

OBSERVATOIRE NATIONAL
SUR LES EFFETS DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE



L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change



Rapport au Premier ministre
et au Parlement

OBSERVATOIRE NATIONAL
SUR LES EFFETS DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

L'**arbre**
et la **forêt**
à l'épreuve
d'un **climat**
qui **change**

Rapport au Premier ministre
et au Parlement

Publications de l'ONERC

Êtes-vous prêt ? Guide pour l'adaptation à l'attention des collectivités locales, Onerc, 2004.

Un climat à la dérive : comment s'adapter ? Rapport de l'Onerc au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2005.

Réchauffement climatique : quelles conséquences pour la France ? Onerc, 2006.

Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique, La Documentation française, Paris, 2007.

Changements climatiques et risques sanitaires en France. Rapport de l'Onerc au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2007.

Changement climatique. Coûts des impacts et pistes d'adaptation. Rapport de l'Onerc au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2009.

Villes et adaptation au changement climatique. Rapport de l'Onerc au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2010.

L'adaptation de la France au changement climatique. Rapport de l'Onerc au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2012.

Les outre-mer face au défi du changement climatique. Rapport de l'Onerc au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2013.

« En application de la loi du 11 mars 1957 (art. 41) et du Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992, complétés par la loi du 3 janvier 1995, toute reproduction partielle ou totale à usage collectif de la présente publication est strictement interdite sans autorisation expresse de l'éditeur. Il est rappelé à cet égard que l'usage abusif et collectif de la photocopie met en danger l'équilibre économique des circuits du livre. »

© La Documentation française, Paris, 2018.

ISBN : 978-2-11-145507-8

Sommaire

LE MOT DU PRÉSIDENT	5
RÉSUMÉ	7
PRÉSENTATION	13
Chapitre A	
La forêt, un milieu naturel et une source de services multiples pour nos sociétés. Et demain?.....	15
Le changement climatique : une préoccupation nouvelle, mais aussi un formidable défi pour le forestier.....	17
La forêt française support de multiples biens et services	20
Changement climatique : nouveau jeu, on redistribue les cartes.....	30
Conclusion : le changement climatique, péril ou opportunité?	32
Chapitre B	
Effets attendus du changement climatique sur l'arbre et la forêt.....	33
Comprendre et observer les évolutions de la forêt	35
Le lien étroit entre climat et répartition des végétaux.....	36
Comprendre les effets du changement climatique sur l'arbre.....	41
Comprendre les effets du changement climatique sur les écosystèmes	47
Imaginons : quels scénarios pour le ^{xxi} ^e siècle?.....	59
Chapitre C	
La forêt protectrice face au changement climatique.....	65
Limitation des dépôts d'avalanches en forêt.....	68
Interception de blocs.....	69
Glissements de terrain.....	70
Limitation de l'érosion de surface	71
Rôle protecteur des ripisylves.....	73
Conclusion.....	74
Chapitre D	
Adaptation au changement climatique et gestion forestière	77
Forêt et climat : les leçons du passé	79

Quelles options possibles pour le gestionnaire forestier?	81
Faut-il miser sur les capacités spontanées de réaction des écosystèmes forestiers?.....	83
Faut-il intervenir modérément pour conforter l'adaptation des forêts au changement climatique?	89
Faut-il intervenir plus intensivement pour anticiper les évolutions du climat?	95
Démarche d'aide à la décision du sylviculteur	102

Chapitre E

L'arbre au service de l'adaptation des espaces agricoles : les potentialités de l'agroforesterie..... 109

Les systèmes agroforestiers : des savoir-faire anciens au service de l'agriculture de demain	111
Les bénéfices de l'agroforesterie pour l'adaptation des espaces agricoles au changement climatique.....	113
Leviers d'action pour le développement des systèmes agroforestiers.....	117

Chapitre F

Les activités du bois au cœur du changement climatique 121

La filière forêt-bois : beaucoup plus qu'une simple filière	124
Une contribution multiforme du bois à la lutte contre l'effet de serre.....	127
Les activités du bois sont essentielles pour adapter la forêt aux enjeux actuels et futurs.....	130
Le changement climatique affectera différemment la filière forêt-bois selon les échéances	131
Conclusions.....	133

Chapitre G

Une balade en forêt en 2050 135

Une balade en forêt en 2050	137
-----------------------------------	-----

BIBLIOGRAPHIE	145
----------------------------	-----

ANNEXES	159
----------------------	-----

1. Rapport d'activité de l'Observatoire	161
2. Sigles et acronymes	177
3. Contributeurs et remerciements.....	179

Le mot du président

Arbre et forêt de métropole et d'outre-mer se sont développés et transformés, au cours des siècles, en suivant les évolutions du climat. Plus largement, toutes les composantes de la biodiversité prospèrent ou régressent en fonction de conditions de nutrition et de reproduction, plus ou moins favorables. Lorsqu'une variation climatique est plus lente que la reconstitution d'un paysage ou d'un écosystème, l'évolution de la forêt s'insère dans l'histoire climatique et n'est pas perçue à l'échelle d'une vie humaine. Mais aujourd'hui l'ère industrielle fait subir au système climatique un changement très rapide, assimilable à un choc. Les humains du ^{xxi} siècle sont et seront spectateurs de l'impact qui en résulte sur la forêt, durant de nombreuses décennies.

L'*optimum holocène* (c'est-à-dire 7 000 à 9 000 ans avant notre ère) était plus chaud que le ^{xx} siècle d'environ 2 °C. Les techniques de datation permettent d'attester que la forêt méditerranéenne s'étendait alors, au nord, jusqu'au confluent de la Saône et du Rhône.

Inversement, lors du dernier maximum glaciaire, il y a environ 18 000 ans, alors que la température moyenne était inférieure de 4 à 5 °C par rapport à celle du ^{xx} siècle, des forêts boréales et des steppes boisées étaient implantées en basse vallée du Rhône.

Outre-mer, les forêts ont également évolué lentement au cours des temps historiques et préhistoriques.

Plus proche de nous, la déforestation liée à l'expansion des zones agricoles au Moyen Âge a mobilisé les populations pendant plusieurs siècles. L'usage du bois comme matériau et source d'énergie est toujours une réalité en ce début de ^{xxi} siècle, quels que soient les pays et les cultures. La filière bois représente, pour la France, une richesse dont le potentiel économique est très important.

Aujourd'hui la forêt fait face à un défi d'une ampleur considérable. En effet, comme le rappelle le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), dans son cinquième rapport d'évaluation, l'évolution du climat risque de s'effectuer à un rythme tel que l'évolution spontanée de la plupart des espèces d'arbres ne pourra accompagner le changement des conditions météorologiques moyennes.

L'expansion ou le déplacement spontané de la plupart des espèces sont très lents, compte tenu du cycle de croissance des arbres. Les forêts, souvent découpées en domaines relativement petits pour des raisons géographiques, climatiques ou historiques, seront d'autant plus vulnérables que leur aire d'expansion est réduite.

Que faire dans ce contexte ? Attendre et voir ce qu'il advient ? Ne possédons-nous pas déjà les moyens d'anticiper certaines évolutions ? N'avons-nous pas la capacité de limiter l'ampleur des changements ?

Notre responsabilité est incontestablement de passer à l'action pour assurer que les neuf à dix milliards d'humains qui peupleront la planète au milieu du ^{xxi}^e siècle vivront en harmonie avec leurs forêts. Cela sera possible seulement si nous sommes capables de nous mobiliser pour une réduction significative des émissions de gaz à effet de serre. Cet effort, s'il est suffisamment ample, réussira à contenir l'évolution du climat, le stabilisant à un niveau d'équilibre acceptable pour les activités humaines et pour la biodiversité.

Au-delà de l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre – qui demeure la plus haute priorité – l'action consiste aussi à évaluer le potentiel d'adaptation de nos forêts, afin de se préparer à les gérer différemment, au moment nécessaire.

Il reste des inconnues sur l'évolution du climat; certaines sont de très grande ampleur, c'est notamment la question de l'organisation, à long terme, de nos sociétés. Nous devons aussi nous interroger sur nos comportements, sur la question de l'évolution démographique et des flux migratoires futurs.

Toutefois, nous ne pouvons pas rester passifs au regard des informations dont nous disposons. C'est pourquoi le conseil d'orientation de l'ONERC a décidé d'engager l'élaboration d'un rapport au Premier ministre et au Parlement, permettant de donner un éclairage récent et documenté sur les aspects les plus importants des impacts et de l'adaptation au changement climatique des arbres et de la forêt.

Paul Vergès

Résumé

Annoncés dans les différents rapports du GIEC, les impacts du changement climatique pourraient avoir des conséquences importantes sur la croissance, voire sur la survie, des arbres et des peuplements forestiers. Dès aujourd'hui, les forestiers doivent intégrer ces changements, car les forêts seront directement touchées. Ce formidable défi pour les forestiers est une opportunité pour mieux prendre en compte les services écosystémiques, pour guider leurs choix sylvicoles qui engagent les décennies à venir. Ces services contribuent à améliorer la résistance et la résilience des forêts face aux aléas et aux crises qu'elles traverseront.

Les écosystèmes¹ forestiers connaissent un cycle de développement et de reproduction long, pouvant varier de cinquante à deux cent cinquante ans en moyenne.

Les forestiers vont devoir agir sur plusieurs fronts pour accompagner l'adaptation des forêts, et permettre ainsi d'assurer l'existence d'un état boisé, de préserver la fourniture des biens et des services environnementaux à la société, et également de conserver leur rôle d'atténuation du changement climatique. Ce rapport annuel s'est ainsi penché sur la vulnérabilité et l'adaptation de l'arbre et des forêts en France métropolitaine. Pour les aspects de ce sujet concernant l'outre-mer, il conviendra de se rapporter aux paragraphes correspondants du rapport ONERC, *Les outre-mer face au défi du changement climatique*.

- *Effets attendus du changement climatique sur l'arbre et la forêt*

Des facteurs multiples naturels et anthropiques, tels la glaciation, les crises et les transitions, les défrichements, les révolutions technologiques, les guerres, les épidémies, les plans de gestion sylvicoles et les fluctuations du climat, affectent la croissance, la vitalité et la composition de la forêt, dont l'observateur ne perçoit qu'un état instantané dans une évolution dynamique.

Pour l'essentiel, la vie des espèces est conditionnée par le climat, qui est notamment caractérisé par l'énergie lumineuse disponible, les températures et la disponibilité en eau. Ces paramètres sont particulièrement déterminants pour les arbres, espèces immobiles et à cycle de vie long. Chaque espèce a ses exigences propres en besoins de chaleur, en tolérance au froid et face au déficit hydrique, qui définissent ce que l'on appelle sa niche climatique, ou enveloppe climatique.

Le changement climatique devrait se traduire à terme par un réarrangement progressif de leur répartition géographique. Ainsi l'augmentation des températures permet aux espèces de s'installer plus au Nord ou plus en altitude. En montagne, la levée de la contrainte liée au froid permet la progression en altitude de

1. Ensemble formé par une association ou une communauté d'êtres vivants et son environnement.

certaines espèces. L'évolution des précipitations, délicate à modéliser sous nos latitudes, constitue une des sources majeures d'incertitude pour les évolutions futures de nos forêts.

Le réchauffement climatique est également responsable de modifications importantes du cycle annuel de développement des arbres. La période d'activité des arbres a augmenté au cours des cinquante dernières années, ce qui explique en partie l'augmentation de productivité de nos forêts sur la même période. Certains modèles établissent un lien entre conditions de climat et de sol, d'une part, et phénologie, physiologie, croissance, survie et succès reproducteur des arbres, d'autre part. Ils prévoient, d'ici à la fin du siècle, des régressions massives dans les marges sud de répartition, voire au centre de l'aire, pour des scénarios de réchauffement de l'ordre de 6 °C d'ici à 2100, essentiellement en raison d'hivers trop doux ne permettant plus la levée de dormance des bourgeons, mais aussi à cause de déficits hydriques trop intenses.

Très peu d'efforts de recherche ont été consacrés jusqu'à présent à la compréhension des capacités de régénération des forêts en fonction des conditions climatiques et édaphiques², depuis la production de graines viables produites jusqu'à l'installation des semis.

Les modifications de l'atmosphère et du climat agissent de façon contradictoire sur la physiologie de l'arbre. Ainsi, l'assèchement des sols renvoie à une diminution de la productivité forestière, alors que l'augmentation de la concentration du CO₂ a des effets positifs sur la croissance. De même, le cycle de l'azote pourrait être affecté.

Malgré les incertitudes liées à la variabilité des réponses, à la complexité des interactions entre espèces et aux composantes multiples du changement climatique, une tendance à la recrudescence des insectes ravageurs et pathogènes semble se dégager et pourrait se poursuivre dans les prochaines années.

Face au changement climatique, les capacités d'adaptation des forêts (ampleur et vitesse de l'évolution, seuils de rupture) restent mal connues : elles dépendront, d'une part, du réservoir de diversité (les ressources génétiques) et, d'autre part, de l'intensité des forces évolutives. Tout cela varie selon les régions géographiques et les espèces. La politique et la gestion forestières peuvent influencer non seulement sur la diversité génétique mais aussi sur les forces évolutives.

Cependant, notre vision des impacts potentiels du changement climatique demeure encore morcelée, conditionnée par les approches mises en œuvre, par les scénarios choisis pour les projections, par les entités de l'écosystème considérées. Pour imaginer les futurs possibles dans une démarche globale de prise en compte du changement climatique et d'adaptation, des démarches intégratrices sont nécessaires.

2. Qui a rapport à la nature du sol.

● *La forêt protectrice face au changement climatique*

Les enjeux liés à une altération éventuelle de la fonction de protection des forêts sont de plusieurs ordres. La forêt intervient à des degrés très divers en limitant ou freinant le départ d'avalanches en milieu forestier, le départ et l'impact des chutes de blocs, les mouvements de terrain, l'érosion superficielle des sols, l'érosion des berges des cours d'eau, les inondations dans les zones aval, l'érosion des dunes sur le littoral.

À long terme, la migration des résineux en altitude, générée par le réchauffement, devrait être favorable à la fonction paravalanche des peuplements résineux d'altitude, à une époque où les départs d'avalanche devraient se produire plus haut en altitude.

Le développement d'une gestion raisonnée de la forêt productive face au changement climatique nécessitera un effort important de recherche et de suivi de l'environnement, ainsi qu'une mobilisation de nombreux acteurs. De façon qualitative, il s'agit également de :

- faire connaître, rendre visible. La « forêt protectrice » est un thème méconnu en dehors des catastrophes auxquelles elle est associée ;
- relire, revisiter. Il s'agit de relire le savoir ancien à la lumière des menaces actuelles ;
- fluidifier. Comme dans d'autres domaines, mutualisation des données ;
- étendre. Les évaluations de la vulnérabilité doivent être non seulement améliorées mais aussi systématiquement étendues au-delà des zones traditionnellement concernées ;
- et finalement, rapprocher la « forêt protectrice » de la « forêt menacée ».

● *Adaptation au changement climatique et gestion forestière*

Face à un changement général de climat, les êtres vivants ont habituellement deux solutions pour ne pas disparaître : s'adapter ou s'échapper.

L'évolution actuelle du climat, largement d'origine humaine, est cette fois bien plus rapide que le réchauffement observé à la fin de la période glaciaire. Ainsi le déplacement vers le nord des enveloppes bioclimatiques³ potentielles devrait être de l'ordre de 500 km en un siècle, alors que la vitesse de migration naturelle des espèces forestières ne dépasse pas 50 km par siècle, comme l'attestent les études récentes des palynologues et des généticiens des populations.

Il est donc très difficile d'anticiper la réaction naturelle de la forêt face aux évolutions climatiques.

La grande difficulté est qu'il ne s'agit pas seulement de protéger la forêt contre des aléas ponctuels : il faut anticiper une modification progressive des conditions du milieu, parfois avec des à-coups, qui instaure un état de déséquilibre

3. Unité géographique dans laquelle les conditions climatiques influençant la répartition des espèces sont homogènes.

permanent des écosystèmes sans possibilité de retour en arrière. Les possibilités d'adaptation de la gestion dépendent de multiples facteurs, souvent en interaction les uns avec les autres.

Un certain nombre de préconisations partent du principe que les capacités d'adaptation spontanée de la forêt ne seront pas suffisantes, et qu'il faut intervenir pour augmenter la résistance ou la résilience des forêts, sans pour autant entrer dans une logique d'intensification de la gestion forestière.

Il serait donc présomptueux – et au final dangereux – de vouloir proposer des recettes universelles clefs en main, dont les promoteurs seraient bien incapables d'assurer la garantie. Malgré tout, cette complexité ne doit pas démotiver, le pire serait de ne rien faire dans une situation où l'on sait qu'il va se produire des changements, qu'on a d'ailleurs déjà commencé à percevoir.

De plus, une autre erreur serait de n'orienter son action qu'en fonction du changement climatique, alors que bien d'autres paramètres influent sur la gestion forestière, souvent à plus court terme, notamment dans les domaines socio-économiques : débouchés des produits en évolution rapide, importance croissante des services écosystémiques et de la demande sociale.

Ce rapport propose une démarche cohérente d'aide à la décision en trois étapes⁴ : diagnostic (connaître et comprendre), définition des objectifs de gestion (décider), choix des itinéraires techniques de gestion⁵ (agir). Le sylviculteur doit s'approprier cette démarche en l'adaptant à son cas particulier.

La démarche présentée ci-dessus se situe au niveau local (forêt, parcelle). Elle s'inscrit bien évidemment dans le cadre d'une stratégie nationale. D'un point de vue opérationnel, les actions des divers organismes forestiers sont harmonisées par le Réseau mixte technologique (RMT) AFORCE.

● *L'arbre au service de l'adaptation des espaces agricoles : les potentialités de l'agroforesterie*

Si l'arbre forestier constitue une richesse multifonctionnelle importante pour la France, l'arbre agricole est l'autre arbre de nos paysages. Les systèmes agroforestiers sont des systèmes de production mixtes qui désignent toutes les formes d'associations de l'arbre avec l'élevage ou la culture, comme les bocages de l'Ouest, les oliveraies associées au maraîchage du Sud-Est, les prés-vergers normands, les noyeraies avec céréales de l'Isère. Aujourd'hui, l'agriculture redécouvre lentement ses grandes performances. Ainsi, sacrifié au profit de l'intensification et de la spécialisation, l'arbre agricole retrouve peu à peu sa place dès que l'on s'intéresse à sa multifonctionnalité.

4. Riou-Nivert et Rosa, 2014

5. Définition des interventions sylvicoles successives (coupes et travaux) à réaliser pour atteindre un objectif fixé dans un contexte donné.

Le développement des systèmes agroforestiers passe par une stratégie de long terme intégrant l'expérimentation, l'acquisition de références, l'accompagnement des acteurs. S'il est difficile d'écrire ce que sera l'agriculture de demain, il est en revanche plus aisé d'identifier les enjeux auxquels elle se trouve confrontée aujourd'hui et qui vont conditionner son avenir.

Les fonctionnalités de l'arbre des champs sont multiples et font l'objet d'un regain d'intérêt face aux enjeux économiques, sociaux et environnementaux. Il produit du bois, matériau et source d'énergie renouvelables. Il participe aussi à la qualité des paysages et du cadre de vie rural. Enfin, l'arbre contribue au maintien de la qualité de l'eau et au support de la biodiversité. Il possède également de sérieux atouts au service de l'adaptation des espaces agricoles au changement climatique, avec l'évolution des pratiques culturales. L'agriculture pourra difficilement se passer de l'arbre pour s'adapter au changement climatique.

- *Les activités du bois au cœur du changement climatique*

La filière forêt-bois constitue un secteur économique significatif et à fort potentiel de l'économie française qui rassemble des activités multiples et reliées entre elles. Elle a un rôle majeur à jouer pour permettre l'adaptation des forêts au changement climatique et l'atténuation de ce dernier. À moyen terme, la récolte de bois pourrait augmenter, à la faveur d'une productivité et de dépêrissements accrus, de mesures d'adaptation de la forêt et d'un développement des usages du bois. À long terme, elle aura à s'adapter aux contraintes imposées par le climat à la forêt au niveau des essences et de leur productivité. Elle devra aussi faire face à des contraintes supplémentaires d'exploitation forestière, avec des hivers probablement plus humides et des saisons de végétalisation allongées, ainsi qu'à des risques accrus d'incendie dans les usines de transformation du bois lors des épisodes intenses de sécheresse ou de canicule.

Au cours des dernières décennies, les questions forestières majeures ont plus souvent concerné le fonctionnement des écosystèmes, la biodiversité, le changement climatique, les tempêtes ou la gestion durable des forêts, que la filière forêt-bois.

Cependant, cette dernière conserve une position centrale et un rôle stratégique vis-à-vis de la plupart de ces thématiques, et regagne en importance dans le cadre de la transition écologique comme énergétique. Son bon fonctionnement et son dynamisme constituent un préalable à toute action forestière, et donc à toute adaptation volontariste ou passive au changement climatique, pour gérer aussi bien les tendances que les crises. La filière forêt-bois est fondamentale de plus pour permettre à la forêt de lutter contre l'effet de serre, et des relations se nouent, grâce à elle, entre adaptation au changement climatique et atténuation de celui-ci. Elle subit et subira, évidemment, les conséquences du changement climatique. Mais le fait majeur est bien que les activités du bois jouent un rôle essentiel face et grâce au changement climatique. Il faut pour cela qu'elles parviennent à surmonter les périodes difficiles et à rester souples, actives et diversifiées pour pouvoir jouer leur rôle pleinement lorsque le besoin s'en fera vraiment

sentir. Il faut aussi que les activités du bois s'associent et soient associées aux réflexions sur l'adaptation des forêts au changement climatique.

- *Une balade en forêt en 2050*

Enfin, sous la forme d'un récit romancé, un exercice de prospective est proposé. Pour avoir une idée précise du paysage forestier en 2050, il suffit de s'y promener. Avec l'appui de scientifiques, cette nouvelle propose de se projeter dans l'avenir en forêt de Tronçais, célèbre chênaie domaniale de 10 600 hectares située dans l'Allier, au nord du Massif central. Sans certitude, avec beaucoup de présomptions à l'aune de nos connaissances actuelles, cette description se veut aussi plausible que possible, dans un monde devenu écocitoyen.

Présentation

Les travaux du groupe de travail II du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) ont été présentés en mars 2014. Intitulé *Changements climatiques 2014 : conséquences, adaptation et vulnérabilité*, ce deuxième volume du 5^e rapport d'évaluation du GIEC présente en détail les incidences du changement climatique à ce jour, les risques à venir dus à l'évolution du climat et les possibilités d'intervention efficaces pour réduire ces risques. Les effets des changements climatiques se font déjà ressentir dans tous les secteurs et dans tous les milieux (agriculture, santé, écosystèmes terrestres et océaniques, approvisionnement en eau...), comme sur tous les continents et les océans (des petites îles aux grands continents), des plus riches aux plus pauvres. Souvent les changements climatiques interagissent avec d'autres sources de stress pour accroître les risques. Le monde est pourtant peu préparé aux risques du changement climatique, et l'adaptation peut contribuer éminemment à les réduire.

Depuis sa création, en 2001, l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC) a œuvré pour la diffusion des connaissances sur l'évolution du climat et ses effets attendus sur les systèmes naturels ou humains.

Publié en 2011 sous l'égide de l'ONERC, le Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC) souligne que le secteur de la forêt a été confronté à de graves crises au cours de la dernière décennie, tels les tempêtes, les sécheresses et les incendies de forêt récurrents. Le changement climatique apparaît comme un facteur supplémentaire de risques, qu'il faut donc considérer avec la plus grande attention. À ces événements exceptionnels s'ajoutent des évolutions de fond qui, compte tenu de la longueur des cycles forestiers, nécessitent, elles aussi, d'être prises en compte dès maintenant. Ces événements et ces évolutions présentent une double facette, avec des aspects favorables (augmentation de la productivité dans certaines zones) et d'autres plus problématiques (modification de l'aire de répartition des essences, aggravation des risques), les deux cas méritant d'être gérés.

Le conseil d'orientation de l'ONERC a souhaité que le rapport 2013 se saisisse de la question de l'arbre et de la forêt face à l'épreuve du changement climatique. Ce rapport se limite à dessein à la métropole, puisque ce thème a déjà fait l'objet d'un chapitre, pour les zones ultramarines, dans le cadre de l'analyse sectorielle du rapport précédent intitulé *Les outre-mer face au défi du changement climatique*. De plus, la plupart des éléments relatifs à la gestion forestière gardent toute leur pertinence pour les outre-mer.

Ce rapport s'organise autour de sept chapitres.

Le premier introduit la problématique, expose les différents aspects de l'arbre et de la forêt, en expliquant les différents services rendus.

Le deuxième traite des effets visibles ou attendus du changement climatique sur l'arbre et la forêt.

Le troisième s'intéresse aux forêts de protection et explore les évolutions possibles de ce service particulier.

Le quatrième étudie les modes de gestion forestière favorisant l'adaptation des forêts et des arbres.

Le cinquième aborde la problématique moins connue de l'agroforesterie, ou de l'utilité de l'arbre pour l'adaptation des espaces agricoles.

Le sixième étend la réflexion aux activités économiques liées à la filière forêt-bois.

Le septième et dernier chapitre aborde le thème avec un regard inhabituel, en proposant une balade dans la forêt de Tronçais en 2050.

Trois annexes complètent ce rapport :

- annexe 1 - rapport de l'activité de l'observatoire
- annexe 2 - sigles et acronymes
- annexe 3 - contributeurs et remerciements

Chapitre A

La forêt, un milieu naturel et une source de services multiples pour nos sociétés. Et demain?

Olivier Picard, CNPF-IDF

© CNPF / Sylvain Gaudin – CRPF CA



Les changements climatiques annoncés à l'horizon du siècle ont des répercussions sur les conditions de croissance des arbres. Des impacts sont donc à prévoir sur les arbres et les forêts : c'est pourquoi les forestiers doivent dès aujourd'hui intégrer ces changements. Mais de nombreuses incertitudes demeurent quant à ce que seront le climat futur et le rythme auquel il évoluera. Ce formidable défi pour les forestiers est une opportunité pour mieux prendre en compte les services écosystémiques, pour guider leurs choix sylvicoles qui engagent les décennies à venir. Ces services contribuent à améliorer la résistance et la résilience des forêts face aux aléas, aux crises qu'elles affronteront.

Le changement climatique : une préoccupation nouvelle, mais aussi un formidable défi pour le forestier

La sylviculture, culture sur le long terme, ne risque-t-elle pas d'être dépassée par l'évolution du climat ?

Les écosystèmes¹ forestiers connaissent un long cycle de développement et de renouvellement, pouvant varier de douze ans (peuplier), à cinquante ans (production de bois d'œuvre de résineux tel que le douglas), voire deux cent cinquante ans (chêne). Le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) indique que l'augmentation des températures moyennes à la surface du globe pour la période 2081-2100, relativement à 1986-2005, sera probablement de 0,3 °C à 1,7 °C pour le scénario le plus optimiste RCP 2.6², et de 2,6 °C à 4,8 °C pour le plus pessimiste RCP 8.5 (GIEC, 2013). La baisse des précipitations, associée à une augmentation de la fréquence des sécheresses et des vagues de chaleur, pourra avoir des conséquences importantes sur la croissance, voire sur la survie, des arbres et des peuplements.

Ainsi, en raison de l'intensité et de la rapidité sans précédent avec lesquelles ces changements du climat surviennent, les forêts vont être directement impactées, tout au long de leur cycle de vie. On peut donc considérer que le changement climatique constitue, dès aujourd'hui, une menace pour les forêts. Dans le cas de la production de bois d'œuvre, par exemple, la fréquence accrue des sécheresses pourra augmenter le taux de mortalité d'arbres qui n'auront pas été choisis pour leur résistance à la sécheresse.

Les évolutions progressives du climat, ponctuées d'à-coups imprévisibles et extrêmes (aléas tels que sécheresses, vagues de chaleur, fortes pluies hivernales...), sont donc les nouveaux ingrédients d'un cocktail auquel les forestiers vont

1. Ensemble formé par une association ou communauté d'êtres vivants et son environnement.

2. Les quatre profils représentatifs d'évolution (RCP) utilisés par le 5^e rapport d'évaluation du GIEC décrivent l'évolution du forçage radioactif sur la période 2006-2300.

être confrontés (voir chap. B). Ils vont devoir composer avec des paramètres susceptibles de varier dans un sens difficile à prévoir : croissance des arbres, étapes de la vie des plantes (germination, floraison...), compétition entre espèces... Et ils vont devoir agir sur plusieurs fronts : anticiper les modifications progressives, limiter les vulnérabilités aux aléas et se préparer au passage à d'autres stades de la succession écologique, sans possibilité de retour en arrière.

Un double enjeu d'atténuation et d'adaptation pour la forêt et les forestiers ?

La forêt joue un rôle crucial dans la régulation de l'évolution du climat en influant sur les causes même de cette évolution. Elle permet, en effet, de contribuer à stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre en captant le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère par la photosynthèse. La forêt française prélève l'équivalent de 15 % des émissions nationales annuelles de CO₂. Cependant, la forêt subit dans le même temps les effets de ces évolutions.

Encadré 1

Le rôle de la forêt dans l'atténuation

La forêt peut participer à l'atténuation du changement climatique de plusieurs manières :

- la séquestration du carbone* atmosphérique par les arbres,
- le stockage dans les produits à base de bois (papier, meubles, construction...),
- la substitution** à des énergies fossiles plus émettrices (pétrole, gaz, charbon) ou à des matériaux énergivores.

Promouvoir chacune de ces formes d'atténuation et veiller au maintien d'un certain équilibre entre chacune d'elles permet une meilleure atténuation. En effet, privilégier la séquestration entraînerait par exemple une surcapitalisation du bois en forêts, ce qui les rendrait plus sensibles aux risques (sécheresses, incendies, ravageurs...). À l'inverse, privilégier la substitution entraînerait une surexploitation des bois avec une diminution de la séquestration en forêt.

* Capture, stockage à long terme du carbone en dehors de l'atmosphère.

** Émissions de carbone fossile évitées grâce à l'usage du bois matériau ou du bois énergie.

Les forestiers ont donc un rôle majeur à jouer pour développer des stratégies d'adaptation des forêts (Biro *et al.*, 2013) de manière à permettre :

- le maintien d'un état boisé,

- la préservation de la fourniture des biens et des services écosystémiques à la société,
- la conservation de leur rôle d'atténuation du changement climatique.

Pour les forestiers, l'adaptation et l'atténuation sont donc à mener de front (Dhôte, 2012). L'objectif est ainsi d'agir à la fois sur les causes et sur les conséquences du changement climatique. De plus, une forêt atténuée d'autant mieux qu'elle est adaptée aux conditions du moment (voir chap. F).

Un défi pour le forestier : s'adapter sans avoir toutes les clés de l'action

L'adaptation des forêts au changement climatique consiste à réduire leur vulnérabilité. Cela implique d'augmenter leur capacité adaptative, de prévenir les impacts potentiels, de réduire la sensibilité des systèmes et de limiter le degré d'exposition aux aléas.

« S'adapter, c'est donc chercher non seulement à être suffisamment solides pour projeter nos choix de développement dans le temps, mais également à être suffisamment flexibles pour réajuster ces choix au fur et à mesure que de nouvelles connaissances sont mises en lumière » (Tubiana *et al.*, 2010 ; Magnan, 2013).

● *Être solide : avoir tous les atouts dans son jeu*

Pour être en mesure d'agir efficacement, le forestier a besoin d'être informé. Il aura ainsi une longueur d'avance. Il doit disposer des dernières connaissances pour réaliser des choix argumentés basés sur un diagnostic préalable. Il y a donc un processus d'échanges nécessaire à mettre en œuvre entre la recherche, qui produit la connaissance, et la pratique. C'est le travail engagé notamment par le Réseau mixte technologique Adaptation de la forêt au changement climatique (RMT AFORCE), (voir chap. D, encadré 13), ou encore le programme de recherche « Biodiversité, gestion forestière et politiques publiques³ » du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie. Ce dernier a en effet comme objectif, pour la période 2014-2018, d'identifier les synergies et les compromis entre les mesures de gestion préconisées pour, d'une part, l'adaptation des forêts au changement climatique et, d'autre part, la préservation de la biodiversité.

● *Être flexible : rester souple et réactif*

Compte tenu des incertitudes autour de la vitesse et de l'ampleur de l'évolution du climat, et autour de son impact potentiel sur les forêts, une gestion souple et

3. Animé par le groupement d'intérêt public Ecofor et soutenu par le ministère en charge de l'Agriculture, le programme incitatif de recherche « Biodiversité, gestion forestière et politiques publiques » du ministère en charge du Développement durable a pour objectif de développer les connaissances nécessaires à une prise en compte effective de la biodiversité dans la gestion forestière au sens large, c'est-à-dire de l'exploitation forestière à la gestion d'espaces boisés protégés. Depuis sa création, en 1996, le programme a soutenu 39 projets et généré de nombreux publications, recueils et synthèses qui contribuent à éclairer les politiques publiques. En 2014, cinq nouveaux projets étudiant diverses facettes des interactions entre adaptation des forêts au changement climatique et préservation de la biodiversité ont été lancés. Plus d'informations sur <http://bgf.gip-ecofofor.org>.

flexible est à préconiser. Cependant, instaurer cette flexibilité sur le temps long de la gestion forestière est un défi car les marges de manœuvre sont étroites. Une fois un peuplement en place, il n'est pas possible de changer d'objectif brusquement, sans manque à gagner important ou impact significatif sur l'environnement. Une récolte anticipée de bois avant d'atteindre les dimensions optimales demandées par le marché du bois entraîne, par exemple, une perte de revenu importante. Il est donc essentiel d'intégrer dès le départ dans la réflexion, lors du renouvellement du peuplement, les effets attendus du changement climatique, en prévoyant une sylviculture qui puisse supporter facilement des changements (par exemple choix d'espèces adaptées, mélange d'essences à rythmes de croissance différents, réduction du nombre d'arbres à l'hectare pour produire plus vite des volumes de bois commerciaux...). Pour sa mise en place, il n'y a pas de recettes toutes faites : la gestion à vocation d'adaptation se fera en plusieurs étapes, sous forme d'un cycle, avec des phases d'apprentissage, d'expérimentation, d'évaluation, d'ajustement permanent, à pas de temps régulier, pour éviter des manques à gagner ou des surcoûts qui rendraient l'investissement forestier fortement dissuasif.

- *Anticiper les risques*

Ce processus adaptatif permet de prendre en compte les risques. Différentes alternatives en gestion forestière permettent de les éviter ou d'en limiter les impacts. Cela consiste principalement à identifier les zones sensibles et/ou vulnérables à certains risques, à privilégier des peuplements moins sensibles aux aléas biotiques ou abiotiques⁴ attendus, à titre d'exemple, :

- attaques de ravageurs : mélanger et diversifier les espèces forestières ;
- tempêtes : ne pas produire des arbres trop élancés, hauts et fins ;
- sécheresses : éviter d'avoir des densités d'arbres trop importantes.

Chacune des solutions proposées ci-dessus doit être adaptée au contexte local.

Le risque climatique constitue une nouvelle donnée que les forestiers doivent assimiler, même si la gestion sur du long terme actuelle intègre déjà la notion de risque. La différence est qu'ils devront composer avec l'évolution de la récurrence, du cumul et de l'intensité des aléas.

La forêt française support de multiples biens et services

Qu'est-ce qu'une forêt ?

L'Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) définit ce qu'est une forêt : « Territoire occupant une superficie d'au moins 50 ares,

4. Les aléas biotiques regroupent tout ce qui est lié au vivant, tels les ravageurs. Ils s'opposent aux aléas abiotiques, qui regroupent ce qui n'est pas vivant, tels les aléas climatiques.

avec des arbres pouvant atteindre une hauteur supérieure à 5 mètres à maturité *in situ*, un couvert boisé de plus de 10 % et une largeur moyenne d'au moins 20 mètres. La forêt n'inclut pas les terrains pour lesquels l'utilisation prédominante du sol est agricole ou urbaine.»

Au terme de «forêt», on associe très souvent :

- son objectif principal : forêt de production, forêt de protection⁵, forêt de récréation,
- son type de propriété : forêt privée, publique, communale, domaniale...
- sa situation géographique ou historique : forêt alluviale, forêt tropicale, forêt primaire, forêt paysanne, forêt ancienne⁶...
- son type de gestion : forêt cultivée, gérée, équienne ou inéquienne⁷...

Chacun de ces éléments contribue à la caractériser plus finement.

Ce terme de «forêt» ou «bois» se différencie de celui de «bosquets» ou «boqueteaux», qui sont généralement des forêts de très petite surface. L'inventaire forestier national de l'IGN définit quant à lui la forêt ou le bois ainsi : «Un espace boisé d'une superficie supérieure ou égale à 4 ha, dont l'utilisation du sol n'est pas à prédominance agricole ou urbaine.»

Dans la représentation sociale, la forêt correspond à un ensemble boisé de grande surface, assez dense, et avec de hauts arbres. Nombre de propriétaires forestiers disent posséder «des bois» et non «une forêt». Ce terme est aussi lié à un usage personnel, à l'autoconsommation, comme faire «son bois de chauffage». Enfin, il se retrouve aussi dans le zonage des sols, dans la catégorie «bois/taillis».

Les différents visages de la forêt française

S'intéresser aux 16,2 millions d'hectares de la forêt française métropolitaine, c'est prendre en compte 30 % du territoire national, et 420 000 personnes employées directement et indirectement, en comptant la filière de transformation du bois (voir chap. F).

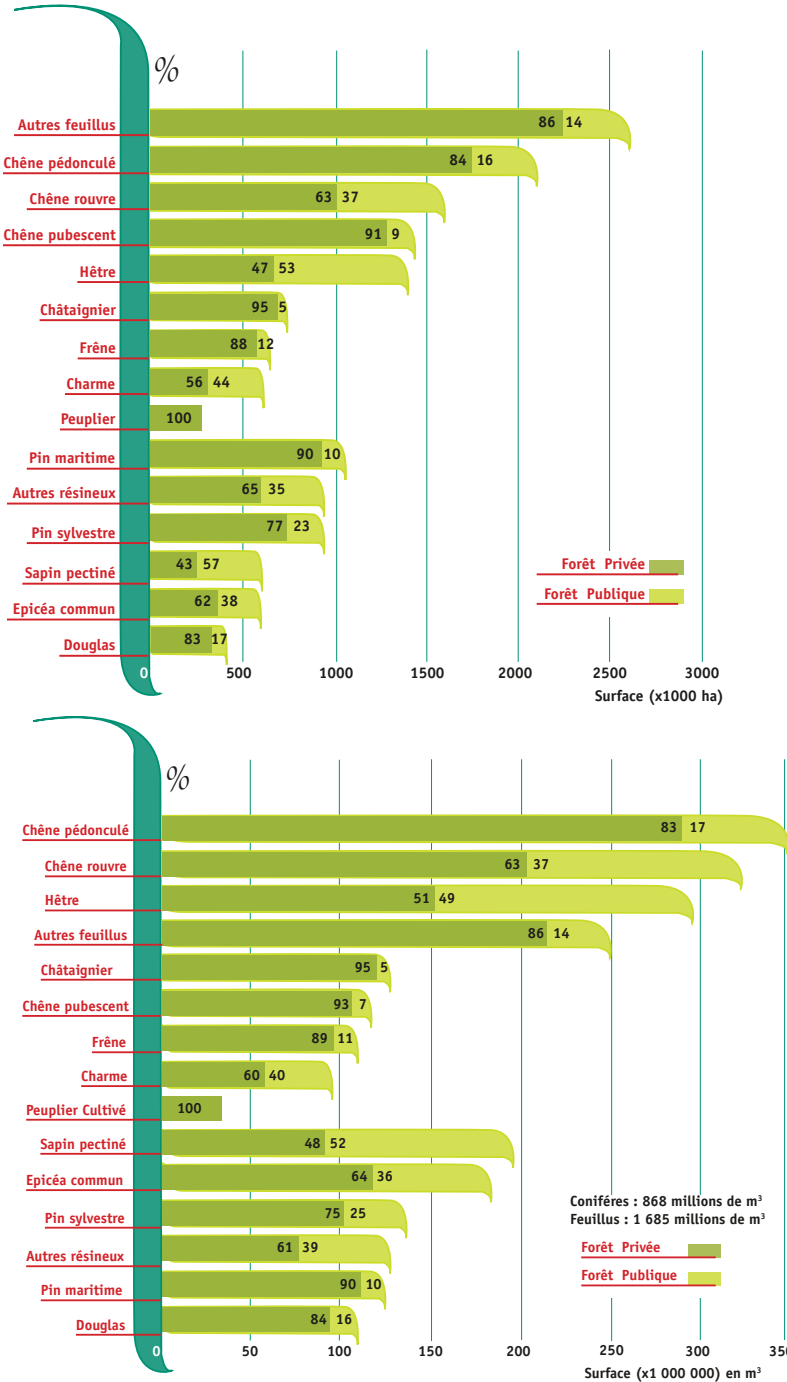
La forêt a beaucoup évolué au cours de ces dernières décennies : sous l'impulsion du FFN, la surface forestière a augmenté de 2 millions d'hectares en quarante ans, entre 1960 et 2000. Cela a eu pour conséquence, dans certaines régions, de modifier considérablement les paysages.

5. Forêt classée par décret du Conseil d'État, sa conservation est reconnue nécessaire pour des raisons physiques, écologiques ou sociales.

6. Forêt qui n'a pas subi de défrichement depuis cent cinquante à quatre cent ans.

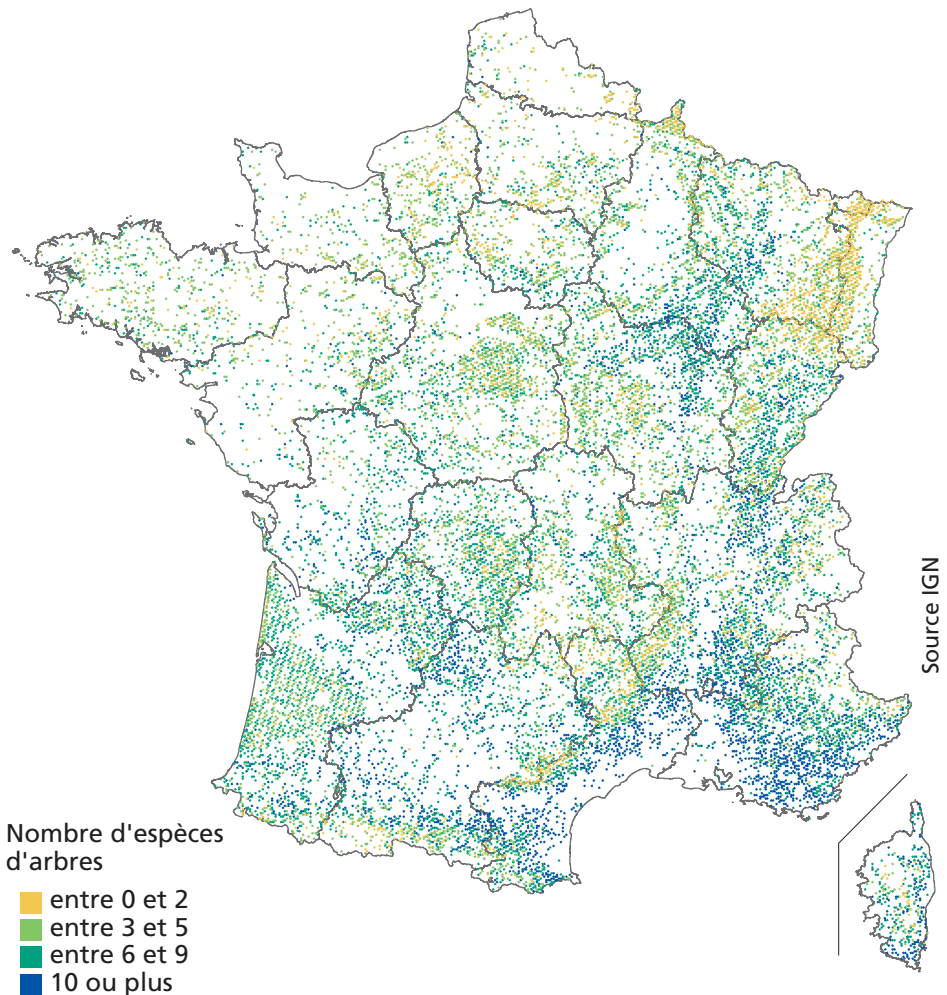
7. Forêt dont les arbres ont le même âge (équienne), ou qui ont des âges très différents (inéquienne).

Figure 1 – Surface (haut) occupée et volume sur pied (bas) des principales espèces d'arbres forestiers, feuillus et conifères, selon le propriétaire public (vert foncé) ou privé (vert clair)



Source : d'après IGN, campagne 2008-2012.

Figure 2 – Richesse en essences forestières



La carte représente, pour chaque point d'inventaire des campagnes 2008 à 2012 de l'IGN, le nombre d'espèces d'arbres observées par placette. Elle permet donc de qualifier la richesse locale.

Source : ©IGN.

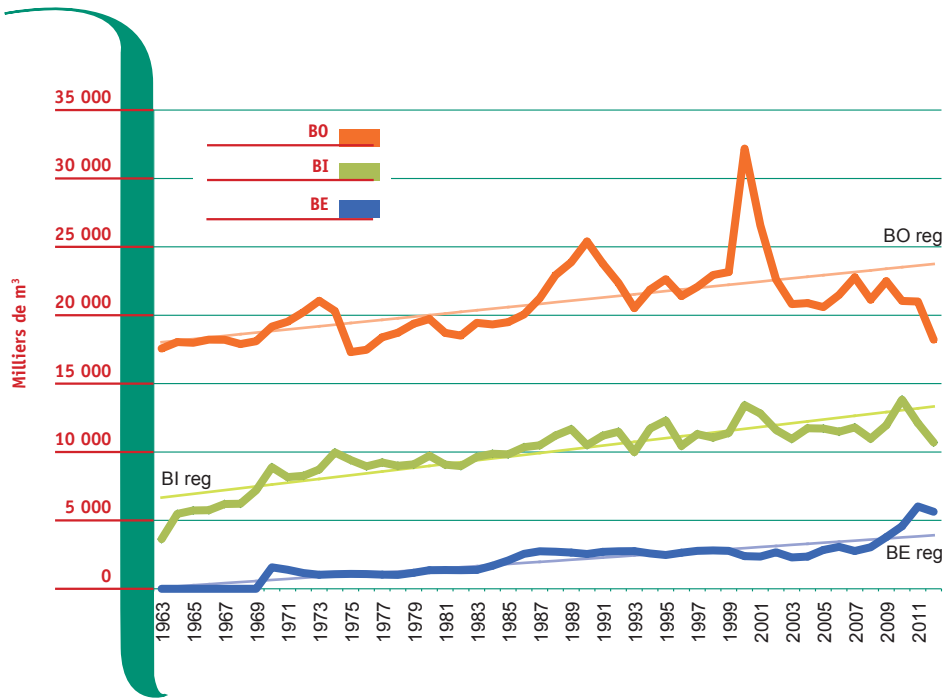
La forêt française est très diverse dans sa composition : 136 essences, dont 20 essences commerciales principales. Les différents écosystèmes forestiers qui composent la forêt française sont le reflet de la diversité des paysages français, de ses climats, de ses roches, de ses sols, de son relief, de ses usages et de ses traditions.

C'est une forêt majoritairement composée d'espèces feuillues (66 % de la surface forestière).

Elle est diverse dans la structure de sa propriété, publique (24 %) ou privée (76 %), et dans ses orientations de gestion (production de bois, protection des sols, réserve de biodiversité...).

À l'issue de la Seconde Guerre mondiale, un effort national de reboisement a permis d'alimenter une filière qui se trouve aujourd'hui au cœur des territoires, et qui les valorise. Malheureusement, cette filière est à l'origine du deuxième déficit de la balance commerciale française, après les produits pétroliers, en raison de l'importation des produits finis (ameublement, papier, cartons). Il y a un défi économique et industriel à relever pour en faire un secteur industriel intégré, innovant et dynamique.

Figure 3 – Les tendances 1963-2012 des volumes commercialisés de bois d'œuvre (BO, orange), bois d'industrie (BI, vert), bois énergie (BE, bleu)



La production de bois d'œuvre en 2012 est équivalente au niveau de 1964. La croissance des années 1990 a été effacée.

Le bois énergie progresse très rapidement depuis 2006.

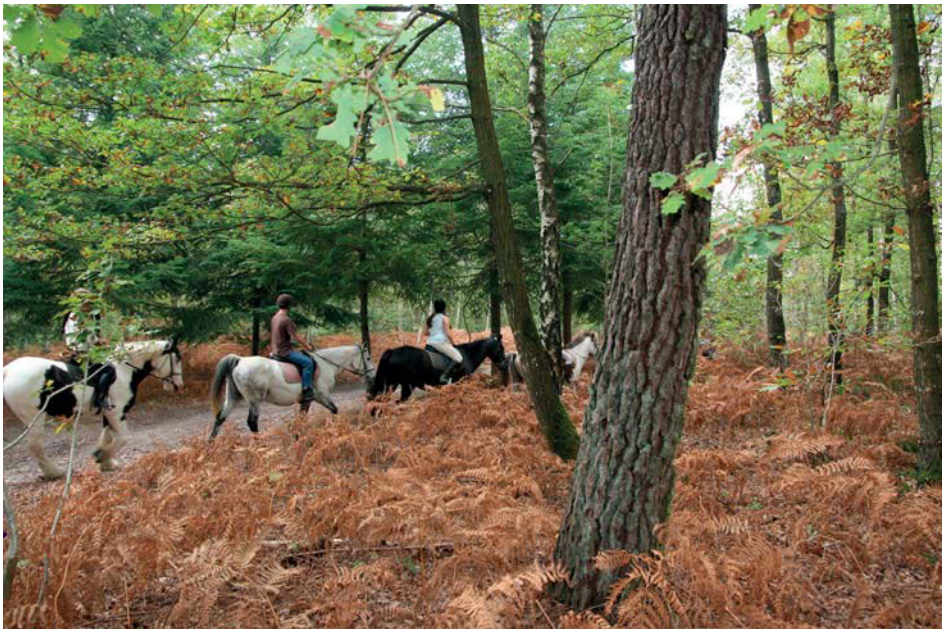
Source : d'après Agreste, *Enquête annuelle de branche exploitation forestière*.

La forêt : une source méconnue de biens et services pour la société

- *La forêt, c'est bien plus que la production de bois*

Le modèle forestier français est fondé sur la gestion durable des forêts, qui prend en compte les trois dimensions de la durabilité : économique, environnementale et sociale⁸. Compte tenu de la diversité des paysages français, les forêts présentent des visages variés, avec des fonctions différentes selon leur emplacement : forêt de protection en montagne sur l'Aigoual, au sud du Massif central, sur les dunes d'Aquitaine, le long des cours d'eau, ou bien forêts plantées pour drainer et assécher les marais en Sologne ou dans les landes de Gascogne. Les forêts peuvent aussi fournir des fruits, des abris et du fourrage pour les animaux, du bois de service pour les clôtures, pour l'énergie, pour la construction, l'ameublement... Les forêts métropolitaines sont aussi un lieu d'accueil pour pratiquer des activités variées, comme la chasse, la randonnée, la cueillette, la détente. Tous ces biens et services d'approvisionnement, de régulation ou culturels peuvent être produits par des assemblages diversifiés. En revanche, pour le propriétaire, le bois est quasiment l'unique revenu financier issu de la forêt, et trois quarts de la valeur des bois commercialisés proviennent des bois d'œuvre⁹.

Figure 4 – Promenade à cheval en forêt, à l'automne



Source : Mireille Mouas, IDF © CNPF.

8. Article L. 121-1 du code forestier, ordonnance du 26 janvier 2012.

9. Bois destiné au sciage et au tranchage, par opposition aux bois de trituration et de feu.

Figure 5 – Centre d'écotourisme de Franchard, forêt de Fontainebleau



Source : Sylvain Gaudin, CRPF CA © CNPF.

La forêt rend aussi de nombreux services de protection (voir chap. C) : aujourd'hui, 0,74 % de la surface forestière métropolitaine y est consacrée en des lieux stratégiques pour la protection des populations contre les inondations ou la chute de blocs et de protection des sols contre l'érosion.

L'arbre trouve aussi des valorisations hors forêt : haies, ripisylves, systèmes agroforestiers... Tout comme pour l'arbre forestier, l'arbre agricole, ou l'arbre des champs, rend de nombreux services (paysage, brise-vent, production de fruits, protection contre l'érosion, production de bois, apport fertilisant pour les cultures, habitat pour de nombreuses espèces, limitation des effets du réchauffement sur les cultures...). Il joue un rôle essentiel dans la constitution de corridors écologiques (trame verte et bleue). Tout comme l'arbre forestier, il est fortement concerné par les changements climatiques (voir chap. E). Ainsi, les questions que se posent les agriculteurs dans ce domaine sont comparables à celles qui font réfléchir les forestiers (choix d'essences plus résistantes aux sécheresses et aux vents forts, optimisation de l'utilisation de l'eau...).

● Une réponse aux défis sociétaux

Pour aider à répondre aux défis actuels, de nouvelles attentes sont adressées à la forêt. Parmi elles, on peut citer :

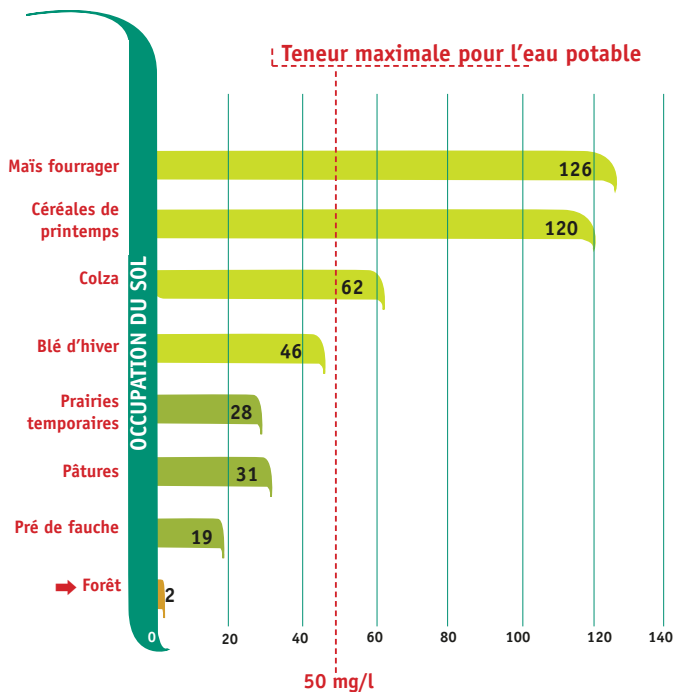
- l'atténuation du changement climatique par le stockage du carbone dans le bois. Les forêts françaises captent chaque année l'équivalent de 15 % des émissions nationales de CO₂ ;
- la contribution à l'amélioration de la qualité de l'eau (voir fig. 6). La qualité des ressources en eau est un défi important. Les forêts de production nécessitent cependant 450 fois moins de traitements phytosanitaires en moyenne que les grandes cultures agricoles (Benoît et Simon, 2011). De récents travaux ont mis en évidence l'influence de la présence de forêt comme facteur positif du prix de l'eau. Cela s'explique par les taux très faibles de nitrates et de produits phytosanitaires, qui ne nécessitent pas de traitements importants de l'eau brute pour la rendre potable (Fiquepron *et al.*, 2013) ;
- le support de la biodiversité¹⁰. La production du bois s'effectue dans le cadre d'une gestion durable, c'est-à-dire soucieuse de la conservation de la diversité biologique. Les forêts métropolitaines représentent 30 % du territoire et abritent 40 % des zones Natura 2000. Avec les 136 espèces d'arbres qui la composent, elles abritent 72 % des espèces de la flore française, mais aussi 73 espèces de mammifères et 120 espèces d'oiseaux. Un total de 15 % des forêts bénéficie du statut d'aires protégées. Enfin, les forêts sont présentes dans 10 parcs nationaux et 122 réserves naturelles. Ce haut niveau de diversité d'espèces et d'habitats forestiers est un facteur favorable à la résilience¹¹ des forêts impactées par des aléas ;
- l'amélioration de la santé publique. La fréquentation des forêts permettrait de limiter le stress et les maladies mentales des populations de plus en plus urbaines... (cf. IUFRO, Taskforce on Forest and Human Health¹² [Union internationale des instituts de recherches forestières, Groupe de travail sur la forêt et la santé humaine]).

10. La forêt guyanaise, une partie du grand massif amazonien, compte à elle seule 7 000 à 10 000 espèces végétales (dont 1 000 espèces d'arbres) ; 1 200 espèces de vertébrés, dont 685 espèces d'oiseaux, 400 000 espèces d'insectes, soit entre 10 % et 20 % du nombre d'espèces d'insectes inventoriées dans le monde (dans l'état actuel des connaissances).

11. Capacité dynamique d'un système à retrouver un état stable ou à maintenir ses fonctions après une perturbation ou un aléa quelconque.

12. www.iufro.org/science/task-forces/forests-trees-humans/.

Figure 6 – Concentration en nitrates des eaux sous racinaires (à 1,10 m de profondeur) pour différents types d'occupation du sol en Lorraine



Les arbres ont un rôle épurateur de l'eau. De plus, la sylviculture n'utilise que très rarement des produits phytosanitaires ou des nitrates.

Source : d'après Benoît et Papy, *L'Eau dans l'espace rural*, 1997.

- *La valeur économique insoupçonnée des services rendus par les forêts*

L'évaluation économique des services permet de définir des valeurs de référence pour les décideurs et les gestionnaires forestiers. L'évaluation la plus complète estime la valeur totale des services forestiers à 968 euros/ha/an (Chevassus-au-Louis *et al.*, 2009), soit 9 fois le revenu réel provenant de la vente des bois, variant entre 75 et 160 euros/ha/an. Les revenus de la chasse sont estimés à 20 euros/ha/an.

Tableau 1 – Valeurs de référence proposées pour les différents services écosystémiques de la forêt française (en euros/ha/an)

Catégorie	Service	Valeur proposée	Remarques
Services de prélèvement	Bois	75 € (75 à 160 €)	Selon méthode d'estimation (bois sur pied ou après exploitation)
	Autres produits forestiers (hors gibier)	10 à 15 €	
Services de régulation	Fixation carbone	115 €	360 € en 2030
	Stockage carbone	414 € (207 à 414 €)	650 à 1300 € en 2030
	Autres gaz atmosphériques	Non évaluée	Manque de bilans quantitatifs fiables
	Eau (quantité annuelle)	0 €	Hypothèse d'absence d'effet majeur des forêts sur le bilan hydrologique annuel
	Eau (régulation des débits)	Non évaluée	Manque d'études pertinentes
	Eau (qualité)	90 €	Voir figure 6
	Protection (érosion, crues)	Non évaluée	Manque d'études pertinentes
	Biodiversité	Non évaluée directement	Évaluée via les autres services
	Autres services de régulation (santé, etc.)	Non évaluée	Manque d'études pertinentes
Services culturels	Promenades (hors cueillette et chasse)	200 € (0 à 1000 €)	Selon fréquentation
	Chasse	55 à 69 €	Externalités négatives à déduire
	Autres services culturels	Non évaluée	Manque d'études pertinentes
TOTAL* (min.-max.)**		Environ 970 € (de 500 à plus de 2000 €)	

* En prenant la valeur indiquée ou la moyenne de la fourchette indiquée.

** En additionnant simplement les valeurs minimales et maximales.

Source : d'après Chevassus-au-Louis *et al.*, 2009.

L'ensemble des services forestiers répond à divers enjeux de la société liés à la biodiversité, à la production de bois ou au stockage du carbone. Ces services sont interdépendants et doivent s'articuler avec des contraintes économiques et avec la mise en œuvre de politiques publiques. Leur superposition, leur valeur économique et les politiques publiques les favorisant interrogent le forestier qui doit composer avec et trouver les bons compromis. Le changement climatique, avec ses incertitudes et ses risques accrus ou nouveaux, vient apporter un niveau de complexité supplémentaire et de nouveaux critères à prendre en compte dans les choix de gestion.

Changement climatique : nouveau jeu, on redistribue les cartes

Vers une évolution des services écosystémiques

Le climat est une source de « perturbations naturelles » des écosystèmes : incendies, tempêtes, inondations... Ces événements climatiques, parfois destructeurs, peuvent cependant, dans certaines conditions d'intensité et de fréquence, être indispensables à la régénération ou à la dissémination de certaines espèces (Chevassus-au-Louis, 2009). Par exemple, à faible fréquence, les incendies peuvent être favorables à la biodiversité, mais ils sont dévastateurs à fréquence élevée.

Le climat changeant, les services rendus par la forêt (bois d'œuvre, stockage de carbone...) peuvent être remis en cause par les déséquilibres qui en résultent. La prospective AFCLIM, menée en 2012 par le Centre d'études et de prospective du ministère chargé de l'Agriculture, illustre bien ce phénomène. Plusieurs scénarios d'évolution du climat y ont été étudiés. Certains entraînent une baisse significative de la productivité qui remet en cause l'objectif de production de bois d'œuvre (Vert *et al.*, 2013). Il est donc utile de tenir compte de cette redistribution possible des services dans les scénarios d'adaptation, afin d'éviter des basculements irréversibles (abandon de la production de bois, modification naturelle ou volontaire par anticipation du pool d'espèces en place, modifiant de ce fait les habitats...).

Des stratégies de gestion en plusieurs étapes

- *Savoir établir le constat : le fondement indispensable de la décision*

Le changement climatique apporte de nouvelles incertitudes. Les risques sont aussi plus nombreux. En conséquence, le forestier doit raisonner en multirisques, et il devient plus complexe pour le forestier de bien mesurer les risques qu'il prend. Il doit pourtant les considérer et les intégrer dans ses choix de gestion. C'est pourquoi le diagnostic de la forêt est une étape clé (Riou-Nivert et Rosa, 2014), (voir chap. D). Il permet de cibler efficacement les forces et les faiblesses des peuplements face aux aléas auxquels ils pourraient être exposés. Il permet de choisir de manière plus raisonnée les opérations sylvicoles à entreprendre : accélérer en raccourcissant la durée de la sylviculture, réduire la densité d'arbres, mélanger les espèces ou changer d'espèces...

- *Être bien informés pour mieux anticiper et connaître les choix possibles*

Le forestier doit multiplier les sources d'information pour mieux anticiper. Il doit donc s'informer des évolutions des connaissances scientifiques, traduites en actions opérationnelles, s'enrichir des échanges des pratiques issues des expériences d'origines géographiques différentes, et aborder les choix de gestion dans un souci d'échange avec les autres acteurs de la filière de transformation et des territoires.

- *Opter pour la stratégie gagnante*

En fonction du diagnostic établi, des moyens et des objectifs visés par le gestionnaire, plusieurs stratégies d'action sont possibles (voir chap. D). L'une d'entre elles vise à limiter les impacts potentiels des aléas pour les rendre les plus acceptables possibles non seulement pour les forestiers mais aussi pour la société (éviter l'altération du paysage, la perte de services...).

Une piste, souvent plus acceptable, consiste à mettre en place des actions dites « sans regret » : les choix faits pour l'adaptation sont alors bénéfiques, quelle que soit l'ampleur du changement climatique. Par exemple, l'ouverture d'une route pour les grumiers¹³ devra être raisonnée également pour les camions de pompiers, et ainsi contribuer à mieux protéger la forêt contre les incendies.

Produire plus rapidement des arbres les expose moins longtemps aux risques. Cela peut aussi constituer une stratégie pour éviter d'avoir à changer d'objectif en cours de route. Mais est-ce pour autant un choix accepté par la société, en raison de l'impact sur les paysages, les sols, la biodiversité, l'accueil du public... ?

Ainsi, le changement climatique implique de revoir certains des objectifs visés par le gestionnaire, parfois au cours de la vie des peuplements déjà en place. Le long terme des cycles forestiers rend difficile tout changement brusque d'objectif, il est donc important de privilégier, quelle que soit la stratégie adoptée, la réversibilité des choix sylvicoles (Picard, 2013). Enfin, les options visant à diversifier les espèces, les objectifs ou les modes de gestion devront être favorisées lorsque c'est possible. Elles permettent d'augmenter la capacité globale des systèmes à s'adapter à ce nouvel environnement changeant.

- *Mieux identifier les services pour mieux adapter la forêt*

Une meilleure valorisation des services environnementaux passe par une meilleure évaluation de l'incertitude, de la valeur des services et des risques, d'une part, et par une valorisation des bénéfices par les acteurs (internalisation des bénéfices), d'autre part.

Les voies d'adaptation aux changements de la gestion forestière devront mieux intégrer les sciences économiques et sociales. L'adaptation aura un coût (De Perthuis *et al.*, 2010), il est donc essentiel d'améliorer les méthodes de chiffrage de la valeur des bénéfices environnementaux, de mettre au point des outils de comptabilité environnementale, de politique pour promouvoir la fourniture des services.

Ces adaptations de la gestion forestière pourront se nourrir d'innovations en matière technique, économique et sociale, avec de nouvelles formes d'organisation et de nouveaux partenariats.

13. Camion pour transporter les grumes, qui sont les troncs d'arbres ébranchés destinés à être sciés.

Outre l'acquisition des connaissances, l'adaptation aura un coût et demandera du temps.

Conclusion : le changement climatique, péril ou opportunité ?

Le changement climatique en marche touche déjà les forêts, et les touchera encore pour de nombreuses années. S'agit-il d'un péril ou d'une opportunité ? Aujourd'hui, ce changement s'avère globalement une bonne chose pour les forêts tempérées, car elles poussent plus vite qu'il y a un siècle, même si certaines espèces marquent le pas ces dernières années (voir chap. B). Toutefois, si l'augmentation de la teneur en CO₂ de l'atmosphère s'emballe, les événements extrêmes sont annoncés plus fréquents, plus intenses (vagues de chaleur, sécheresses...) pour le XXI^e siècle (Bonduelle et Jouzel, 2014).

Alors, opportunité ? Le forestier doit prévoir et savoir anticiper les impacts du futur. Le changement climatique vient rebattre les cartes en faisant apparaître de l'incertitude là où le forestier se sentait sûr de ses choix. Le changement climatique lui apporte une opportunité technique d'actualiser ses connaissances pour cultiver une forêt plus résistante et plus résiliente. Face à l'impératif de maintenir la capacité des forêts à remplir leurs multiples rôles, le changement climatique représente aussi une opportunité environnementale : l'occasion de promouvoir et de mieux valoriser les services que la forêt fournit autour de la biodiversité, de la qualité de l'eau, de la protection des sols... Il s'agit aussi d'une opportunité économique, en faisant du bois une source d'innovations, ou un écomatériau qui stocke le carbone et contribue à atténuer le changement climatique. Et c'est aussi une opportunité sociale pour faire reconnaître le rôle important des forêts sur le bien-être humain, notamment face au changement climatique, comme lieu « climatisé ».

Mais la forêt se trouve aussi soumise aux changements globaux, comme la mondialisation des échanges intercontinentaux, qui apportent leur lot de maladies émergentes. C'est un point crucial que les forestiers doivent intégrer lors de leur choix d'essences et de sylviculture.

Entre péril et opportunité, comment choisir ? Pour les forestiers, savoir qu'il y a un péril potentiel constitue une opportunité pour agir afin de l'éviter, de l'atténuer et d'en limiter les risques.

Chapitre B

Effets attendus du changement climatique sur l'arbre et la forêt

Myriam Legay, ONF

© ONF / Jean Ladier



Comprendre et observer les évolutions de la forêt

La forêt est en constante évolution.

À l'échelle des millénaires, elle reconquiert le territoire abandonné lors de la dernière glaciation.

À l'échelle des siècles, elle recule ou reprend du terrain au gré des crises et des transitions de l'activité humaine (défrichements, révolutions technologiques, guerres, épidémies).

À l'échelle de la décennie, elle est rythmée par les plans de gestion sylvicoles.

À toutes ces échelles de temps, elle obéit aux fluctuations du climat.

Ces facteurs affectent la croissance, la vitalité et la composition de la forêt, dont l'observateur ne perçoit qu'un état instantané dans une évolution dynamique conduite par une multiplicité de facteurs, naturels ou anthropiques.

À la charnière des décennies 1970-1980, une dégradation du feuillage des sapins et des épicéas a été observée dans les massifs montagneux (Vosges, Jura, Alpes), et attribuée dans un premier temps à la pollution atmosphérique acide. Dans un second temps, l'analyse des cernes de croissance¹ des arbres a révélé le rôle clé des accidents climatiques dans l'apparition de ces symptômes, surtout des sécheresses telles que celle de 1976. Cette analyse a également dégagé une tendance forte et paradoxale d'augmentation de la croissance au cours du siècle précédent. Les effets des polluants sont de fait multiples :

- acidifiant (oxydes de soufre),
- fertilisant (oxydes d'azote),
- stimulant de la photosynthèse (augmentation du taux de CO₂ atmosphérique).

Dès 1987, Michel Becker soulignait le parallélisme de l'évolution de la croissance avec celle de la température (Becker, 1987). Au fil de résultats similaires en Europe (par exemple voir fig. 7) et en Amérique du Nord s'est imposée l'idée que, sous l'effet des modifications de l'environnement, la forêt évoluait sans retour possible vers un état de référence.

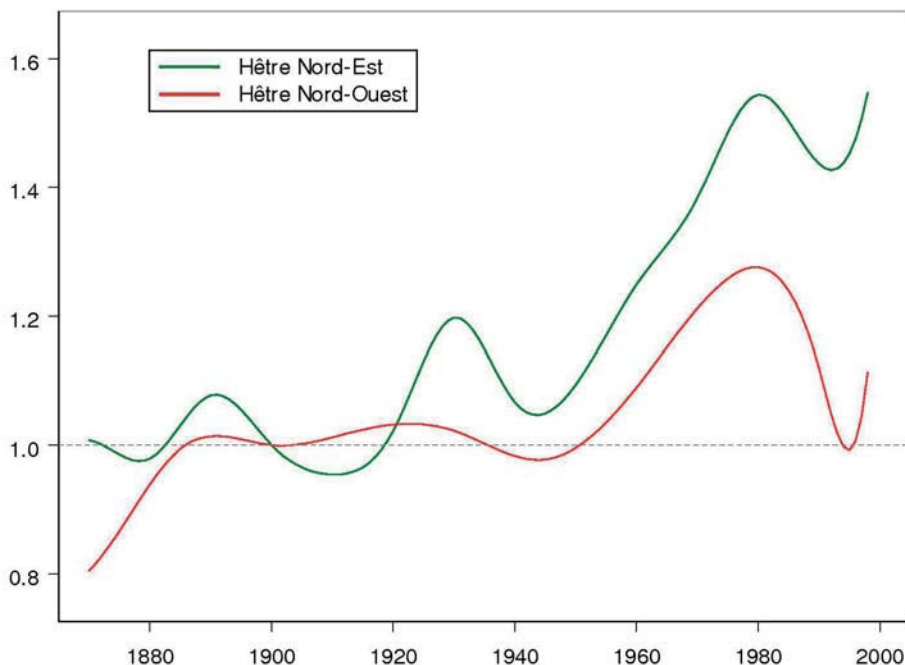
L'étude des évolutions à long terme de la forêt en lien avec l'activité humaine s'est alors développée. Entre les années 1980 et 2000 ont été ainsi étudiés les effets de l'augmentation du CO₂ atmosphérique, du changement climatique, des pollutions à longue distance (dépôts acides ou azotés, ozone), des changements d'usage des sols, de la dissémination d'espèces par l'homme, des fluctuations des populations de cervidés, etc.

1. Anneau représentant la couche annuelle formée par le bois de printemps et le bois d'été sur une section transversale de tronc, de branche ou de racine.

Au regard de ce rappel historique, les questions face aux évolutions observées de la forêt sont donc bien :

- Comment détecter un phénomène nouveau (modification de l'état des arbres, développement ou recul d'une espèce...) dans le bruit de fond des variations ordinaires ?
- Comment attribuer une évolution observée à tel facteur plutôt qu'à tel autre ?

Figure 7 – Un exemple d'augmentation de productivité : accélération de la croissance en hauteur dominante dans les hêtraies françaises (Nord-Est et Nord-Ouest)



Un indice de modification de la croissance (axe des ordonnées) de 1,2 en 1970 dans le Nord-Ouest signifie que la vitesse de croissance en hauteur dominante* est en 1970, à hauteur dominante égale, supérieure de 20 % à celle de 1900.

* Hauteur moyenne des 100 plus gros arbres à l'hectare.

Source : Dhôte et al., *Rendez-vous techniques de l'ONF*, 2007.

Le lien étroit entre climat et répartition des végétaux

Le climat, principal facteur déterminant la répartition des espèces

L'étude de la répartition des végétaux et des causes de cette répartition, ou phytogéographie, est apparue avec les explorateurs et les botanistes de la fin du XVIII^e et du début du XIX^e siècle (voir encadré 2), et s'est développée avec l'avancée des connaissances sur le climat.

Encadré 2

Le développement de la phytogéographie

À partir de la période des Lumières, l'homme a pris conscience à la fois de la diversité des formes de vie et des lois qui semblaient régir leur présence sur Terre. L'immense travail d'investigation des naturalistes bénéficiant d'outils conceptuels nouveaux, comme la définition de l'espèce selon Linné, a permis de commencer à dresser peu à peu un inventaire des espèces vivantes. Dans le même temps, deux éléments fondamentaux de compréhension ont émergé :

- les espèces ne sont pas indépendantes, mais échangent des relations de parenté dont la systématique* rend compte et que les théories sur l'évolution initiées par Darwin expliquent ;
- elles ne se répartissent pas au hasard sur Terre, et on peut identifier des causes à leur répartition.

Dès qu'il a pu être correctement mesuré et qualifié (fin du XVIII^e siècle), le climat est apparu comme un déterminant majeur de la répartition des espèces. Succès et échecs des essais d'acclimatation des espèces végétales d'un continent à l'autre ont, de plus, montré que le climat constituait un facteur limitant incontournable.

Il restait à décrire ces relations entre le climat et les exigences des espèces, tâche à laquelle deux auteurs du XIX^e siècle ont apporté une contribution majeure : Alexandre von Humboldt et Augustin Pyrame de Candolle. Ces travaux atteignirent leur apogée entre les années 1950 et 1970, période pendant laquelle de nombreux auteurs publièrent des classifications biogéographiques** à différentes échelles spatiales.

* *Systématique* : science de la classification des êtres vivants.

** *Biogéographie* : science qui a pour objet l'étude de la répartition des espèces dans l'espace, en fonction des caractéristiques géographiques du milieu (climat, sols).

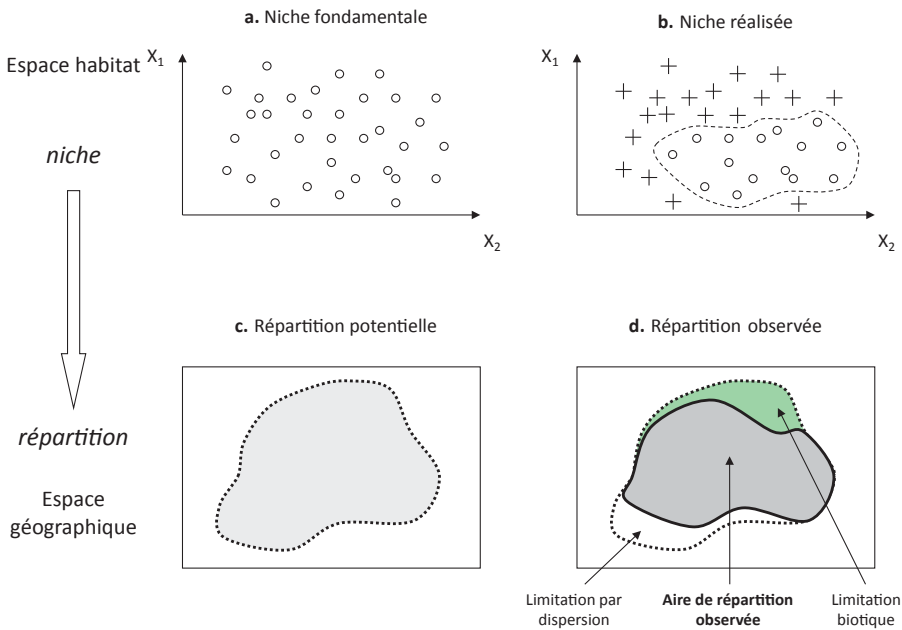
Pour l'essentiel, la vie des espèces est conditionnée par le climat, qui est lui-même notamment caractérisé par l'énergie lumineuse disponible, les températures et la disponibilité en eau. C'est particulièrement déterminant pour les arbres, espèces immobiles et à cycle de vie long.

La température, liée à l'énergie solaire reçue, varie de l'équateur aux pôles, l'altitude venant perturber cet ordonnancement en bandes parallèles des grands types de végétation : équatoriale, tropicale, tempérée, boréale. Hors des zones intertropicales, le cycle saisonnier détermine des phases marquées dans l'activité des plantes et des arbres. Les températures moyennes annuelles et mensuelles rendent bien compte de ces variations, auxquelles il faut également ajouter les minima hivernaux pour expliquer les limites liées à la tolérance aux froids extrêmes.

La disponibilité en eau est plus difficile à caractériser. Pour une plante, l'enjeu est qu'il pleuve suffisamment et au bon moment pour répondre à ses besoins. Ces derniers dépendent de multiples facteurs : rayonnement net, température, humidité de l'air et vent. Ce n'est que depuis quelques dizaines d'années que l'on sait calculer ce besoin en eau des plantes, et donc évaluer le manque d'eau, ou déficit hydrique.

Besoins en chaleur, tolérance au froid et au déficit hydrique : chaque espèce a ses tolérances propres, qui définissent ce que l'on appelle sa niche climatique (voir fig. 8). Un environnement climatique approprié est une condition nécessaire pour permettre la présence durable d'une espèce.

Figure 8 – Le concept de niche écologique



(a) On appelle niche écologique le domaine de l'espace des variables environnementales (x_i) où l'espèce peut se développer.

(b) L'espèce n'occupe souvent qu'une partie de cette niche fondamentale, appelée par définition la « niche réalisée ».

(c) Dans l'espace géographique, la niche fondamentale correspond à une répartition potentielle.

(d) La répartition observée est un sous-ensemble de la répartition potentielle, que l'espèce n'occupe généralement pas entièrement, du fait de la concurrence avec d'autres espèces, ou parce qu'elle n'a pas pu coloniser l'ensemble.

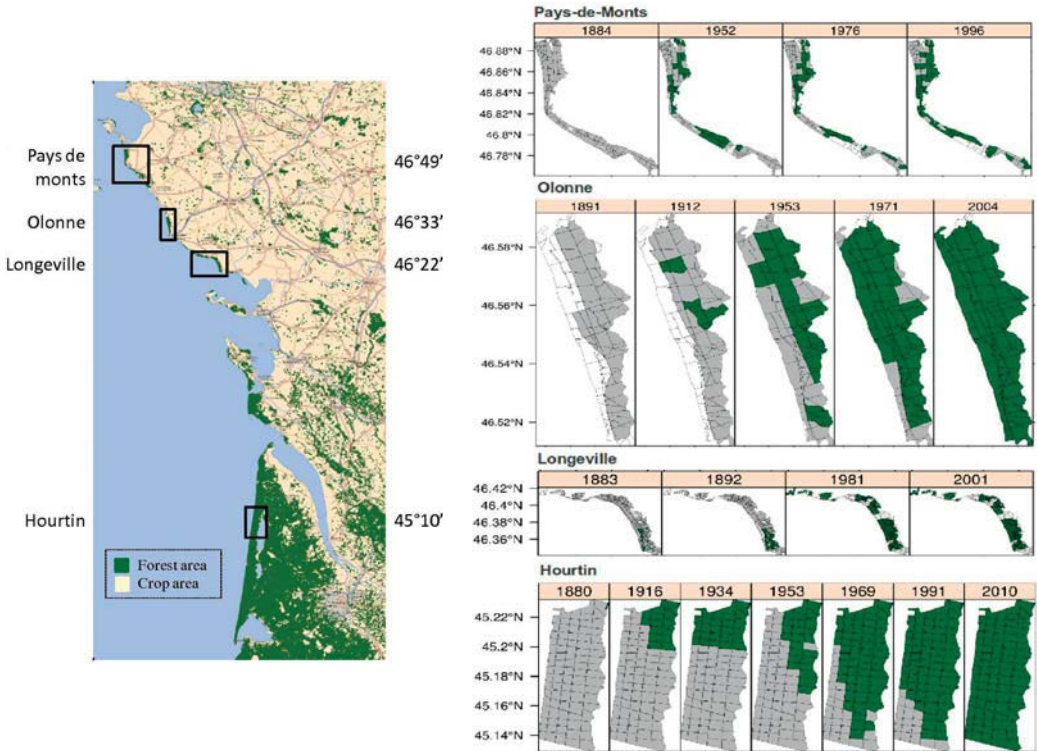
Source : Morin, 2006.

Le changement climatique agit sur la répartition des espèces forestières

Le climat étant le facteur déterminant de la répartition des espèces, on comprend qu'un changement significatif et durable du climat mette en question la pérennité de toutes les espèces, partout où elles se trouvent. Ainsi ce changement devrait se traduire à terme par un réarrangement de leur répartition géographique.

L'augmentation des températures permet aux espèces de s'installer plus au nord ou plus en altitude. À nos latitudes, le chêne vert illustre bien ce phénomène. En France, il est cantonné actuellement à la zone méditerranéenne et à une mince frange atlantique. L'analyse de cette répartition relie sa présence à des climats suffisamment chauds, à amplitude thermique réduite, et avec des périodes de froid marqué ($< 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) limitées. Le réchauffement lui ouvre donc potentiellement de nouveaux espaces en Aquitaine et dans l'Ouest en général. Or certaines évolutions locales de la répartition du chêne vert confirment cette projection, même si l'effet de changement des pratiques ne peut être totalement exclu. (Delzon *et al.*, 2013 ; voir fig. 9).

Figure 9 – Évolution au cours du xx^{e} siècle de la surface occupée par le chêne vert dans quatre forêts du littoral atlantique



La présence du chêne vert dans le domaine forestier (en gris) est indiquée en vert.

Source : Delzon *et al.*, PLOS One, 2013.

En montagne, l'affaiblissement de la contrainte liée au froid permet la progression en altitude de certaines espèces. Une analyse statistique sur un grand jeu de relevés floristiques² effectuée entre 1965 et 1985 dans les massifs montagneux de France a mis en évidence une progression en altitude moyenne de 66 m au cours de cette période (Lenoir *et al.*, 2008).

Cependant, hors zone méditerranéenne et de haute montagne, dans lesquelles l'originalité de la flore est liée à des gradients thermiques importants, la répartition des espèces d'arbres en France dépend plutôt de la contrainte d'alimentation en eau. Le cas d'espèces comme l'épicéa ou le sapin – à affinités montagnardes – l'illustre bien, mais c'est également le cas d'espèces de plaine, comme le hêtre. Dans notre pays, ces espèces ne sont pas favorisées par le réchauffement (si ce n'est à haute altitude), et souffriront au contraire, sur la plus grande part de leur aire actuelle, de l'assèchement des sols superficiels. Cet assèchement est sous la double influence de l'augmentation des températures (qui accroît la demande évaporative³), et de la diminution des précipitations. L'évolution des précipitations, délicate à modéliser sous nos latitudes, constitue une des sources majeures d'incertitude sur les évolutions futures de nos forêts. Même si les éclairages les plus récents sur ce sujet décrivent une légère hausse des précipitations en été comme en hiver à l'horizon 2020-2050, une forte incertitude subsiste sur la distribution géographique de ces changements (Ouzeau *et al.*, 2014). Les incertitudes à un horizon plus lointain, tel que 2071-2100, sont encore plus grandes en termes d'intensité et de répartitions temporelle et géographique.

L'étude des corrélations entre répartition des espèces et climat : une approche efficace, mais limitée

Pour simuler les effets du changement climatique sur la répartition géographique future d'une espèce, on recherche donc des corrélations entre sa présence et les facteurs environnementaux, en particulier climatiques. En projetant l'évolution de ces facteurs dans le futur, il est alors possible de modéliser la modification des zones présumées climatiquement favorables à l'espèce étudiée. Cette approche permet d'établir des cartes (voir fig. 10). Leur interprétation doit cependant tenir compte des biais potentiels et des limites de cette approche :

– elle n'éclaire pas sur les mécanismes qui conduiront au recul ou à la progression de l'espèce. Les capacités réelles de migration – incluant la dispersion des graines et le développement des plantules dans les nouveaux espaces, plus ou moins accueillants – ne sont par exemple pas prises en compte. Pour la plupart des espèces, ce sera pourtant déterminant. Dans l'exemple de la figure 9, la vitesse de colonisation par le chêne vert, estimée à 100 m/an, est 100 fois trop faible pour suivre la progression du climat ;

2. Inventaire des espèces végétales présentes sur une surface donnée.

3. Capacité de l'atmosphère d'extraire de la vapeur d'eau du système sol-plante, en fonction des conditions météorologiques.

- elle ne prend pas en compte certains paramètres comme le taux de CO₂ atmosphérique ;
- elle suppose que la répartition actuelle de l'espèce correspond suffisamment bien à sa répartition potentielle – hypothèse diversement acceptable selon les cas. En effet, une espèce peut ne pas occuper l'ensemble de sa niche soit parce qu'elle n'a pas encore pu coloniser la totalité de l'espace correspondant, soit parce qu'elle est éliminée d'une partie de cet espace par des interactions d'autres espèces : compétition, prédation, parasitisme... ou par effet des activités humaines ;
- elle considère l'espèce comme homogène du point de vue de son écologie, alors que différentes populations ont pu se différencier en s'adaptant à des conditions de milieu variées. Par exemple l'aire du douglas, *Pseudotsuga menziesii*, s'étend du Canada jusqu'à la Californie, et les populations des deux extrémités de cette aire présentent des caractéristiques très différentes.

Il existe enfin d'autres biais plus techniques⁴, à ne pas négliger.

L'approche corrélative, malgré ses limites, est simple et efficace ; elle offre en cela de nombreuses perspectives pour l'adaptation opérationnelle. Nous allons chercher à dépasser ses limites intrinsèques en nous intéressant aux mécanismes d'action du changement climatique sur les arbres, puis aux processus d'évolution des populations.

Comprendre les effets du changement climatique sur l'arbre

Des modifications du cycle annuel de développement, avec des conséquences diverses

- *Allongement du cycle annuel de développement des arbres*

Le réchauffement climatique est responsable de modifications importantes du cycle annuel de développement des arbres. Les événements phénologiques⁵ de printemps, en particulier la floraison et le débourrement⁶ des espèces forestières, ont avancé en moyenne de trois jours par décennie au cours des cinquante dernières années en région tempérée. En revanche, les événements d'automne, en particulier l'entrée en sénescence⁷ des feuilles, ont eu tendance à se produire plus tardivement, en moyenne d'un jour et demi par décennie dans ce même contexte (Chuine, 2010). Au-delà de la corrélation avec la hausse des températures, la relation de

4. Ces biais tiennent à la qualité des données de répartition ou de climat utilisées, au risque de confondre les effets de variables fortuitement corrélées dans l'espace d'étude, ou encore au choix du modèle statistique.

5. La phénologie est la description des diverses phases du cycle vital d'une espèce animale ou végétale.

6. Processus d'épanouissement des bourgeons au printemps.

7. Processus débutant par l'apparition de la coloration automnale et aboutissant à la chute des feuilles ou des aiguilles.

cause à effet entre ces deux phénomènes a été démontrée expérimentalement dans de nombreux travaux (Chuine *et al.*, 2003). La période d'activité des arbres a ainsi augmenté au cours des cinquante dernières années, ce qui explique en partie l'augmentation de productivité de nos forêts sur la même période (Piao *et al.*, 2008). Cependant, aux marges sud de l'aire de répartition de certaines espèces, notamment le hêtre, le pin sylvestre et le sapin en région méditerranéenne, des baisses de croissance et des dépérissements commencent à apparaître pour des raisons encore mal élucidées, même si le déficit hydrique et les fortes températures estivales semblent en partie responsables (Jump *et al.*, 2006).

- *Conséquences sur le fonctionnement des espèces et sur leur survie*

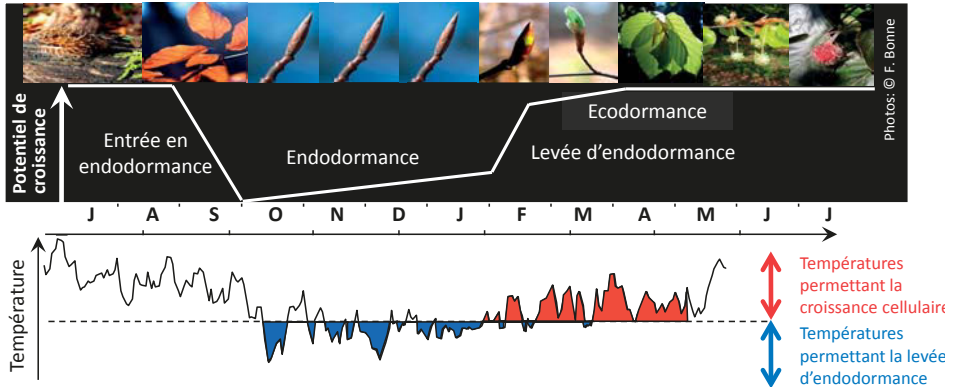
Certains modèles établissent un lien entre conditions de climat et de sol, d'une part, et entre phénologie, physiologie, croissance, survie et succès reproducteur des arbres, d'autre part. Ils prévoient d'ici à la fin du siècle des régressions massives dans les marges sud de répartition de certaines espèces, voire au centre de leur aire, pour des scénarios de réchauffement de l'ordre de 6 °C d'ici à 2100. Cela est dû essentiellement à des hivers trop doux ne permettant plus la levée de dormance des bourgeons, mais aussi à des déficits hydriques trop intenses (Cheaib *et al.*, 2012 ; Gritti *et al.*, 2013). En revanche, ils projettent des expansions possibles des espèces vers le Nord et les sommets, essentiellement par un allongement de la saison de croissance permettant aux espèces de fructifier dans ces régions. Cependant, des zones d'ombre sur la compréhension du déterminisme environnemental du cycle annuel des arbres, en particulier celui de la dormance des bourgeons et de la maturation des fruits, engendrent des incertitudes fortes sur les projections actuelles des modèles.

- *La régénération des forêts : une étape déterminante, mais encore mal connue*

Très peu d'efforts de recherche ont été consacrés jusqu'à présent à la compréhension des capacités de régénération des forêts en fonction des conditions climatiques et édaphiques, depuis la production de graines viables jusqu'à l'installation des semis. Les capacités d'adaptation aux nouvelles conditions climatiques des différentes populations d'arbres vont essentiellement dépendre de la plasticité et de l'évolution de caractéristiques influant sur le fonctionnement des arbres, telles que surface des feuilles, taille des graines, densité du bois... Leur évolution va dépendre des flux de pollens et de graines entre populations et des paramètres démographiques, ainsi que de la variabilité génétique des populations. L'homme pourra favoriser ce processus d'évolution, à condition de mieux connaître l'ensemble des processus permettant à la forêt de se régénérer, mais aussi de documenter la variabilité génétique de ces traits fonctionnels⁸ au sein des populations à l'échelle de l'aire des espèces.

8. Caractéristiques morphologiques, physiologiques ou phénologiques d'un organisme, qui affectent sa performance individuelle.

Figure 10 – Évolution au cours de l'année de la capacité de croissance des cellules du bourgeon et des températures



À l'automne, les cellules entrent progressivement en endodormance (ralentissement extrême de l'activité physiologique qui ne peut être levé que par l'action de températures froides pendant un temps plus ou moins long). Cette endodormance est levée pendant l'hiver et les cellules entrent alors en écodormance (incapacité de croître si les températures ne sont pas assez élevées). Plus les températures seront élevées, plus la croissance cellulaire sera rapide, et plus cette phase sera courte, et le débourrement ou la floraison précoces.

Source : © I. Chuine, CNRS.

Les modifications de l'atmosphère et du climat agissent de façon contradictoire sur la physiologie de l'arbre

Le changement climatique associe deux tendances : l'augmentation de la fréquence des épisodes ponctuels de sécheresse ou de canicule, et la tendance d'évolution à long terme des variables climatiques et de la concentration atmosphérique en CO₂. Or cette concentration et la disponibilité en eau dans les sols forestiers constituent des facteurs majeurs du fonctionnement, de la croissance, de la qualité et de la survie des arbres.

• Vers une diminution de la productivité forestière liée à l'assèchement des sols

La sécheresse du sol, premier facteur limitant de la croissance des arbres sur une large partie du territoire métropolitain, surtout au printemps et en été, produit deux effets :

- 1) elle dégrade la conductivité hydrique des arbres par embolie gazeuse dans les vaisseaux conducteurs de la sève brute⁹, provoquant le dessèchement des organes vivants, d'abord au niveau des feuilles, puis, si le phénomène s'aggrave, à celui des branches, voire de l'arbre entier ;
- 2) elle induit une fermeture des stomates¹⁰, elle limite l'entrée de CO₂ dans les feuilles, affectant directement leur photosynthèse, et *in fine* réduisant leur croissance (Choat *et al.*, 2012 ; Granier *et al.*, 2007).

Ces deux mécanismes présentent des variations fortes entre espèces.

9. Sève riche en sels minéraux, qui monte des racines vers les feuilles.

10. Orifice de l'épiderme des organes aériens des végétaux, qui permet les échanges gazeux entre la plante et l'air ambiant ainsi que la régulation de la pression osmotique.

Les températures excessives et la forte sécheresse de l'air peuvent aussi impacter l'arbre, cependant de façon moindre et plus localisée dans l'espace. L'effet de ces deux facteurs est aggravé lorsqu'il se conjugue à la sécheresse du sol, qui augmente l'échauffement des feuilles. Toutefois, des températures plus douces en fin d'hiver et au printemps, sur certaines espèces¹¹, tels les chênes, conduisent à une apparition plus précoce des feuilles, et ce à une période où le sol est le plus souvent bien rechargé en eau. Cela peut, notamment sur les sols profonds, permettre une meilleure absorption du carbone par la photosynthèse, donc une croissance et une productivité plus fortes des arbres.

- *L'augmentation de la concentration du CO₂ a des effets positifs sur la croissance*

L'augmentation de la concentration du CO₂ atmosphérique stimule la photosynthèse et la croissance de l'arbre¹², à condition qu'elle ne soit pas limitée par la sécheresse du sol. L'effet stimulant du CO₂ semble s'être traduit par une augmentation, au cours du xx^e siècle, de la croissance des arbres. Il en résulte des variations de la densité du bois, qui baisse pour les résineux comme l'épicéa commun et qui augmente pour des feuillus comme les chênes. De plus l'évolution, intra-annuelle du climat conduit à des modifications de la phénologie de l'activité cambiale¹³, ce qui induit des modifications des propriétés de base du bois.

En outre, les deux grandes composantes associées au changement climatique, augmentation du CO₂ et sécheresse, agissent de façon antagoniste. Des études montrent que l'augmentation de la concentration en CO₂ peut avoir un effet anti-transpirant, par fermeture des stomates des feuilles, conduisant à une économie de l'eau du sol en situation de sécheresse. Néanmoins, cet effet n'est mis en évidence que chez certaines espèces, tels les chênes, contrairement à d'autres, tels les hêtres. La modélisation permet d'intégrer ces effets contradictoires pour simuler les évolutions qui pourraient en résulter.

- *Le cycle de l'azote pourrait également être affecté*

Enfin, le changement climatique aura une incidence sur le cycle de l'azote dans les forêts, soit par les effets directs du climat sur le sol, soit en agissant sur l'interface sol-plante. Actuellement, les pertes d'azote par drainage sont faibles car la minéralisation de l'azote organique et les prélèvements par la végétation sont synchrones. Mais une période de croissance plus longue et des hivers plus doux pourraient perturber cette synchronisation, augmenter le lessivage¹⁴ d'azote, donc les stress nutritifs, et affecter la croissance des arbres.

11. Espèces dites thermosensibles.

12. Il semble exister, malgré tout, des différences de réponse entre les espèces, mais cette question reste mal documentée.

13. Se réfère à la fine couche de cellules située à la limite du bois et de l'écorce, et dont le fonctionnement entraîne l'accroissement en diamètre des racines, du tronc, des branches et des rameaux.

14. Entraînement mécanique d'éléments minéraux du sol par l'eau de drainage.

Figure 11 – Dépérissement dans une chênaie



Source : © N. Bréda, INRA.

La représentation des effets à l'échelle de l'arbre : une autre approche des effets du changement climatique

La représentation de ces différents mécanismes de réponse du fonctionnement de l'arbre aux conditions climatiques permet de bâtir d'autres types de modèles que ceux décrits au début de ce chapitre (voir encadré 3).

Ainsi, la comparaison de la palette la plus complète de modèles (corrélatifs, basés sur les processus ou hybrides) permet d'évaluer le degré de confiance que l'on peut accorder à la simulation des effets d'un scénario climatique donné sur les arbres : la concordance des simulations produites par des modèles de nature différente¹⁵ est un gage de crédibilité des résultats.

Encadré 3

Les modèles basés sur les processus écophysologiques

Ces modèles décrivent l'arbre comme un ensemble de compartiments : feuillage, partie ligneuse aérienne, racines. Ils représentent les flux de matière ou d'énergie entre ces compartiments, ainsi qu'entre la plante et le sol, d'une part, la plante et l'atmosphère, d'autre part. Sont ainsi décrits l'ensemble des processus physiologiques permettant à l'arbre d'assimiler le carbone de l'air, l'eau et les nutriments du sol pour produire de la biomasse.

Ces modèles ont bénéficié de l'apport plus récent de sites munis de nombreux dispositifs de mesure, permettant de suivre en continu le fonctionnement d'un peuplement forestier et ses échanges avec le sol et l'atmosphère. Le lourd effort de recueil de données et de travail scientifique requis n'a permis leur développement que pour un nombre encore réduit d'espèces, uniquement des ligneux d'une certaine importance économique.

En modélisant l'effet du climat sur les processus biologiques, ces modèles permettent de simuler les impacts du changement climatique avec une approche et des données de paramétrage de nature complètement différente de celle des approches corrélatives évoquées au chapitre A. Ils permettent en particulier de représenter les effets de l'enrichissement de l'atmosphère en CO₂.

Cheab et al. (2012) décrivent un exercice de comparaison de modèles sur cinq espèces majeures en France : les chênes sessile, pédonculé et vert, le hêtre (voir fig. 10) et le pin sylvestre, soumis au scénario A1B¹⁶ décrit par le modèle

15. Sous réserve que chacun des modèles soit construit dans les règles de l'art et soit de qualité satisfaisante.

16. Jusqu'au 4^e rapport du GIEC, 4 familles de scénarios d'émission des gaz à effet de serre étaient proposés par le SRES. Le scénario A1B correspond à une évolution modérée des émissions. La croissance, rapide, s'appuie sur des sources d'énergie équilibrées entre fossiles et autres (nucléaire, renouvelables). De nouvelles technologies plus efficaces se diffusent largement.

climatique Arpège à l'horizon 2055. Les modèles basés sur les processus permettent de reproduire plus ou moins bien la répartition actuelle des espèces, ce qui confirme qu'elle est en grande partie conditionnée par les contraintes physiologiques exercées par le climat. Cette aptitude à reproduire la répartition actuelle varie selon les espèces et selon les modèles. Cependant, lorsque l'on simule les effets d'un même scénario climatique, les simulations convergent ou divergent selon les cas, comme nous le verrons au fil des pages suivantes.

Ainsi, pour un scénario climatique donné, la représentation des effets du changement climatique sur les arbres engendre son propre lot d'incertitudes.

Cependant, la forêt ne se réduit pas à une collection d'arbres similaires : c'est un écosystème dans lequel les arbres se développent, meurent et se reproduisent, en interaction entre eux et avec d'autres organismes, comme les insectes ou les champignons. Elle évolue selon une dynamique qui traverse les espèces d'arbres elles-mêmes, lesquelles ne sont pas des entités séparées ni figées.

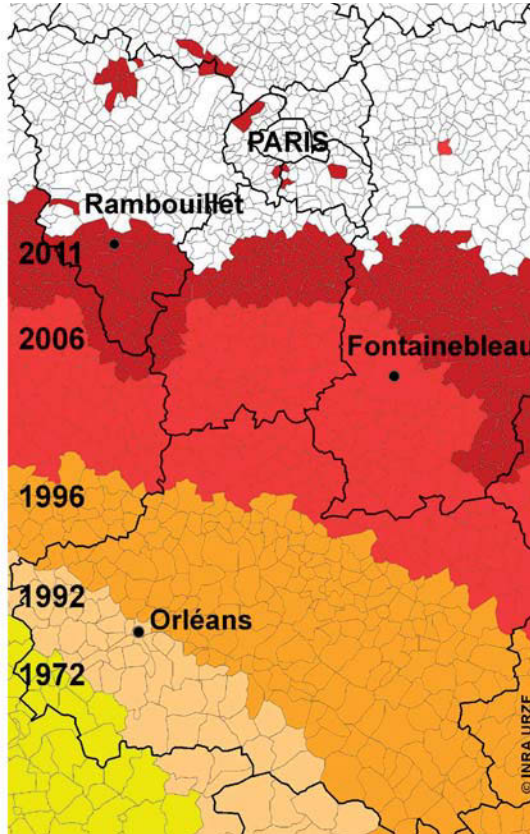
Comprendre les effets du changement climatique sur les écosystèmes

Une tendance à la recrudescence des insectes ravageurs et pathogènes

La survie et le développement des insectes ravageurs et pathogènes sont étroitement associés aux conditions climatiques. Un changement, même modéré, de ces conditions peut donc impacter leur croissance et entraîner la colonisation de nouveaux territoires. Parmi les principaux insectes ravageurs et pathogènes affectant les forêts françaises, plus de la moitié de ceux-ci montrent un niveau de population plus élevé ou bien étendent leur aire de distribution par rapport à la situation des années 1970-1980 (voir tableau 2).

Toutefois, le rôle du changement climatique n'a pu être démontré que pour un nombre restreint d'espèces. Ainsi, depuis les années 1990, la chenille processionnaire du pin (voir fig. 13 d) progresse vers le nord et en altitude, en réponse à une hausse moyenne des températures minimales entre octobre et mars (voir fig. 12), (Battisti *et al.*, 2005; Robinet *et al.*, 2014), et le dépérissement des pins dû au pathogène *Diplodia pinea* s'est accentué en raison des sécheresses récurrentes (Fabre *et al.*, 2011). La hausse des températures peut permettre aux insectes d'effectuer leur développement plus rapidement et d'accomplir un plus grand nombre de générations, de se propager, et de mieux survivre dans les territoires qui leur étaient auparavant défavorables (Netherer et Schopf, 2010; Robinet et Roques, 2010).

Figure 12 – Expansion de la chenille processionnaire du pin dans le Bassin parisien



Le front d'expansion de la chenille processionnaire du pin est un indicateur du changement climatique de l'ONERC.
Source : © INRA URZF.

Si l'effet d'une hausse moyenne des températures est souvent bien étudié, ce n'est pas le cas pour d'autres facteurs associés au changement climatique, comme la modification des régimes de précipitations et la fréquence accrue d'événements climatiques extrêmes. Ils peuvent pourtant se révéler tout aussi importants et avoir des effets opposés. Alors que la hausse moyenne des températures bénéficie à certains insectes, les canicules peuvent leur être défavorables (Rouault *et al.*, 2006 ; Robinet *et al.*, 2013).

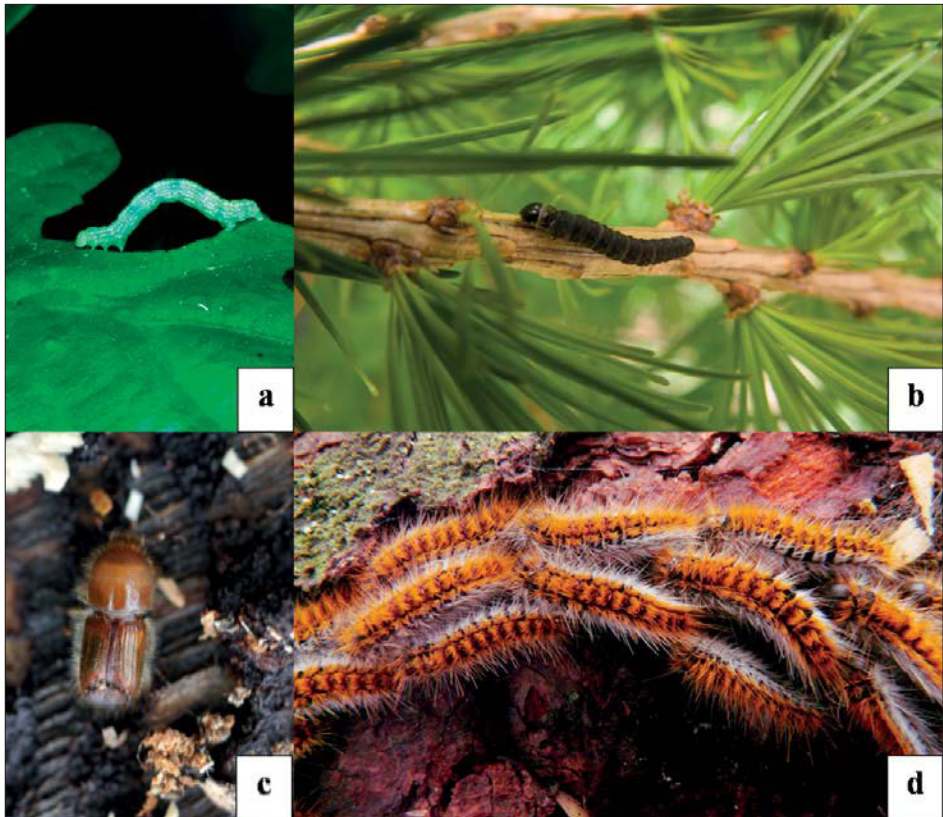
Aux effets directs sur les insectes ravageurs et pathogènes s'ajoutent les effets indirects à travers la réaction de l'arbre (Netherer et Schopf, 2010). Par exemple, la canicule et la sécheresse de l'été 2003 ont provoqué un déficit hydrique affaiblissant les arbres et les rendant moins résistants aux insectes (Rouault *et al.*, 2006). Après les sécheresses et les tempêtes, un grand nombre d'arbres stressés ou dépérissants permettent aux scolytes¹⁷ d'atteindre des niveaux de population très élevés (Netherer et Schopf, 2010).

17. Coléoptère dont les larves se développent dans le bois. Les adultes y forment des galeries de ponte qui peuvent entraîner la mort de l'arbre.

Le changement climatique affecte aussi la phénologie, et donc la synchronie entre le débourrement de l'arbre et la sortie de l'insecte ou la sporulation¹⁸ du pathogène. Une meilleure synchronie favorise désormais l'oïdium du chêne (Granier *et al.*, 2013). Une désynchronisation est observée chez la tordeuse du mélèze (Granier *et al.*, 2013) et la phalène brumeuse (Van Asch *et al.*, 2007), mais la synchronie pourrait être rétablie grâce à leur capacité d'adaptation ou à la pression de sélection.

Malgré les incertitudes liées à la variabilité des réponses, à la complexité des interactions entre espèces et aux composantes multiples du changement climatique, une tendance à la recrudescence des insectes ravageurs et pathogènes semble se dégager, et pourrait se poursuivre dans les prochaines années. Leurs attaques peuvent perturber la dynamique forestière car ils affaiblissent les arbres et peuvent aussi limiter leur croissance. En conjonction avec d'autres facteurs, ils peuvent même concourir à la mort de l'arbre.

Figure 13 – Insectes répondant au changement climatique



Sources : a) la phalène brumeuse, © L. M. Nageleisen, DSF; b) la tordeuse grise du mélèze, © O. Denux, INRA; c) le typographe, © L. M. Nageleisen, DSF; d) la processionnaire du pin, © L. M. Nageleisen, DSF.

18. Processus de formation et de libération des spores (cellules ou ensemble de cellules de multiplication végétative ou de reproduction).

Enfin, le nombre d'invasions de nouveaux insectes ravageurs et pathogènes ne cesse d'augmenter à cause des activités humaines (Desprez-Loustau, 2009 ; Roques, 2010). Cette problématique doit être prise en compte pour l'adaptation au changement climatique car un certain nombre d'espèces exotiques pourraient s'établir plus facilement sous un climat plus chaud (Walther *et al.*, 2009).

Tableau 2 – Principaux insectes ravageurs et pathogènes des forêts françaises jusqu'en 2010, en termes de fréquence et d'impact

Arbre	Insectes	Pathogènes
Châtaignier		<i>Cryphonectria parasitica</i> (chancre du châtaignier)
Châtaignier et chêne		<i>Phytophthora cinnamomi</i> (encre du châtaignier et du chêne)
Chêne	Processionnaire du chêne	<i>Collybia fusipes</i> (collybie à pied en fuseau)
	Tordeuse verte du chêne	<i>Erisiphe alphitoïdes</i> (oïdium des chênes)
Conifère	Typographe	<i>Heterobasidion annosum</i> (<i>Fomes</i>)
Épicéa	Dendroctone de l'épicéa	
Épicéa de Sitka	Puceron vert de l'épicéa	
Feuillus	Bombyx disparate	
	Phalène brumeuse	
Hêtre	Cochenille du hêtre	<i>Nectria ditissima</i> (chancre du hêtre)
Mélèze	Tordeuse grise du mélèze	
Peuplier	Puceron lanigère du peuplier	<i>Melampsora</i> spp (rouilles du peuplier)
Pin	Processionnaire du pin	<i>Diplodia pinea</i> (sphaeropsis des pins)
	Pyrale du tronc	<i>Dothistroma septospora</i> (maladie des bandes rouges)
	Sténographe	<i>Melampsora pinitorqua</i> (rouille courbeuse)
Pin maritime	Cochenille du pin maritime	
Résineux	Hylobe	

Les cases rosées indiquent les espèces ayant un niveau de population plus élevé ou bien étendant ou déplaçant leur aire de distribution. Le rôle du changement climatique est montré seulement pour les espèces en gras (voir également figure 13).

Sources : Marçais et Robinet, 2011, d'après Lanier *et al.*, 1976 ; Desprez-Loustau *et al.*, 2006 ; Nageleisen *et al.*, 2010.

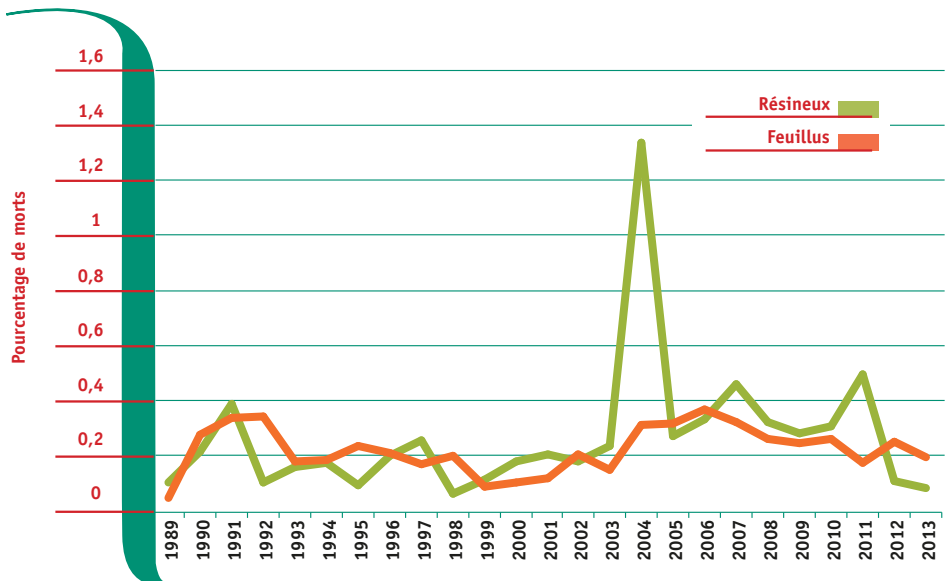
La modification des équilibres compétitifs entre espèces

Les déplacements d'aires des espèces végétales, que nous avons envisagés jusqu'ici de façon théorique, correspondent sur le terrain à des modifications des équilibres compétitifs entre espèces. Une telle modification a été observée par exemple dans le massif du Montseny, en Catalogne, où les surfaces de hêtraie ont régressé au profit du chêne vert au cours des cinquante dernières années (Peñuelas et Boada, 2003). Un processus similaire semble s'amorcer dans le massif de la Sainte-Baume, où la productivité du pin d'Alep, au nord de son aire, a augmenté avec le réchauffement, tandis que celle du pin sylvestre, en marge sud de sa répartition, diminuait (Vennetier *et al.*, 2007).

Sur son front de progression, une espèce peut gagner en productivité, en capacité à produire des graines, ou à les installer avec succès. La vitesse réelle de colonisation diffère sensiblement de la vitesse de déplacement de la niche climatique. En effet, l'installation de nouveaux semis reste subordonnée à la dissémination des graines par la gravité, le vent ou les animaux. Dans le cas du chêne vert, la colonisation est environ 100 fois moins rapide qu'elle ne devrait l'être pour suivre l'évolution du climat, et cette vitesse de colonisation ne dépasse pas quelques dizaines de mètres par siècle pour certaines espèces (Dupouey *et al.*, 2002). De surcroît, l'installation des semis doit trouver des terrains disponibles, dans un paysage fragmenté où la forêt est en concurrence avec l'agriculture et l'urbanisation.

Dans la zone de retrait, les individus installés à la faveur d'un climat passé favorable souffrent de plus en plus souvent d'épisodes climatiques qui altèrent leur vitalité, leur productivité ou leur capacité à produire des graines viables. Cependant, les arbres ont une grande aptitude à durer, héritée de leur histoire évolutive, et donc à endurer les accidents climatiques ; il est donc probable que des individus, voire des populations entières, puissent persister bien après que le climat leur est devenu en moyenne défavorable. Certaines populations peuvent aussi se maintenir à la faveur de refuges locaux : sols profonds, nappes d'eau permanentes accessibles aux racines, vallons encaissés... On peut imaginer que des régressions se produisent par un accroissement progressif de la mortalité naturelle, ou au contraire de façon brutale, par franchissement des seuils de tolérance physiologique de l'espèce. Il est très probable que ce soient les événements climatiques exceptionnels qui révèlent l'inadaptation de l'espèce au climat. Les pics de mortalité observés après la sécheresse de 2003 (voir fig. 14) donnent un aperçu de ce type de scénario (Goudet, 2013).

Figure 14 – Variation du taux de mortalité observé de 1989 à 2013



Observations dans le réseau systématique de suivi des dommages forestiers, après les sécheresses de 1989-1991, 2003, 2011.

Source : Goudet, 2013.

On comprend ainsi que les évolutions de la flore peuvent avoir une certaine inertie par rapport à l'évolution du climat, en particulier en plaine (Bertrand *et al.*, 2011).

Encadré 4

Impacts observés et attendus sur la biodiversité : une diversité de mécanismes d'action, mais un rôle déterminant de la végétation

On observe des phénomènes de migration vers le nord et/ou en altitude pour la plupart des organismes en réponse au changement climatique de ces dernières décennies (Feehan *et al.*, 2009). Mais beaucoup d'espèces ne parviennent pas à migrer aussi vite que le climat se réchauffe, et les communautés accumulent un retard adaptatif, estimé en Europe à 212 km pour les oiseaux et 135 km pour les papillons (Devictor *et al.*, 2012).

Le réchauffement climatique a également engendré le décalage des cycles de vie chez certains animaux. De nombreuses études attestent d'un avancement de la date de ponte et des périodes de migration des oiseaux en réponse à l'augmentation des températures. Ces phénomènes semblent d'autant plus marqués que les contraintes sont fortes (zone arctique, milieu urbain) et plus atténués en région tempérée. Les espèces animales pourraient être affectées par ces modifications en cas de décalage des naissances avec la disponibilité des ressources alimentaires. Par exemple, ces trente dernières années, le chevreuil n'a pas modifié ses dates de mise bas, alors que la phénologie de la végétation a avancé de dix-huit jours (Plard *et al.*, 2014). Ce décalage est susceptible d'avoir des conséquences très négatives pour le succès reproducteur de cette espèce.

Pour l'heure, peu de cas de disparition d'espèces sont directement imputables aux changements du climat. Mais, dans un avenir proche, l'ensemble des relations entre espèces pourrait être affecté. Une moindre prédation sur les ravageurs aggraverait l'ampleur des dommages, tandis qu'un décalage entre le cycle de vie des animaux et la disponibilité de la ressource apparaît comme une menace pour leur survie.

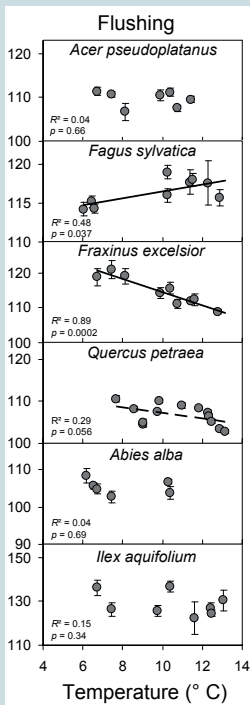
D'une façon générale, l'état du couvert arboré (composition, densité, structure...) conditionne en grande partie la vie des espèces animales de la forêt, leur fournissant les habitats et les ressources de leurs chaînes trophiques. À l'échelle des grandes variations climatiques de ces derniers 200 000 ans, une étude très récente a montré que les communautés d'oiseaux sont plus liées à la végétation présente qu'aux paramètres climatiques (Holm et Svenning, 2014), laissant supposer que les adaptations des organismes sont intimement dépendantes de la réponse de la végétation.

La diversité intraspécifique : un atout adaptatif

• Une grande diversité génétique au sein des espèces d'arbres

Les plantations comparatives de provenance¹⁹, c'est-à-dire l'installation dans une même parcelle de plants d'une même espèce issus de graines de différentes origines géographiques, ont montré que la diversité génétique au sein des espèces d'arbres est très grande et que les provenances sont globalement adaptées aux conditions climatiques de leur aire d'origine. Ainsi, certaines sont plus tolérantes au stress (froid, sécheresse), tandis que d'autres, moins tolérantes, sont aussi plus performantes en conditions non stressantes, comme chez le mélèze (Pâques, 1996), le pin contorta (Rehfeldt *et al.*, 2001), le pin sylvestre (Rehfeldt *et al.*, 2002). Le choix des provenances en plantation doit en tenir compte : on se souvient de l'impact dramatique du froid de 1985 dans les Landes sur certaines provenances portugaises de pin maritime, plus vigoureuses mais moins tolérantes au froid. La diversité des adaptations locales s'observe aussi sur de courtes distances géographiques (voir encadré 4). On sait en revanche peu de chose sur le comportement des provenances en condition de déficit hydrique intense ou répété.

Encadré 5



Différenciation de populations à courte distance

Sur un gradient altitudinal pyrénéen, Vitasse *et al.* (2009) ont montré l'existence d'une diversité phénologique marquée entre populations chez plusieurs espèces : quand les plants sont expérimentés dans un environnement commun, les populations d'altitude débourrent plus tôt que les populations de basse altitude chez le hêtre – la relation est inverse chez le chêne. La divergence adaptative entre populations suit ici le gradient climatique : il y a autant de divergence génétique adaptative entre populations relativement proches sur un gradient climatique altitudinal qu'entre populations plus distantes sur un gradient climatique latitudinal.

Dates de débourrement en 2007 pour les populations des six espèces étudiées en plantation comparative, en fonction de la température moyenne de leur site de provenance.

Source : Vitasse *et al.*, *Canadian Journal of Forest Research*, 2009.

19. Lieu d'origine d'un peuplement dont les graines sont récoltées pour la production de plants forestiers.

La diversité génétique évolue en permanence, naturellement, mais aussi sous l'influence de l'homme.

Les forestiers utilisent les essences au-delà de leur aire d'origine, parfois dans des conditions climatiques totalement différentes. Ainsi le pin radiata est l'une des espèces les plus largement plantée sur le globe alors que les populations d'origine sont cantonnées à une aire restreinte de Californie. Le tableau 3 illustre la diversité des conditions dans lesquelles l'espèce pousse bien et se régénère, grâce aux programmes d'amélioration génétique qui ont sélectionné des variétés adaptées aux conditions présentes dans chacune de ces zones.

L'évolution génétique est aussi à l'œuvre naturellement. Par leur histoire et leurs caractéristiques biologiques, les arbres sont parmi les organismes possédant la plus grande diversité génétique. En raison de la reproduction sexuée, chaque arbre est une combinaison unique des gènes hérités de ses parents. Au fil des générations, la diversité génétique des populations ne cesse d'évoluer. Ainsi, la diversité génétique actuelle des populations est à la fois la marque de l'action des forces évolutives passées, anciennes et récentes, et le réservoir qui détermine leur potentiel d'évolution. Si on compare en plantation des familles issues de différents arbres-mères d'une même forêt, on constate en général que la plus grande part de la diversité génétique se trouve à l'intérieur des populations, plus encore qu'entre populations (par exemple Alberto *et al.*, 2013 indiquent que, en moyenne, plus de 75 % de la diversité génétique pour le débourrement végétatif se situe au niveau intrapopulation).

Cependant l'évolution génétique a ses limites et ne pourra pas tout résoudre. Les évolutions génétiques notamment prennent du temps (au moins une génération...). Le changement climatique joue sur les facteurs d'évolution de la diversité : mortalité (massive et destructrice, ou sélective dans le cas de dépérissements partiels), et reproduction (fécondité, qualité de la fructification, phénologie de la floraison).

Tableau 3 – Diversité des conditions d'acclimatation du pin radiata

Région	Précipitations annuelles (en mm)	T. moy. mois le plus froid (en °C)	T. moy. mois le plus chaud (en °C)
Aire d'origine			
Californie (5 populations)	420-700	10-11	16-18
Zones d'introduction			
Nouvelle-Zélande (Southland)	960-1 000	3-5	13-15
Nouvelle-Zélande (Kaingaroa)	1 300-1 500	7-9	11-19
Chili (Valdivia)	2 350	7,7	17
Afrique du Sud (Le Cap)	900-1 100	10-13	20-24
Chine (Sichuan)	490-590	- 3,4- - 0,7	25-28
Australie (Bathurst)	650-950	0,4-0,6	24-28
Australie (Tumut)	800-1 300	0,5-0,8	25-30

Conditions climatiques de l'aire d'origine et de diverses zones d'introduction du pin radiata.
Source : d'après Yan *et al.*, *Forest Ecology and Management*, 2006.

- *Mieux comprendre les mécanismes qui agissent sur cette dynamique*

Face au changement climatique, les capacités d'adaptation des forêts (ampleur et vitesse de l'évolution et seuils de rupture) restent mal connues : elles dépendront, d'une part, du réservoir de diversité (les ressources génétiques) et, d'autre part, de l'intensité des forces évolutives. Tout cela varie selon les régions géographiques et selon les espèces. Politique et gestion forestières peuvent influencer non seulement sur la diversité génétique mais aussi sur les forces évolutives. Comprendre les processus de cette dynamique permettra de mieux les piloter (Valadon, 2009 ; Lefèvre, 2012). En forêt tout particulièrement, le changement climatique ne doit pas être considéré comme un nouvel état de la planète, mais comme un contexte durable de transition. Ainsi, compte tenu de la durée du cycle forestier, les reproducteurs sont sélectionnés dans des conditions que ne connaîtront plus leurs descendants du lieu considéré.

Le rôle déterminant des accidents climatiques sur la dynamique forestière

- *Vers une augmentation des accidents climatiques*

Le changement climatique se traduit par des dérives des normales climatiques, perceptibles et significatives à moyen terme, typiquement au-delà de plusieurs décennies. Mais la variabilité intrinsèque naturelle du climat est sensible à court terme, et génère des événements climatiques extrêmes. Les projections des climatologues convergent vers une accentuation de ces épisodes extrêmes²⁰ au cours des décennies à venir, avec des fréquences de retour telles que les peuplements forestiers pourraient être plusieurs fois impactés au cours d'une révolution²¹ (Parry *et al.*, 2007 ; Haarsma *et al.*, 2013).

Un nouvel ensemble de modèles de changement climatique régional pour l'Europe (résolution horizontale de 12,5 km), EURO-CORDEX²² (Jacob *et al.*, 2013) confirme les résultats du projet de recherche ENSEMBLES²³ :

- une augmentation de la fréquence des vagues de chaleur, des sécheresses, une aggravation continue de l'intensité moyenne des sécheresses édaphiques en France d'ici à la fin du siècle (Vidal *et al.*, 2012, projet CLIMSEC²⁴) ;
- des changements saisonniers d'événements de pluies intenses.

20. L'accentuation des épisodes extrêmes est à comprendre en termes de dépassement de seuil. En termes de quantiles des événements les plus marqués elle n'est pas avérée.

21. Durée d'un cycle de production, depuis l'installation d'un peuplement jusqu'à son renouvellement.

22. Partie européenne de l'initiative internationale CORDEX, programme financé par le WRCP.

23. Projet mené sur la période 2004-2009 et appartenant au programme européen FP6-6^e PCRD.

24. Projet mené sur la période 2008-2011, en collaboration avec plusieurs institutions françaises, par la direction de la climatologie de Météo-France et le CNRM-GAME. Il a permis de caractériser la typologie des sécheresses en Métropole sur la période 1958-2008 et d'établir un diagnostic sur leurs évolutions attendues au cours du ^{xxi} siècle.

En conséquence, la réduction de la teneur en eau des ligneux pourrait augmenter l'inflammabilité de la végétation, le risque d'incendie (Alessio *et al.*, 2008) et de propagation du feu (McKenzie *et al.*, 2004).

- *Dommmages causés et récupération différenciée selon les aléas et les espèces*

Les impacts de ces aléas peuvent être réfléchis à partir des acquis de l'écologie forestière. Les analyses rétrospectives des séries climatologiques nous rappellent en effet que l'amplitude interannuelle passée des variations du climat est, à certaines échéances temporelles au moins, du même ordre de grandeur, sinon supérieure, aux changements projetés par certains scénarios climatiques. Or les écosystèmes sont capables de faire face à cette variabilité interannuelle par des mécanismes de régulation et d'ajustement.

Toutefois, les aléas thermiques ou hydriques extrêmes, en particulier aux saisons intermédiaires (automne, printemps), ainsi que les tempêtes provoquent des chocs contre lesquels les arbres n'ont pas le temps de mettre en place des mécanismes d'acclimatation ou d'ajustement. Ils provoquent des dommages écologiques et économiques forts, rapides, dont la récupération souvent partielle nécessitera plusieurs années (Bréda et Badeau, 2008).

Ainsi, les tempêtes²⁵ (voir encadré 6) provoquent des dégâts massifs et visibles immédiatement, tandis que les sécheresses, exceptionnelles par leur intensité, leur précocité ou leur récurrence, ont toutes provoqué des perturbations plus insidieuses, durables et suivies de dépérissements complexes (voir fig. 15). La vulnérabilité accrue des arbres ainsi affaiblis amplifie les dommages des maladies et des ravageurs (Bréda *et al.*, 2006). Les conséquences de ces aléas sur la dynamique de la forêt française sont illustrées par des cas emblématiques : plantation de pins après dépérissement de chênes (forêts de Vierzon, de Tronçais...), ou replantation à l'identique (épicéa dans les Vosges ou pin maritime dans les landes après 1999). Dans le contexte de notre forêt gérée, les conséquences des choix des aménagistes marquent l'évolution des paysages autant, sinon plus, que l'épisode climatique en lui-même.

25. En ce qui concerne les tempêtes, aucune évolution claire n'est projetée par les simulations au niveau de la France métropolitaine, ni en termes de trajectoire, ni en termes d'intensité, ni en termes de fréquence.

Figure 15 – Dépérissement de sapins dans la montagne de Bleine



Source : © J. Ladier, ONF, (voir lettre de l'ONERC n° 8, mars 2011).

Lorsque plusieurs espèces s'associent dans le peuplement, les sécheresses extrêmes peuvent provoquer des mortalités différentielles. En effet, les espèces perçoivent la sécheresse de façon différente, en raison d'enracinements ou de phénologies contrastées, et elles peuvent également présenter des susceptibilités différentes aux attaques des ravageurs secondaires²⁶.

Les peuplements, qui semblent avoir récupéré, peuvent révéler des altérations plus subtiles, consistant en des récupérations partielles du niveau de croissance précédant le choc météorologique, avec des modifications de compétitivité entre arbres ou entre espèces aboutissant à des changements de statut des individus ou à des changements de composition en espèces des peuplements.

26. Insectes qui attaquent des organes vivants d'arbres présentant déjà des signes d'affaiblissement.

Encadré 6

Même si le risque de tempête ne s'accroît pas, les dégâts à la forêt devraient augmenter

Les tempêtes sont la première cause de pertes en volume dans les forêts d'Europe (Schelhaas *et al.*, 2003). Après une première moitié du ^{xx}e siècle peu ventée, une forte augmentation de la fréquence des tempêtes majeures a été observée (Della-Marta et Pinto, 2009). Cela a conduit les forestiers à se préoccuper de ce risque en améliorant considérablement la connaissance des facteurs de vulnérabilité (Birost *et al.*, 2009). Néanmoins, le risque tempête est rarement associé au changement climatique en France.

En effet, contrairement aux prédictions d'autres pays d'Europe, les modèles climatologiques ne convergent pas sur un accroissement certain de la fréquence ou de la violence des tempêtes à la latitude de la France. Certains modèles (Haarsma *et al.*, 2013) prévoient néanmoins des changements radicaux, liés au réchauffement des océans, avec de nouvelles tempêtes d'automne arrivant par le golfe de Gascogne, issues du déplacement de cyclones tropicaux américains. De plus, certaines autres modifications du régime saisonnier affectent le risque : une augmentation des pluies pendant l'hiver augmentera le risque de renversement des arbres par saturation du sol en eau (Gardiner *et al.*, 2010).

En outre, le risque ne dépend pas que du vent mais aussi des propriétés des forêts impactées par le changement climatique, comme leur composition en essences, et de leurs vulnérabilités différenciées (Colin *et al.*, 2009). Les effets des propriétés des arbres, du peuplement (dont le sol) et du paysage sont complexes, et leur modélisation (Gardiner *et al.*, 2008 ; Heinonen *et al.*, 2009) est en cours d'adaptation aux forêts françaises. On observe un effet majeur de la hauteur des arbres. Or, les augmentations de productivité au cours des 150 dernières années se sont traduites par une hauteur plus importante (voir fig. 7), et donc par une plus grande sensibilité au vent, à un âge donné. Si l'on prolongeait la tendance actuelle d'accumulation du volume sur pied, les niveaux de dommage pourraient doubler d'ici à la fin du siècle (Gardiner *et al.*, 2010). L'adaptation des systèmes sylvicoles consiste donc d'abord à récolter les arbres de façon plus dynamique.

Enfin, la résistance aux tempêtes des arbres dépend aussi des vents normaux en saison de végétation (Telewski, 1995). En effet, les arbres acclimatent leur croissance en fonction du vent ordinaire : lorsqu'ils sont protégés des flexions dues au vent, ils réduisent la croissance racinaire

en diamètre et poussent plus en hauteur (e. g. Meng *et al.*, 2006), ce qui les fragilise. Ce processus est responsable de la vulnérabilité plus grande des lisières nouvelles et des éclaircies récentes, ou de la forte résistance des arbres battus par les vents. Or, cette acclimatation au vent pourrait aussi être modifiée par le changement climatique.

Imaginons : quels scénarios pour le XXI^e siècle ?

Quel devenir pour les grandes essences emblématiques ?

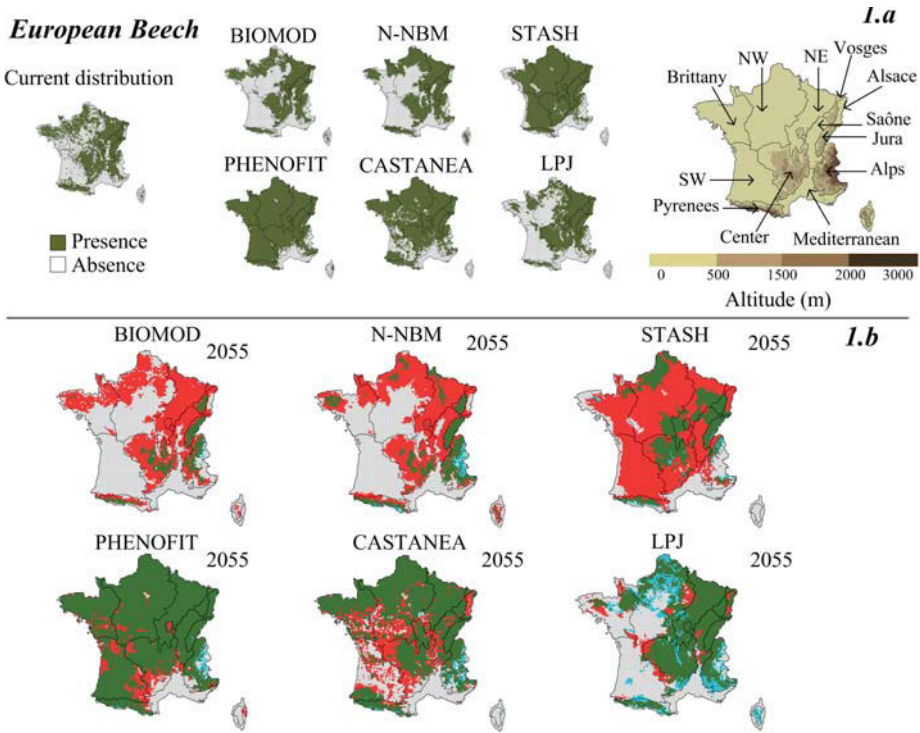
Au cours des dix dernières années, les espèces majeures de la forêt métropolitaine ont fait l'objet de publications projetant les impacts du changement climatique sur leur aire en France (à l'exception notable du chêne pubescent). Ces publications permettent de brosser un panorama qui doit cependant être considéré avec circonspection. L'objectif de ces travaux, divers dans leurs approches et dans les hypothèses climatiques envisagées, n'était en effet pas de livrer des projections à visée opérationnelle, quantifiées et comparables, mais plutôt d'explorer scientifiquement différentes méthodes.

- *Grands feuillus de plaine : des incertitudes importantes, mais un fort recul potentiel*

Le hêtre (15 % de la surface forestière de production) est l'une des premières espèces à avoir bénéficié de travaux de modélisation, encouragés par le lien manifeste entre sa répartition et les caractéristiques du climat (en l'occurrence le déficit hydrique). Les approches corrélatives simulent son retrait sur 60 à 70 % de son aire actuelle, à l'horizon 2055 selon un scénario médian²⁷ (Cheaib *et al.*, 2012 ; Piedallu *et al.*, 2009), avec un repli vers les massifs montagneux et le nord-est de la France. Les approches basées sur les processus (par exemple *Castanea*, voir fig. 15) sont nettement moins pessimistes, notamment les modèles à base écophysiologique qui prennent en compte l'effet favorable de l'augmentation du CO₂ atmosphérique.

27. Scénario A1B X Arpège, *in* Cheaib *et al.*, 2012), encadrement par les scénarios B2 et A2 X HadCm3 *in* Piedallu *et al.*, 2009).

Figure 16 – Répartition du hêtre en France



(a) Répartition actuelle observée (IGN) et simulée par différents modèles.

(b) Changements projetés :

Rouge : présence actuelle d'après le modèle, mais absence en 2055.

Bleu : absence actuelle d'après le modèle, mais présence en 2055 ;

Vert : présence actuelle d'après le modèle ainsi qu'en 2055 ;

Gris : absence actuelle d'après le modèle ainsi qu'en 2055.

Source : d'après Cheaib *et al.*, *Ecology Letters*, 2012.

Considérés ensemble, les chênes sessile et pédonculé constituent la première espèce de la forêt métropolitaine. Les approches corrélatives conduisent à un pronostic pessimiste pour le chêne sessile (Piedallu *et al.*, 2009 ; Cheaib *et al.*, 2012), dont 30 à 40 % de l'aire actuelle deviendraient inhospitaliers pour l'espèce à la moitié du *xxi*^e siècle selon des scénarios médians. Le chêne pédonculé apparaît potentiellement plus vulnérable au déficit hydrique (Bréda *et al.*, 1993), bien que la différence de pronostic entre les deux espèces soit difficilement appréciable dans les résultats de modélisation publiés à ce jour²⁸. Comme dans le cas du hêtre, les modèles à base écophysologique prennent en compte

28. Les difficultés de discrimination des deux espèces et la complexité des relations écologiques qu'elles entretiennent rendent délicate la modélisation de leur enveloppe climatique propre, surtout pour le chêne pédonculé.

un effet compensateur du CO₂, et projettent le maintien de ces espèces emblématiques de nos forêts, au sujet desquelles incertitudes et enjeux sont à leur comble.

- *Une extension des zones climatiquement favorables au chêne vert*

À l'instar du hêtre, le chêne vert suit une répartition à déterminisme climatique clair. Les modèles corrélatifs, ainsi que les modèles basés sur les processus simulent une extension importante de son aire potentielle (Badeau *et al.*, 2010; Cheaib *et al.*, 2012), dont l'occupation réelle sera cependant drastiquement limitée par sa vitesse de colonisation – sauf si sa migration est volontairement favorisée par les forestiers.

- *Les résineux de montagne : régression globale et changements d'équilibre*

Le sapin et l'épicéa ont fait l'objet de quelques travaux de modélisation de l'impact du changement climatique (Badeau *et al.*, 2010; Piedallu *et al.*, 2009), ce retrait serait de l'ordre de 60 % pour le sapin et de 90 % pour l'épicéa, à l'échelle de leur aire française²⁹.

Le sapin, espèce des montagnes méditerranéennes, est cependant mieux adapté aux climats chauds et secs que l'épicéa, espèce circumboréale³⁰. Il pourrait ainsi lui-même bénéficier du réchauffement, au détriment de l'épicéa, dans la zone où les deux espèces coexistent (Gomez, 2012).

- *Le cas des pins : expansion du pin maritime, recul du pin sylvestre ?*

Les pins sont des espèces importantes de la forêt française, mais la relation de leur répartition avec le climat est délicate. En effet, leur tempérament pionnier³¹ conduit à leur élimination progressive lors de la maturation des forêts³², sauf dans les situations les plus difficiles écologiquement. Leur frugalité a assuré leur succès en tant qu'essences de reboisement des terrains difficiles – de sorte que leur aire obéit à un faisceau de mécanismes dynamiques et historiques complexe. Le pin maritime, originaire de climats chauds pour notre pays (Aquitaine et zone méditerranéenne), voit sa productivité potentielle stimulée par le réchauffement, notamment dans la moitié nord de la France, tandis qu'elle se maintient dans le Sud au moins à moyen terme (2050), (Loustau *et al.*, 2004). Compte tenu de son aptitude à produire du bois dans des conditions de sols variées, il représente un espoir pour les sylviculteurs du nord de la France, tempéré par les menaces

29. Encadrement par les scénarios B2 et A2 X HadCm3 (Piedallu *et al.*, 2009).

30. Qui appartient à la zone tempérée froide de l'hémisphère Nord.

31. Groupe d'espèces qui s'installe en premier dans un milieu récemment ouvert.

32. Processus d'évolution d'un couvert forestier après une perturbation (incendie, coupe...), caractérisé par la dominance croissante d'espèces supportant la concurrence et par l'élimination progressive des espèces pionnières.

sanitaires qui pèsent sur lui, notamment avec le risque d'arrivée en France du nématode du pin.

Le pin sylvestre a bénéficié de travaux récents, associant cinq modèles différents, corrélatifs et basés sur les processus (Cheaib *et al.*, 2012). L'aptitude de ces modèles à rendre compte de la répartition actuelle de l'espèce est médiocre (notamment pour les raisons évoquées ci-dessus), mais l'ensemble des approches concordent pour simuler une rétraction importante de son aire. Une telle tendance semble déjà confirmée par la dégradation de l'état sanitaire des populations observée en limite chaude de son aire, dans le Valais suisse ou les Alpes-Maritimes (voir l'illustration placée en tête de ce chapitre).

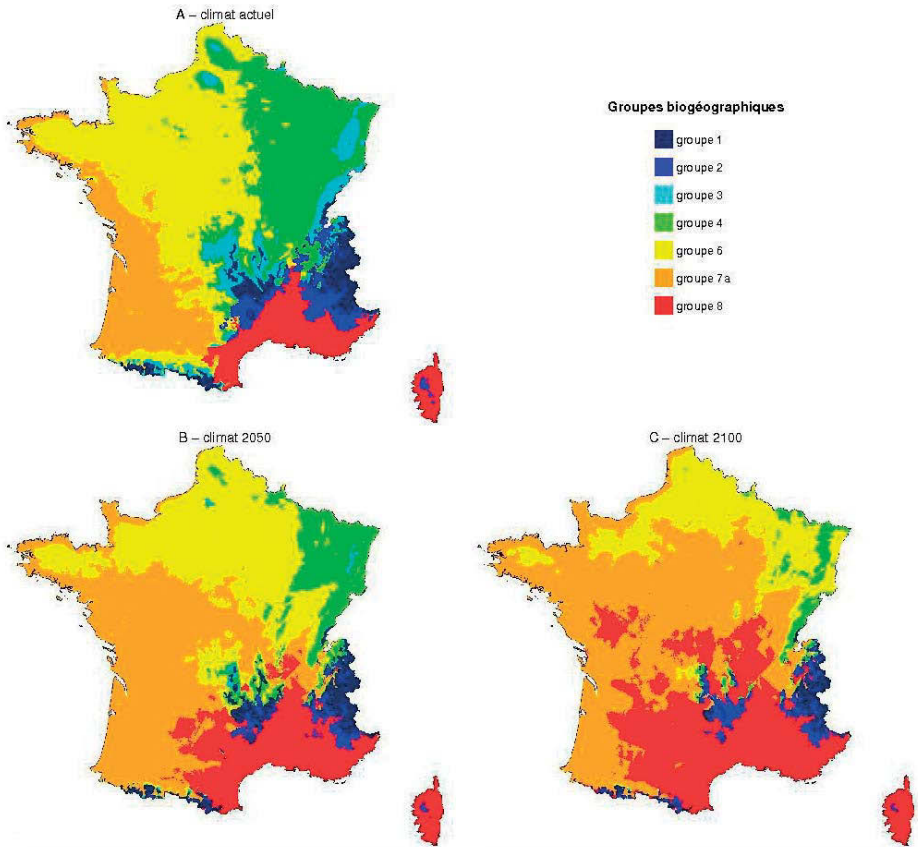
Remaniement ou bouleversement des paysages forestiers?

Prenons un peu de recul pour imaginer ce que pourrait être l'évolution du paysage forestier vers la fin du *xxi*^e siècle. Malgré leurs limites, les approches corrélatives sont les seules permettant de prendre en compte de façon globale l'ensemble des ligneux forestiers (Badeau *et al.*, 2010), voire l'ensemble des espèces végétales, en analysant leur fréquence par région. D'autres travaux en cours de développement (Le Bouler *et al.*, 2014) permettent de traiter les espèces de façon générique, et donc de considérer l'évolution simultanée d'un grand nombre d'espèces à l'échelle du continent. Quel aperçu nous donne ces travaux de l'évolution des grands types de paysages forestiers?

Les climats français s'organisent autour de trois pôles : le pôle méditerranéen, le pôle atlantique et le pôle montagnard (Joly *et al.*, 2010). La combinaison des gradients climatiques correspondants (« méditerranéité », continentalité et altitude) permet de partitionner la France en zones climatiques, qui structurent également la flore forestière (voir fig. 17a). Avec le changement climatique, le découpage de ces zones bioclimatiques se modifie (voir fig. 17b). En particulier, les climats chauds à contrainte hydrique forte s'étendent depuis la zone méditerranéenne vers l'ouest, en Aquitaine et dans le bassin de la Loire, ainsi que le long de la vallée du Rhône vers le nord.

Pour les scénarios climatiques les plus modérés (en pratique jusqu'à 2 °C de réchauffement), bien que le climat devienne par endroit inhospitalier pour certaines espèces, une partie de la flore locale reste adaptée, suffisamment pour que le paysage forestier ne soit pas considérablement perturbé, malgré des évolutions de composition.

Figure 17 – Les bioclimats de France et leur projection en climat futur



(a) Répartition géographique de sept groupes d'espèces de même affinité climatique, obtenus par analyse discriminante sur le climat actuel ;

(b) Projection de ces bioclimats en 2050 ;

(c) Projection de ces bioclimats en 2100.

Scénario A2 Arpège.

Source : Badeau, *in* Loustau, éd., Quae, 2010.

Pour les scénarios présentant un fort réchauffement et une aggravation du déficit hydrique, des climats aussi chauds et secs que l'actuel climat méditerranéen gagnent une partie importante de la moitié nord, ce qui devrait s'accompagner d'un bouleversement complet de la flore, et donc des écosystèmes forestiers dans leur ensemble. Dans ces scénarios, des mesures actives d'adaptation sont indispensables pour maintenir ou restaurer des services écosystémiques de toute façon modifiés ou redistribués en fonction du climat. La productivité en bois en particulier serait, selon ces hypothèses, en diminution en fin de siècle dans le sud et dans une grande partie de l'ouest de la France, comme l'ont montré les projets

successifs Carbofor³³ (Loustau, éd., 2010), Climator³⁴ (Brisson et Levrault, éd., 2010) et FAST³⁵ (Granier, coord., 2013).

Ainsi les approches corrélatives permettent de considérer non seulement des espèces isolément, mais également de projeter l'évolution potentielle de la composition en espèces des écosystèmes.

Cependant notre vision des impacts potentiels du changement climatique demeure encore morcelée, conditionnée par les approches mises en œuvre, par les scénarios choisis pour les projections, et par les entités de l'écosystème considérées. Pour imaginer les futurs possibles dans une démarche globale de prise en compte du changement climatique et d'adaptation, des démarches intégratrices sont nécessaires. L'objectif serait de représenter l'écosystème de façon plus complète, dans un jeu de scénarios décrivant l'ensemble des possibles, et surtout en intégrant les connaissances apportées par les différentes disciplines. Or, si l'approfondissement des connaissances suit naturellement son cours au sein de chaque discipline, cette intégration des différentes visions disciplinaires doit être soutenue par la société et les pouvoirs publics, pour appuyer la prise en compte du changement climatique et de l'adaptation.

33. Projet du programme GICC, mené de 2002 à 2005, qui avait pour but de quantifier les impacts d'un changement climatique sur le bilan et le stockage de carbone, la production primaire et l'hydrologie des grands écosystèmes forestiers français (feuillus sociaux de plaine, pinède atlantique, chênaie méditerranéenne), ainsi que des plantations industrielles d'eucalyptus en milieu tropical.

34. Projet ANR, mené de 2007 à 2010, qui visait à fournir des méthodes et des résultats sur l'impact du changement climatique sur des systèmes cultivés variés, à l'échelle de la parcelle, et dans des climats contrastés français.

35. Projet du programme GICC, mené de 2009 à 2013, qui a pour objectif d'analyser les évolutions régionalisées de la forêt métropolitaine face aux aléas climatiques et biotiques.

Chapitre C

La forêt protectrice face au changement climatique

**Guy Landmann, GIP Ecofor,
Frédéric Berger, IRSTEA,**

© CNPF / Catherine Michel CRPF PACA



Tel que décrit dans le chapitre B, la forêt est soumise à différents aléas – le feu, le vent, la sécheresse, les agents pathogènes – qui verront leurs impacts modifiés à des degrés divers par le changement climatique.

L'altération de l'état de la forêt peut mettre directement en danger certaines implantations humaines ou handicaper certaines activités économiques. La forêt assure ainsi des fonctions de protection qui sont tangibles en cas de défaillance (disparition, même transitoire, du couvert forestier). Ces fonctions restent dans les mémoires quand des accidents majeurs sont arrivés, mais sont tout à fait invisibles quand elles sont bien assurées. À la difficulté de bien appréhender et préserver ces fonctions à l'heure actuelle s'ajoute à présent celle d'anticiper – avec la part d'incertitude que cela comporte – la manière dont le changement climatique pourrait les influencer.

Les enjeux liés à une altération éventuelle de la fonction de protection des forêts sont de plusieurs ordres. La forêt intervient à des degrés divers en limitant ou en freinant :

- le départ d'avalanches en milieu forestier ;
- le départ et l'impact des chutes de blocs ;
- les mouvements de terrain ;
- l'érosion des berges de cours d'eau.

La plupart de ces effets concernent les zones montagneuses où la hausse des températures sous l'effet du changement climatique sera relativement plus rapide qu'en plaine. En conséquence, ces forêts seront soumises à une évolution très rapide des contraintes liées au réchauffement (risque incendie, dépérissement, attaques parasitaires).

Si la forêt venait à brûler ou à dépérir, ces fonctions protectrices pourraient être mises en défaut, et des biens (habitations, infrastructures) et des personnes mais également les écosystèmes sensibles qui en dépendent seraient directement affectés, parfois de façon catastrophique.

Pour chacun de ces effets protecteurs, ce chapitre traite brièvement de leur ampleur, des mécanismes en jeu et des conséquences potentielles du changement climatique. Pour être exhaustif, d'autres aspects seraient à considérer, par exemple le rôle des arbres dans le maintien de certaines dunes du littoral.

Figure 18 – Après le feu, une période délicate vis-à-vis des diverses fonctions de protection remplies par la forêt



Source : Marie-Laure Gaduel, CRPF PACA © CNPF.

Limitation des départs d'avalanches en forêt

Les situations avalancheuses sont le fruit de situations météorologiques extrêmes (fortes chutes de neige, redoux important) combinées à un manteau neigeux fourni. Elles sont donc surtout conditionnées par les facteurs météorologiques à très court terme (quelques jours), difficiles à modéliser sur le long terme.

Si les forêts sont impuissantes à freiner les avalanches qui ont démarré au-dessus de la limite forestière, elles limitent fortement le départ des avalanches dans la partie basse de leur occurrence, aux environs de 1 700-1 800 m. L'importance de cet effet protecteur est parfois brutalement illustrée lorsque surviennent des incendies de forêt (comme en Vallorcine en 1964) réduisant la forêt à des stades de végétation qui n'offrent plus la même efficacité de protection (en l'occurrence, des arbres de moins de deux fois la hauteur du manteau neigeux) en aval. Ces boisements dans les zones de départ d'avalanche ont en outre un rôle actif en matière de prévention d'érosion et d'inondation. Leur rôle a été identifié dès la fin du XIX^e siècle dans les Alpes ainsi que dans les Pyrénées, et de grands travaux de reboisement avaient été entrepris dès cette époque (Combes, 1989 ; Charry, 1996a et b ; De Crécy, 1988 et 1995 ; Fourchy, 1963).

L'altitude d'arrêt des avalanches référencées dans l'*Enquête permanente sur les avalanches*¹ semble avoir remonté en altitude au cours des trente dernières années. Cette propagation réduite s'explique par un plus grand nombre d'avalanches de neige humide et un moins grand nombre d'avalanches de neige sèche, en raison de la remontée de la limite pluie/neige (Météo-France, 2001). À long terme, la migration des résineux en altitude, générée par le réchauffement, devrait être favorable à la fonction paravalanche des peuplements résineux d'altitude, à une époque où les départs d'avalanches devraient se produire plus haut en altitude.

Interception de blocs

Des pierres, voire d'énormes rochers peuvent se désolidariser de leur support et dévaler la pente, entraînant des dégâts parfois considérables aux personnes et aux biens². Ces éboulements et chutes de blocs interviennent plus fréquemment les jours où se produisent des cycles de gel/dégel.

L'évolution du permagel³ (ou en anglais *permafrost*⁴) joue ici un rôle important car il influence l'hydrologie et la stabilité des versants de débris à forte pente. Or, comme des forages l'ont montré, le permagel alpin s'est déjà réchauffé au cours du xx^e siècle, de 0,5 °C à 0,8 °C dans les premières dizaines de mètres du sol (coll. PGRN, 2008a). Le suivi des chutes de blocs montre un accroissement de ces événements au cours des périodes récentes (1989-2006), (Arpa Pemonte-Cemagref, 2008), cette augmentation semble confirmée par les études dendro-géomorphologiques⁵ menées en France et dans les pays voisins (Trappmann et al., 2013 ; Stoffel et al., 2014). Les hypothèses généralement retenues à propos de l'évolution des chutes de rochers prévoient une augmentation de leur fréquence dans les zones de permagels et, plus généralement, dans les zones soumises aux phénomènes de gel/dégel, ainsi qu'une diminution dans les zones d'altitudes moins élevées (Berger et al., 2013 ; coll. PGRN, 2008b).

La disparition de la forêt et du couvert végétal accroît le risque lié aux chutes de blocs. Ainsi, après un feu de forêt, les conséquences sur le départ de chutes de

1. Enquête ayant répertorié plus 80000 événements dans les Alpes françaises depuis 1899 (voir ministère de l'Écologie et du Développement durable, *Présentation générale de l'Enquête permanente sur les avalanches* http://www.avalanches.fr/epa_observa-tion-actuelle/).

2. À l'exemple de ce rocher de plusieurs tonnes qui a frappé en 2014 le train des Pignes, près d'Annot (Alpes-de-Haute-Provence), causant la mort de deux personnes.

3. *Dictionnaire de science du sol*, 2002 : « Dans le domaine périglaciaire, couche du sol gelée en permanence, entre la couche superficielle qui gèle en hiver mais dégèle en été et la zone profonde que la rayonnement interne maintient toujours gelée ».

4. Sol gelé de manière pérenne dans lequel des températures inférieures au point de congélation de l'eau ont existé de manière continue pour une longue période, de deux à plus de mille ans.

5. Science qui interprète et date des processus géomorphologiques à l'aide de la dendrochronologie. Chaque processus géomorphologique a une influence spécifique sur le développement des arbres et a des conséquences déterminées sur la croissance de ces derniers. Ces influences sont enregistrées dans les cernes de croissance. De ce fait, l'analyse des cernes permet, dans une certaine mesure, de reconnaître les événements géomorphologiques qui ont touché l'arbre et de les dater.

blocs (contraintes thermiques et moindre maintien par les racines) et sur leurs distances d'arrêt (diminution du rôle d'écran protecteur des forêts) peuvent être considérables. Des conséquences négatives ont ainsi été observées après les feux de L'Argentière-la-Bessée (Hautes-Alpes), du Néron et de Pont-en-Royans (Isère) intervenus en 2003, selon les observations des agents locaux de l'ONF (fiches événements de la base de données « Restauration des terrains en montagne (RTM) ». En lien avec le changement climatique, la probable multiplication des feux de forêts et, dans une moindre mesure (car l'effet est moins radical), l'occurrence de dépérissements pourraient ainsi aggraver le phénomène.

Glissements de terrain

L'enracinement parfois profond des arbres (2 m en général, 10 m pour quelques espèces) accroît la cohésion des horizons de surface. Les feux de forêt, qui déstabilisent les couches superficielles du sol, diminuent cette cohésion.

Faut-il dès lors s'inquiéter de l'augmentation de ce type de phénomènes à l'avenir? Le retrait des glaciers, la dégradation des permagels mais également une augmentation éventuelle des précipitations à certaines périodes de l'année alimentent des hypothèses sur une fréquence accrue des phénomènes de glissement de terrain en haute altitude. Par contre, la (re) végétalisation progressive (spontanée, avec le réchauffement) des dépôts morainiques, talus d'éboulis, chaos rocheux, etc., pourrait diminuer la fréquence des instabilités en améliorant la cohésion des matériaux. Il n'y a toutefois pas d'observations qui corroborent cette hypothèse pour l'instant.

Notons encore que dans le cas des glissements de terrain profonds, les peuplements forestiers n'interviennent pas et que, en outre, on ignore les mécanismes à l'œuvre et l'influence éventuelle du changement climatique.

De la même façon, les forêts n'interviennent pas dans les départs de coulées ou laves torrentielles⁶, dont l'occurrence et l'intensité sont suivies⁷. Bien que les études disponibles fassent plutôt état d'une diminution récente de la fréquence des laves torrentielles, on estime que le retrait glaciaire (moraines, talus d'éboulis) et la dégradation des permafrosts (démantèlement des glaciers rocheux...) sont supposés fournir des volumes importants de matériaux mobilisables pour de futures laves torrentielles.

6. Écoulement d'un mélange d'eau (minimum 30 %), de sédiments fins et d'éléments rocheux (maximum 70 %), de diverses grosseurs, depuis les graviers jusqu'aux rochers énormes. Cet ensemble s'écoule par bouffées, d'où le terme de lave.

7. La base de données dédiée à ces phénomènes dans les Alpes françaises depuis 1970 indique plus de 100 occurrences d'impact du réseau routier.

Limitation de l'érosion de surface

L'érosion est un phénomène naturel de déplacement des particules de sol par le ruissellement (mécanisme dominant en montagne) et par le vent (dunes, par exemple). L'érosion est nettement plus importante dans des conditions de forte pente et de dénivelé, de fortes précipitations, de sol instable, tels les sols limoneux sensibles à la battance ou les sols sableux sensibles à l'érodibilité, et de sol provisoirement dépourvu de couvert végétal (Rey *et al.*, 2004, 2006, 2009).

Les effets négatifs de l'érosion sont, en France, bien connus sur les sols agricoles limoneux du nord de la France et sur les sols sud-alpins sur marnes noires. C'est dans les Alpes du Sud que la restauration des terrains de montagne (RTM) a été entreprise, au *xix*^e siècle, avec des moyens considérables, sur des terrains dégradés par un usage pastoral intensif (Combes, 1989 ; Charry, 1996a et b ; De Crécy, 1988 et 1995 ; Fourchy, 1963 ; Vallauri *et al.*, 1997). Le pin noir d'Austriche a été l'essence principalement utilisée, suivi du pin sylvestre.

La réhabilitation des zones concernées constitue une grande réussite, mais le résultat n'est pas définitif et nécessite une surveillance et une mise en œuvre de méthodes d'intervention rigoureuses sur une forte proportion de la surface forestière concernée. En effet, le feu peut découvrir le sol et le rendre sensible aux reprises d'érosion pendant plusieurs années. Les tempêtes peuvent aussi causer une reprise d'érosion, cela d'autant que les dégâts augmentent avec la maturation des peuplements (les arbres plus grands sont plus sensibles au vent). Enfin, les prélèvements de biomasse associés à l'exploitation forestière peuvent également accélérer le phénomène d'érosion s'ils mettent le sol à nu.

Si le risque d'érosion de surface en zone forestière est maximal en haute montagne, le cas de la moyenne montagne et des collines mériterait plus d'attention. Le ruissellement induit par le tassement des sols dans les voies de passage d'engins semble responsable de la plus grande partie de l'érosion hydrique sur des reliefs de collines ou de moyenne montagne (Croke *et al.*, 1999). Même si ces phénomènes sont plus localisés et plus restreints, il faut citer également l'érosion par piétinement dans les zones pâturées et les secteurs touristiques.

L'érosion peut induire, outre une perte de fertilité parfois considérable des sols concernés, d'autres effets peu spectaculaires mais très préjudiciables aux activités humaines, parmi lesquels on peut citer le comblement progressif des retenues hydrauliques et des bassins de rétention d'eau pour l'agriculture. Le coût pour la collectivité peut être considérable. En France, l'influence de l'érosion sur le remplissage du lac de Serre-Ponçon sur la Durance a été particulièrement étudiée. Plus en aval, l'érosion entraîne également des dommages aux milieux aquatiques par le colmatage des substrats des rivières (affectant la reproduction de nombreuses espèces aquatiques) ainsi que des perturbations du fonctionnement hydrologique des cours d'eau (Dambrine *et al.*, 2009).

Figure 19 – Peuplement issu de travaux de RTM : son évolution est surveillée de près



Source : © J. Ladier, ONF.

Figure 20 – Aménagements de lutte contre l'érosion



Source : Gilles Bossuet, CRPF PACA © CNPF.

Figure 21 – Érosion de berges, un aspect sensible à d'éventuels changements de régime des eaux



Source : Éric Paillassa, IDF © CNPF.

L'influence du changement climatique sur le risque érosif doit s'apprécier à l'aune d'un ensemble de facteurs de déstabilisation (voir chap. B) :

- les incendies de forêt (fréquence et sévérité accrues, extension à de nouvelles zones; Chatry *et al.*, 2010);
- les ravageurs et les pathogènes sensibles à la sécheresse et à une élévation de la température;
- les sécheresses (qui pourraient être plus fréquentes et plus sévères) et leurs effets directs (dépérissements forestiers) ou indirects (sur les ravageurs notamment).

La gestion forestière peut intégrer et atténuer la plupart de ces risques, notamment en employant de nouvelles techniques relevant du génie végétal (Vennetier *et al.*, 2013), (voir chap. D) mais elle se heurte à des limites naturelles et économiques drastiques. L'absence de gestion, de même qu'une exploitation insuffisamment respectueuse du sol, peuvent avoir des répercussions négatives.

Rôle protecteur des ripisylves

Les ripisylves sont des formations naturelles végétales qui bordent de nombreux cours d'eau. Ces formations riveraines jouent un rôle dans la stabilisation des bordures des cours d'eau et limitent leur érosion. Elles concourent à la régulation des crues et assurent bien d'autres fonctions écologiques et économiques (rôle d'épurateur des eaux, fourniture d'habitats piscicoles, fourniture de bois...). Pour autant, l'érosion des berges constitue un phénomène naturel. Ce sont les alternances des hautes et des basses eaux qui construisent et remanient les fonds et les berges. Les processus d'érosion, d'incision et de dépôts de matériaux sont

des réponses physiques naturelles, en lien avec les forces hydrauliques des écoulements. Seule l'intensité de ces processus peut indiquer un dysfonctionnement, dont l'origine est souvent liée à un déséquilibre entre les caractéristiques des débits, les quantités de matériaux à transporter, la morphologie du cours d'eau, la cohésion du substrat et, finalement, la ripisylve (Baran et Leroyer, 2007).

Le climat futur va-t-il bouleverser le régime de crues et menacer l'intégrité des berges des cours d'eau? Si le signal température est relativement clair (et a des répercussions sur la vie aquatique), les analyses réalisées sur l'évolution des débits sur les cinquante dernières années ne permettent pas de conclure à un signal clair sur les débits passés. Dans les Alpes, une augmentation de la fréquence des crues « extrêmes » a été enregistrée au cours des vingt dernières années, par rapport à la moyenne du ^{xx}^e siècle (Berger *et al.*, 2013, coll. PGRN 2008a). Ces résultats ne permettent pas plus de conclure à l'absence d'impact lié au changement climatique qu'à son existence. S'agissant des impacts futurs du changement climatique, les modèles indiquent une réduction de l'apport pluvial en été et une réduction nette des surfaces englacées. Or, on sait que les neiges et les glaciers déterminent en grande partie les débits des rivières à régime nival. À l'inverse, les modèles prévoient une augmentation des précipitations hivernales et la réduction de l'effet tampon du couvert neigeux (liée à l'élévation altitudinale de la limite pluie/neige), ce qui devrait conduire à une augmentation des crues hivernales. L'augmentation des précipitations hivernales reste cependant très incertaine (les prévisions ne sont pas stabilisées).

L'avenir pourrait donc réserver des tendances au dessèchement de certaines zones (la France ne manque pas d'eau globalement), laissant des sols plus sensibles à l'érosion (mais les activités humaines y contribueront sans doute plus sûrement), et une probabilité encore mal cernée de crues plus fortes, avec leurs cortèges éventuels d'effets indésirables. Mais, là aussi, les activités humaines (aménagement, activités agricoles, développement des énergies renouvelables, etc.) joueront un rôle de premier ordre.

Conclusion

Au terme de ce rapide tour d'horizon, il apparaît que le développement d'une gestion raisonnée de la forêt protectrice face au changement climatique nécessitera un effort important de recherche et de suivi de l'environnement, ainsi qu'une mobilisation de nombreux acteurs.

Dans le domaine de la recherche, le progrès viendra d'approches pluridisciplinaires plus poussées, associant sciences écologiques, biophysiques, économiques et humaines. L'action dans le domaine des risques fait l'objet d'un savoir ancien spécifique très développé, à l'exemple de la RTM, qu'il faut relire à la lumière des menaces actuelles et futures, comme le changement climatique. Il est en outre avantageux d'intégrer chaque fois que possible les préoccupations concernant

la forêt « protectrice », aux côtés des thématiques en fort développement visant la forêt menacée par le changement climatique et productrice de divers biens.

Pour que la valeur protectrice de la forêt soit plus perceptible – et présente à l'esprit des divers acteurs hors du champ de la protection – il serait opportun de produire, par exemple à destination des acteurs de la gestion durable des forêts, des indicateurs non seulement des dégâts occasionnés lorsque la protection est prise en défaut, mais aussi de la vulnérabilité des milieux et des efforts d'adaptation entrepris.

Un enjeu important, en lien avec le changement climatique, consisterait à étendre les évaluations de la vulnérabilité des forêts au-delà des zones traditionnellement concernées. Cela toucherait par exemple l'érosion en moyenne montagne et le risque d'incendie de forêt au nord des zones actuellement affectées. Dans ces zones nouvelles comme dans celles déjà recensées, il est important d'améliorer l'articulation entre les initiatives locales, par exemple départementales, et nationales, ainsi que d'harmoniser les outils d'évaluation. Les services rendus par le patrimoine forestier en termes de protection seront progressivement mieux reconnus et pris en compte, les documents d'aménagements constituant *in fine* le véritable levier d'action.

Chapitre D

Adaptation au changement climatique et gestion forestière

Philippe Riou-Nivert, *CNPF-IDF*,

© CNPF / Olivier Martineau CRPF PACA



Forêt et climat : les leçons du passé

L'exemple de la dernière glaciation : un appauvrissement sensible de la flore forestière

Face à un changement important du climat, les êtres vivants ont en général deux solutions pour ne pas disparaître : s'adapter ou « fuir ».

Prenons un exemple connu de tous : les glaciations du début de l'ère quaternaire (– 100 000 à – 10 000 ans), dernier grand changement climatique sensible en Europe. Chez les animaux, les espèces présentant des adaptations au froid, morphologiques (toison) ou physiologiques (hibernation, réserve de graisse), ont prospéré : mammoth, rhinocéros laineux, ours... D'autres, comme l'homme, ont migré vers le sud ou ont utilisé des techniques d'évitement : se couvrir de peaux de bête, chercher refuge dans les cavernes, utiliser le feu...

Les espèces végétales, elles, disposaient de beaucoup moins de marges de manœuvre : mobilité réduite, moyens d'évitement trop limités, renouvellement lent des générations ne facilitant pas l'adaptation. Les plus chanceuses se sont maintenues dans des zones refuges en Italie, en Espagne ou dans les Balkans. Certaines ont vu leurs aires se morceler, ont différencié des écotypes¹ ou se sont scindées en espèces distinctes. Ce fut le cas par exemple des pins noirs, des sapins ou des cèdres. Les patrimoines génétiques se sont appauvris. Beaucoup d'espèces ont disparu. La reconquête de l'Europe a débuté il y a 10 000 ans à partir de populations reliques², elle a duré plusieurs milliers d'années, mais la diversité de la flore, notamment forestière, avait été considérablement réduite. Elle reste encore aujourd'hui très pauvre par rapport à celle des autres continents situés à la même latitude.

Une capacité d'adaptation naturelle des forêts dépassée par la vitesse du changement climatique ?

Nous connaissons actuellement la première évolution climatique majeure depuis cette époque. Elle est caractérisée cette fois par une tendance globale au réchauffement, qui se traduit également par une augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses estivales et des phénomènes extrêmes (voir chap. A et B). Il est difficile de prévoir quelles espèces pourront le mieux se sortir d'une telle situation.

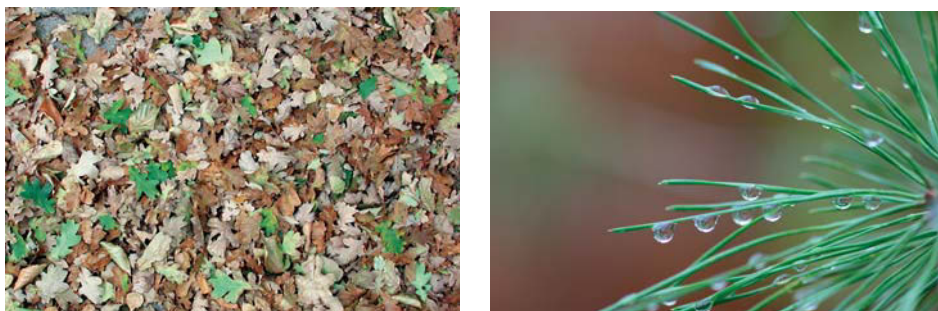
Chaque groupe d'arbres possède sa stratégie propre d'adaptation au stress hydrique, qui présente des avantages et des inconvénients :

1. Au sein d'une espèce, population morphologiquement différenciée par la sélection naturelle exercée par un ou plusieurs facteurs écologiques.

2. Se dit d'une population ou d'une espèce autrefois prospère ne se trouvant plus aujourd'hui que dans un nombre très limité de localités.

- les feuillus perdent leurs feuilles plus précocement, ce qui réduit leur transpiration mais ils ont alors une période de végétation plus courte ; la chute des feuilles est aussi une adaptation au froid ;
- les résineux à feuillage persistant possèdent des aiguilles ou écailles de surface réduite, recouvertes d'une pellicule cireuse protectrice qui limite les pertes en eau. Ils sont productifs sur une plus longue période, mais transpirent plus au printemps et à l'automne ;
- chaque espèce a en outre une résistance propre à la cavitation, c'est-à-dire à l'apparition, notamment en situation de sécheresse, d'une bulle d'air dans un élément conducteur de la plante, le rendant impropre au transport de sève. Les résineux y sont moins sensibles que les feuillus.

Figure 22 – Deux adaptations naturelles à la sécheresse : (a) chute précoce des feuilles chez les feuillus (à gauche), (b) feuilles aciculaires chez les résineux (à droite)



Source : (a) © L. M. Nageleisen, DSF ; (b) Mireille Mouas, IDF © CNPF.

L'évolution actuelle du climat, largement d'origine humaine, semble cependant cette fois bien plus rapide que le réchauffement observé à la fin de la période glaciaire. Ainsi, le déplacement vers le nord des enveloppes bioclimatiques³ potentielles devrait être de l'ordre de 500 km en un siècle, alors que la vitesse de migration naturelle des espèces forestières est de l'ordre de 50 km par siècle, comme l'attestent les études des paléoclimatologues (Birks, 1989).

Il est donc très difficile d'anticiper la réaction naturelle de la forêt aux évolutions climatiques et de préjuger de l'efficacité future des stratégies actuelles d'adaptation des arbres au stress hydrique.

3. Unité géographique dans laquelle les conditions climatiques influençant la répartition des espèces sont homogènes.

Quelles options possibles pour le gestionnaire forestier ?

De la difficulté d'organiser la réflexion

En France, la surface forestière augmente régulièrement depuis deux siècles. L'homme en tire de nombreux bénéfices matériels et immatériels : bois, énergie, paysages, accueil, biodiversité, protection du milieu... (voir chap. A et C). Il ne veut naturellement pas que les effets du changement climatique, en supposant qu'ils soient néfastes, affectent ces avantages. Il s'interroge alors sur les moyens de les conserver en faisant évoluer ses pratiques sylvicoles dans le cadre d'une gestion durable dans un climat en évolution.

La grande difficulté est qu'il ne s'agit pas seulement de protéger la forêt contre des aléas ponctuels. Il faut anticiper une modification progressive des conditions du milieu, parfois avec des à-coups, qui instaure un état de déséquilibre permanent des écosystèmes, sans possibilité de retour en arrière. De nombreux paramètres sont susceptibles de varier dans un sens difficile à prévoir : production, cycles de vie des plantes (germination, floraison...), compétition entre espèces, cortèges phytosanitaires⁴, interactions biotiques⁵ (voir chap. B)...

Les possibilités d'adaptation de la gestion dépendent de multiples facteurs, souvent en interaction les uns avec les autres. Plusieurs auteurs ont déjà abordé le sujet (Legay *et al.*, 2007 ; Riou-Nivert 2005, 2008 a), 2008 b) ; Dhôte, 2012...), mais, à ce jour, il n'existe aucun document d'aide à la gestion proposant des itinéraires bien définis. Les connaissances sont encore trop fragmentaires, les incertitudes trop grandes pour établir des conseils génériques.

Malgré tout, la réflexion autour des choix de gestion à privilégier est en marche, et les études de cas, telles celles mises en œuvre dans le cadre de la prospective AFCLIM, contribuent progressivement à orienter les décisions.

La démarche adoptée dans ce chapitre

Plutôt que de lister chronologiquement les moyens ponctuels d'action à la disposition du sylviculteur tout au long des étapes de la vie du peuplement, il est proposé ici d'examiner tout d'abord différents ensembles cohérents de recommandations tels qu'on peut tenter de les dégager de la littérature.

Mais le sylviculteur n'adhère en général jamais en bloc à l'un de ces ensembles, car toute situation est particulière. Il emprunte par contre à chacun quelques « briques » afin de construire son propre itinéraire technique. Nous essaierons

4. Ensemble des régulateurs naturels, parasites et prédateurs attachés à la plante.

5. Interactions entre organismes vivants.

donc de dégager dans un deuxième temps une approche pragmatique d'aide à la décision pour l'appuyer dans sa démarche, en tenant compte des spécificités de sa forêt et des objectifs qu'il s'est fixé.

Nous avons regroupé les recommandations en trois ensembles théoriques, selon l'intensité des interventions proposées :

- nous commencerons par exposer ce que l'on peut attendre des capacités spontanées d'adaptation des écosystèmes (intervention humaine délibérément limitée);
- nous aborderons ensuite les recommandations proposant des interventions modérées visant à atténuer les impacts et à soutenir ou renforcer la résilience⁶ des écosystèmes;
- enfin, nous décrirons les préconisations qui envisagent des transformations actives et planifiées.

Cette présentation est bien évidemment discutable car les points de vue ne sont jamais aussi tranchés, mais elle facilite la compréhension des enjeux.

Nous constaterons que les préconisations de chacun de ces trois ensembles sont parfois convergentes mais souvent contradictoires. Nous nous attacherons donc non seulement à détailler les arguments sur lesquels elles se fondent, mais aussi à en montrer les limites. Le lecteur ne doit pas être étonné des divergences possibles entre les différents conseils de gestion. Elles résultent des incertitudes importantes et incontournables tant sur l'évolution du climat que sur la réaction des espèces à cette évolution (voir chap. A et B). Ces incertitudes autorisent des interprétations variées.

À la réflexion, la diversité des solutions proposées est, en elle-même, une réponse intéressante, et finalement saine, face à une situation incertaine. L'avenir et la progression des connaissances permettront seuls de trier petit à petit parmi des systèmes de gestion contrastés et de réajuster les stratégies.

Nous invitons le sylviculteur à dépasser les apparentes contradictions qu'il pourrait percevoir entre les groupes de recommandations sans chercher à se ranger dans une case ou une autre et à se faire sa propre opinion à partir d'une information objective. En effet, lui seul au final peut définir l'itinéraire technique adapté à sa situation, après avoir diagnostiqué précisément son cas particulier et clarifié ses souhaits personnels, comme cela est décrit dans les pages suivantes.

Le forestier, pourtant habitué à l'incertitude du long terme, ne s'est sans doute jamais retrouvé devant un problème de décision aussi délicat qu'aujourd'hui.

6. Capacité dynamique d'un système à retrouver un état stable ou à maintenir ses fonctions après une perturbation ou un aléa quelconque.

Faut-il miser sur les capacités spontanées de réaction des écosystèmes forestiers ?

Principes

La sylvigénèse⁷ des forêts naturelles témoigne des importantes capacités des écosystèmes à réagir aux perturbations grâce aux différents niveaux de biodiversité qu'ils présentent. Ainsi, la cicatrization du couvert forestier après une tempête, un incendie ou une attaque d'insectes, est toujours observée sous nos climats, même si elle peut prendre des décennies.

Ce constat inspire une série de mesures d'adaptation limitées, visant à tirer parti de cette résilience naturelle des écosystèmes. Elles consistent à :

- favoriser un maximum de biodiversité, en privilégiant notamment les mélanges d'espèces et en prolongeant autant que possible la durée de vie des arbres ;
- miser sur la régénération naturelle en évitant les coupes rases brutales suivies de plantation ;
- conserver les peuplements fermés pour maintenir le sol couvert et le microclimat forestier ;
- maintenir des corridors pour permettre la dissémination des graines.

Fondements

• *S'appuyer sur le potentiel génétique et les processus de sélection naturelle*

La biodiversité végétale et animale est considérée comme une des conditions de survie des écosystèmes. Elle est maximale dans les peuplements diversifiés et comportant des stades âgés.

La sélection naturelle est la force motrice de l'évolution. Par ce processus, les espèces les mieux adaptées, qui subsisteront après un changement climatique d'envergure, sont progressivement privilégiées. Si le vivier d'espèces est important, comme dans les peuplements mélangés, le tri sera plus efficace.

Au sein même d'une espèce, la diversité génétique est très forte chez les arbres, beaucoup plus que chez les animaux (voir chap. B). La sélection doit là aussi faire son œuvre, et il faut conserver un maximum de variabilité en privilégiant la régénération naturelle et en maintenant un nombre de tiges important à tous les stades du peuplement.

7. Ensemble des processus dynamiques naturels, cycliques ou linéaires, s'observant au sein d'un écosystème forestier ou d'un massif forestier.

Toujours à l'intérieur d'une espèce, les individus possèdent certaines possibilités d'acclimatation par plasticité phénotypique⁸, par exemple architecturale⁹ ou physiologique¹⁰ qui leur permet de réagir rapidement à une évolution climatique en modifiant leur morphologie (taille des feuilles...) ou leur fonctionnement (Rambal, 2011). Cette plasticité peut être de nature adaptative (elle procure un avantage sélectif à l'individu qui l'exprime), ou non (elle correspond à une réponse inévitable à des processus physiques ou à la limitation de certaines ressources), (Nicotra *et al.*, 2010). Il a été récemment montré que cette plasticité était en partie d'origine épigénétique¹¹ (Kremer *et al.*, 2012; Bräutigam *et al.*, 2013; Alberto *et al.*, 2013) et potentiellement transmissible à la descendance (Cortijo *et al.*, 2014).

Dans le même ordre d'idée, après un aléa provoquant des dépérissements, on évitera les coupes éliminant les quelques individus ayant résisté et on favorisera la reproduction de ces derniers.

Figure 23 – Bouquet de régénération résineuse en peuplement mélangé à base de hêtre (Vielsalm, Belgique), un bon laboratoire pour la sélection naturelle



Source : Sylvain Gaudin, CRPF Champagne-Ardenne © CNPF.

8. Capacité d'un génotype (ensemble ou partie de l'information génétique d'un individu) à produire différents phénotypes (ensemble ou partie des caractères visibles d'un individu, *i. e.* expression du génotype) en fonction de l'environnement.

9. Variation des réponses de l'architecture de la plante en fonction de l'environnement.

10. Capacité des organismes à compenser des modifications environnementales par des ajustements physiologiques.

11. Ensemble des mécanismes ayant lieu au niveau du génome et de la régulation de l'expression des gènes qui peuvent être influencés par l'environnement et l'histoire individuelle ainsi qu'être potentiellement transmissibles d'une génération à l'autre, sans altération de l'ADN, et avec un caractère réversible.

- *Offrir des conditions favorables à la migration naturelle*

La migration est le moyen principal de reconquête des espaces après un cataclysme naturel. Ainsi, les populations d'arbres adaptées aux climats secs du sud doivent pouvoir progresser vers le nord si les conditions leur deviennent propices. De même, les espèces de plaine doivent pouvoir progresser en altitude. Puisque les arbres ne se déplacent qu'au moment de la reproduction par transport de graines, grâce au vent ou aux animaux, il faut que des axes de dissémination existent sans coupures de végétation (trame verte). La migration est évidemment bien plus facile en zone montagneuse, où les distances à parcourir sont plus courtes : une élévation de 100 m en altitude correspond climatiquement environ à un déplacement en plaine de 100 km vers le nord).

- *Favoriser le stockage du carbone en forêt*

Les fortes densités et les longues révolutions¹² permettent d'accumuler du carbone dans les peuplements et au sol. C'est un argument en faveur de l'atténuation du changement climatique, dans la mesure bien sûr où les peuplements restent sur pied et ne sont pas détruits par divers aléas.

Les limites de l'adaptation spontanée des écosystèmes

- *S'appuyer sur le potentiel génétique et les processus de sélection naturelle*

Les aires de répartition des espèces ont évolué depuis des milliers d'années et les mélanges d'essences forestières qui se sont constitués sont adaptés au climat actuel. *Un changement rapide et profond ne va-t-il pas affecter conjointement toutes les espèces présentes, même si certaines montrent une relative variabilité dans la résistance aux aléas (températures extrêmes, sécheresse prolongée, gels tardifs ou précoces...)?*

La sélection naturelle doit s'exercer pendant plusieurs générations, selon le modèle darwinien, pour pouvoir être efficace. Après un tri rapide au sein de la diversité spécifique existante et l'émergence des « meilleures aptitudes » parmi les mutations apparues aléatoirement au sein d'une espèce, la recombinaison génétique et la diffusion des types adaptés prennent du temps. *Le changement climatique n'est-il pas beaucoup trop rapide au regard de la durée d'une génération d'arbres (de l'ordre du siècle pour les grands feuillus sociaux tels que le chêne) pour permettre cette évolution (voir chap. B)?*

La régénération naturelle n'est pas possible pour le boisement de terrains nus, d'anciennes terres agricoles ou de friches, sauf à attendre des décennies. De plus, pour des peuplements isolés, *la régénération naturelle n'aboutirait-elle pas à une forte consanguinité et à une diversité plus faible que dans une plantation avec*

12. Durée d'un cycle de production, depuis l'installation d'un peuplement jusqu'à son renouvellement.

un matériel diversifié et amélioré ? Enfin, la fructification nécessite des houppiers larges bien éclairés, donc des peuplements clairs.

La diversité génétique au sein de l'espèce est *a priori* d'autant plus importante que le nombre de tiges du peuplement est élevé. Cela implique souvent une forte densité de tiges, avec comme corollaire une surface foliaire, une évapotranspiration et une interception des pluies importantes, ainsi qu'une concurrence interindividuelle exacerbée. *Ces facteurs ne risquent-ils pas d'accroître la sensibilité au stress hydrique auquel il faut précisément s'adapter ?*

Dans bien des cas, laisser faire la nature conduit à permettre aux espèces les plus compétitives de dominer les autres. On peut citer l'exemple du hêtre face aux chênes, ou du sapin en basse altitude face aux pins (avalaison¹³). Dans ces cas, malheureusement, les espèces qui domineront sont les plus sensibles au changement climatique (Legay *et al.*, 2007 ; Vitasse *et al.*, 2009). *Ne risque-t-on pas ainsi de favoriser le développement d'espèces sans avenir ?*

Les phénomènes épigénétiques, qu'on commence à mieux connaître, sont-ils susceptibles d'entraîner une adaptation rapide, et si oui, pourquoi alors certaines espèces ne se sont-elles pas déjà maintenues hors de leur aire bioclimatique préférentielle ? *La plasticité phénotypique sera-t-elle d'une ampleur suffisante pour permettre la survie des espèces ?*

La conservation de stades âgés est favorable à la biodiversité animale. Mais pourra-t-on conserver longtemps des arbres adaptés au climat passé lorsque les conditions auront changé ? Ces stades sont aussi parfois plus sensibles aux aléas (vent...), (voir chap. B). *Les peuplements anciens ne seront-ils pas les plus fragiles ?*

La protection intégrale, au profit de la biodiversité, de sites remarquables « mis sous cloche » risque de se trouver en porte à faux en raison du changement climatique. *Ne faut-il pas réfléchir à une protection différente, dynamique, et préparer la formation de nouveaux écosystèmes ?*

Le taux de disparition locale d'espèces végétales forestières à l'horizon 2050 est évalué à 30 % pour l'Europe (Bakkenes *et al.*, 2002), les plus emblématiques, dans des habitats reliques déjà menacés, étant les premières touchées.

13. Décrit ici le phénomène selon lequel des groupes d'espèces d'altitude s'implantent en plaine et en collines.

- *Offrir des conditions favorables à la migration naturelle*

Figure 24 – Plantation d'un corridor végétal pour assurer une continuité écologique



Source : Delphine Garapon © CNPF.

Les continuités écologiques seront-elles suffisantes pour assurer la migration des populations, de toute façon très lente, alors que la prévision de déplacement des aires de répartition est rapide ? Peu d'exemples basés sur des observations de terrain existent à l'heure actuelle (chêne vert : chap B).

De plus, une multiplication des parasites et de leurs vecteurs est attendue, favorisée par l'augmentation des températures (voir chap. B). *Ces corridors ne risquent-ils pas de faciliter leur transfert ?*

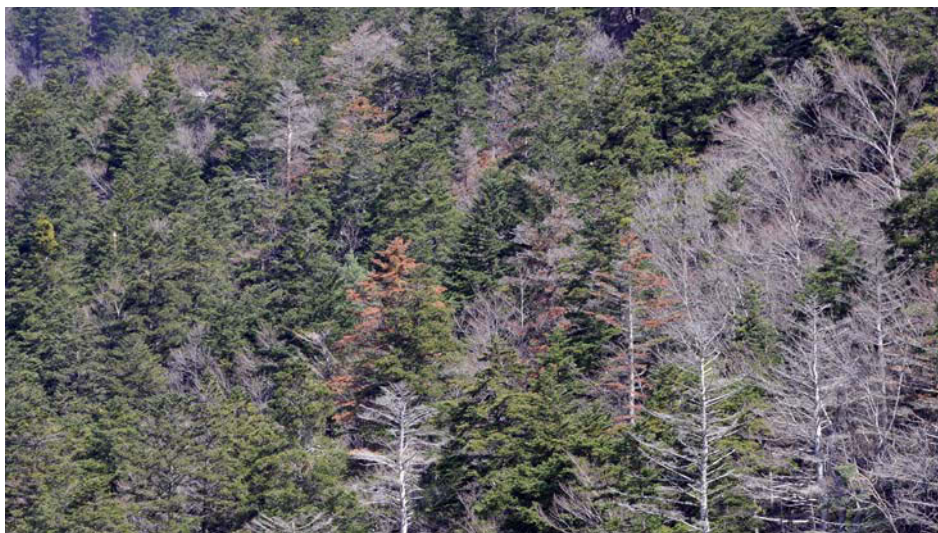
- **Favoriser le stockage du carbone en forêt**

Les fortes densités permettent d'accumuler du carbone sur pied mais rendent les peuplements plus fragiles au vent (tiges élancées), aux parasites de faiblesse (tiges concurrencées) ou aux pathogènes (peuplements confinés). *Ne risque-t-on pas, en voulant piéger le carbone, d'en relarguer encore plus dans l'atmosphère à l'occasion de catastrophes climatiques ou sanitaires ? Le stockage de carbone dans les produits bois récoltés à rythme plus rapide n'est-il pas préférable ?*

- **Cas particulier : gérer les peuplements dépérissants**

D'un point de vue pratique, la gestion de peuplements dépérissants est difficile. Pour éviter les coupes rases, on peut être tenté de baser la reconstitution de la forêt sur les arbres survivants jugés plus résistants. *Mais n'est-il pas hasardeux de s'appuyer ainsi sur des survivants peu nombreux dont la reproduction sera problématique (dérive génétique) ? Ne risque-t-on pas d'aboutir à la disparition totale d'espèces ou de mélanges d'espèces ?* En outre, les dépérissements sont parfois précédés de difficultés de fructification encore mal cernées.

Figure 25 - Peuplement de sapins dépérissants dans les Alpes-de-Haute-Provence après la sécheresse de 2003 : comment gérer ?



Source : © L. M. Nageleisen, DSF.

Laisser les peuplements dépérissants sur pied ne va-t-il pas engendrer de vastes zones à risques où toutes les fonctions de la forêt, y compris sociales et écologiques seront altérées ?

Parmi ces risques, on peut citer le développement de parasites, de plantes invasives, d'incendies. Si la survie même de la forêt n'est sans doute pas remise en cause à très long terme par le changement climatique, l'évolution spontanée vers de nouveaux écosystèmes peut prendre beaucoup de temps, elle passera probablement par des phases de « déserts boisés ».

Faut-il intervenir modérément pour conforter l'adaptation des forêts au changement climatique ?

Principes

Les arbres disposeront-ils d'assez de temps pour mettre en place des adaptations spontanées ? Seront-elles suffisantes pour faire face à l'ampleur des modifications climatiques à venir ? De nombreuses incertitudes demeurent sur la capacité des écosystèmes à surmonter les changements annoncés. Il paraît donc important de commencer à anticiper ces changements en intervenant progressivement et modérément pour augmenter la résistance ou la résilience des peuplements, sans pour autant entrer dans une logique d'intensification de la gestion et en restant attaché à la multifonctionnalité des forêts.

Les mesures inspirées par ces principes sont typiquement les suivantes :

- promouvoir la régénération naturelle (voir encadré 7) plutôt que les coupes rases suivies de plantation, qui restent à éviter quand c'est possible mais ne sont pas exclues ;
- privilégier soit la futaie régulière claire, soit la futaie continue irrégulière et claire (voir encadré 8) ;
- augmenter la diversité interspécifique par la recherche des mélanges, par exemple au moment du renouvellement par enrichissement avec des essences résistantes à la sécheresse.

Ce type de gestion peut être ajusté petit à petit et se prête bien au processus de gestion adaptative, qui consiste à tester des orientations contrastées en grandeur réelle en intégrant les avis des différentes composantes de la société (chercheurs, sylviculteurs, environnementalistes...).

Encadré 7

Recommandations de la Commission des ressources génétiques forestières (CRGF, 2008)

« Si la révolution prévue dépasse vingt ans, il faut prendre en compte adaptation et adaptabilité*. Plus l'âge d'exploitabilité de la forêt est élevé, plus les changements subis entre le stade juvénile et l'exploitation seront importants, plus l'assurance de diversité génétique devient importante. Pour les peuplements en place, l'adaptation de la sylviculture devra aussi prendre en compte la préparation de la phase de régénération pour assurer sa quantité et sa diversité génétique.

Dans la phase de renouvellement, par régénération naturelle ou plantation, veiller à assurer une diversité génétique suffisante pour laisser prise à une sélection naturelle ultérieure. »

** Capacité d'ajustement d'un système face aux changements climatiques (y compris à la variabilité climatique et aux extrêmes climatiques), afin d'atténuer les effets potentiels, d'exploiter les opportunités ou de faire face aux conséquences.*

Encadré 8

Avis de l'association Pro Silva France sur l'adaptation au changement climatique (Givors, 2008)

« Pro Silva France, devant les conséquences importantes à attendre du changement climatique sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers, conséquences complexes à appréhender dans le détail, considère que la meilleure gestion des risques est l'application des principes de la sylviculture irrégulière, continue et proche de la nature. Ce mode de traitement forme les peuplements les plus stables, les plus résilients, les plus productifs et les plus économes en travaux, en dépenses d'énergie et en intrants. Il mérite donc d'être appliqué le plus largement possible. »

Encadré 9

Les principes de la gestion adaptative

La gestion adaptative est une approche de la gestion des systèmes naturels qui s'appuie sur l'apprentissage – qu'il provienne du bon sens, de l'expérience, de l'expérimentation, du suivi... – en adaptant les pratiques en fonction de ce qui a été appris (Cordonnier et Gosselin, 2009). Elle se construit autour de quelques étapes clés formant un cercle vertueux (voir figure ci-dessous).

Elle n'est pas forcément adaptée à un contexte changeant tel que le contexte actuel, où le climat évolue rapidement, car les relations entre actions de gestion et réponses des écosystèmes y sont instables. Du coup, ce que l'on apprend aujourd'hui pourrait ne pas nous aider demain. Cependant, elle peut permettre d'accélérer la compréhension des impacts et la mise en place de nouvelles sylvicultures.

Le cercle vertueux de la gestion adaptative



Source : IRSTEA, d'après Allen et al., *Journal of Environment*.

La mise en œuvre d'une gestion adaptative efficace implique, dans ce contexte, de cibler des questions de gestion qui peuvent se décliner en itinéraires techniques ; de faire appel aux modèles de croissance ; de cibler des zones ou des espèces à enjeux ; d'adopter une double démarche d'expérimentation, au niveau théorique et pratique ; de privilégier des expérimentations multisites ; de se reposer sur des structures d'animation pérennes fédérant organismes de gestion et organismes de recherche (par exemple RMT AFORCE, GIS-Coopérative de données sur la croissance des peuplements forestiers, GIP-Ecofor, plate-forme de modélisation CAPSIS). (Cordonnier et Gosselin, 2013).

Fondements

• *Augmenter la diversité*

La solution privilégiée pour faire face au changement climatique est d'accroître la résilience de la forêt. Les aléas climatiques sont inévitables mais, si l'on s'attache à développer ses capacités de réaction, la forêt doit pouvoir les subir (éventuellement avec des pertes), sans disparaître. Une biodiversité importante (oiseaux, insectes...) permet de mieux réguler les attaques parasitaires.

La structure irrégulière offre l'intérêt de permettre une restauration de l'état forestier après un aléa grâce à la présence d'une strate basse (sous-étage, perches, tâches de régénération naturelle bien réparties), souvent moins affectée par les dégâts que l'étage principal.

La régénération naturelle est le mode de renouvellement choisi chaque fois que possible; elle augmente la diversité, réduit et dilue les dégâts de gibier. Dans ce cadre, un certain nombre de préconisations sylvicoles peuvent être données pour favoriser la dynamique de la diversité génétique (Lefèvre *et al.*, 2013). La coupe rase est en général évitée et les travaux mécaniques sont limités pour respecter le sol.

Les mélanges sont également privilégiés selon l'adage «Ne pas mettre tous ses œufs dans le même panier». Les plantations d'enrichissement avec des essences diverses, mais plutôt autochtones, sont possibles. Elles permettent d'accroître la diversité dans des peuplements trop purs.

En cas de plantation ou de semis, pour une même espèce, un mélange de provenances variées peut constituer un moyen d'augmenter la diversité. Il s'agira alors :

- soit d'un mélange de graines issues de plusieurs peuplements au stade de la pépinière;
- soit d'un mélange de plants de plusieurs régions de provenance, en plantation.

Il n'est pas exclu non plus d'introduire ponctuellement des essences non autochtones (migration assistée), dans les cas où la survie des essences en place est jugée compromise.

Un programme de sauvetage des provenances situées sur les marges sud de l'aire géographique des espèces menacées par le réchauffement peut être envisagé au titre de la conservation des ressources génétiques (conservation *ex situ*).

• *Développer les techniques pour gérer l'eau ou pour favoriser le mélange*

Les plantations en plein découvert sont en général proscrites car sensibles à la dessiccation, et on préfère les introductions dans un gainage ligneux protecteur.

Les plants peuvent être installés dans des potets travaillés¹⁴ (par exemple avec une cultisoussoleuse¹⁵).

Les chercheurs ont montré que les peuplements clairs étaient moins sensibles au stress hydrique que les peuplements denses, en raison de leur surface foliaire réduite, en lien avec des niveaux d'interception des pluies et de transpiration du feuillage faibles (Legay, 2006). La surface terrière des peuplements¹⁶ adultes devra donc en général rester modérée (moins de 20 à 25 m²/ha, par exemple), quelle que soit la structure. En futaie irrégulière, la couverture permanente du sol atténue les à-coups de la gestion sur le microclimat.

Figure 26 – La futaie irrégulière (ici douglas et sapins en Auvergne) mise sur la résilience et le renouvellement continu



Source : © J. Becquey, CNPF-IDF.

14. Technique de plantation qui consiste à ameublir la terre localement afin de recevoir le plant.

15. Outil mécanique équipé d'une dent montée sur minipelle et utilisé pour la préparation des potets.

16. Surface que représenteraient, pour 1 hectare de forêt, toutes les sections de tronc des arbres que l'on aurait coupées à 1,30 mètre de hauteur. S'exprime en mètres carrés par hectare (m²/ha).

Les limites d'une intervention modérée pour conforter l'adaptation

• Augmenter la diversité

La régénération naturelle n'est envisageable que pour des peuplements déjà constitués, de bonne qualité, et avec des essences en station¹⁷, susceptibles de se maintenir pendant au moins un cycle.

Le maintien sur pied prolongé d'arbres âgés augmente les risques vis-à-vis de certains aléas (vent, parasites).

Les mélanges ne sont intéressants que lorsque les essences constitutives ont des comportements différents vis-à-vis de la sécheresse. *Que faire si ce n'est pas le cas (hêtraie-sapinière...)?* Au-delà des conseils de bon sens sur les mélanges, les études de vulnérabilité restent peu nombreuses (Vallet, 2012), et leur gestion d'un point de vue pratique demeure très délicate.

La préférence aux essences autochtones¹⁸ peut être mise en porte à faux si ces dernières se révèlent progressivement inadaptées à l'évolution du climat et subissent des dépérissements massifs. Quelle solution dans certaines régions pour les grands feuillus sociaux à longue durée de vie, potentiellement sensibles au réchauffement : chêne pédonculé, hêtre ? De même pour certains résineux : épicéa, sapin, voire pin sylvestre ?

• Développer les techniques pour gérer l'eau ou pour favoriser le mélange

Les techniques de plantation et d'entretien sont à affiner. En cas d'enrichissement, le maintien des lignes ou placeaux de plants sous couvert est délicat. De même la gestion de la végétation concurrente dans une plantation faite dans le recrû¹⁹ demande un suivi régulier.

La gestion en futaie irrégulière et en mélange nécessite une bonne technicité (sylviculture, exploitation, commercialisation) et de grandes capacités d'observation des phénomènes de compétition dans la durée. Disposerons-nous de suffisamment de temps pour réorienter la structure et la composition des peuplements existants ?

17. Étendue de terrain homogène du point de vue des conditions de croissance pour les arbres.

18. Se dit d'une espèce ou d'une population présente uniquement dans son aire de répartition naturelle (non introduite par l'homme).

19. Ensemble de la végétation semi-ligneuse et ligneuse apparue après ouverture d'un peuplement forestier.

Faut-il intervenir plus intensivement pour anticiper les évolutions du climat ?

Principes

Le changement climatique amène à s'interroger sur la sylviculture actuelle et les essences et provenances utilisées. Seront-elles adaptées au climat de demain ? La solution pour faire face à ces évolutions ne se trouverait-elle pas dans de nouvelles sylvicultures, un nouveau matériel végétal ?

Face à ces questions, un autre ensemble de mesures d'adaptation consiste à anticiper les effets du changement climatique en optant pour une intervention plus marquée, mais aussi très ciblée : plantation d'un matériel végétal adapté et résistant à la sécheresse, recherche de révolutions courtes conjointement avec une meilleure rentabilité des itinéraires techniques (voir encadrés 10 et 11). L'objectif est de développer localement des sylvicultures spécialisées en s'éloignant donc du cadre de la multifonctionnalité.

Encadré 10

Les forêts de plantation sont l'une des clés pour répondre au défi du changement climatique (Alliance Forêt Bois, 2012)

« Les révolutions peuvent être raccourcies pour diminuer l'intervalle entre deux générations et mieux s'adapter au risque.

L'utilisation de nouvelles variétés, provenances ou espèces permettra de répondre au changement climatique, voire de l'anticiper. Pour autant, on ne devra pas oublier que les grandes plantations monospécifiques sont souvent plus exposées aux risques d'insectes, de maladies ou d'incendie que les forêts naturelles. »

Encadré 11

Collectif « Réinvestir la forêt » (2010)

« À partir de 2050, un été sur trois sera caniculaire (GIEC, 2007), menaçant nombre d'essences locales qui n'ont pas les moyens de s'adapter naturellement à ces changements climatiques rapides induits par l'homme. Le recours à la plantation de variétés améliorées bien adaptées à ces épisodes permet de répondre plus rapidement et efficacement à cette menace. »

Cet ensemble de mesures implique les principes suivants :

- identifier les parties de territoires (quelques pour cent de la surface forestière) susceptibles de permettre de hauts rendements avec des essences à croissance rapide sur des surfaces unitaires de plus de 5 ha ;

- pratiquer une sylviculture industrielle à courte rotation (moins de cinquante ans), basée sur la plantation et en optimisant toutes les étapes de la production ;
- renouveler en permanence le matériel végétal en intégrant en continu les résultats de la recherche en génétique forestière ;
- renforcer le lien avec l'industrie du bois (contrats d'approvisionnement).

Fondements

● *Préférer les cycles courts*

Face aux incertitudes sur l'évolution du climat, une gestion à court ou à moyen terme est privilégiée. Ce conseil est renforcé par l'argument souvent avancé d'un réchauffement « raisonnable » jusque vers 2050 (Penneroux, 2012). Les courbes d'évolution future de la température des différents scénarios du GIEC (2007, puis 2013) divergent en effet surtout après cette date. Les révolutions de trente à cinquante ans maximum sont donc choisies chaque fois que possible, ce qui impose des essences à croissance rapide. Après 2050, cette stratégie sera réajustée en fonction des nouvelles connaissances disponibles.

Le raccourcissement des révolutions présente cinq avantages :

- réduire le risque de rencontrer des aléas exceptionnels dont l'occurrence est rare (fortes sécheresses, tempêtes) ;
- limiter certaines phases critiques (par exemple sensibilité accrue au vent au-delà de 20 m de hauteur) ;
- limiter la phase où le peuplement est âgé et souvent plus sensible aux dépérissements ;
- permettre un renouvellement rapide du matériel végétal et donc une adaptation en continu à l'évolution du climat ;
- augmenter le rendement financier car le temps est un des principaux facteurs de la rentabilité.

Les cultures énergétiques (taillis à courte ou très courte rotation, de deux à dix ans) ne sont pas exclues, sous réserve de vérifier au préalable leur rentabilité. On émet l'hypothèse qu'il sera possible de réaliser une, voire plusieurs révolutions avant qu'un aléa majeur ne survienne.

Des arbres jeunes, à forte croissance et en pleine santé, bénéficiant d'une bonne nutrition minérale, sont en principe considérés comme plus résistants aux divers aléas et comme ayant de meilleures capacités de récupération que les arbres âgés (Nageleisen *et al.*, 2010).

- **Renouveler régulièrement les espèces**

Une recherche des espèces les plus résistantes à la sécheresse est effectuée, en prenant en compte toutes les incertitudes existantes sur leur autécologie²⁰. Les résineux à croissance rapide (douglas, pin maritime) et le peuplier sont choisis comme essences de transition, susceptibles de pouvoir accomplir une révolution avant d'être trop affectées. D'autres essences sont citées : robinier, cèdre... Le recours à des essences moins connues, en général exotiques²¹, est perçu comme une solution possible, mais elles doivent faire l'objet d'expérimentations dès aujourd'hui afin de préciser leur adaptabilité et leur capacité de production (Rosa *et al.*, 2011).

L'introduction d'espèces ne doit en aucun cas faire l'économie de leur adaptation aux stations, qui est la condition première de leur survie et de leur productivité.

- **Améliorer les espèces, favoriser leurs critères de résistance**

L'amélioration génétique est une étape essentielle en matière de domestication de la nature. Les critères privilégiés, principalement aujourd'hui la croissance, doivent être complétés par des critères d'adaptation à la sécheresse ou à d'autres facteurs tels que les gelées tardives, dont il convient encore d'analyser la corrélation avec la production.

De nouveaux critères d'évaluation sont en plein développement, notamment avec la création d'une plate-forme de phénotypage²² de la résistance à la cavitation dans les laboratoires de l'INRA, permettant d'identifier des espèces, des populations et des génotypes moins vulnérables au stress hydrique.

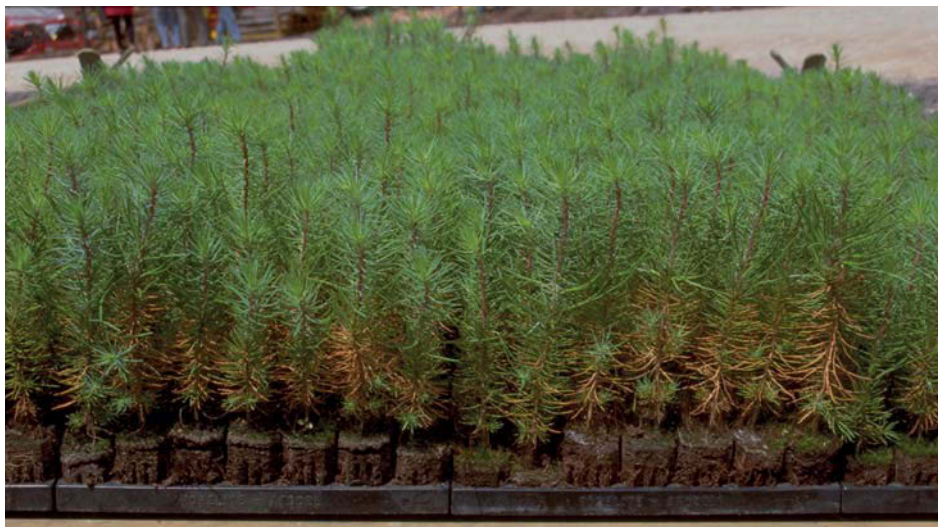
L'amélioration actuelle consiste principalement à sélectionner des provenances ou des individus et à les regrouper dans des vergers à graines, qui sont des plantations de clones ou de descendances sélectionnées, isolées afin d'éviter ou de réduire le risque de pollinisation à partir de sources étrangères, gérées de façon à produire fréquemment et en abondance des semences faciles à récolter. Une réflexion est en cours pour réorienter la création de vergers en intégrant des critères de résistance à la sécheresse : vergers de douglas de provenance californienne, vergers à courtes rotations (en phase de recherche).

20. Étude de l'action du milieu sur la morphologie, la physiologie et le comportement d'une espèce.

21. Espèce non originaire de la région où elle se trouve.

22. Méthode qui consiste à identifier et quantifier le phénotype, c'est-à-dire les caractéristiques morphologiques, anatomiques et physiologiques d'un organisme, résultant de l'expression de son génome et de l'action des facteurs du milieu.

Figure 27 – Plants de pin maritime en godets issus de vergers à graines



Source : Philippe van Lerberghe, IDF © CNPF.

Pour le peuplier, la création variétale consiste à compléter régulièrement les collections de cultivars²³ par de nouvelles productions intégrant la résistance au stress hydrique.

L'hybridation²⁴ contrôlée entre espèces ou provenances est un domaine encore peu exploré (pin maritime hybride Landes et Maroc). Pour l'instant, la création d'arbres génétiquement modifiés pour résister au stress hydrique n'est pas à l'ordre du jour.

Plus généralement, les principes mêmes de l'amélioration sont peut-être à repenser, la recherche de variétés « flexibles » à forte diversité adaptative prenant le pas sur l'optimisation de performances précises.

En attendant les résultats de la création variétale, la révision des conseils aux utilisateurs de matériels forestiers de reproduction est demandée. Elle devrait ouvrir des possibilités de déplacement d'essences ou de provenances méridionales dans les régions du nord de la France, pour pallier la lenteur des migrations naturelles. Cela permettrait de plus, de s'assurer dès maintenant, qu'elles auront le temps d'acquérir les marqueurs épigénétiques qui seront transmis à la descendance. Cette anticipation devra cependant être organisée sur le long terme, le changement étant progressif et continu.

23. Formes végétales obtenues par sélection et conservées par la culture.

24. Croisement entre deux individus d'espèces différentes, voire issus de populations génétiquement distinctes d'une même espèce, qui donne naissance à un hybride.

- *Opter pour l'artificialisation, intensifier*

Tous les moyens pour optimiser la vitesse de croissance sont mis en œuvre, en s'inspirant des techniques de l'agriculture intensive : préparation du terrain, entretiens suivis des plantations, protection phytosanitaire (encadrés 11 et 12). Les intrants sont cependant en général limités à la phase d'installation.

Figure 28 – Plantation artificielle de pin laricio dans les Pays de la Loire



Source : © C. Perrier, CNPF-IDF.

Encadré 12

Migration assistée et réglementation

Les recommandations des pouvoirs publics aux utilisateurs de graines et plants forestiers (matériels forestiers de reproduction : MFR) sont en cours de révision sous l'égide du CTPS. Deux objectifs sont visés :

- cesser de conseiller certaines espèces dans les régions où elles risquent de ne plus pouvoir se maintenir durablement en raison du changement climatique ;
- permettre l'utilisation de MFR susceptibles de mieux convenir ou de mieux s'adapter aux changements de l'environnement que l'espèce ou la provenance actuellement en place. Ces pratiques de « migration assistée » visent notamment à accélérer artificiellement le processus naturel par lequel les populations d'arbres adaptées à des climats chauds et secs progressent vers le nord et en altitude si le climat devient propice.

Les nouvelles préconisations seront énoncées avec beaucoup de prudence car l'ampleur et l'impact du changement climatique à venir sont très incertains. Elles seront révisables à un rythme assez rapide. Les risques inhérents aux différentes options possibles en matière de MFR seront clairement présentés et l'importance capitale du diagnostic de la station à reboiser sera rappelée.

La plantation est une phase critique pour le peuplement vis-à-vis du stress hydrique. Les techniques limitant le stress hydrique à ce stade (précautions lors du transport des plants, préparation du terrain, paillages, amélioration du substrat des conteneurs, mycorhization²⁵ contrôlée, gestion du recrû feuillu, enherbement artificiel...) sont à promouvoir et à améliorer.

La standardisation des opérations impose en général des plantations monospécifiques. La mécanisation est présente à tous les stades : travail du sol, plantation, entretiens, exploitation. Sur des terrains potentiellement sensibles à l'appauvrissement, des techniques de remédiation sont mises en œuvre : fertilisation, amendements, restitution de cendres.

- *Rester en phase avec les débouchés et la demande sociale*

L'option intensive doit impérativement être en phase avec la demande des industriels du bois, qui réclament aujourd'hui un accroissement de la production de produits standards de petites dimensions : sciages industriels (résineux), bois énergie.

Le raccourcissement des cycles va dans le sens d'une meilleure adéquation de l'offre avec la demande des industriels.

La segmentation du territoire permet de réserver en parallèle de grandes surfaces gérées de façon extensive pour assurer les autres fonctions de la forêt (accueil du public, paysages, biodiversité...).

Les limites d'une intervention plus intensive pour anticiper les évolutions du climat

- *Préférer les cycles courts*

Le raccourcissement des révolutions implique une plus grande fréquence des renouvellements par plantation. Or, cette phase est critique dans la vie du peuplement : dégâts de sécheresse, d'insectes, de rongeurs ou de cervidés (qui sont rédhibitoires dans certaines régions). En outre, la lutte chimique contre les adventices ou les parasites (par exemple hylobe sur résineux) est progressivement abandonnée à cause de ses impacts environnementaux. Pourra-t-on contourner ces différents problèmes de façon satisfaisante économiquement ?

- *Renouveler régulièrement les espèces*

Le choix d'essences de transition, à la fois à croissance rapide, résistantes au climat actuel et potentiellement au climat futur est très restreint. Pour l'après 2050, les essences plus méridionales à identifier ne seront-elles pas nettement moins productives que les essences actuellement présentes, ce qui réduira la rentabilité ?

25. Association à bénéfice mutuel entre un champignon et les racines d'un végétal, permettant d'améliorer leur nutrition minérale.

L'installation d'essais testant le comportement des espèces est indispensable mais il nécessite une organisation importante alors que les moyens manquent : prospection des aires naturelles, circuits fiables de fourniture de graines, méthodes de culture en pépinière... Ces difficultés d'organisation ont bien été mises en évidence lors du projet européen REINFFORCE qui consistait à mettre en place des arboretums d'élimination d'espèces et de provenances. Comment s'assurer qu'il est possible de transposer des résultats d'essais installés dans la moitié sud de la France pour des zones situées dans la moitié nord lorsque le climat aura évolué ?

L'introduction d'espèces exotiques doit se faire avec précaution car elles peuvent être affectées, au bout d'un certain temps, par des parasites indigènes²⁶ avec lesquels elles n'ont pas co-évolué, ou bien transporter avec elles des parasites qui peuvent accélérer la destruction des espèces autochtones qui n'y sont pas habituées. Dispose-t-on de moyens de contrôle suffisants pour contrer ce risque ?

- *Améliorer les espèces, favoriser leurs critères de résistance*

Les fondements traditionnels de l'amélioration génétique qui visent l'optimisation de certaines performances dans un milieu connu risquent d'être mis en défaut dans un contexte en perpétuel changement. Quelle amélioration viser quand plusieurs futurs sont possibles et quand les moyens sont limités ?

- *Opter pour l'artificialisation, intensifier*

La gestion intensive doit être menée avec précaution sur certaines stations sensibles. La généralisation de la mécanisation ne risque-t-elle pas d'augmenter les risques de dégradation des sols ?

On peut également s'interroger sur le cas des sols pauvres : le coût des compléments nutritionnels nécessaires ne sera-t-il pas discriminant ?

Dans le contexte actuel, plus encore que précédemment, la sylviculture intensive est un pari (raisonné) qui fonctionne sur le principe du tout ou rien. Elle peut être comparée à un placement à haut rendement mais à haut risque. Les peuplements monospécifiques constituent une caisse de résonance pour tous les aléas qui pourraient survenir, climatiques (sécheresse, vent) mais aussi phytosanitaires. *Les techniques limitant les risques (bandes feuillues dans des résineux...), réduisant les surfaces utiles et donc la rentabilité de l'opération, seront-elles appliquées ?*

- *Rester en phase avec les débouchés et la demande sociale*

La demande actuelle des industriels porte sur des diamètres faibles et des branches fines (l'élagage artificiel est rarement un plus). *N'est-ce pas en décalage avec l'adaptation au changement climatique ?* En effet, si la recherche de petits produits va bien dans le sens d'un raccourcissement des révolutions, la production de branches fines

26. Se dit d'une espèce ou d'une population originaire de la zone géographique où elle se trouve (synonyme d'autochtone dans ce cas), ou élevée à partir de semences provenant de la même région de provenance.

implique, quant à elle, de fortes densités et donc une augmentation de la sensibilité au stress hydrique et au vent. De plus, la production de bois jeunes, pour les résineux, correspond à une baisse de qualité pour les usages les plus valorisants (forte proportion de bois juvénile²⁷, faible proportion de duramen²⁸).

La sylviculture intensive demande des investissements conséquents. Or le contexte actuel n'est pas favorable aux plantations, dont la surface annuelle a fortement chuté : désengagement des propriétaires face aux risques importants (tempêtes, grands herbivores, parasites), à la réglementation environnementale, à la diminution des aides de l'État. Trouvera-t-on les moyens de relancer l'investissement en forêt? En outre, une baisse de production est annoncée pour l'avenir au moins dans la moitié sud de la France. Cela ne va-t-il pas pénaliser la rentabilité des investissements forestiers?

La sylviculture intensive implique une artificialisation du milieu, certes plus faible que pour l'agriculture, mais qui se heurte à la représentation classique que certains ont de la forêt. Elle peut être, du coup, souvent mal perçue par une partie de la société. L'introduction d'essences exotiques, par exemple, se heurte localement à des résistances des populations, qui invoquent les changements de paysages ou le risque d'introduction de parasites nouveaux. Ces préoccupations sociétales se retrouvent dans des réglementations nationales, locales ou dans des référentiels (PEFC...). Les partisans de la sylviculture intensive seront-ils en mesure de résoudre ces problèmes d'acceptabilité?

Démarche d'aide à la décision du sylviculteur

Agir malgré la complexité

La diversité des considérations qui précèdent montre la complexité du problème. Celle-ci résulte des incertitudes sur l'évolution du climat, sur les capacités de réaction des arbres à ces évolutions et sur la pertinence des options de gestion. Il serait donc présomptueux – et au final dangereux – de vouloir proposer des recettes universelles clefs en main dont les promoteurs seraient bien incapables d'assurer la «garantie après-vente».

Malgré tout, cette complexité ne doit pas démotiver ni empêcher d'agir dans une situation où l'on sait qu'il va se produire des changements, qu'on a d'ailleurs déjà commencé à percevoir. Il ne s'agit pas de supprimer les incertitudes, car il n'est pas possible de prévoir l'avenir, mais de les appréhender de façon rationnelle afin de minimiser la prise de risque et d'optimiser les capacités de réaction en cas d'aléa.

27. Bois formé dans le jeune âge ou au niveau des branches vivantes dans le houppier, ayant en général de mauvaises propriétés technologiques chez les résineux. Opposé au bois adulte, formé après la chute ou la coupe des branches.

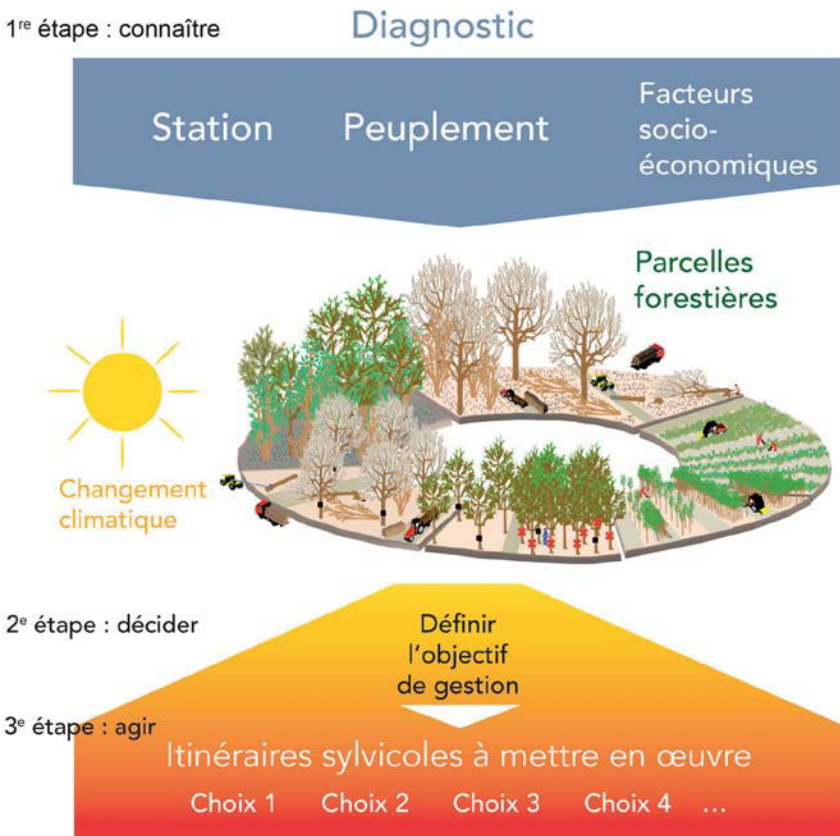
28. Partie centrale du tronc ayant subi le phénomène naturel de duraminisation (imprégnation de substances antiseptiques lui assurant une meilleure durabilité). Opposé à l'aubier périphérique, assurant la conduction de la sève et non durable.

Une autre erreur serait de n’orienter son action qu’en fonction du changement climatique alors que bien d’autres paramètres influent sur la gestion forestière, souvent à plus court terme, notamment dans les domaines socio-économiques : débouchés des produits en évolution rapide, importance croissante des services écosystémiques et de la demande sociale.

Les principes de la démarche d’aide à la décision

Nous proposons donc une démarche cohérente d’aide à la décision en trois étapes (Riou-Nivert et Rosa, 2014) : diagnostic (connaître et comprendre) ; définition des objectifs de gestion (décider) ; choix des itinéraires techniques de gestion²⁹ (agir). Le sylviculteur doit s’approprier cette démarche en l’adaptant à son cas particulier.

Figure 29 – Une démarche d’aide à la décision en trois étapes



Source : CNPF, cycle chêne © J. Lemaire.

29. Définition des interventions sylvicoles successives (coupes et travaux) à réaliser pour atteindre un objectif fixé dans un contexte donné.

● *Connaître et comprendre : établir un diagnostic*

Figure 30 – Un bon diagnostic est difficile et demande souvent l'appui d'un conseiller



Source : Julien Fiquepron, IDF © CNPF.

Il est recommandé au propriétaire, avec l'appui de son technicien conseil, de toujours commencer par un diagnostic actuel mais aussi prospectif au niveau de l'unité de gestion (en général la parcelle). Cet exercice est difficile compte tenu de la longue durée des cycles forestiers, car il faut composer avec de multiples paramètres, mais il est plus que jamais indispensable.

Ce diagnostic porte sur trois domaines :
– la station, qui conditionne l'adaptation des essences et leur croissance. Le diagnostic stationnel comporte une description du climat local et une estimation de son évolution grâce à des outils qui commencent à être disponibles : plate-forme «Drias, les futurs du climat³⁰» de Météo-France... Il comporte aussi une description des caractéristiques du sol et de la topographie, qui peuvent venir compenser les facteurs climatiques : catalogues et guides de stations prenant en compte le chan-

gement climatique, outil Biljou³¹ pour apprécier le bilan hydrique journalier d'un peuplement ;

– le peuplement lui-même : régime sylvicole antérieur, composition, âge, variables dendrométriques³² et qualitatives, état sanitaire. L'autécologie des essences en place, évaluée au mieux dans l'état des connaissances actuelles, sera mise en regard avec les caractéristiques stationnelles précédemment décrites, actuelles et estimées pour le futur. Le peuplement sera alors classé dans une des trois catégories : d'avenir potentiel, d'avenir incertain, sans avenir ;

– le contexte socio-économique, qui n'est pas directement lié à l'évolution climatique mais influence les possibilités de valorisation des produits et oriente la gestion ; il est également évolutif. Il comprend les souhaits et les moyens du propriétaire, le marché des bois et les autres valorisations, les contraintes locales (réglementation, desserte, gibier, possibilité de mécanisation...) complétés par une analyse environnementale et sociétale.

30. <http://www.drias-climat.fr/>.

31. <https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/>.

32. Ensemble des variables obtenues après mesure des arbres et de leur croissance.

- **Décider : définir des objectifs de gestion**

Le propriétaire établit ensuite une synthèse raisonnée à partir des souhaits personnels qu'il émet en général pour sa forêt et des différents facteurs recensés par le diagnostic au niveau de ses parcelles. Il doit tenir compte notamment des conseils de vigilance produits pour certaines essences. Il choisit une ligne directrice pour chaque unité de gestion. Par exemple : production de bois par gestion multifonctionnelle, production de bois par ligniculture, chasse, forêt réservée aux loisirs... Cette étape comporte fatalement des prises de risque.

Les trois grands ensembles de préconisations décrits précédemment vis-à-vis du changement climatique, correspondant à différents niveaux d'intensivité des interventions, vont alors orienter ses décisions. Selon sa sensibilité personnelle à tel ou tel argument, le sylviculteur peut emprunter des briques à chacun et étayer avec pragmatisme son propre point de vue.

Il est possible – voire souhaitable – de retenir des objectifs différents selon les unités de gestion : gestion intensive à un endroit, gestion multifonctionnelle à un autre. On peut même conserver certaines parcelles en réserve naturelle, selon l'état des peuplements et les moyens disponibles. Dans une même parcelle, il est aussi possible de mener une gestion à deux vitesses avec culture intensive d'arbres à faible densité (détourages, élagages...) dans un peuplement géré de façon extensive.

- **Agir : choisir des itinéraires sylvicoles parcellaires**

Les itinéraires qui seront appliqués à chaque peuplement peuvent être variés, mais doivent permettre d'atteindre l'objectif fixé. On entend par itinéraire la succession des opérations sylvicoles prévues sur une parcelle (plantation, entretiens, éclaircies, élagages, exploitation...), assortie d'un calendrier prévisionnel. La perspective du changement climatique impose cependant pour l'ensemble de la forêt un angle de vue nouveau. On attachera par exemple une plus grande importance à la gestion de l'eau dans le peuplement en limitant les risques de stress hydrique à chaque étape, et on effectuera une surveillance accrue (suivi sanitaire, infrastructure anti-incendie, gestion du gibier...). Une culture de gestion de crise devra aussi être développée pour préparer rationnellement une réaction rapide à des dépérissements potentiels.

Les itinéraires les plus souples sont évidemment à privilégier, s'il y a le choix, car ils peuvent être réorientés en continu en fonction des évolutions observées. Si des itinéraires variés sont retenus par parcelle, ils permettront de façonner une forêt mosaïque susceptible de diluer les risques. Il faudra cependant rester innovant et réserver une place importante dans la forêt à l'expérimentation, au niveau des techniques comme des essences pour tester les plus résilientes ou résistantes lorsque l'évolution climatique s'accroîtra. Il peut être intéressant ainsi de s'inscrire dans une démarche plus globale de gestion adaptative. Se tenir au courant en permanence des avancées scientifiques par l'information et la formation est plus que jamais indispensable.

Des outils pour aider le gestionnaire forestier dans sa démarche

Guide de l'expérimentation forestière (Rosa et al., IDF, 2011)

Ce guide, réalisé à l'initiative du RMT AFORCE, fournit les bases scientifiques et pratiques pour permettre à l'expérimentateur d'éviter les multiples écueils lors de la mise en place d'un essai. Il insiste notamment sur la description du climat, du sol et du matériel végétal. La problématique du changement climatique est abordée en détail : tests d'élimination et de comportement d'espèces ou de provenances, gestion des peuplements dépérissants ou choix d'itinéraires sylvicoles adaptatifs.

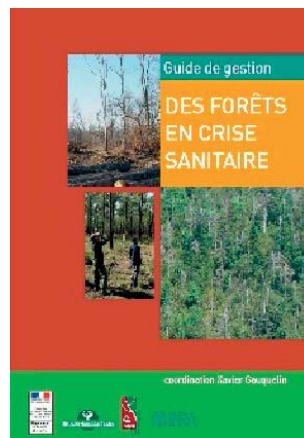
Guide des forêts en crise sanitaire (Gauquelin, coord., ONF-IDF, 2010)

Les crises sanitaires risquent de se multiplier sous l'effet des changements climatiques et de désorganiser la gestion. Ce guide place à la disposition des forestiers les bonnes pratiques à mettre en œuvre pour y faire face, sur les plans organisationnels et techniques.

Jérôme Rosa
Philippe Rissu-Nivert, Éric Pallazzo

Guide de l'expérimentation forestière

Principes de base
Prise en compte du changement climatique



Une politique nationale d'adaptation pour encourager la production d'outils de décision

La démarche présentée ci-dessus se situe au niveau local (forêt, parcelle). Elle s'inscrit bien évidemment dans le cadre d'une stratégie nationale. Celle-ci est structurée par le Plan national d'adaptation au changement climatique établi sous l'égide du ministère du Développement durable. Il porte sur la période 2011-2015 et regroupe 84 actions déclinées en 230 mesures autour de 20 domaines, dont la forêt. Ce plan a vocation à éclairer les décisions publiques en matière d'adaptation et à faciliter l'intégration de l'adaptation dans les politiques publiques existantes (PNACC, 2011).

D'un point de vue opérationnel, les actions des divers organismes forestiers sont harmonisées par le Réseau mixte technologique (RMT) AFORCE (voir encadré 13).

Encadré 13

AFORCE : les forestiers s'unissent pour anticiper le changement climatique

Les constats de dépérissement survenus après la sécheresse de 2003 ont contribué à la prise de conscience sur le terrain, par les forestiers, du changement climatique. Pour anticiper ces changements et répondre aux interrogations qu'ils soulèvent, les organismes forestiers français ont choisi de se regrouper, dès 2008, en un réseau qui rassemble aujourd'hui seize partenaires, acteurs de la recherche, du développement, de la gestion, de la formation et de l'enseignement. Il est soutenu par le ministère en charge de l'Agriculture et

l'interprofession France Bois Forêt. Il vise les objectifs suivants :

- accompagner les forestiers dans la préparation des forêts au changement climatique en leur fournissant des outils d'aide à la décision et en s'assurant qu'ils bénéficient de formations sur ces questions ;
- mobiliser l'expertise pour accélérer la mise à disposition des connaissances et des savoir-faire, et de leur traduction pour la gestion ;
- créer des lieux d'échanges ;
- promouvoir la mise à disposition de services ;
- centraliser l'information.

Figure 31 – Réunion des acteurs de l'adaptation dans le cadre des actions du réseau AFORCE

AFORCE
RMT Adaptation des forêts
au changement climatique



Source : © CNPF.

Chapitre E

L'arbre au service de l'adaptation des espaces agricoles : les potentialités de l'agroforesterie

Philippe Guillet, *Chambre d'agriculture de la Sarthe*,
Matthieu Rebendenne, *Chambre d'agriculture de la Sarthe*

© CNPF / Louis-Michel Duhen CRPF PACA



L'arbre forestier constitue une richesse multifonctionnelle importante pour la France. L'arbre agricole est quant à lui l'autre arbre de nos paysages. Il doit partager un espace qui lui a longtemps été contesté sur l'autel de la rentabilité en ignorant ses multiples contributions. Aujourd'hui, l'agriculture redécouvre lentement ses grandes performances et instaure de nombreuses passerelles de réflexion, communes sur certains enjeux, avec l'arbre forestier. Il reste à construire la nouvelle architecture des espaces agricoles de demain, capables d'être économiquement et environnementalement performants.

L'arbre agricole s'organise en systèmes agroforestiers multiples complexes. Sacrifié au profit de l'intensification et de la spécialisation, il retrouve peu à peu sa place dès que l'on s'intéresse à sa multifonctionnalité.

Les apports des systèmes agroforestiers peuvent réduire les effets néfastes du changement climatique sur les productions agricoles animales ou végétales.

Les effets se comptabilisent positivement tant au niveau de l'eau, du sol, du vent que des microclimats générés par la présence d'arbres et arbustes.

Le développement des systèmes agroforestiers passe par une stratégie sur le long terme intégrant l'expérimentation, l'acquisition de références, l'accompagnement des acteurs.

Choix des essences en contexte de changement climatique, origine génétique des plants, méthodes d'implantation, optimisation du potentiel de stockage de carbone, tels sont quelques-uns des questionnements en communs avec l'arbre forestier, qui invite à un partage des acquis et des méthodes.

Les systèmes agroforestiers : des savoir-faire anciens au service de l'agriculture de demain

Les systèmes agroforestiers : définitions et formes

Les systèmes agroforestiers sont des systèmes de production mixtes qui désignent toutes les formes d'associations de l'arbre avec l'élevage ou la culture. Les bocages de l'Ouest, les oliveraies associées au maraîchage du Sud-Est, les prés-vergers normands, les noyeraies avec céréales de l'Isère en constituent quelques exemples. Les arbres peuvent être disposés en bordure des parcelles (implantations périparcéllaires) ou au cœur même de celles-ci (implantations intraparcéllaires).

Il existe une grande diversité de systèmes agroforestiers qui se distinguent notamment par le mode d'implantation des arbres :

- les formations périparcéllaires sont essentiellement des haies, et parfois des alignements d'arbres (têtards, fruitiers, etc.);
- les implantations intraparcéllaires font souvent référence à des plantations d'alignement disposées à intervalles réguliers (prés-vergers, cultures intercalaires

associées à des arbres à vocation bois d'œuvre ou double-fin, etc.). Mais elles peuvent prendre d'autres visages, à l'instar des parcours à volailles qui associent sur la même parcelle haies intraparcellaires, arbres isolés et bosquets.

Figure 32 – (a) Bocage sarthois (à gauche), (b) pré-verger normand (à droite), deux systèmes agroforestiers traditionnels



Source : © CA72.

Ces deux formes de systèmes agroforestiers sont traditionnellement présentes en Europe. Les systèmes anciens ne résultent pas uniquement d'une action délibérée de plantation sur une parcelle d'origine agricole. Ils sont parfois issus de milieux initialement forestiers : prés-bois, haies constituées par les lisières conservées lors des défrichements. Ils peuvent aussi être des éléments relictuels de structures agroforestières (arbres isolés, etc.), ou le résultat d'un processus de colonisation naturelle.

Les associations de plusieurs systèmes agroforestiers complémentaires sont fréquentes, comme les haies bocagères entourant des prés-vergers. Le territoire rural compte souvent une diversité de systèmes de production juxtaposés autour de l'arbre.

Un savoir-faire ancestral en retrait face à l'agriculture intensive de la fin du xx^e siècle

Depuis les années 1950, la place de l'arbre dans l'exploitation agricole a sensiblement diminué. Consommateur d'espace, non rémunérateur, responsable de pertes de rendement à proximité des cultures, ses rôles ont été minorés. Les aménagements fonciers, la maladie de l'orme, la mécanisation, la diminution de la main-d'œuvre disponible, parfois même la PAC ont accentué son recul. Dans le même temps, la place des enseignements sur l'arbre dans les programmes agricoles diminuait. La recherche n'investissait que très peu sur le sujet. L'agriculteur perdant ainsi ses savoirs sur l'arbre. On pouvait craindre le pire à l'aube du xxi^e siècle.

Pendant ce temps quelques agriculteurs et des techniciens, souvent issus de la forêt, aux côtés de quelques agronomes, ont continué à s'intéresser à l'arbre agricole. Ainsi, à la fin des années 1970, se sont engagées les premières démarches de replantation de haies dans les zones bocagères de l'ouest de la France, et

quelques plantations d'« agroforesterie intraparcellaire » sur des espaces dédiés à l'élevage plus rarement avec des cultures.

Le regain d'intérêt pour l'agroforesterie face aux enjeux de l'agriculture de demain

S'il est difficile d'écrire ce que sera l'agriculture de demain, il est en revanche plus facile d'identifier les enjeux auxquels elle est confrontée aujourd'hui et qui vont conditionner son avenir.

Les connaissances sur le fonctionnement des formations arborées, leurs interactions avec l'agriculture suscitent de nouveau l'intérêt. Les agronomes, les zootechniciens s'interrogent sur la place à donner à l'arbre, et se demandent comment aménager l'espace rural en intégrant réellement « cette forêt linéaire », ces arbres, au cœur des parcelles dans le cadre de leurs travaux sur la gestion de l'eau tant en qualité qu'en quantité, la stabilisation de l'érosion de la matière organique des sols, la création de milieux plus favorables à la biodiversité, l'adaptation au changement climatique, la réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires, les économies, voire la production d'énergies, sans oublier les paysages.

Le tout devra se faire en assurant le renouvellement des agriculteurs, un revenu suffisant, et en limitant les pertes en terres agricoles. Une tâche complexe dans un contexte économique difficile.

Les bénéfices de l'agroforesterie pour l'adaptation des espaces agricoles au changement climatique

Les fonctionnalités de l'arbre des champs sont multiples et font l'objet d'un regain d'intérêt face aux enjeux économiques, sociaux et environnementaux. Il produit du bois, matériau et source d'énergie renouvelables. Il participe à la qualité des paysages et du cadre de vie rural. Enfin, l'arbre contribue au maintien de la qualité de l'eau et au support de la biodiversité. Il possède également de sérieux atouts au service de l'adaptation des espaces agricoles au changement climatique avec l'évolution des pratiques culturales. Les travaux menés depuis plus de dix ans dans le cadre des programmes CASDAR Agroforesterie l'illustrent clairement¹.

Constituer des microclimats plus favorables

Les systèmes agroforestiers se caractérisent par leur capacité à créer leur propre microclimat², qui résulte de l'action de l'arbre sur plusieurs facteurs : le vent et le

1. <http://www.agroforesterie.fr/CASDAR/20092011/casdar0911.html>.

2. Conditions climatiques distinctes du climat général, influencées par des éléments particuliers du paysage et limitées à une région géographique restreinte.

rayonnement lumineux. L'action directe de ce microclimat et de ses conséquences potentiellement bénéfiques sur la gestion des réserves en eau peut permettre d'amortir les impacts sur l'agriculture. Les scénarios d'évolution du climat produits par le GIEC mettent en évidence une augmentation de la fréquence et de l'intensité des périodes de sécheresse et de canicule (GIEC, 2013) avec pour conséquence l'apparition de stress thermiques³ et hydriques⁴ contre lesquels les arbres pourraient jouer un rôle régulateur encore plus marqué à l'avenir.

Les systèmes agroforestiers fournissent de l'ombrage aux animaux en période estivale, qui permet de réduire la dépense d'énergie allouée à la lutte contre la chaleur, et donc d'augmenter le bien-être animal. Dans la mesure où les animaux sont très sensibles aux élévations de température, l'ombrage contribue à limiter la baisse de performance des élevages en optimisant les rations alimentaires pour une meilleure productivité.

Le microclimat instauré sur la parcelle par les implantations intraparcellaires protège également les cultures et les prairies des stress thermiques.

Protéger contre le vent pour réduire les pertes de productivité

Les haies constituent un rempart contre le vent. En réduisant sa vitesse dans les parcelles, les haies permettent de limiter ses actions mécaniques néfastes vis-à-vis des productions animales et végétales. Les organes végétaux des cultures (feuilles, tiges, fleurs et fruits) sont moins sollicités. Les feuilles subissent moins de déchirures, de lacérations et d'arrachements, qui engendrent une baisse proportionnelle d'activité photosynthétique et de résistance des feuilles à la transpiration. Les intempéries ou les fortes rafales de vent peuvent aussi provoquer la verse⁵ des cultures.

Le confort et le niveau de performance des animaux sont meilleurs lorsque la vitesse du vent est réduite par temps froid et humide : cela est dû à la réduction de l'énergie allouée à la thermorégulation de l'organisme.

Les haies situées à proximité des bâtiments permettent des économies d'énergie, et donc des réductions des émissions de carbone.

Un effet brise-vent est également possible dans le cas d'implantations intraparcellaires.

3. Stress subi par une plante dont la quantité d'eau transpirée est supérieure à la quantité absorbée.

4. Stress dû à une accumulation de chaleur altérant le métabolisme.

5. Accident de végétation touchant notamment les céréales, qui se trouvent couchées au sol.

Optimiser l'utilisation de l'eau pour améliorer la résilience à la sécheresse ?

En limitant la vitesse du vent, les haies réduisent le pouvoir évaporant de l'air, et par là l'évapotranspiration potentielle des végétaux. L'évapotranspiration réelle, quant à elle, dépend certes de l'action des haies sur le vent, mais aussi du niveau d'alimentation en eau des végétaux. En conditions humides, les haies n'ont aucune influence sur le niveau de production des cultures. Mais, en conditions sèches, les implantations péri-, voire intraparcellaires réduisent l'évapotranspiration potentielle, ce qui a pour effet de maintenir les stomates⁶ des feuilles ouverts plus longtemps, alors qu'ils se seraient fermés plus rapidement en l'absence de haies, et donc de maintenir des conditions favorables à la croissance des plantes. Ainsi, même si la réduction de la quantité totale d'eau consommée par les cultures est relativement faible, celle-ci est mieux valorisée au cours des journées d'été chaudes et sèches, ce qui a pour effet potentiel d'augmenter la quantité de matière sèche produite avec une même quantité d'eau.

En implantation intraparcellaire, les arbres et les cultures sont complémentaires. L'arbre accède à l'eau des couches profondes du sol et a la capacité de la restituer aux couches de surface, ce qui la rend accessible aux cultures.

Protéger et optimiser les sols pour les rendre plus résilients aux aléas climatiques

Face au changement climatique, les systèmes agroforestiers peuvent jouer un rôle en stockant activement du carbone. Le potentiel de stockage est certes important au niveau des parties aériennes, mais il l'est également au niveau racinaire et dans le sol, au travers des possibilités de reconstitution des taux de matière organique⁷ des terres agricoles.

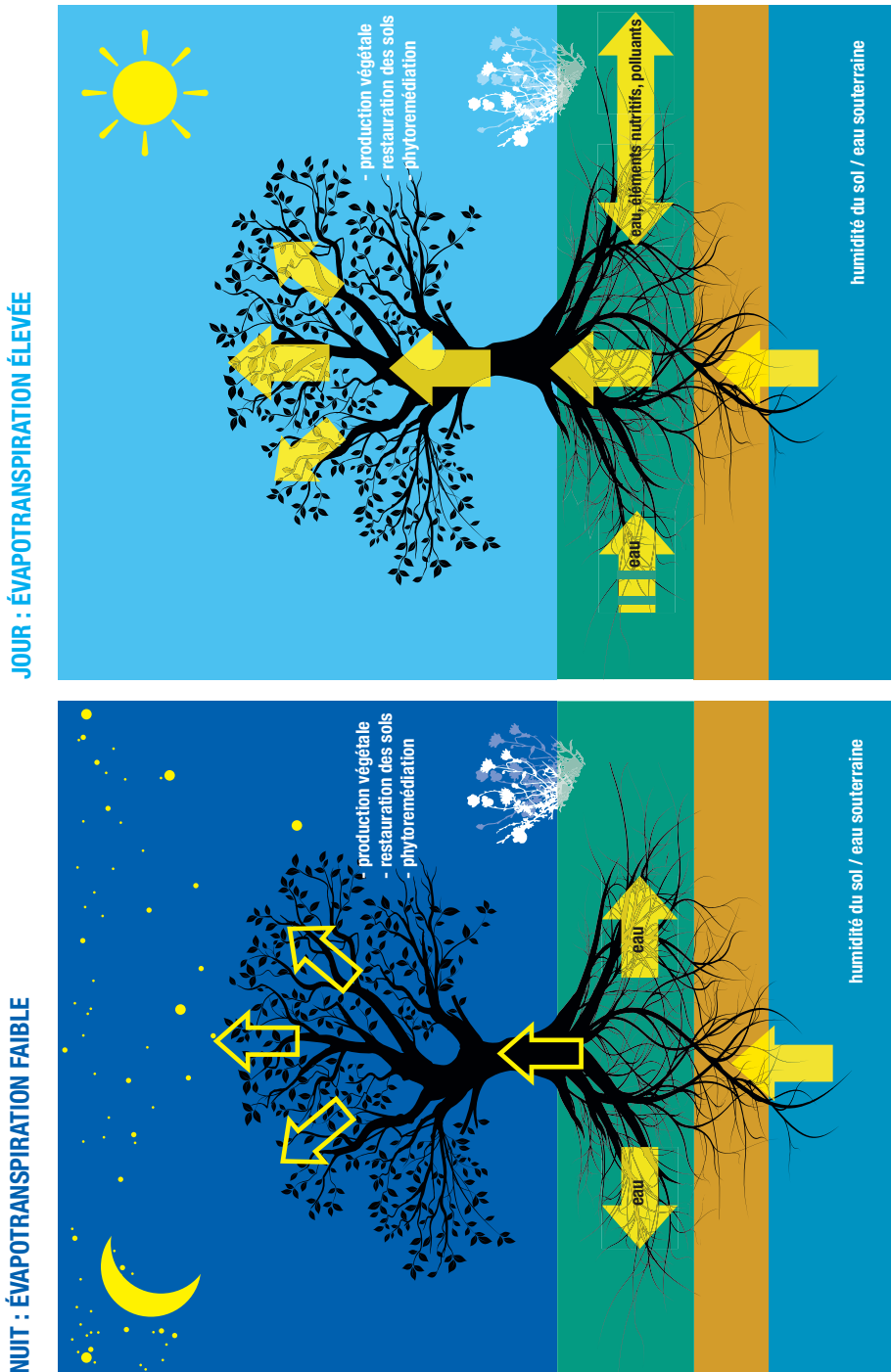
En participant à la recapitalisation des sols en carbone, les systèmes agroforestiers intraparcellaires réapprovisionnent les parcelles en un élément fondamental dans les cycles biogéochimiques. Ces apports en matière organique contribuent à améliorer la fertilité du système en améliorant l'activité des champignons et de la pédofaune⁸. Ils participent aussi à l'augmentation de la capacité de stockage en eau du sol.

6. Orifice de l'épiderme des organes aériens des végétaux, qui permet les échanges gazeux entre la plante et l'air ambiant ainsi que la régulation de la pression osmotique. Il permet l'entrée de carbone pour que la plante puisse synthétiser de la matière organique.

7. Résultante de la décomposition de la matière composant les êtres vivants végétaux, animaux, ou micro-organismes composant leurs organes et fabriquée par ceux-ci (bois, feuilles, etc.).

8. Ensemble de la faune effectuant tout ou partie de son cycle de vie dans le sol.

Figure 33 – Le processus de l'ascenseur hydraulique (Liste et White, 2008)



Infographie : studio du département de l'édition de la DILA. Crédit photo : fotolia

Source : d'après Dupraz, 2009.

La protection des sols est aussi effective au travers du rôle anti-érosif des systèmes agroforestiers. Judicieusement disposés, ils constituent un obstacle à l'entraînement des éléments les plus riches, notamment les limons et la matière organique. Ils constituent ainsi un rempart face à l'augmentation pressentie des épisodes pluvieux violents. L'effet brise-vent des haies contribue aussi à lutter contre l'érosion éolienne.

Par leurs multifonctionnalités, les systèmes agroforestiers constituent donc des outils performants pour s'adapter aux conséquences du changement climatique annoncé.

Leviers d'action pour le développement des systèmes agroforestiers

Les agriculteurs doivent sans cesse adapter leurs entreprises agricoles aux règles du marché, notamment en y intégrant les problématiques environnementales et les incertitudes sur le climat. Les choix sont basés sur des objectifs à rentabilité immédiate ou à court terme. On est loin des réalités touchant à l'arbre, où les investissements voient leurs premiers résultats à cinq, dix, voire vingt ans. Nombreuses sont les raisons d'avoir des systèmes agroforestiers dans l'espace agricole. Cependant, pour assurer leur développement, il faut lever les appréhensions, les freins, souvent basés sur des inquiétudes quant à leur performance économique et leur adaptation aux contraintes techniques actuelles. La première difficulté à surmonter est aussi souvent plus d'ordre culturel que technique. Mais il faut se réappropriier les bases de l'agronomie.

Expérimenter, éprouver, tester et adapter les systèmes

De plus en plus d'agriculteurs sont prêts à accorder une place aux systèmes agroforestiers pour répondre à leurs problématiques de qualité d'eau, de préservation de sols, de biodiversité, de réduction des produits phytosanitaires, de maintien des rendements mais tous s'interrogent sur la méthode à développer pour construire ces systèmes, en prenant en compte l'adaptation au changement climatique, et tout cela en un temps le plus court possible. Il faut donc aujourd'hui développer l'expérimentation sur les techniques d'aménagement des espaces agricoles capables de répondre aux attentes, autour de plusieurs axes importants :

- dans les espaces ouverts depuis toujours ou depuis les grands aménagements fonciers, il faut imaginer une nouvelle organisation spatiale. Agroforesterie péri-parcellaire, intraparcellaire, ou les deux associées, les pistes sont nombreuses ;
- dans les espaces dits « bocagers », les travaux doivent intégrer la poursuite de l'adaptation des exploitations agricoles aux contraintes de mécanisation de plus en plus affirmées avec parfois un recul important de l'élevage, activité en outre traditionnellement plus favorable à la présence d'arbres. Comment réaménager l'espace sans faire régresser davantage la place de l'arbre sur ces territoires ?
- le vieillissement des formations arborées dans l'espace agricole constitue une réalité marquée. Il faut mettre en place une dynamique de renouvellement et de

valorisation d'espaces disponibles, faute de quoi nous constaterons une constante régression de la présence de l'arbre avec toutes ses conséquences ;

– l'évaluation de la performance économique de l'arbre en agriculture est un travail complexe qu'il convient de poursuivre pour favoriser son retour au sein des territoires. Chiffrer les aménités visibles et invisibles reste un enjeu majeur pour convaincre les agriculteurs ;

– arbres des champs ou des forêts partagent les mêmes enjeux de recherche au travers de plusieurs problématiques : adaptation des essences face au changement climatique, sélection des ressources génétiques, développement de techniques d'implantation économes en eau, choix d'itinéraires techniques de gestion.

Les interrogations des praticiens sont, elles aussi, assez proches : le chêne pédonculé a-t-il encore sa place dans les plantations ? Pourra-t-il conserver un statut dominant ? Doit-on l'y aider dans les projets à venir ? Quelle(s) essence(s) lui substituer (chêne sessile, chêne cerris...)?

Peut-on laisser faire des introductions d'essences au potentiel génétique de type « méditerranéen » dans la moitié nord de la France ? Quels en sont les risques ?

Comment implanter des systèmes agroforestiers à moindre coût en économisant l'eau ? Faut-il privilégier la régénération naturelle des haies ou recourir à la technique artificielle ?

Comment évaluer l'état d'affaiblissement d'arbres dans un réseau de haies ?

Figure 34 – Expérimenter, acquérir des références, une étape essentielle dans le développement des systèmes agroforestiers



Source : © CA72.

Sensibiliser, vulgariser, former tous les acteurs des territoires

La disparition des savoirs sur l'arbre est une triste réalité. Le développement de systèmes agroforestiers performants sur les exploitations agricoles passe par toutes les étapes de la transmission des connaissances. Si l'arbre reprend aujourd'hui une meilleure place dans les cursus de formation initiale agricole, il reste à assurer cette transmission aux actifs agricoles (salariés, chefs d'entreprise, entrepreneurs, techniciens, etc.). Après des plus anciens d'entre eux qui parfois ont été les acteurs du recul des arbres dans le paysage, la tâche est difficile.

Il faut aussi assurer l'information et la formation des élus, des aménageurs des espaces et des associations.

Les échanges doivent se développer avec les grainetiers, les pépiniéristes, les revendeurs de plants pour mieux leur faire appréhender les enjeux autour du choix des essences, de leur origine et de leur potentiel génétique.

Figure 35 – Former, informer pour s'adapter



Source : © CA72.

Accompagner sur le long terme

Comme pour la forêt, la démarche de réappropriation autour de l'arbre agricole ne peut se contenter de « programmes flashes ». C'est dans la stratégie marathon que l'action aura le plus d'efficacité. Il faut admettre que la performance dans l'action

ne se mesure pas seulement aux kilomètres de haies ou aux milliers d'arbres plantés, mais aussi à la capacité à accompagner dans la durée. Il est nécessaire de développer des *scenarii* basés sur des critères économiques fiables, des filières de valorisation agricoles et forestières communes qui mettent en évidence la performance des systèmes agroforestiers à l'échelle des exploitations agricoles sur le long terme, et prenant en compte réellement le changement climatique avec toutes ses incertitudes. Les soutiens financiers de l'Europe et l'État, des régions, des départements sont indispensables dans cet objectif.

L'agriculture ne peut se passer de l'arbre pour espérer s'adapter au changement climatique. Enfin, un regard croisé entre arbre forestier et arbre agricole apparaît plus que nécessaire pour trouver plus rapidement les meilleures options de gestion possibles de nos espaces agricoles et forestiers, et sensibiliser d'un même élan les propriétaires de ces espaces aux nouveaux défis qu'entraîne le changement climatique.

Figure 36 – Les systèmes agroforestiers, une voie d'avenir pour l'agriculture de demain face au changement climatique



Source : © CA 72.

Chapitre F

Les activités du bois au cœur du changement climatique

Jean-Luc Peyron, *Ecofor*,
Alain Bailly, *FCBA*

© ONERC / Sylvain Mondon



La filière forêt-bois représente un secteur économique significatif et à fort potentiel de l'économie française, qui rassemble des activités multiples et reliées entre elles.

Elle a un rôle majeur à jouer pour permettre l'adaptation des forêts au changement climatique et l'atténuation de ce dernier, tout en contribuant aux transitions écologique et énergétique.

À moyen terme, la récolte de bois pourrait augmenter à la faveur d'une productivité (baisse de la rigueur climatique) et de dépérissements (extrêmes climatiques) accrus, des mesures d'adaptation de la forêt et d'un développement des usages du bois.

À long terme, elle aura à s'adapter profondément aux contraintes imposées par le climat à la forêt en agissant au niveau des essences, de leur répartition, de leur productivité et des infrastructures de traitement. Elle devra aussi faire face à des contraintes supplémentaires d'exploitation forestière (difficulté d'accès lors d'hivers humides) et à des risques accrus d'incendie dans les usines.

L'usage accru du bois aujourd'hui et dans les prochaines années permettra de contribuer à la transition énergétique (sobriété carbone, propriétés isolantes du bois) et d'aider à l'adaptation des massifs existants sur notre territoire.

Si la forêt apparaît fortement sujette au changement climatique, il en va de même des multiples biens et services qu'elle engendre (cf. chap. A). Le bois tient une place à part dans cette palette : il est en effet un matériau majeur, à la fois traditionnel, moderne et en devenir (METL, MRP, MAFF, 2013) ; il est aussi une source d'énergie renouvelable et de molécules pour la chimie. De plus, son exploitation n'a pas pour seule vocation d'alimenter les ménages et les industries : elle est aussi le principal moyen de gestion de la forêt. Elle peut ainsi être mobilisée à l'encontre du changement climatique soit pour l'atténuer en luttant contre l'effet de serre, soit pour composer avec lui en s'y adaptant.

C'est dans ce contexte qu'un aperçu de la richesse des liens entre le bois et le changement climatique est donné ici à travers quatre thèmes successifs :

- les débouchés, l'organisation et les enjeux propres à la filière forêt-bois qui regroupe les activités de production, d'exploitation et de transformation du bois, dont la connaissance est importante avant de se placer dans le contexte du changement climatique ;
- la contribution de cette filière au cycle du carbone, qui est indissociable de l'élaboration du bois, de ses utilisations, et de ses implications en termes d'atténuation du changement climatique ;
- le rôle général des activités d'exploitation du bois pour adapter la forêt aux enjeux actuels, dont ceux qui touchent au climat ;
- enfin, la façon dont la filière pourrait être affectée par le changement climatique.

La filière forêt-bois : beaucoup plus qu'une simple filière

Le bois possède différentes propriétés qui lui ouvrent de multiples débouchés (Alcimed, 2012). Mis en œuvre après sciage, fendage, tranchage ou déroulage, il apporte ses qualités structurelles ou esthétiques à l'emballage, à la construction, aux meubles et à d'innombrables objets. Matière fibreuse, il est couramment déchiqueté dans les installations de la trituration ; il peut alors être reconstitué au sein de panneaux de fibres ou de particules dont les utilisations rejoignent celles du bois d'œuvre ; mais il peut aussi être dégradé plus complètement, par des procédés mécaniques et chimiques, jusqu'à une qualité papetière, voire textile. Comme il est constitué de molécules complexes aux propriétés intéressantes (susceptibles d'être transformées en sucres, alcools, résines, solvants, émulsifiants, adhésifs, arômes, dérivés pharmaceutiques...), ses débouchés en chimie organique sont en plein développement dans le cadre de bioraffineries. Enfin, essentiellement composé d'atomes de carbone et d'oxygène, il est utilisable à tout moment et sous diverses formes comme source d'énergie pour les ménages et les industries.

La filière forêt-bois se structure ainsi en grandes activités :

- la gestion forestière maintient la croissance et la santé des forêts tout en désignant les arbres à couper ;
- l'exploitation forestière « mobilise » ces arbres en les faisant abattre pour les rendre ainsi propres au transport, aux échanges, et d'ores et déjà utilisables dans des débouchés directs énergétiques ou de services ;
- une première transformation du bois réalise des produits intermédiaires tels que sciages, placages, panneaux et pâte à papier...
- une seconde transformation éventuelle élabore des charpentes, menuiseries, meubles, objets divers, emballages, papiers et cartons, produits chimiques...

Figure 37 – Transport de bois d'oeuvre issu d'un coupe d'éclaircie dans une forêt de montagne



Source : © J.-L. Peyron.

Après exploitation, le bois se présente sous deux grandes formes principales : en premier lieu, des grumes ou billons, parties de troncs de diamètre en général supérieur à 22,5 cm, qui alimentent les industries du bois d'œuvre, à commencer par les scieries (voir fig. 37); en second lieu, des rondins de faible dimension, issus soit de petites tiges, soit de la partie supérieure du tronc ou de branches de plus gros arbres (voir fig. 38), qui sont parfois directement déchetés en forêt pour produire des plaquettes et viennent approvisionner les industries de la trituration et les débouchés énergétiques (y compris directement auprès des ménages).

Figure 38 – Exploitation de bois de trituration dans un taillis sous futaie d'essences diverses



Source : © J.-L. Peyron.

Cette structure et ces relations sont schématisées sur la figure 40. La filière forêt-bois n'y apparaît pas aussi linéaire que sa dénomination ne le laisse supposer. On note tout d'abord plusieurs itinéraires possibles pour le bois selon qu'il a une nature de bois d'œuvre (30 à 35 % de la récolte), de bois de trituration (20 à 25 % de la récolte) ou d'énergie (40 à 50 % de la récolte). La fabrication de produits principaux s'accompagne ensuite de produits secondaires ou connexes qui permettent une autre utilisation. Par exemple, la fabrication de sciages à partir de bois ronds engendre des déchets (près de 50 % de la matière utilisée), qui sont ensuite valorisés comme du bois de trituration ou pour l'énergie (voir fig. 39); de même, les procédés papetiers chimiques extraient la cellulose du bois en éliminant la lignine (de l'ordre de 30 % du bois), qui est ensuite valorisée par des procédés chimiques ou énergétiques. En outre, une part importante de certains produits est réutilisable (palettes de transport...) ou recyclable (plus de 60 % des papiers et des cartons consommés). Après utilisation, en fin de vie, les produits du bois sont susceptibles d'alimenter d'autres usages, comme la trituration, ou l'énergie

s'ils n'ont pas subi des traitements (préservation, collage, peinture, vernis) qui les ont rendus impropres à cette nouvelle vie. Finalement, les utilisations du bois s'effectuent en partie en cascade, depuis le bois d'œuvre jusqu'au bois de trituration et d'énergie, avec des rebondissements vers d'autres gammes de produits.

Figure 39 – Production de plaquettes de bois pour la trituration ou l'énergie à partir des chutes de bois d'une scierie

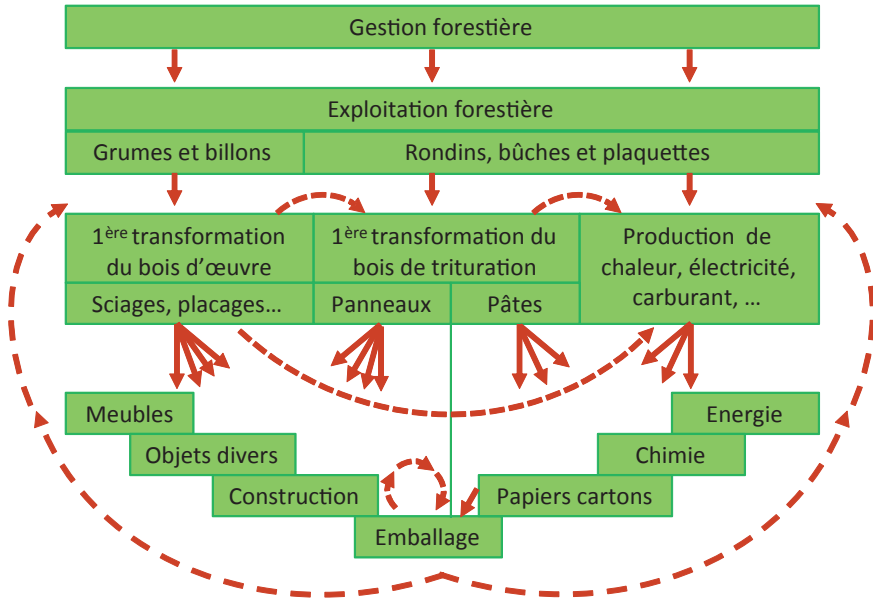


Source : © J.-L. Peyron.

La filière forêt-bois est fondée sur une matière renouvelable ; elle est sobre en ressources fossiles et offre de multiples possibilités parallèles ou successives de valorisation et de recyclage de la matière : à l'image des écosystèmes qui l'alimentent, elle tend à optimiser les flux de matière et d'énergie. Elle symbolise bien ainsi la bio-économie.

Le bois répond parfaitement aux objectifs actuels de la transition énergétique, et apparaît bel et bien comme un matériau d'avenir (MEDDE, 2014). La filière forêt-bois française est relativement développée et occupe directement plus de 420 000 emplois en France (Maapat, IFN, 2011), ce qui en fait en termes d'emploi un secteur équivalent à celui de l'automobile. Cependant, elle fait l'objet de préoccupations majeures (Caullet J.-Y, 2013). Elle est, de manière structurelle, importatrice de bois, notamment de produits tels que les sciages résineux, les produits papetiers, l'ameublement, qui représentent globalement une forte valeur ajoutée. Et dans le même temps, elle n'exploite qu'une partie de sa production ligneuse, ce qui est sans doute dommageable pour son économie comme pour la vulnérabilité de la forêt aux risques (cf. chap. B), et représente ainsi un potentiel à mieux valoriser.

Figure 40 – Schéma de la filière forêt-bois



On voit apparaître les compartiments successifs de la gestion forestière, de l'exploitation forestière et de la première transformation du bois. La seconde transformation n'y apparaît qu'implicitement pour permettre de satisfaire les attentes des divers secteurs utilisateurs (positionnés en bas), à l'aide des produits semi-finis issus de la première transformation. Les flèches représentent les flux de bois. Les pointillés mettent en évidence la valorisation des produits secondaires, le recyclage et la récupération en fin de vie.

Une contribution multiforme du bois à la lutte contre l'effet de serre

Lorsqu'est venue sur le devant de la scène la question du changement climatique, la première réaction a été de s'attaquer aux causes du phénomène en limitant le développement de la consommation des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) et en favorisant la séquestration du carbone. Ce raisonnement a particulièrement prévalu pour la forêt qui est fortement concernée par ces deux aspects. En effet, le bois est constitué, à l'état sec, pour moitié environ de carbone puisé dans l'atmosphère, ce qui en fait un épurateur de l'air, un matériau aisément usinable, ainsi qu'une source d'énergie renouvelable et substituable aux énergies fossiles.

Ce potentiel résulte d'un fait connu depuis plus de deux siècles : la photosynthèse prime sur la respiration d'un arbre qui capte ainsi plus de carbone qu'il n'en émet ; cet effet positif demeure dans la majorité des cas lorsqu'on prend aussi en compte la respiration des autres organismes présents dans l'écosystème, notamment les insectes, les champignons et les bactéries qui dégradent la matière organique. Il en résulte qu'une forêt en croissance fixe le carbone de l'air.

Le carbone fixé est ensuite stocké : il est d'abord présent en forêt dans le bois, la végétation et le sol ; il reste ensuite dans les produits pendant une durée plus ou moins longue mais qui va, au total, de plusieurs années à plusieurs siècles. Cette durée de stockage est un avantage vis-à-vis de l'effet de serre (figure 41).

Figure 41 – Construction traditionnelle en bois pour l'exploitation des mines d'argent de Kutna Hora (République Tchèque)



Source : © J.-L. Peyron.

En l'absence d'exploitation, cependant, des arbres meurent et se dégradent sur place : ils sont à l'origine d'émissions accrues de carbone qui tendent à en équilibrer la capture. Il en résulte qu'une forêt non exploitée fixe de moins en moins de carbone. L'exploitation laisse aussi se dégrader sur place des rémanents, mais elle récolte surtout des bois à partir desquels sont élaborés des produits. Ces derniers entrent en concurrence avec des produits similaires issus de matériaux dont la transformation est en général plus gourmande en énergie que le bois. Ils se substituent ainsi à des ressources fossiles lorsqu'ils sont utilisés soit à titre énergétique, soit en tant que matériaux équivalents à des composés plus consommateurs d'énergie fossile, soit après récupération en fin de vie. Dans ce dernier cas, deux avantages se cumulent puisque des émissions de dioxyde de carbone fossile sont évitées successivement par rapport aux autres matériaux et aux autres énergies. La substitution du bois à d'autres matériaux ou énergies représente donc souvent un avantage à exploiter (figure 42).

Figure 42 – Bâtiment moderne en bois : Institut de recherche forestière de Joensuu (Finlande)

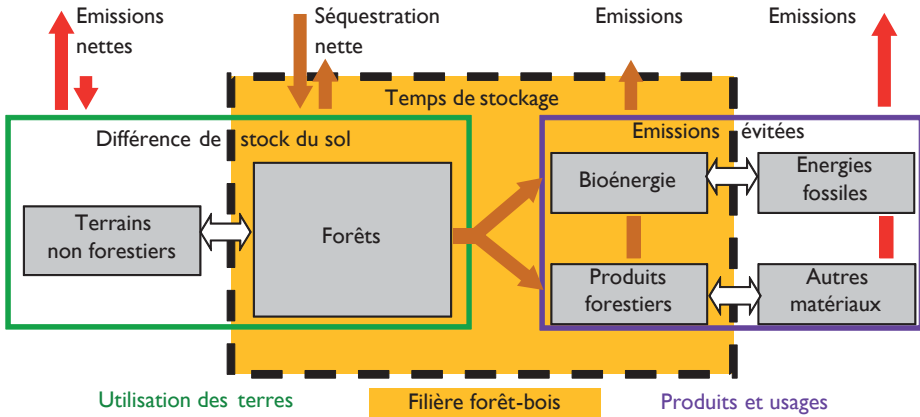


Source : © J.-L. Peyron.

Enfin, le reboisement d'un sol agricole se traduit, en général, par une augmentation du stock de carbone dans les sols et la végétation, y compris les arbres.

La contribution de la forêt au cycle du carbone et à la lutte contre l'effet de serre est donc multiple (Nabuurs *et al.*, 2007). Elle mobilise l'ensemble de la filière forêt-bois en jouant à la fois par le reboisement, la séquestration, le temps de stockage du bois aussi bien en forêt que dans la sphère économique, et la substitution considérée au niveau des matériaux comme des énergies fossiles (*cf.* fig. 43). L'importance relative à accorder à ces différentes options d'atténuation est un sujet de débats. Elle dépend des choix de gestion et d'exploitation forestières. Or ceux-ci ne sont pas les mêmes selon qu'on raisonne à court ou long terme, selon la façon dont on évalue la substitution en comparant énergies et matériaux, selon le dynamisme des marchés du bois. En outre, la vulnérabilité des forêts tend à croître avec le volume de bois sur pied et le changement global (*cf.* chap. B) : elle doit aussi être considérée attentivement pour trouver un bon équilibre.

Figure 43 – La filière forêt-bois et le cycle du carbone



La filière forêt-bois participe au cycle du carbone grâce à la photosynthèse et à la respiration des divers organismes inféodés à la forêt qui produisent une séquestration nette positive. La récolte de bois provoque la libération rapide d'une fraction du carbone et plus lente de la partie qui contribue à des produits à longue durée de vie. Elle évite de plus les émissions de carbone fossile liées aux produits et énergies qui seraient utilisés à défaut du bois. Tous ces éléments doivent être pris en compte pour une bonne analyse de la contribution de la filière forêt-bois à la lutte contre l'effet de serre.

Source : d'après Nabuurs *et al.*, 2007.

Les activités du bois sont essentielles pour adapter la forêt aux enjeux actuels et futurs

Il résulte des considérations précédentes que la filière forêt-bois alimente des débouchés majeurs et contribue à la lutte contre l'effet de serre bien au-delà de la séquestration de carbone en forêt. Elle est tout aussi indispensable pour prémunir la forêt contre les risques qui la guettent, parmi lesquels le changement climatique.

Dans la plupart des cas, le bois n'est coupé que s'il a de fortes chances d'être valorisé au sein de la filière forêt-bois et au profit d'un débouché. Or la coupe de bois n'est pas seulement la récolte du « fruit » de la gestion forestière. Elle en est aussi le moyen principal, par lequel le forestier assure le renouvellement de la forêt, conforte son état sanitaire et la conduit vers les objectifs qu'il lui a assignés : la régénération de la forêt est obtenue en ouvrant graduellement les peuplements pour apporter de plus en plus de lumière ; la réduction progressive au cours temps du nombre d'arbres d'une génération donnée confère à la forêt un meilleur état sanitaire et une plus grande stabilité, tout en permettant d'atteindre l'équilibre souhaité entre les différentes essences et générations d'arbres ; si les espèces en place s'avèrent inappropriées, leur substitution par d'autres plus adaptées passe nécessairement par leur récolte ; lorsque surviennent des dépérissements en raison de la sécheresse, de l'incendie, du vent, ou encore d'insectes ravageurs ou pathogènes, il est primordial d'enlever les arbres touchés

pour éviter le développement de problèmes sanitaires sur les arbres épargnés jusque-là et permettre la restauration des zones frappées. De plus et de manière générale, la vente de bois constitue la part principale des revenus forestiers à partir desquels il est possible de financer les opérations d'entretien, de surveillance, de reboisement.

Les mesures d'adaptation au changement climatique consistent (chap. B) à favoriser les essences supportant à la fois les conditions actuelles et les conditions futures, à accroître la diversité de ces mêmes essences, à augmenter le rythme de renouvellement des arbres et à limiter leurs exigences en eau, à proportionner la récolte à la croissance, à gérer les crises susceptibles d'intervenir, à maintenir un bon compromis entre les différents services rendus par les forêts, non seulement pour soutenir une gestion durable mais aussi pour mieux faire face à l'incertitude de l'avenir... L'adaptation au changement climatique passe, elle aussi, par une exploitation raisonnée du bois pour laquelle le bon fonctionnement de la filière forêt-bois est requis.

Le changement climatique affectera différemment la filière forêt-bois selon les échéances

Indispensables à l'adaptation des forêts au changement climatique comme aux principaux enjeux forestiers (prévention des risques, production de biens et de services socioculturels et écologiques, dont la lutte contre l'effet de serre), les activités du bois sont *de facto* très concernées à moyen et à long terme par les conséquences directes et indirectes du réchauffement attendu (*cf.* tableau 4).

Tableau 4 – Effets directs et indirects à moyen et à long terme du changement climatique sur la filière forêt-bois

	Effets du changement climatique	Effets de l'adaptation des forêts	Effets de l'adaptation des marchés
À moyen terme	<ul style="list-style-type: none"> Niveau d'exploitation Gestion des crises 		<ul style="list-style-type: none"> Propriétés isolantes du bois Echanges commerciaux
À long terme	<ul style="list-style-type: none"> Contraintes d'exploitation Sinistralité industrielle Importance relative de la production de bois Evolution des zones de production Adéquation entre production forestière et usages du bois 		

A moyen terme, le niveau d'exploitation des forêts pourrait augmenter, notamment en raison de la gestion des crises et de leur prévention. On s'attend d'abord à une croissance ou décroissance de la productivité des forêts avec le changement climatique selon les endroits, qu'elle commence probablement en général à croître pour finir par se réduire si aucune mesure n'est prise (ONERC, 2009). On s'attend aussi que des sécheresses plus fréquentes, intenses et étendues, voire des tempêtes, soient suivies de dépérissements ainsi que de risques d'incendie et sanitaires exacerbés. De tels phénomènes laissent penser qu'une offre

de bois accrue devrait être mise sur le marché pour peu que le forestier ait les moyens de réagir à ces crises (voir fig. 44). Ils perturbent cependant l'approvisionnement des entreprises en mettant inopinément sur le marché des bois en plus grande quantité et de moindre qualité que dans les circonstances habituelles. Si des mesures préventives sont de surcroît mises en place pour limiter l'ampleur de tels phénomènes, elles se traduiront encore par une offre de bois accrue pour réduire la vulnérabilité et accélérer le renouvellement des forêts au profit d'essences adaptées au climat à venir. Dans ce cas, la qualité des bois devrait peu varier en moyenne par rapport aux attentes de l'industrie qui demande souvent des arbres moins gros que ceux qui sont présents en forêt, notamment en résineux.

Figure 44 – Stockage et conservation sous aspersion de bois sinistrés (ici par la tempête Klaus de 2009 en Aquitaine)



Source : © J.-L. Peyron.

À moyen et à long terme, le changement climatique est susceptible de perturber directement les activités de la filière forêt-bois. D'abord en soumettant l'exploitation forestière à des contraintes supplémentaires : des hivers plus courts, plus chauds, probablement plus humides, avec moins de jours de gel, augmenteront la sensibilité des sols au tassement des engins d'exploitation ; de même, une saison de végétation nettement allongée réduira la période durant laquelle les feuillus peuvent être récoltés. On peut s'attendre en outre à des risques supplémentaires d'incendie dans des usines lors des épisodes intenses de sécheresse ou de canicule, comme cela a été le cas en 2003.

À long terme, les zones de production et l'approvisionnement en bois des entreprises pourront se trouver modifiés par les évolutions en matière d'essences cultivées, de structure des forêts et de modalités de la sylviculture. Dans certains

cas, la vocation productive de certains massifs boisés pourrait être révisée au profit d'autres services rendus par la forêt. De nouvelles zones de production pourraient également émerger. Combinées aux effets directs du changement climatique, de telles modifications conduiraient à produire des bois d'une qualité sans doute assez différente à celle d'aujourd'hui. On peut imaginer que l'industrie puisse s'y préparer progressivement en fonction de la façon dont le changement climatique sévira finalement. Il est important aussi qu'elle soit consultée par rapport aux essences et aux qualités vers lesquelles s'orientera dorénavant la gestion forestière dans les diverses régions.

Il est difficile d'apprécier les conséquences de toutes ces évolutions sur les échanges de bois qui dépendent de bien d'autres facteurs que du seul changement climatique : niveau de l'activité économique, coûts de transport, parités monétaires... On peut imaginer cependant que les variations de l'offre de bois qui sont attendues s'accompagnent du développement des échanges, au moins sur des distances qui seraient peu impactées par une augmentation du prix de l'énergie. Du côté de la demande, les marchés du bois pourraient bénéficier de la sobriété de ce matériau et de ses propriétés isolantes qui constituent un potentiel d'adaptation à la chaleur tout en engendrant des économies d'énergie en hiver sur le chauffage et en été sur la climatisation.

Conclusion

Au cours des dernières décennies, les questions forestières majeures ont plus souvent concerné le fonctionnement des écosystèmes, la biodiversité, le changement climatique, les tempêtes ou la gestion durable des forêts que la filière forêt-bois.

Cependant, cette dernière conserve une position centrale et un rôle stratégique vis-à-vis de la plupart de ces thématiques, et regagne en importance dans le cadre de la transition écologique et énergétique. Son bon fonctionnement et son dynamisme constituent un préalable à toute action forestière et donc à toute adaptation volontariste ou passive au changement climatique, pour gérer aussi bien les tendances que les crises. La filière forêt-bois est fondamentale aussi pour permettre à la forêt de lutter contre l'effet de serre, et des relations se nouent, grâce à elle, entre adaptation au changement climatique et atténuation de celui-ci. Elle subit et subira, évidemment, les conséquences du changement climatique. Mais le fait majeur est bien que les activités du bois jouent un rôle essentiel dans le cadre du changement climatique. Il faut pour cela qu'elles parviennent à surmonter les périodes difficiles et à rester souples, actives et diversifiées pour pouvoir jouer leur rôle pleinement lorsque le besoin s'en fera vraiment sentir. Il faut aussi qu'elles s'associent et soient associées aux réflexions sur l'adaptation des forêts au changement climatique. Ce texte constitue une étape dans ce sens.

Chapitre G

Une balade en forêt en 2050

Isabelle Bellin, *Technoscope*

© ESAT Image-arts graphiques / Erika Gonnord



Comment se faire une idée précise du paysage forestier en 2050 ? En s'y promenant tout simplement ! Avec l'appui de scientifiques, nous vous proposons de nous projeter dans l'avenir en forêt de Tronçais, célèbre chênaie domaniale de 10 600 hectares, située dans l'Allier, au nord du Massif central. Sans certitude, avec beaucoup de présomptions à l'aune des connaissances actuelles, cette description se veut aussi plausible que possible, dans un monde devenu écocitoyen.

Une balade en forêt en 2050

Mardi 9 août 2050. Il fait grand soleil et la circulation est fluide sur l'A71. Timéo a eu le temps de sympathiser avec le jeune couple qui le descend en covotuage chez sa grand-mère Stéphanie, propriétaire d'un gîte de *woofing* à Dun-sur-Auron, au sud de Bourges. Le couple a même bien envie d'y faire une première étape. Timéo les convainc : « Restez un peu, vous verrez : la cité médiévale est chouette, et son beffroi trop beau ! Et vous pourrez venir bosser quelques heures dans l'entoraffinerie de grand-mère où elle élève des insectes pour nourrir ses poissons et sa volaille. »

Stéphanie, toujours aussi dynamique malgré ses soixante-quinze ans, les accueille et installe le couple. Heureuse, comme chaque année, de partager quelques jours avec cet ado turbulent de quinze ans qui vit à Paris et adore la nature. Comme elle au même âge.

« Ravie de te retrouver, bonhomme. Bonne route ? »

– Super ! À part cet incendie, ça fumait encore et quelle odeur ! Un vrai *no man's land* !

– Oui, j'ai eu l'info ce matin : 200 hectares de pinède ont brûlé hier en Sologne. Heureusement, ça commence à être moins fréquent et moins violent. Certains secteurs restent néanmoins très sensibles aux dépôts de feu, mais on sait maintenant mieux anticiper les risques en surveillant, en débroussaillant, en créant des zones coupe-feu. Les pompiers ont dû apprendre à s'organiser avec des moyens limités pour faire face aux incendies qui se développaient dans des régions de plus en plus vastes et pendant une saison à risque plus longue. On sait aussi quelles espèces replanter, moins inflammables ou capables de repousser ensuite. »

Retraîtée de l'ONF depuis quinze ans, Stéphanie est toujours aussi sensible à tout ce qui touche à la forêt, toujours prête à expliquer, raconter, renseigner les *woofers* de passage, forcément intéressés : « C'est une des nombreuses conséquences du changement climatique : les étés sont de plus en plus chauds et longs, les sols sont très secs et certaines forêts, comme en Sologne, dans les Landes ou en Pays de la Loire sont très exposées. Tu n'étais pas né quand on a pris conscience de tout cela. Dès les années 2000, la responsabilité de l'homme dans l'évolution du climat était établie. Les sécheresses ont commencé par devenir plus fréquentes, puis dévastatrices, tout comme les inondations et les cyclones, avec de plus en plus de victimes, des populations entières déplacées, des crises

alimentaires, des écosystèmes bouleversés... Il a fallu ces preuves visibles pour déclencher l'action. La société que tu connais est récente. On avait tout compris il y a cinquante ans, on parlait beaucoup d'écologie, mais peu de gouvernements agissaient. Heureusement, c'est du passé! Depuis une trentaine d'années, on agit en amont et on entreprend dans la durée. Sauf que la planète continue d'encaisser : la température moyenne a augmenté de presque 2 °C depuis 1990 et la mer est montée de près de 30 cm. Et ce n'est pas fini! Malgré tout, on s'est désormais organisés, y compris pour limiter les impacts. Allez, parlons d'autre chose, viens goûter mon délicieux jus d'oranges du jardin.»

En s'installant sous la pergola, elle propose à Timéo de l'emmener le lendemain visiter la forêt de Tronçais, une des plus belles chênaies d'Europe, à une petite heure de route : « Je te raconterai comment la forêt a changé, et ce qu'on a fait pour l'aider à s'adapter. On y tient car elle produit le bois qui sert à faire les tonneaux dans lesquels sont élevés les plus grands bordeaux, bourgogne, des cognacs ou des banyuls... Ce bois est réputé dans le monde entier. » « Super! J'emporterai mon drone. Je viens juste de le fabriquer avec l'imprimante 3D que tu nous as offerte à Noël. » « On partira tôt pour éviter la chaleur », prévient-elle, ce qui enchante moins Timéo... « Ils ont prévu 35 °C. On prendra beaucoup d'eau et un pique-nique. Emporte aussi ton maillot de bain. »



Source : Olivier Baubet, DSF © DSF.

À 7 heures le lendemain, ils montent dans la voiture au biogaz du gîte. Sur la route, ils traversent un bois impénétrable.

« On a planté ces arbres pour produire de l'électricité ou de la chaleur, comme dans ta chaudière à granulés, explique Stéphanie. On appelle cela du bois-énergie. Ici c'est de l'eucalyptus, on le récolte au bout de sept à huit ans, il est ensuite broyé et brûlé. C'était très à la mode dans les années 2020, mais c'est en train de disparaître. Maintenant, on utilise surtout des déchets de scierie, les restes de l'exploitation forestière comme les branches des arbres, les arbres morts, ou le bois trié lors du recyclage. C'est plus rentable. »

C'est un peu tôt pour Timéo pour engager la conversation, il somnole encore. Une fois arrivés au rond-point de Morat, Stéphanie le réveille doucement.

« Humm... elle est où ta forêt? Je ne vois que des broussailles!

– Effectivement, ces chênes n’ont qu’une dizaine d’années. On est dans la futaie Colbert, qui était la partie la plus ancienne de la forêt. Ici, les arbres seraient morts de vieillesse s’ils n’avaient pas été récoltés, ils avaient trois cents, parfois trois cent cinquante ans, un bel âge pour des chênes. On les a coupés petit à petit avant qu’ils ne tombent. Tiens, regarde à quoi ressemblait cet endroit en 2020. »

Elle fouille dans sa poche et déplie son iFlex, une tablette souple qu’elle emmène partout pour faire des photos des arbres, des animaux... ou de ses petits-enfants : « C’était la seule partie totalement préservée depuis qu’elle avait été plantée à la demande de Colbert, au ^{xvii}^e, à l’époque pour construire les bateaux de la marine. Dans le reste de la forêt de Tronçais, les peuplements ont d’abord été intensément exploités, puis patiemment entretenus par les forestiers pendant deux cents ans. Regarde ce petit film : c’était ici même, avant la dernière vente aux enchères en 2004. Les acheteurs de prestigieuses caves marquaient les arbres qu’ils convoitaient. La futaie Colbert avait fière allure avec ses gros chênes majestueux de plus de 30 mètres et, en sous-étage, ces hêtres et ces charmes ! Je ne serai plus de ce monde mais toi, tu pourras revenir dans cinquante ans dans une parcelle qui ressemblera à ça, la futaie de Buffévent, que l’on laisse vieillir comme on l’avait fait pour la futaie Colbert. On enlève juste les arbres qui risquent de tomber. Ces vieux bois et les bois morts sont le refuge de beaucoup d’oiseaux, de chauve-souris et de nombreux insectes. »

En parlant, elle l’emmène dans la dernière zone de la futaie encore sur pied à proximité de l’étang de Morat : quelques ancêtres de près de quatre cents ans, très dégarnis en cime, avec de nombreuses branches mortes, un feuillage très proche du tronc, une écorce qui se détache ici et là. Le sol est en grande partie couvert de houx : « Vois-tu le couple d’écureuils qui nichent dans ce vieil arbre, et entends-tu ce pic épeiche qui tambourine sur un tronc ? Ces arbres jouent un rôle important pour la biodiversité. Même s’ils font un peu peine à voir, ils se défendent encore ! Regarde, ils ont tous développé ce qu’on appelle un deuxième houppier, un feuillage un peu plus bas sur le tronc, comme un petit vieux qui se tasse... »



Source : Olivier Baubet, DSF © DSF.

Progressivement, la luminosité change, le sol est plus sombre, éclairé ici et là par des rayons qui percent un feuillage vert tendre, des mousses apparaissent par endroits, l’ambiance est plus humide, les oiseaux plus nombreux.

« Eh, la voilà la forêt de Tronçais. Elle est en pleine forme ! », s’exclame Timéo.

« Regarde mieux ! », réplique sa grand-mère.

En levant les yeux, il voit que certains arbres ont un peu la même allure que dans la futaie Colbert, dégarnis en tête.



Source : Olivier Baubet, DSF © DSF.

« Sauf qu'ici, et c'est le cas dans une bonne partie de la forêt, ce n'est pas contre la vieillesse qu'ils luttent », lui fait-elle remarquer, « mais contre les sécheresses à répétition. Une des premières mémorables a eu lieu en 1976, elles se sont ensuite multipliées à partir de 2003 et on en a presque tous les cinq ans depuis 2040. Les chênes supportent mal ces accidents à répétition. Dans une forêt voisine, à Vierzon, où le sol est moins favorable qu'ici, ça a même été brutal. Les arbres ont dû vite être récoltés : là-bas, par endroits, la forêt a cédé la place à des landes de plusieurs dizaines d'hectares. Aujourd'hui, beaucoup de chênes souffrent, plus ou moins, un peu partout en France, surtout dans l'Ouest.

– Ici, combien de temps ces arbres vont-ils survivre ?

– On les coupe au fur et à mesure. Les plus affectés ne tiendront pas dix ans... Même les plus sains n'atteindront pas tous 2100 ! Ce qui est sûr, c'est que l'on cherchera à maintenir du chêne ici et à produire la meilleure qualité de bois, aussi longtemps que possible : c'est l'âme de Tronçais. Les forestiers poursuivront le travail de leurs ancêtres pour que les plus beaux chênes se régénèrent, qu'ils poussent lentement et produisent des gros troncs de 50 à 80 cm de diamètre, élancés et sans nœuds pour faire les meilleurs tonneaux. Pour cela, ils ont besoin aussi d'un sous-étage, notamment de hêtres. Or la plupart des hêtres ont dû être coupés, affaiblis par les sécheresses puis attaqués par de petits coléoptères, des scolytes, qui se sont multipliés. Depuis, on a planté du charme pour maintenir une futaie élancée.

– Mais les chênes pourront-ils encore se régénérer longtemps ?

– En fait, certaines espèces résistent mieux que d'autres. »

Sur son iFlex, elle lui montre la différence subtile entre chênes sessiles et pédonculés, au niveau des houppiers, des feuilles, des glands.

« On veille depuis longtemps à ce que ce soit les chênes sessiles qui se régénèrent, car ils sont moins sensibles aux fortes sécheresses, même si on a compris

qu'ils en souffraient aussi, ainsi que des sols saturés en eau lors des périodes de fortes pluies, fréquentes en hiver : 20 % ont déjà disparu. Quant au chêne pédonculé, on n'en voit presque plus.

– Attends, j'en cherche un!»

Timéo pilote son drone d'arbre en arbre, prend des photos et les analyse sur l'iFlex de Stéphanie.

«OK, j'abandonne! D'ailleurs ça change quoi en fait qu'on n'en trouve plus?

– Pas grand-chose en termes de qualité de bois, sauf pour les puristes. En revanche, on perd en biodiversité. Depuis quelques années, on plante d'ailleurs une autre espèce de chêne, méditerranéenne : le chêne pubescent, lui aussi difficile à différencier de ses cousins. Il résiste mieux à la chaleur et ne craint pas les vagues de froid. Les chênes pubescents poussent lentement et le bois est d'un peu moins bonne qualité mais on assure ainsi l'avenir de la chênaie pour tes enfants.

– Quel boulot! Je n'imaginai pas ça!

– C'est vrai. Les gens s'en rendent compte maintenant, il a fallu leur expliquer, notamment avec les ateliers d'information et les chantiers de reboisement où chacun peut venir nous aider. Avant, comme toi, ils ne voyaient pas les arbres souffrir et croyaient qu'on massacrait la forêt sans raison. Aujourd'hui, ils savent que lorsqu'on coupe des arbres, c'est pour en aider d'autres à pousser, c'est ce qu'on appelle la régénération. D'ailleurs, à Tronçais, si on avait laissé faire la nature, on n'aurait jamais produit du chêne de qualité. Et les hêtres, plus compétitifs dans les conditions climatiques de l'époque, auraient tout simplement pris le dessus sur les chênes pour finalement disparaître plus vite à cause du changement climatique! Couper, éclaircir, planter... est indispensable pour façonner la forêt et l'orienter en favorisant la production de bois ou en privilégiant tel ou tel paysage. Et ça demande encore plus de travail aujourd'hui compte tenu de l'impact du changement climatique. Tiens, allons voir de plus près cette zone en régénération. Ici le sol devait être moins favorable, trop d'arbres dépérissaient, on a dû couper la plupart d'entre eux.»

Quelques beaux chênes s'élancent au milieu d'une vaste clairière envahie de fougères, de ronces et de graminées.

«C'est sûr qu'ils ont de la place! ... Mais ça fait un peu vide, et il fait chaud!

– La forêt est une école de patience. Cela prend cent cinquante ans pour faire une belle chênaie, équilibrée comme on dit, avec des arbres de différentes tranches d'âge. On choisit les plus beaux spécimens et effectivement on leur fait de la place et on prépare le sol pour que leurs semis se développent. Pendant trente ans, parfois plus, on dégage les ronces, les fougères et on coupe les arbres qui pourraient les concurrencer. Au bout de soixante-dix ans, les jeunes chênes feront 20 mètres de haut... »

Timéo l'interrompt :

« Oh, regarde, des cerfs !

– Ils sont beaux ! Ils apprécient beaucoup ces clairières où ils trouvent plus de végétation. Mais ils mangent aussi les jeunes pousses de chênes ! Comme ils n'ont plus de prédateurs, il faut surveiller tous les ans les effectifs et demander aux chasseurs de les équilibrer. Car si les populations deviennent trop importantes, la régénération de la forêt est en péril. »

Ils ne sont plus très loin de l'étang de Tronçais et décident d'y casser la croûte. Emportée dans son élan, Stéphanie poursuit : « Le changement climatique nous a obligés à changer la physionomie de la forêt. Elle est plus claire car on espace plus les arbres pour qu'ils aient plus d'eau : ils poussent donc plus vite et on les coupe plus tôt, au bout de cent cinquante ans, deux cents au maximum maintenant. Le bois est d'un peu moins bonne qualité mais on n'a pas le choix. Et la chênaie n'est plus aussi bien équilibrée qu'avant car certaines vagues de régénération ont échoué, par exemple à cause de la terrible sécheresse de 2046. Les arbres s'adaptent aussi : ils perdent leurs feuilles plus tôt, souvent sans passer par ces belles couleurs d'automne que l'on trouve encore plus au nord. Ici, les feuilles virent au marron très vite. Parfois, elles tombent vertes. Elles sont aussi devenues plus petites pour résister au manque d'eau. Il y a également de plus en plus de houx. »

Dès qu'ils sont près de l'eau, Timéo enfile son maillot et pique une tête avant de dévorer son pique-nique. L'endroit, frais et ombragé, est très fréquenté en été. Ici, les arbres sont majestueux et résistent mieux. Tout comme près de la quarantaine de sources de Tronçais. Mais certaines risquent d'être bientôt à sec.



Source : Gilbert Douzon, DSF © DSF.

Pendant que Stéphanie s'assoupit, Timéo fait faire quelques loopings à son drone. En prenant de la hauteur, il repère une vaste lande, telle que sa grand-mère la lui a décrite. Un peu plus loin, une canopée plus sombre... des pins, semble-t-il. Quand Stéphanie émerge, ils décident de s'y rendre. Avec son drone et le GPS de sa montre, Timéo trouve rapidement le meilleur chemin.

En traversant la lande, Stéphanie lui explique qu'on a planté quelques pinèdes à Tronçais depuis la sécheresse de 1976 mais qu'on change d'espèce depuis une

vingtaine d'années en remplaçant ces pins sylvestres par des pins maritimes, plus adaptés au climat à long terme.

« Finalement, peu de gens font la différence, reconnaît-elle, même s'ils sont assez faciles à distinguer. En tout cas, on continue à remplacer des chênaies par de petites pinèdes, là où les chênes ne trouvent plus assez d'eau. »

Ils entendent le chant des cigales bien avant de pénétrer dans la pinède. Il fait un peu plus sombre d'un coup. Des arbres d'une vingtaine de mètres. Des troncs élancés, alignés. Un sol recouvert d'herbes vigoureuses, d'aiguilles et de pommes de pins.

« Ces pins maritimes doivent avoir une trentaine d'années, précise Stéphanie. En dessous, on a aussi planté des chênes verts. Ils sont encore petits. » Timéo aime bien cette ambiance.

« Et on en fera des tonneaux aussi ?

– Non, ce sera pour produire du parquet, des lambris ou du contreplaqué. On pourra couper les premiers pins dans vingt ans : le pin maritime est bien plus productif que le chêne. À partir d'extraits de pins, on fait aussi aujourd'hui de multiples produits dans des bioraffineries, pour la pharmacie ou la cosmétologie. Ces arbres n'abritent pas non plus les mêmes animaux.

– Et il y a pas mal de chenilles on dirait ! Je n'aime pas ces cocons laineux à l'extrémité des branches...

– Effectivement, beaucoup de pins ont été colonisés par les chenilles processionnaires, qui, comme tous les insectes, migrent vite. Elles ont d'ailleurs envahi toute la France. Elles affaiblissent les arbres mais ne les font pas mourir. Depuis dix ans, ce sont de tout petits vers, les nématodes du pin, qui nous inquiètent plus. Il faudra peut-être encore planter une autre espèce. Sans compter que, par endroits, les plus jeunes plantations ont souffert des fortes gelées de l'an dernier. »



Source : © Gip Ecofor.

14 heures. Il est temps de rentrer, il fait trop chaud.

« Tiens regarde, encore une clairière. Ici, vois-tu, ils ont fait des tests. Mais aucune espèce n'a résisté. C'est aussi ça le travail du forestier.

– En fait, ici vous aidez les chênes à se reproduire et à grandir et, s'il le faut, vous les remplacez par des arbres plus résistants, vous cultivez la forêt, quoi !

– Tu as tout compris ! L'homme a créé un paysage forestier dans des conditions climatiques stables pendant des siècles. Maintenant qu'elles changent, le rôle du forestier est d'anticiper et d'aider les espèces végétales et animales à s'adapter. Et cela implique aussi que chacun accepte de voir changer la forêt. C'est très compliqué. C'est pour cela qu'on a créé le Groupement d'experts européen sur l'évolution des forêts, le pendant européen du GIEC sur le climat, que tu connais. Mais on aura toujours des surprises, des bonnes et des moins bonnes. On ne pourra pas toujours tout sauver mais on pourra toujours accompagner le changement et perpétuer notre superbe patrimoine forestier ».

De retour au gîte, au frais, ils profitent du calme. Tout le monde est assoupi, comme c'est devenu l'habitude pendant les mois chauds, un mode de vie à l'espagnole. En fin d'après-midi, Timéo admire ses vidéos et les enregistre consciencieusement en s'imaginant les commenter cinquante ans plus tard à ses petits-enfants. À quoi ressemblera la forêt de Tronçais en 2100 ?

Bibliographie

AGROOF, CASDAR Agroforesterie (2009-2011), *Améliorer l'efficacité agro-environnementale des systèmes agroforestiers*, 61 p.

Alberto F. J., Aitken S. N., Alia R., Gonzalez-Martinez S., Hänninen H., Kremer A., Lefèvre F., Lenormand T., Yeaman S., Whetten R. et Savolainen O. (2013), « Potential for Evolutionary Responses to Climate Change-Evidence From Tree Populations », *Global Change Biology*, 19, pp. 1645-1661.

Alcimed, *Marché actuel des nouveaux produits issus du bois et évolutions à échéance 2020*, étude prospective pour le Pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques (Pipame), février 2012, 200 p.

Alessio G. A., Penuelas J., Llusia J., Ogaya R., Estiarte M. et De Lillis M. (2008), « Influence of Water and Terpenes on Flammability in Some Dominant Mediterranean Species », *International Journal of Wildland Fire*, 17, pp. 274-286.

Allen C. R., Fontaine J.-J., Pope K. L. et Garmestani A. S. (2011), « Adaptive Management for a Turbulent Future », *Journal of Environmental Management*, 92, pp. 1339-1345.

Alliance Forêt-Bois (2012), *Manifeste en faveur des forêts de plantation en France*, plaquette, janvier 2012, 12 p.

Arpa Piemonte, Cemagref (2008), *PROVIALP Protection de la viabilité alpine*, projet n°165, Interreg IIIa 2000-2006 : Alpes latines, Coopération transfrontalière, rapport final, ISBN 978-88-7479-070-8, 386 p.

Attali C., Fradin G., de Menthière C., Dereix C. et Lavarde P. (avril 2013), *Vers une filière intégrée de la forêt et du bois*, rapport aux ministres du Redressement productif, de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 155 p.

Badeau V., Dupouey J.-L., Cluzeau C., Drapier J. et Le Bas C. (2010), « Climate Change and the Biogeography of French Tree Species : First Results and Perspectives » ? in Loustau D. (éd.), *Forest, Carbon Cycle and Climate Change*, Éditions Quae, Versailles, pp. 231-252.

Bakkenes M., Alkemade J.-R., Ihle F., Leemas R. et Latour J.-B. (2002), « Assessing the Effects of Forecasted Climate Change on the Diversity and Distribution of European Higher Plants for 2050 », *Global Change Biology*, vol. 8 (4), pp. 390-407.

Baran P. et Leroyer-Gravet F. (2007), *Le Débit, élément clé de la vie des cours d'eau. Bilan des altérations et possibilités de restauration*, ONEMA, CSP, 20 p.

Battisti A., Stastny M., Netherer S., Robinet C., Schopf A., Roques A. et Larsson S. (2005), « Expansion of Geographic Range in the Pine Processionary Moth Caused by Increased Winter Temperatures », *Ecological Applications*, 15, pp. 2084-2096.

Baudry J. et Jouin A. (2003), *De la haie aux bocages : organisation, dynamique et gestion*, Paris, Éditions INRA-Quae, 435 p., ISBN 2-7380-1050-4.

Baudry O., Bourgerie C., Guyot G. et Rieux R. (2000), *Les Haies composites, réservoirs d'auxiliaires*, Paris, Éditions du Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes, 119 p., ISBN 2-87911-095-5.

Becker M. (1987), « Santé de la forêt : le sapin témoigne », *La Recherche*, 18, pp.1097-1098.

Benoît M. et Papy F. (1997), « Pratiques agricoles sur le territoire et qualité de l'eau alimentant un captage », in *L'Eau dans l'espace rural*, INRA, pp. 323-338.

Benoit M. et Simon E. (2011), « La forêt pour l'eau potable, un service de qualité », *La Lettre eau*, France Nature Environnement, n°54, mars 2011, pp. 6-8.

Berger F., Dorren L., Kleemayr K., Maier B., Planinsek S., Bigot C., Bourrier F., Jancke O., Toe D. et Cerbu G. (2013), « Chapitre 12 : Eco-Engineering and Protection Forests Against Rockfalls and Snow Avalanches », in *Management Strategies to Adapt Alpine Space Forests to Climate Change Risks*, Gillian Ann Cerbu, Marc Hanewinkel, Giacomo Gerosa et Robert Jandl (éds), ISBN 978-953-51-1194-8, InTech, August 8, 2013.

Bertrand, R., Lenoir J., Piedallu C., Riofrío-Dillon G., de Ruffray P., Vidal C., Pierrat J.-C. et Gégout J.-C. (2011), « Changes in Plant Community Composition Lag Behind Climate Warming in Lowland Forests », *Nature*, 479, pp. 517-520.

Birks H.J.B. (1989), « Holocene Isochrone Maps and Patterns of Tree-Spreading in the British Isles », *Journal of Biogeography*, vol. 16 (6), Blackwell Publishing, pp. 503-540.

Birot Y., Déglise X., Peyron J.-L., Thibaut B. et Roman-Amat B. (2013), *Les Forêts, leurs produits et services dans un contexte changeant : apports potentiels de la science*, Académie d'agriculture de France, groupe de travail « Potentiels de la science pour l'avenir de l'agriculture, de l'alimentation et de l'environnement », publié le 28 octobre 2013, 24 p.

Birot Y., Landmann G. et Bonhême I. (éds), (2009), *La Forêt face aux tempêtes*, Éditions Quae, Versailles.

Bonduelle A. et Jouzel J. (2014), *L'Adaptation de la France au changement climatique mondial*, « Les avis du Conseil économique, social et environnemental », Éditions des Journaux officiels, mai 2014, 82 p.

Bräutigam K., Vining K. J., Lafon-Placette C., Fossdal C. G., Mirouze M., Marcos J. G., Fluch S., Fraga M. F., Guevara M. A., Abarca D., Johnsen O., Maury S., Strauss S. H.,

- Campbell M. M., Rohde A., Díaz-Sala C. et Cervera M. (2013), « Epigenetic Regulation of Adaptive Responses of Forest Tree Species to the Environment », *Ecology and Evolution*, 3 (2), pp. 399-415.
- Bréda N., et Badeau V. (2008), « Forest tree responses to extreme drought and some biotic events : towards a selection according to hazard tolerance? », *Comptes-Rendus Geoscience*, 340, p. 651-662.
- Bréda N., Cochard H., Dreyer E. et Granier A. (1993), « Water Transfer in a Mature Oak Stand (*Quercus petraea*) : Seasonal Évolution and Effects of a Severe Drought », *Canadian Journal of Forest Research*, 23 (6), pp. 1136-1143.
- Bréda N., Huc R., Granier A. et Dreyer E. (2006), « Temperate Forest Trees and Stands Under Severe Drought : A Review of ecophysiological Responses, Adaptation Processes and Long-Term Consequences », *Annals of Forest Science*, 63, pp. 625-644.
- Brisson N. et Levrault F. (éds), (2010), *Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le Livre Vert du projet CLIMATOR (2007-2006)*, ADEME.
- Caullet J.-Y. (2013), *Bois et forêt de France : nouveaux défis*, rapport au Premier ministre, M. Jean-Marc Ayrault.
- Charry J.-C. (1996a), *La Restauration des terrains en montagne*, dossier coordonné par Charry J.-C., *Arborescences*, pp. 1-34.
- Charry J.-C. (1996b), « Actions de correction et de prévention, la restauration des terrains en montagne (RTM) », in *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France*, pp. 27-34.
- Chatry C., Le Gallou J.-Y., Le Quentrec M., Lafitte J.-J., Laurens D., Creuchet B. et Grelu J. (2010), *Rapport de la mission interministérielle « Changement climatique et extension des zones sensibles aux feux de forêts »*, ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche, ministère de l'Intérieur, de l'Outre-mer et des Collectivités territoriales, ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, 190 p.
- Chebib A., Badeau V., Boe J., Chuine I., Delire C., Dufrêne E., François C., Gritti E. S., Legay M., Pagé C., Thuiller W., Viomy N. et Leadley P. (2012), « Climate Change Impacts on Tree Ranges : Model Intercomparison Facilitates Understanding and Quantification of Uncertainty », *Ecology Letters*, 15, pp. 533-544.
- Chevassus-au-Louis B., Salles J.-M. et Pujol J.-L. (2009), *Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes. Contribution à la décision publique*, Centre d'analyse stratégique, La Documentation française, avril 2009, 376 p.
- Choat B., Jansen J., Brodribb T. J., Cochard H., Delzon S., Bhaskar R., Bucci S. J., Field T. S., Gleason S. M., Hacke U. G., Jacobsen A. L., Lens F., Maherali H.,

Martínez-Vilalta J., Mayr S., Mencuccini M., Mitchell P. J., Nardini A., Pittermann J., Pratt R. B., Sperry J. S., Westoby M., Wright I. J. et Zanne A. E. (2012), « Global Convergence in the Vulnerability of Forests to Drought », *Nature*, 491, pp. 752-755.

Chuine I. (2010), « Why Does Phenology Drive Species Distribution ? », *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 365, pp. 3149-3160.

Chuine I., Kramer K., et Hänninen H. (2003), « Plant Development Models », in Schwartz M. Éd., *Phenology : An Integrative Environmental Science, Tasks for Vegetation Science*, Springer, The Netherlands, pp. 217-235.

Colin F., Vinkler I., Riou-Nivert P., Renaud J.-P., Hervé J.-C., Bock J. et Piton B. (2009), « Facteurs de risques de chablis dans les peuplements forestiers : les leçons tirées des tempêtes de 1999 », in Birot Y., Landmann G. et Bonhême I. Éd., *La Forêt face aux tempêtes*, Éditions Quae, Versailles, pp. 177-228.

Collectif, sous la direction du PGRN (2008a), « Synthèse permafrost », *Impacts observés et potentiels du changement climatique sur les aléas naturels*, Working Package 5, 6 p.

Collectif, sous la direction du PGRN (2008b), « Synthèse mouvements de terrain », *Impacts observés et potentiels du changement climatique sur les aléas naturels*, Working Package 5, 9 p.

Collectif, sous la direction du PGRN (2008c), « Synthèse crues », *Impacts observés et potentiels du changement climatique sur les aléas naturels*, Working Package, 5 p.

Collectif (2010), *De l'urgence de réinvestir la forêt. Une gestion de la forêt française en contradiction avec les objectifs du Grenelle de l'environnement*, plaquette, 20 p.

Combes F. (1989), « Restauration des terrains en montagne : du rêve à la réalité ? », *Revue forestière française*, XLI (2), pp. 91-106.

Cordonnier T. et Gosselin F. (2009), « La gestion forestière adaptative : intégrer l'acquisition de connaissances parmi les objectifs de gestion », *Revue forestière Française*, 61, p. 131-143.

Cordonnier T. et Gosselin F. (2013), *La gestion adaptative peut-elle nous aider dans l'adaptation des forêts au changement climatique?*, Académie d'agriculture de France, séance du 9 octobre 2013.

Cortijo S., Wardenaar R., Colomé-Tatché M., Gilly A., Etcheverry M., Labadie K., Caillieux E., Hospital F., Aury J.-M., Wincker P., Roudier F., Jansen R.C., Colot V. et Johannes F. (2014), « Mapping the epigenetic Basis of Complex Traits », *Science*, 343, pp. 1145-1148.

CRGF (2008), *Préserver et utiliser la diversité des ressources génétiques forestières pour renforcer la capacité d'adaptation des forêts au changement climatique*, doc. DGPAAT ministère de l'Agriculture et de la Forêt, 4 p.

- Croke J., Hairsine P. et Fogarty P. (1999), « Sediment Transport, Redistribution and Storage on Logged Forest Hillslopes in Southeastern Australia », *Hydrological Processes*, 13, pp. 2705-2720.
- Dambrine E., Granier A., Bréda N., Guérold F., Probst A. et Cosandey C. (2009), « Chapitre 11 : Impacts de l'utilisation de biomasse forestière sur les eaux de surface », in Landmann G., Gosselin F. et Bonhême I. (coord.), (2009), *Bio2, Biomasse et biodiversité forestières. Augmentation de l'utilisation de la biomasse forestière : implications pour la biodiversité et les ressources naturelles*, Paris, MEEDDM-Ecofor, pp. 125-132.
- De Crécy L. (1988), « L'histoire de la RTM. Quelques réflexions d'un praticien », *Revue géographique des Pyrénées et du Sud Ouest*, T 59.
- De Crécy L. (1995), « La naissance de la RTM », *Arbre actuel*, n°19, pp. 26-29.
- Della-Marta P.M., et Pinto J.G. (2009), « Statistical uncertainty of changes in winter storms over the North Atlantic and Europe in an ensemble of transient climate simulations », *Geophysical Research Letters*, 36 (14).
- Delzon S., Urli M., Samalens J.-C., Lamy J.-B., Lischke H., Sin F., Zimmermann N. E. et Porté A. J. (2013), « Field Evidence of Colonisation by Holm Oak, at the Northern Margin of its Distribution Range, During the Anthropocene Period », *PLOS One*, 8 (11).
- De Perthuis C., Hallegatte S. et Lecocq F. (2010), *Économie de l'adaptation au changement climatique*, rRapport au Conseil économique pour le développement durable, février 2010, 90 p.
- Desprez-Loustau M., Marcais B. et de La Rocque S. (2006), « Facteurs climatiques et maladies dans les écosystèmes naturels et agroécosystèmes », *Biofutur*, 270, pp. 37-40.
- Desprez-Loustau M.-L. (2009), « Alien Fungi of Europe », in *Handbook of Alien Species in Europe*, Springer, pp. 15-28.
- Devictor V., van Swaay C., Brereton T., Chamberlain D., Heliölä J., Herrando S., Julliard R., Kuussaari M., Lindström Å., Reif J., Roy D. B., Schweiger O., Settele J., Stefanescu C., van Strien A., van Turnhout C., Vermouzek Z., Wallis de Vries M., Wynhoff I. et Jiguet F. (2012), « Differences in the Climatic Debts of Birds and Butterflies at a Continental Scale », *Nature Climate Change*, 2 (2), pp. 121-124.
- Dhôte J.-F. (2012), « Adaptation, atténuation et services écosystémiques », *Rendez-vous techniques*, n° 38, automne 2012, ONF, pp. 89-96.
- Dhôte J. F., Bontemps J. D., Hervé J. C., Rittié D. et Vallet P. (2007), « Changements de productivité à long terme dans les hêtraies du nord de la France », *Rendez-vous techniques*, hors-série n°3, ONF, pp. 74-80.

Drénou Ch., Bouvier M. et Lemaire J. (2011), « La méthode de diagnostic ARCHI, application aux chênes pédonculés dépérissants », *Forêt Entreprise*, n°200, pp. 4-15.

Dupouey J.-L., Sciama D., Koerner W., Dambrine E. et Rameau J.-C. (2002), « La végétation des forêts anciennes », *Revue forestière Française*, 54, pp. 521-532.

Dupraz C. et Liagre F. (2008), *Agroforesterie : des arbres et des cultures*, Paris, Éditions France agricole, 413 p., ISBN 978-2-85557-150-8.

Fabre B., Piou D., DesprezLoustau M.-L. et Marçais B. (2011), « Can the Emergence of Pine *Diplodia* Shoot Blight in France be Explained by Changes in Pathogen Pressure Linked to Climate Change? », *Global Change Biology*, 17, pp. 3218-3227.

Feehan J., Harley M. et van Minnen J. (2009), « Climate Change in Europe : 1. Impact on Terrestrial Ecosystems and Biodiversity. À Review », *Agronomy for Sustainable Development*, 29, pp. 409-421.

Fiquepron J., Garcia S., Stenger A. (2013), Land Use Impact on Water Quality : Valuing Forest Services in Terms of the Water Supply Sector, *Journal of Environmental Management*, 126, pp. 113-121.

Fourchy P. (1963), « Un centenaire oublié, les lois du 28 juillet 1860 sur le reboisement des montagnes et du 8 juin 1864 sur le regazonnement des montagnes », *Revue de géographie alpine*, tome LI, base 1.

Gardiner B., Blennow K., Carnus J.-M., Fleischer P., Ingemarson F., Landmann G., Lindner M., Marzano M., Nicoll B., Orazio C., Peyron J.-L., Reviron M.-P., Schelhaas M.-J., Schuck A., Spielmann M. et Usbeck T. (2010), *Destructive Storms in European Forests : Past and Forthcoming Impacts*, rapport EFI Atlantic, 138 p.

Gardiner B., Byrne K., Hale S., Kamimura K., Mitchell S.J., Peltola H. et Ruel J.-C. (2008), « A Review of Mechanistic Modelling of Wind Damage Risk to Forests », *Forestry*, 81, pp. 447-463.

Gauquelin X. (coord.), (2010), *Guide de gestion des forêts en crise sanitaire*, Éditions ONF-IDF, 96 p.

GIEC (2013), *Résumé à l'intention des décideurs. Changements climatiques 2013 : les éléments scientifiques*, contribution du groupe de travail I au cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, sous la direction de T. F Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P. M. Midgley, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, et New York (État de New York), États-Unis d'Amérique.

GIEC (2007), *Bilan 2007 des changements climatiques*, contribution des groupes de travail I, II et III au quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat ; équipe de rédaction principale, Pachauri R. K. et Reisinger A. (dir.), GIEC, Genève, Suisse, ..., 103 p.

- Givors A. (2008), *Avis de Pro Silva France sur l'augmentation de la récolte de bois en France et sur la gestion des risques induits par les changements climatiques*, doc. Pro Silva, 7 p.
- Gomez N. (2012), « Quel avenir pour le sapin et l'épicéa ? Synthèse bibliographique sur l'autécologie et la vulnérabilité comparée du sapin et de l'épicéa dans le cadre des changements climatiques », *RENDEZ-VOUS techniques*, 36-37, ONF, pp. 3-8.
- Goudet M. (2013), « Résultats 2012 du réseau systématique de suivi des dommages forestiers », département de la santé des forêts, *Bilan de la santé des forêts 2012*.
- Granier A. coord. (2013), *Analyse et spatialisation de scénario intégré de changement global sur la forêt française*, rapport de fin de contrat Programme GICC, 129 p.
- Granier A., Reichstein M., Bréda N., Janssens I. A., Falge E., Ciais P., Grünwald T., Aubinet M., Berbigier P., Bernhofer C., Buchmann N., Facini O., Grassi G., Heinesch B., Ilvesniemi H., Keronen P., Knohl A., Köstner B., Lagergren F., Lindroth A., Longdoz B., Loustau D., Mateus J., Montagnani L., Nys C., Moors E., Papale D., Peiffer M., Pilegaard K., Pita G., Pumpanen J., Rambal S., Rebmann C., Rodrigues A., Seufert G., Tenhunen J., Vesala T. et Wang Q. (2007), « Evidence for Soil Water Control on Carbon and Water Dynamics in European Forests During the Extremely Dry Year : 2003 », *Agricultural and Forest Meteorology*, 143, pp. 123-145.
- Gritti E. S., Duputié A., Massol F., et Chuine I. (2013), « Estimating Consensus and Associated Uncertainty Between Inherently Different Species Distribution Models », *Methods in Ecology and Evolution*, 4, pp. 442-452.
- Haarsma R. J., Hazeleger W., Severijns C., de Vries H., Sterl A., Bintanja R., van Oldenborgh G. J. et van den Brink H. W. (2013), « More Hurricanes to Hit Western Europe Due to Global Warming », *Geophysical Research Letters*, 40, pp. 1783-1788.
- Hamon X., Dupraz C. et Liagre F. (2009), *L'Agroforesterie, outil de séquestration du carbone en agriculture*, 17 p.
- Heinonen T., Pukkala T., Ikonen V.-P., Peltola H., Venälääinen A. et Dupont S. (2009), « Integrating the Risk of Wind Damage Into Forest Planning ». *Forest Ecology and Management*, 258, pp. 1567-1577.
- Holm S. R. et Svenning J.-C. (2014), « 180,000 Years of Climate Change in Europe : Avifaunal Responses and Vegetation Implications ». *PLOS One*, 9 : e94021.
- IGN (2013), *Mémento. La forêt en chiffres et en cartes*, édition 2013, 29 p.
- Jacob D., Petersen J., Eggert B., Alias A., Christensen O. B., Bouwer L., Braun A., Colette A., Déqué M., Georgievski G., Georgopoulou E., Gobiet A., Menut L., Nikulin G., Haensler A., Hempelmann N., Jones C., Keuler K., Kovats S., Kröner N., Kotlarski S., Kriegsmann A., Martin E., Meijgaard E., Moseley C., Pfeifer S., Preuschmann S., Radermacher C., Radtke K., Rechid D., Rounsevell M., Samuelsson P., Somot S., Soussana J.-F., Teichmann C., Valentini R., Vautard R., Weber B. et Yiou P. (2013),

«EURO-CORDEX : New High-Resolution Climate Change Projections for European Impact Research», *Regional Environmental Change*, Springer, Berlin, pp. 1-16.

Joly D., Brossard T., Cardot H., Cavailhes J., Hilal M., et Wavresky P. (2010), « Les types de climats en France, une construction spatiale », *Cybergeo : European Journal of Geography*, Cartographie, Imagerie, SIG, document 501.

Jump A.S., Hunt J. M., et Penuelas J. (2006), « Rapid Climate Change-Related Growth Decline at the southern Range Edge of *Fagus sylvatica* », *Global Change Biology*, 12, pp. 2163-2174.

Kremer A., Ronce O., Robledo-Arnuncio J. J., Guillaume F., Bohrer G., Nathan R., Bridle J. R., Gomulkiewicz R., Klein E. K., Ritland K., Kuparinen A., Gerber S., et Schueler S. (2012), « Long-Distance Gene Flow and Adaptation of Forest Trees to Rapid Climate Change », *Ecology Letters*, 15, p. 378-392.

Lanier L., Joly P., Bondoux P. et Bellemere A. (1976), « Pathologie des essences résineuses. Mycologie et pathologie forestières », *Pathologie forestière*, tome II, Éditions Masson, Paris, pp. 217-232.

Le Bouler H., Legay M., et Riou-Nivert P. (2014), « Le climat change, vite, trop vite : comment aider les arbres à le suivre ? », *Forêt Entreprise*, 127, p. 26-29.

Lefèvre F., Boivin T., Bontemps A., Courbet F., Davi H., Durand-Gillmann M., Fady B., Gauzere J., Gidoïn C., Karam M.-J., Lalagüe A., Oddou-Muratorio S., et Pichot C. (2013), « Considering Evolutionary Processes in Adaptive Forestry », *Annals of Forest Science*, 8, 17 p.

Lefèvre F. (2012), « Les ressources génétiques, un réservoir et une dynamique pour la gestion des incertitudes », *Revue forestière française*, 64, pp. 235-242.

Legay M., Ginisty C. et Bréda N. (2006) « Que peut faire le gestionnaire forestier face au risque de sécheresse ? », *RENDEZ-VOUS techniques*, n°11, ONF, pp. 35-40.

Legay M., Mortier F., Mengin-Lecreux P. et Cordonnier T., (2007), « La gestion forestière face aux changements climatiques : tirons les premiers enseignements », *RENDEZ-VOUS techniques*, hors-série n°3, ONF, pp. 95-102.

Lenoir J., Gégout J.-C., Marquet P.-A., de Ruffray P. et Brisse H. (2008), « À Signifiant Upward Shift in Plant Species Optimum Elevation During the 20th Century », *Science*, 320, pp. 1768-1771.

Liagre F. (2009), « Reconsidérer la place de l'arbre en agriculture : le cas de l'agroforesterie », *Revue forestière française*, vol. 61, n°5, pp. 503-511.

Plant Hydraulic Lift of Soil Water JC. (2008), « Plant Hydraulic Lift of Soil Water. Implications for Crop Production and Land Restoration », *Plant Soil*, 313 : 1-17, DOI 10.1007/s11104-008-9696-z, pp. 1-17.

Loustau D., Bosc A., Colin A., Ogée J., Davi H., François C., Dufrêne E., Déqué M., Cloppet E., Arrouays D., Le Bas C., Saby N., Pignard G., Hamza N., Granier A., Bréda N., Ciais P., Viovy N., et Delage F. (2004), « Modeling Climate Change Effects on the Potential Production of French Plains Forests at the Sub-Regional Level », *Tree Physiology*, 25, pp. 813-823.

Loustau D. (éd.), (2010), *Forest, Carbon Cycle and Climate Change*, Éditions Quae, Versailles.

Maaprat, IFN, « Indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines »; édition 2010, ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du territoire, *Inventaire forestier national*, 2011, 200 p.

Magnan A. (2013), *Changement climatique : tous vulnérables ? Repenser les inégalités* (Foreword from H. Le Treut), Éditions de la Rue-d'Ulm, Paris, 66 p.

MAP, *Le Programme forestier national*; ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 2006, 16 p.

Marçais B et Robinet C (2011), « L'évolution du climat modifie-t-elle l'impact des parasites sur la forêt? », Salon international de l'agriculture, 24 février 2011.

McKenzie D., Gedalof Z., Peterson D.L. et Mote P. (2004), « Climatic Change, Wildfire, and Conservation », *Conservation Biology*, 18, pp. 890-902.

MEDDE, *Stratégie nationale de transition écologique vers un développement durable (SNTEDD) 2014-2020; avant-projet*; ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (coord.), version du 20 mars 2014, 87 p.

Meng S. X., Lieffers V. J., Reid D. E. B., Rudnicki M., Silins U. et Jin M. (2006), « Reducing Stem Bending Increases the Height Growth of Tall Pines », *Journal of Experimental Botany*, 57, pp. 3175-3182.

METL, MRP, MAAF, *Plan national d'action pour l'avenir des industries de transformation du bois*; ministère de l'Égalité, des Territoires et du Logement, ministère du Redressement productif, ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, octobre 2013, 19 p.

Morin X. (2006), *Biogéographie des espèces d'arbres européens et nord-américains : déterminisme et évolution sous l'effet du changement climatique*, thèse, Université de Montpellier 2.

Nabuurs G. J., Masera O., Andrasko K., Benitez-Ponce P., Boer R., Dutschke M., Elsiddig E., Ford-Robertson J., Frumhoff P., Karjalainen T., Krankina O., Kurz W. A., Matsumoto M., Oyhantcabal W., Ravindranath N. H., Sanz Sanchez M. J., Zhang X., « Forestry », in *Climate Change 2007 : Mitigation*, contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer (éds), Cambridge

University Press, Cambridge, Royaume-Uni, et New York, État de New York, États-Unis, pp. 542-584.

Nageleisen L.-M., Saintonge F.-X., Piou D. et Riou-Nivert P. (2010), *La Santé des forêts : maladies, insectes, accidents climatiques... Diagnostic et prévention*, Institut pour le développement forestier, département de la santé des forêts, 608 p.

Netherer S. et Schopf A. (2010), « Potential Effects of Climate Change on Insect Herbivores in European forests. General Aspects and the Pine Processionary Moth as Specific Example », *Forest Ecology and Management*, 259, pp. 831-838.

Nicotra A. B., Atkin O. K., Bonser S. P., Davidson A. M., Finnegan E. J., Mathesius U., Poot P., Purugganan M. D., Richards C. L., Valladares F. et van Kleunen M. (2010), « Plant Phenotypic Plasticity in a Changing Climate », *Trends in Plant Science*, 15, pp. 684-692.

ONERC, *Changement climatique. Coûts des impacts et pistes d'adaptation*, La Documentation française, septembre 2009, 198 p.

Ouzeau G., Déqué M., Jouini M., Planton S., Vautard R., Vrac M., sous la direction de Jean Jouzel (2014), *Le Climat de la France au XXI^e siècle*, vol. 4, « Scénarios régionalisés », édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer.

Pâques L. (1996), « Variabilité naturelle du mélèze. I. Mélèze d'Europe : bilan de 34 ans de test comparatif de provenances », *Annales des sciences forestières*, pp. 51-67.

Parry M. L., Canziani O. F., Palutikof J. P. et al. (2007), « Technical Summary » in Parry M. L., Canziani O. F., Palutikof J. P., van der Linden P. J. et Hanson C. E. (éds.) *Climate Change 2007 : Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, p. 23-78.

Penneroux M. (2012), « Prise en compte des risques dans la stratégie sylvicole de la Société forestière de la Caisse des dépôts et consignations », *RENDEZ-VOUS techniques*, n°38, ONF, pp. 80-88.

Peñuelas J. et Boada M. (2003), « A Global Change-Induced Biome Shift in the Montseny Mountains (NE Spain) », *Global Change Biology*, 9, pp. 131-140.

Piao S., Ciais P., Friedlingstein P., Peylin P., Reichstein M., Luysaert S., Margolis H., Fang J., Barr A., Chen A., Grelle A., Hollinger D. Y., Laurila T., Lindroth A., Richardson A. D., et Vesala T. (2008), « Net Carbon Dioxide Losses of Northern Ecosystems in Response to Autumn Warming ». *Nature*, 451, pp. 49-52.

Picard O. (2013), « Le défi forestier : s'adapter au changement climatique », *Forêt Entreprise*, dossier, n°212, juillet 2013, pp. 16-47.

- Piedallu C., Perez V., Gegout J. C., Lebourgeois F. et Bertrand R. (2009), « Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l'épicéa, du sapin, du hêtre et du chêne sessile en France », *Revue forestière française*, 61, pp. 567-593.
- Plard F., Gaillard J.-M., Coulson T., Mark Hewison A.-J., Delorme D., Warnant C. et Bonenfant C. (2014), « Mismatch Between Birth Date and Vegetation Phenology Slows the Demography of Roe Deer », *PLOS Biology*, vol. 12, Issue 4, e1001828, avril 2014, pp. 1-8.
- PNACC (2011), *Plan national d'adaptation de la France aux effets du changement climatique 2011-2015*, ministère de l'Écologie, 187 p.
- Poitereau P. et Bazile D. (1995), *Arbres des champs. Haies, alignements, prés-vergers ou l'art du bocage. Pour protéger, restaurer et gérer les arbres « hors la forêt »*, Paris, Solagro, 137 p.
- Rambal S. (2011), *DROUGHT +, les écosystèmes méditerranéens et l'accroissement des sécheresses : évaluation de leur vulnérabilité*, exposé au colloque « Que nous apprend la recherche sur la vulnérabilité des forêts au changement climatique ? », 17 novembre 2011.
- Rehfeldt G. E., Tchebakova N. M., Parfenova Y. I., Wykoff W. R., Kuzmina N. A. et Milyutin L. I. (2002), « Intraspecific Response to Climate in *Pinus sylvestris* », *Global Change Biology*, 8, pp. 912-929.
- Rehfeldt G. E., Wykoff W. R. et Ying C. C. (2001), « Physiologic Plasticity, Évolution, and Impacts of a Changing Climate on *Pinus contorta* », *Climatic Change*, 50, pp. 355-376.
- Rey F., Ballais J.-B., Marre A. et Rovéra G. (2004), « Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface », *Comptes rendus Geoscience*, 336, pp. 991-998.
- Rey F., Chenost C. et Simon-Teissier S. (2006), « Forêt et érosion dans les bassins-versants torrentiels », *Revue forestière française*, LVIII (4), pp. 329-338.
- Rey F., Ladier J., Hurand A., Berger F., Calès G. et Simon-Teissier S. (2009), *Forêts de protection contre les aléas naturels. Diagnostics et stratégies (Alpes du Sud françaises)*, Éditions Quae.
- Riou-Nivert P. et Rosa J. (2014), « Du diagnostic à l'action. Démarche d'aide à la décision du sylviculteur », *Forêt Entreprise*, dossier, n°214, janvier 2014, pp. 22-42
- Riou-Nivert P. (2005), *Les Résineux*, t. 2 « Écologie et pathologie », Édition IDF, 447 p.
- Riou-Nivert P. (2008a), « Changement climatique », dossier « Questions des sylviculteurs et réponses des chercheurs », *Forêt Entreprise*, 180, pp. 11-44.
- Riou-Nivert P. (2008b), « Changement climatique », dossier « Préparer l'avenir », *Forêt Entreprise*, 182, pp. 18-48.

Riou-Nivert P. (2005), « Changements climatiques et sylviculture », dossier « La forêt face aux changements climatiques », *Forêt Entreprise*, 162, pp. 49-53.

Riou-Nivert P. et Rosa J. (2014), « Du diagnostic à l'action. Démarche d'aide à la décision du sylviculteur », *Forêt Entreprise*, dossier, n°214, janvier 2014, pp. 22-42.

Robinet C., Rousselet J., Pineau P., Miard F. et Roques A. (2013), « Are Heat Waves Susceptible to Mitigate the Expansion of a Species Progressing With Global Warming? », *Ecology and Evolution*, 3, pp. 2947-2957.

Robinet C. et Roques A. (2010), « Direct Impacts of Recent Climate Warming on Insect Populations », *Integrative Zoology*, 5, pp. 132-142.

Robinet C., Rousselet J. et Roques A. (2014), « Potential Spread of the Pine Processionary Moth in France : Preliminary Results From a Simulation Model and Future Challenges », *Annals of Forest Science*, pp. 1-12.

Roques A. (2010), « Alien Forest Insects in a Warmer World and a Globalised Economy : Impacts of Changes in Trade, Tourism and Climate on Forest Biosecurity », *New Zealand Journal of Forestry Science*. pp. S77-S94.

Rosa J., Riou-Nivert P. et Paillassa E. (2011), *Guide de l'expérimentation forestière. Principes de base. Prise en compte du changement climatique*, Édition IDF, 224 p.

Rouault G., Candau J. N., Lieutier F., Nageleisen L. M., Martin J.-C. et Warzee N. (2006), « Effects of Drought and Heat on Forest Insect Populations in Relation to the 2003 Drought in Western Europe », *Annals of Forest Science*, 63, pp. 613-624.

Schelhaas M.-J., Nabuurs G.-J. et Schuck A. (2003), « Natural Disturbances in the European Forests in the 19th and 20th Centuries », *Global Change Biology*, 9, pp. 1620-1633.

Stoffel M., Tiranti, D. et Huggel C. (2014), « Climate Change Impacts on Mass Movements. Case Studies from the European Alps », *Science of the Total Environment* (sous presse).

Telewski F. W. (1995), « Wind-Induced Physiological and Developmental Responses in Trees », in Coutts M. P. et Grace J. (éds.), *Wind and Trees*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 237-263.

Trappmann D., Corona C. et Stoffel M. (2013), « Rolling Stones and Tree Rings : A State of Research on Dendrogeomorphic Reconstructions of Rockfall », *Progress in Physical Geography*, 37 (5), pp. 701-716.

Tubiana L., Gemenne F. et Magnan A. (2010), *Anticiper pour s'adapter : Le nouvel enjeu du changement climatique*, Pearson Éducation France, 2010, ISBN 978-2-7440-6424-1, 204 p.

Valadon A. (2009), « Effets des interventions sylvicoles sur la diversité génétique des arbres forestiers. Analyse bibliographique », in *Dossiers forestiers de l'ONF*, 157 p.

- Vallauri D., Chauvin C. et Mermin E. (1997), « La restauration écologique des espaces forestiers dégradés dans les Alpes du Sud. Chronique de 130 ans de restauration et problématique actuelle de gestion des forêts recréées en pin noir », *Revue forestière française*, XLIX (5), pp. 433-449.
- Vallet P. (2012), « Intérêt des mélanges pour limiter la vulnérabilité vis-à-vis des crises biotiques », *RENDEZ-VOUS techniques*, n°38, ONF, pp. 62-69.
- Van Asch M., van Tienderen P. H., Holleman L. J. M. et Visser M.E. (2007), « Predicting Adaptation of Phenology in Response to Climate Change, An Insect Herbivore Example », *Global Change Biology*, 13, pp. 1596-1604.
- Vennetier M., Vila B., Liang E.-R., Guibal F., Ripert C. et Chandioix O. (2007), « Impact du changement climatique et de la canicule de 2003 sur la productivité et l'aire de répartition du pin sylvestre et du pin d'Alep en région méditerranéenne », *Rendez-vous techniques*, hors-série n°3, ONF, pp. 67-73.
- Vennetier M., Ladier J. et Rey F. (2013), « Contrôle de l'érosion des sols forestiers par la végétation : des pratiques et des recherches à adapter aux changements globaux », Actes de l'Atelier REGEFOR des 10, 11 et 12 juin 2013 (Champenois) Référence à vérifier
- Vert J., Schaller N. et Villien C. (2013), *Agriculture, forêt, climat : vers des stratégies d'adaptation*, Centre d'études et de prospective, ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 227 p.
- Vidal J.-P., Martin E., Kitova N., Najac J. et Soubeyroux J.-M. (2012), « Evolution of Spatio-Temporal Drought Characteristics : Validation, Projections and Effect of Adaptation Scenarios », *Hydrology & Earth System Sciences*, 16, pp. 2935-2955.
- Vitasse Y., Delzon S., Bresson C. C., Michalet R. et Kremer A. (2009), « Altitudinal Differentiation in Growth and Phenology Among Populations of Temperate-Zone Tree Species Growing in a Common Garden », *Canadian Journal of Forest Research*, 39, pp. 1259-1269.
- Vitasse Y., Porté A., Kremer A., Michalet R. et Delzon S. (2009), « Responses of Canopy Duration to Temperature Changes in Four Temperate Tree Species : Relative Contributions of Spring and Autumn Leaf Phenology », *Oecologia*, 161, pp. 187-198.
- Walther G.-R., Roques A., Hulme P. E., Sykes M. T., Pysek P., Kühn I. et Zobel M. (2009), « Alien Species in a Warmer World : Risks and Opportunities », *Trends in Ecology & Evolution*, 24, pp. 686-693.
- Yan H., Bi H., Li R., Eldridge R., Wu Z., Li Y. et Simpson J. (2006), « Assessing Climatic Suitability of *Pinus radiata* (D. Don) for Summer Rainfall Environment of Southwest China », *Forest Ecology and Management*, 234, pp. 199-208.

Annexes



RAPPORT D'ACTIVITÉ DE L'OBSERVATOIRE

Créé par la loi en 2001 (article L. 229-1 et suivants du code de l'environnement), l'ONERC est rattaché au ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE) via le service « Climat et efficacité énergétique » de la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC).

L'ONERC est présidé par M. le sénateur Paul Vergès et dirigé par M. Laurent Michel, directeur général de l'énergie et du climat. Le secrétariat général est assuré par M. Nicolas Bériot assisté de quatre chargés de mission, dont un ingénieur documentaire-webmestre. L'équipe constituant le secrétariat général de l'ONERC est aussi le pôle « Adaptation » de la DGEC, et se trouve donc chargé du pilotage de la politique nationale d'adaptation. Cette annexe, sans être exhaustive, présente les principales actions dans lesquelles l'ONERC s'est engagé depuis décembre 2012.

- *Action internationale*



14 avril 2014. Ségolène Royal rencontre la presse à l'occasion de la parution du volume 3 du 5^e rapport du GIEC.
Source : © Arnaud Bouissou/MEDDE-MLETR.

En raison de la publication du 5^e rapport d'évaluation, la fonction de point focal du GIEC pour la France, confiée à l'ONERC en 2001, a occupé une large part des activités internationales de l'observatoire en 2013 et 2014. En outre, l'ONERC participe régulièrement à d'autres travaux internationaux, notamment au niveau de l'Union européenne, de l'océan Indien, du Bassin méditerranéen, il a développé des relations multilatérales et bilatérales avec les services chargés des politiques publiques d'adaptation dans plusieurs pays.

- *Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)*

En tant que point focal du GIEC pour la France, l'ONERC a organisé les revues des trois volumes et du rapport de synthèse du 5^e rapport d'évaluation. La valorisation de la publication des volumes a été précédée par l'organisation d'un atelier pédagogique pour la presse. L'ONERC a notamment organisé une conférence de presse et un colloque de présentation technique pour chacun des trois volumes. Le Dr Pachauri, président du GIEC, a été reçu par le président de la République, avec une délégation de scientifiques français et, également, Nicolas Bériot, secrétaire général de l'ONERC. Bénéficiant du travail actif de chercheurs français, l'ONERC a publié, sur son site internet, dans les jours suivants l'adoption, une traduction provisoire du résumé pour décideurs de chacun des volumes afin de faciliter la diffusion rapide des résultats au sein de la communauté francophone.



30 septembre 2013. Le président de la République s'entretient avec une délégation de scientifiques du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)

Source : © Présidence de la République-L. Blevenec.

En appui des interventions, le livret *Mieux comprendre le GIEC* a été élaboré avec l'appui de la direction de la communication du MEDDE. Ce livret, diffusé à plus de 2 000 exemplaires, est accompagné de fiches récapitulatives reprenant les grandes conclusions des trois volumes du 5^e rapport d'évaluation. Les publications du GIEC ont, de plus, fait l'objet en 2014 de deux numéros dédiés de la lettre aux élus *Le climat change, agissons !*

MIEUX COMPRENDRE LE GIEC
GIEC
 GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT

LE GIEC, COMMENT ÇA MARCHE ?

LE 5^e RAPPORT D'ÉVALUATION

PAROLES DE CHERCHEURS
 Jean-Jouzel,
 Serge Planton,
 Valérie Masson-Delmotte,
 Jean-François
 Soussana,
 Jean-Charles
 Hourcade

GIEC
 CINQUIÈME RAPPORT DU GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT

VOLUME 2
 CHANGEMENTS CLIMATIQUES 2014 : IMPACTS, ADAPTATION ET VULNÉRABILITÉ

LE VOLUME 2 C'EST :

- 309 AUTEURS** de 70 pays
- 436 CONTRIBUTEURS** de 54 pays
- 12 000 PUBLICATIONS** citées
- 50 492 COMMENTAIRES**
- 1^{er} tome** les risques par secteur (20 chapitres)
- 2nd tome** les risques par région (10 chapitres)
- 1 RÉSUMÉ** pour décideurs
- 1 RÉSUMÉ TECHNIQUE**

LE DEUXIÈME VOLUME du 5^e rapport d'évaluation du GIEC (*AR5, Assessment Report*) est publié en mars 2014, après l'adoption à l'unanimité du résumé à l'intention des décideurs par les 195 délégations membres du GIEC.

2 LE RAPPORT DU GROUPE DE TRAVAIL 2 présente de façon détaillée les impacts des changements climatiques à ce jour, les risques à venir et les possibilités d'intervention pour réduire ces risques.

Lors des assemblées plénières du GIEC Nicolas Bériot copréside, depuis 2010, le comité financier, l'autre coprésident étant le chef de la délégation du Soudan. L'ONERC coordonne le versement de la contribution française au budget du GIEC émanant de trois ministères : Affaires étrangères, Recherche et Développement durable. Enfin, l'ONERC appuie la participation des chercheurs français aux travaux du GIEC en prenant en charge environ 50 % des missions des experts.

• Organisation météorologique mondiale

L'ONERC a participé aux sessions du Conseil intergouvernemental pour les services climatologiques (CISC/IBCS International Board of Climate Services) établi par l'Organisation météorologique mondiale (OMM). Le Conseil intergouvernemental est un organe clé puisqu'il guidera la mise en œuvre du Cadre mondial des services climatologiques (CMSC/GFCS) au cours des prochaines années et formulera des recommandations à ce propos.

Cet effort international de coordination et de structuration de l'accès aux données climatologiques contribuera notamment à développer de manière cohérente les études de vulnérabilité nécessaires dans un contexte de planification de l'adaptation au changement climatique. Avec l'aval du ministère des Affaires étrangères,

L'ONERC a élaboré une convention entre la DGEC et l'OMM prévoyant notamment le versement d'une contribution financière de la France et l'information mutuelle des parties sur les sujets techniques.

- *Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC)*

L'ONERC a participé à la 19^e session de la Conférence des parties à la CCNUCC et à la 9^e session de la Conférence des parties agissant comme réunion des parties au protocole de Kyoto ayant eu lieu en novembre 2013 à Varsovie. L'ONERC a participé à la rédaction de la 6^e communication nationale à la CCNUCC pour les chapitres relatifs à l'observation, la recherche et l'adaptation, et il a présenté ces éléments à la commission conduisant l'audit au printemps 2014.

L'ONERC a également contribué à un atelier international sur le suivi et l'évaluation des politiques d'adaptation par le comité « Adaptation » de la CCNUCC aux îles Fidji à l'automne 2013. Après ces travaux, le cas français sera illustré dans une publication réalisée par la coopération technique allemande GIZ (publication prévue en 2014).

En appui des travaux du GIEC et des négociations de la CCNUCC, l'ONERC participe à un groupe informel d'experts européens (ex-EGSci) visant à construire une vision collective des sujets scientifiques en appui des équipes de négociation.

- *Espace européen*

La Commission européenne a publié au printemps 2013 une stratégie d'adaptation au changement climatique accompagnée de plusieurs documents techniques. Elle met ainsi en œuvre les orientations du Livre blanc sur l'adaptation de 2009. L'équipe de l'ONERC assure, par délégation de la DGEC, la représentation française auprès de l'Union européenne pour les travaux en matière d'adaptation au changement climatique. À ce titre, l'ONERC a participé à toutes les réunions du groupe de pilotage européen (Adaptation Steering Group, ASG) organisées à Bruxelles par la Commission européenne (DG Climat), et assure la représentation de la France au sein de l'instance de suivi de la mise en œuvre de la stratégie européenne d'adaptation.

L'ONERC met à jour annuellement les informations concernant les actions de la France sur la plate-forme d'échange *Climate Adapt* (<http://climate-adapt.eea.europa.eu/>), ouverte en 2012 en appui des travaux relatifs à la stratégie européenne d'adaptation.

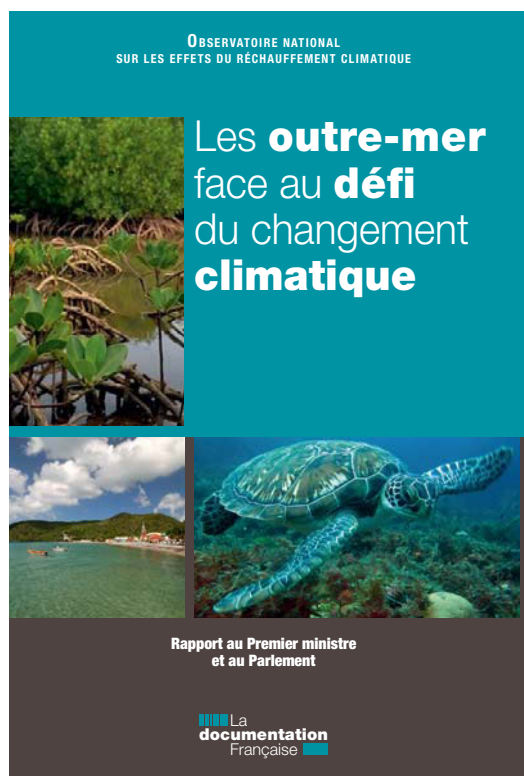
En relation avec l'Agence européenne de l'environnement (AEE) et sous la coordination du CGDD/SOeS, l'ONERC fait partie du groupe de travail fédéré dans le réseau Eionet rassemblant les correspondants de l'AEE intéressés par les problématiques d'observation des effets du changement climatique et de l'adaptation. À ce titre, l'ONERC a participé à la réalisation d'un rapport thématique sur l'adaptation des infrastructures de transport dans l'espace européen, une étude

sur les plates-formes d'adaptation en Europe, ainsi qu'à une auto-évaluation des politiques mises en œuvre en Europe sur l'adaptation.

L'ONERC a accueilli une étudiante de l'Institut d'études politiques de Grenoble pour conduire une étude approfondie (six mois) sur les mécanismes de prise en compte de l'adaptation au changement climatique dans la coopération transfrontalière et la pertinence d'un cadre international pour le développement de ces actions.

• Initiatives multilatérales et bilatérales

Dans le cadre du projet Acclimate, l'ONERC participe aux travaux de la Commission de l'océan Indien (COI) visant à l'élaboration d'une stratégie régionale d'adaptation pour les États insulaires de l'Ouest de l'Océan indien. La COI est constituée des Comores, des Seychelles, de La Réunion, de Madagascar et de Maurice. Le rapport de l'ONERC sur l'outre-mer a été présenté à cette occasion lors d'un colloque à la Réunion. Au printemps 2014, l'ONERC a apporté son soutien pour la définition, en appui de chaque délégation nationale, d'un réseau d'échanges de données pour le bénéfice de l'adaptation littorale dans la zone de l'océan Indien ouest.



En mars 2013, à la demande de la partie polonaise et dans le cadre du partenariat franco-polonais, une présentation de la politique française d'adaptation et du plan national français a été réalisée à Varsovie au cours d'un atelier de deux jours. Dans le cadre d'échanges bilatéraux sur le thème de l'énergie et des politiques climatiques l'ONERC a coprésidé un groupe d'échange franco-chinois qui a donné lieu à un voyage d'études en Chine à la fin de 2013, et un en France au printemps 2014.

L'ONERC assure le suivi des travaux de la Convention alpine sur les changements climatiques. Après plusieurs années centrées sur les observations, les pays signataires traitent des questions d'adaptation notamment en relation avec le tourisme.

Plan national d'adaptation au changement climatique



Le premier Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC) a été publié en juillet 2011. Après avoir coordonné son élaboration de 2009 à 2011, l'ONERC est désormais chargé du suivi de la mise en œuvre d'ensemble ainsi que de l'exécution de plusieurs mesures au sein de différentes fiches thématiques. Ces actions nécessitent une coordination interministérielle et interdirections.

Dans le prolongement de la Stratégie nationale d'adaptation élaborée en 2006, le Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC) couvrant la période 2011-2015 représente un élément important de la démarche d'adaptation de la France. L'élément fondateur de cette démarche, initiée en 2001, est la loi, votée à l'unanimité au Sénat comme à l'Assemblée nationale, indiquant : « La lutte contre l'intensification de l'effet de serre et la prévention des risques liés au réchauffement climatique sont reconnues priorités nationales. »

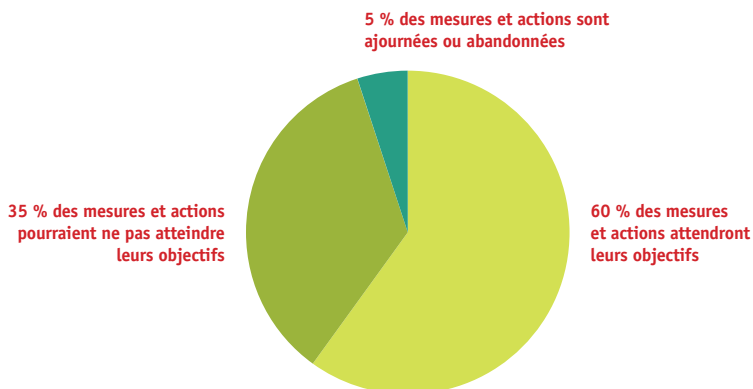
Le PNACC 2011-2015 décline en mesures opérationnelles les recommandations issues de la large concertation nationale et régionale organisée au cours de l'année 2010. Ce PNACC concerne 20 thèmes et associe les actions de plusieurs ministères et agences publiques. Il est complémentaire des actions de lutte contre les émissions de gaz à effet de serre (politique nationale d'atténuation) et des exercices de planification territoriaux (atténuation et adaptation) portés par les schémas régionaux du climat de l'air et de l'énergie (SRCAE) et les plans climat énergie territoriaux (PCET).

Le rapport d'évaluation à mi-parcours du PNACC 2011-2015 rend compte de l'état d'avancement des actions. Il restitue les appréciations des pilotes thématiques sur l'atteinte des objectifs initiaux (auto-évaluation).

Ce rapport a été présenté au Conseil national de la transition écologique (CNTE) pour rendre compte de la mise en œuvre de la politique nationale d'adaptation, pour recueillir son avis sur les actions actuelles et, le cas échéant, sur de futurs champs à couvrir en matière d'adaptation au changement climatique au niveau national.

L'exécution des actions enregistre une progression satisfaisante à mi-parcours :

- 92 % des actions prévues ont démarré ;
- 60 % du budget identifié a été engagé ;
- 60 % des actions sont en phase avec les objectifs initiaux ;
- 5 % des actions sont abandonnées ou ajournées ;
- 35 % actions pourraient n'atteindre qu'une partie de leurs objectifs initiaux.

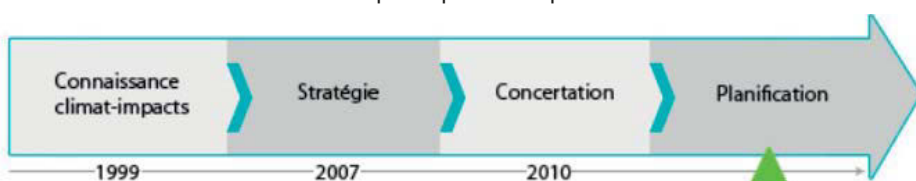


L'importance de cette démarche renforçant la résilience de la France au changement climatique a été bien perçue par les participants.

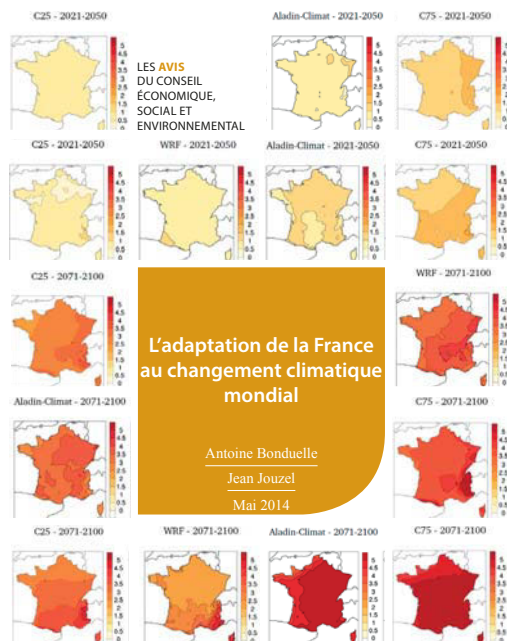
Les nombreuses questions et remarques formulées en séance par les membres du CNTE attestent l'importance de l'adaptation dans toutes les dimensions de la société. En particulier, la nécessité d'améliorer, de renforcer et d'étendre le PNACC a été exprimée à plusieurs reprises.

Au-delà de l'extension à de nouveaux secteurs et de l'approfondissement des secteurs impliqués, le besoin de renforcement des dimensions transversales de formation, d'éducation, d'information, de sensibilisation, de mobilisation et de diffusion a été particulièrement souligné (<http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Adaptation-au-changement,479-.html>).

Ce point d'étape du tout premier plan national d'adaptation au changement climatique sera suivi en 2015 d'une évaluation globale approfondie visant à préparer les orientations futures de la politique d'adaptation.



L'assemblée plénière du Conseil économique, social et environnemental (CESE) a adopté l'avis présenté par la section de l'environnement relatif à la démarche d'adaptation au changement climatique de la France. Les travaux synthétisés par Jean Jouzel et Antoine Bonduelle se sont appuyés sur plusieurs mois de travail de la section. L'ONERC a été entendu dès le début de ces travaux en tant que pilote de la démarche nationale d'adaptation.



Les éditions des JOURNAUX OFFICIELS

Les commentaires émis par les membres du CESE attestent d'une forte sensibilité de cette assemblée sur le sujet de l'adaptation au changement climatique et d'une volonté marquée de contribuer efficacement à la démarche d'adaptation des territoires.

La Commission développement durable de l'Assemblée nationale a auditionné l'ONERC à l'automne 2013 et au printemps 2014. Dans le cadre de la Mission d'information sur les conséquences géographiques, économiques et sociales des changements climatiques en France et la préparation de la COP 21 en 2015 s'est tenue, au printemps 2014, une table ronde sur les plans d'adaptation au changement climatique.

La commission de l'aménagement et du développement durable du Sénat a entendu l'ONERC dans le

cadre de travaux sur la représentation des impacts du changement climatique en lien avec le site *Drias, les futurs du climat* (www.drias-climat.fr).

- Outils et intégration de l'adaptation
- Contribution aux activités d'adaptation

Afin d'assurer la fonction d'observatoire, complémentaire de la fonction de suivi des politiques publiques d'adaptation, l'ONERC participe à de nombreuses initiatives dans le domaine des impacts, de la vulnérabilité et de l'adaptation ainsi que dans le domaine amont des sciences de l'atmosphère. L'ONERC participe notamment :

- au programme de recherche et d'innovation GICC (Gestion et impacts du changement climatique) piloté par le CGDD ;
- aux travaux prospectifs du CGDD du CGET et de grandes entreprises ;
- à l'alimentation de la réflexion stratégique sur la transition écologique ;
- au débat national pour la transition énergétique pour une croissance verte ;
- à la conférence environnementale ;
- aux développements nationaux pilotés par l'Ademe (outils pour les collectivités) ;
- aux actions ministérielles et interministérielles relatives à l'adaptation ;
- à certaines initiatives régionales, territoriales ou associatives (Ville de Paris, Île-de-France, Picardie, Rhône-Alpes, Nantes métropole, Loiret, Plaine commune, Limousin, etc.) ;

- au suivi des éléments traitant d'adaptation au sein des documents de planification régionaux (SRCAE) ;
- au Club Vitecc (CDC Climat) destiné aux acteurs territoriaux de l'adaptation ;
- à l'élaboration et au suivi de l'Accord de partenariat 2014-2020 coordonnée par le CGET dans le cadre de l'objectif thématique dédié à l'adaptation et aux risques (en collaboration avec la DGPR) ;
- au programme spatial européen GMES-COPERNICUS coordonné par le CGDD ;
- à des activités d'adaptation au changement climatique portées par le Fonds français pour l'environnement mondial.

- *Le portail de l'adaptation*

Le site Internet de l'ONERC continue son amélioration et devient un véritable portail pour l'adaptation au changement climatique. Grâce à une page d'accueil rénovée facilitant l'accès à l'ensemble des informations, mais aussi au réaménagement de ses rubriques, il ambitionne de devenir l'outil indispensable pour les collectivités, les administrations, les entreprises pour bâtir leurs stratégies et plans d'adaptation. Les améliorations du portail sont continues et intégreront progressivement un accès vers un champ de connaissance en matière d'adaptation au changement climatique qui, *de facto*, croît rapidement, en même temps que l'activité d'adaptation apparaît et se développe en France ou ailleurs.

Les contenus très techniques (bibliographie, base de données, indicateurs) nécessitant l'usage de ressources spécifiques sont regroupés au sein de la partie « base de données » du portail. L'intégration des ressources techniques dans le portail a bénéficié d'une importante évolution dans le but de simplifier la navigation. Le portail a contribué de manière importante à la valorisation de la publication des différentes composantes du 5^e rapport d'évaluation du GIEC.

The screenshot displays the ONERC website interface for the 5th IPCC Report. At the top, the header reads 'ÉNERGIE, AIR ET CLIMAT' and 'Impacts et adaptation (ONERC)'. The main content area is titled '5e Rapport du GIEC' and includes a timeline showing the release of Volume 1 (September 2013), Volume 2 (March 2014), Volume 3 (April 2014), and the Synthesis Report (October 2014). A sidebar on the right contains a 'En savoir plus' section with the GIEC logo and links to 'Livres', 'Principaux sites du GIEC', and 'Portail en anglais'. Below this is a 'Comprendre le changement climatique' section with four sub-sections: 'L'EFFET DE SERRE', 'QUELS SONT LES INDICATEURS CLÉS DE L'EFFET DE SERRE?', 'QU'EST-CE QUE LE GIEC ET QUEL EST SON RÔLE?', and 'LE CLIMAT DÉPEND DE'.

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/-5e-Rapport-du-GIEC-.html>

● *Base de données des projets de recherche*

L'ONERC a mis en ligne à l'automne 2011 une base de données recensant des projets de recherche sur le changement climatique et l'adaptation. Prévue par le PNACC, cette base de données a pour but de faciliter et accélérer la diffusion des résultats de la recherche. Elle rassemble des informations sur des projets menés actuellement par des équipes françaises ou achevés depuis 2008, portant sur les impacts du changement climatique et l'adaptation à ses effets. Chercheurs, décideurs, ONG, bureaux d'études, grand public... Tous peuvent ainsi mieux connaître la diversité de cette recherche, les laboratoires impliqués, les thèmes abordés et, dans la plupart des cas, accéder aux documents présentant les résultats.

Développée en partenariat avec le Groupement d'Intérêt scientifique climat-environnement-société (GiIS-Climat), cette base est régulièrement enrichie. Les 76 projets présents lors de l'ouverture ont été complétés, la base contient 183 projets en ligne en septembre 2014. Le système de recherche est un outil complet intégrant des fonctionnalités d'exportation de contenu.

● *Statistiques de fréquentation*

Le site Internet de l'ONERC a été repensé au cours de la période pour simplifier la navigation d'une part en limitant au maximum les « clics » inutiles et pour valoriser les réalisations associées au PNACC, les publications du GIEC et la production de l'ONERC. De plus chaque grande rubrique dispose d'un espace dédié aux actualités.

Les efforts importants ont permis d'accompagner l'accroissement significatif de la fréquentation du site (cf. tableau ci-après) des cinq dernières années.

Année	2010	2011	2012	2013	2014
Visites (mensuelles moyennes)	2 304	2 061	2 998	5 944	7 888
Pages vues (mensuelles moyennes)	5 405	5 349	7 639	14 101	17 754
Remarques	Concertation du PNACC	Publication du PNACC	Ouverture Drias les futurs du climat	Publication vol. 1 AR5 (GIEC)	Publication vol. 2 et 3 AR5 (GIEC)

La fréquentation atteinte en 2014 atteste d'un intérêt pour le site de l'ONERC largement au-delà des acteurs de l'adaptation et nécessite la prise en compte de publics variés dans la conception des rubriques pour que chacun trouve l'information qu'il recherche aussi rapidement que possible.

- **WIKLIMAT**

WIKLIMAT a ouvert en juillet 2013, inspiré par l'expérience WIKHYDRO. Cette plateforme collaborative développée par le CEREMA permet à chacun de se documenter sur les initiatives françaises en matière d'adaptation au changement climatique et à chaque acteur de partager avec le plus grand nombre son expérience et ses réalisations. Le fonctionnement n'est pas encore complètement opérationnel du fait notamment d'une alimentation seulement possible en interne au MEDDE et d'un géoréférencement minimaliste.

- **Information, formation et communication**

L'ONERC assure ses missions d'information et de communication en étroite collaboration avec la direction de la communication (Dicom) du MEDDE. Ces actions visent tous les publics par l'intermédiaire de différents supports dont certains sont présentés ci-après. L'ONERC apporte son soutien en matière de réalisation de supports d'information sur l'adaptation au changement climatique pour différentes structures (services déconcentrés du MEDDE, administrations centrales y compris hors MEDDE, communication interne au MEDDE, établissements publics, organisations non-gouvernementales, presse, associations).



- **Rapports annuels**

Le rapport dédié aux outre-mer a fait l'objet de plusieurs actions de valorisation et de présentation notamment auprès du ministère chargé des outre-mer, des commissions parlementaires chargées du développement durable et de la section de l'environnement du CESE. Le rapport annuel 2013 *L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change* a été publié à l'automne 2014 en raison des aléas de réalisation. Il dresse un panorama des enjeux de l'adaptation au changement climatique pour l'arbre et la forêt.

- **Lettre trimestrielle aux élus**

La lettre de l'ONERC aux élus, diffusée à 5800 exemplaires, a bénéficié d'une évolution de sa présentation à partir du numéro 15 afin de mieux mettre en valeur le thème traité et d'améliorer encore l'efficacité de cette publication très appréciée. En complément de l'édition, la lettre est aussi diffusée sous forme dématérialisée à plus de 400 destinataires.



Actu
TERRITOIRES

Depuis une dizaine d'années, la question de l'adaptation s'est imposée aux collectivités locales.

Plans locaux d'urbanisme, schémas de cohérence territoriale, schémas climat-énergie, plans de prévention des risques naturels, plans climat-énergie territoriaux, plans régionaux de l'agriculture durable... Chaque collectivité territoriale dispose de différents outils de planification afin d'intégrer l'adaptation au changement climatique dans les orientations de gestion à long terme de son territoire.

Ces documents de planification ont vocation à prendre en compte les impacts locaux du changement climatique. Dans certains cas, l'évaluation préalable ne produira pas de recommandation du fait d'impacts mineurs pour tel et tel secteur. Inversement, dans d'autres cas, les études de vulnérabilité permettront d'identifier des axes importants à éviter. La démarche de diagnostic des vulnérabilités face au climat présente, en s'appuyant sur les observations passées, dans un premier temps, puis face au climat futur en s'appuyant sur les projections climatiques, dans un deuxième temps, est indispensable pour mettre en évidence les forces et faiblesses du territoire à court et moyen termes.

Ainsi toutes les réflexions, sectorielles ou transversales, supports de la planification territoriale permettent d'incorporer l'adaptation au changement climatique au travers des processus d'élaboration ou de révision des documents.

INDICATEUR EXPOSITION DES POPULATIONS AUX RISQUES CLIMATIQUES : le traitement de la densité de population et des enjeux naturels identifiés (inondations, tempêtes, foudre, incendies, mouvements de terrain) permet d'identifier l'ordre d'urgence des populations en France métropolitaine. Actuellement, 27% des communes sont exposées ou fortement exposées et le pourcentage est susceptible d'augmenter avec le changement climatique.

Paul Vergès
Président de l'ONERC



Actu
Formation

Le renforcement de notre capacité d'adaptation passe par une meilleure connaissance des enjeux climatiques.

Sageant de formation initiale ou permanente, la sensibilisation aux enjeux du changement climatique s'intègre pleinement dans les problématiques de développement durable. Les initiatives en ce domaine sont multiples, des écoles élémentaires aux cursus d'enseignement supérieur ou aux modules de formation professionnelle. Les enseignants développent ainsi une conscience et une culture des sujets climatiques.

L'ensemble de ces dimensions éducatives est fondamental pour accompagner des évolutions de la société nationales et européennes et dépasser craintes et fatalismes. Le climat est un sujet complexe — certaines composantes, peu intuitives, sont difficiles à appréhender et à assimiler — qui nécessite un accompagnement dans le processus d'acquisition des connaissances.

Très peu de domaines et de territoires peuvent se considérer comme insensibles au climat et à son évolution. Ainsi, le développement d'une culture partagée renforce la résilience des populations et des territoires par une plus grande capacité d'adaptation et d'innovation. Par ailleurs, une meilleure conscience des enjeux climatiques permet aux populations de se mobiliser pour une utilisation raisonnée des ressources et la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

INDICATEUR 30% DES COMMUNES MOUVEMENTENT OU FORTEMENT MOUVEMENTENT LA VULNÉRABILITÉ DE LEUR TERRITOIRE RAPPORTÉ AU COMPARTIMENT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE, DANS LA MESURE OÙ CERTAINS ÉVÉNEMENTS MÉTÉOROLOGIQUES DEVENNENT PLUS ÉPISODES, PLUS FRÉQUENTS OU PLUS INTENSES. L'IMPACT DES RISQUES ENCEAUX EST DONC PLUS QUE JAMAIS LIÉ AU CHANGEMENT CLIMATIQUE.

Paul Vergès
Président de l'ONERC

EDITO

Éduquer et former les femmes et les hommes, et notamment les jeunes, à une culture environnementale est une nécessité pour préserver l'esprit de l'humanité.

En effet, la connaissance des sciences de l'environnement et de l'énergie humaine, mieux informée, à faire des choix plus responsables et à agir pour réduire le bouleversement climatique.

Les disciplines concernées sont multiples, car les sciences qui rapportent au climat et à l'adaptation au changement climatique mobilisent des sciences dures et des sciences humaines et sociales.

L'adaptation au changement climatique, pour être effective, devra être intégrée aux divers plans politiques, mais aussi être portée par chacun et chacun d'eux nous. Cet objectif, s'il est envisagé, sera concret et partagé, et qui contribuera à une réelle transition écologique.

Paul Vergès
Président de l'ONERC

● **Sélection d'informations thématiques (lettre de veille technique)**

Depuis 2009, l'ONERC diffuse, tous les deux mois, une lettre d'information thématique à son réseau d'experts et de correspondants contribuant à la production d'indicateurs du changement climatique. Initialement, cette lettre d'information portait sur l'actualité de l'ONERC et de son réseau. La mise en place progressive d'une veille portant sur les impacts du changement climatique et l'adaptation à ses effets a permis d'enrichir son contenu. La lettre d'information contient une sélection d'une vingtaine de liens Internet classés selon les catégories actualités, publications et manifestations, ainsi que quelques informations relatives à l'Observatoire. La diffusion de ces informations ciblées concerne désormais 750 abonnés spontanés (une cinquantaine seulement jusqu'en 2012). Depuis novembre 2013, l'inscription est accessible sur la page de consultation de la base de données de projets de recherche.

● **Actions de formation et séminaire**

Une session de sensibilisation sur le portail *Drias, les futurs du climat* a été réalisée auprès d'une centaine d'agents des ministères du Développement durable et de l'Économie dans le cadre du cycle de formation « Défi Climat ».

À l'occasion de la finalisation du projet ANR CECILE- Changements environnementaux côtiers : impact de l'élévation du niveau de la mer, l'ONERC et les partenaires du projet se sont associés pour présenter les principaux résultats du projet et l'état des lieux des recherches sur les implications de la hausse du niveau de la mer sur les risques côtiers lors d'un colloque organisé à la Défense en

septembre 2013. Il s'agissait de dresser un état des lieux sur les questions de la gestion intégrée des zones côtières, dans un contexte de hausse du niveau de la mer. Cette manifestation a rassemblé des scientifiques, des gestionnaires et des élus. Elle sera valorisée pour le prochain rapport thématique de l'observatoire.

Plusieurs actions de formation au sein d'établissements d'enseignement supérieur sont assurées par l'ONERC (AgroParisTech, École nationale de la météorologie, PontsParisTech, etc.).



Les entreprises et l'adaptation au changement climatique

• *Adaptation et acteurs privés*

L'ONERC a réalisé cette année plusieurs présentations à destination d'acteurs privés et de réseaux d'entreprises pour présenter les enjeux de l'adaptation pour les acteurs économiques et les implications du PNACC (par exemple Air liquide, L'Oréal). L'ONERC participe également à un cycle de conférences sur les actions d'adaptation engagées par les entreprises françaises piloté par Entreprises pour l'environnement (EPE), qui s'est matérialisé par une publication conjointe au printemps 2014 *Les Entreprises et l'Adaptation au changement climatique*.



• *Exposition pédagogique itinérante*

L'ONERC dispose, depuis 2006, de deux jeux complets d'une exposition sur l'adaptation au changement climatique. Cette exposition pédagogique itinérante, composée de 13 panneaux autoportants, est mise à disposition gratuitement sur simple demande auprès de l'ONERC. Sur la période de décembre 2012 à décembre 2013, 20 sollicitations se sont traduites par 241 jours d'exposition (141 jours en 2012) répartis en 5 lieux différents. Des diffusions numériques au format pdf ont également eu lieu. Le regain d'intérêt constaté sur le second semestre 2012, où certaines demandes n'ont pas pu être entièrement satisfaites, s'est ainsi confirmé pour l'année 2013. En 2014, l'exposition a eu moins de succès avec seulement 104 jours de présentation. La préparation du renouvellement de cette exposition sur la base du 5^e rapport d'évaluation du GIEC et des travaux français a été engagée en 2014 avec l'appui de Météo-France et de l'IPSL. Un binôme d'élèves techniciens supérieurs de la météorologie a produit des recommandations pour cette action dans le cadre d'un stage co-encadré par l'ONERC et l'École nationale de la météorologie.

● **Large public**

Un PHÉNOMÈNE complexe en marche

En 2012, la température moyenne planétaire a progressé de 0,90 °C par rapport à la moyenne du 20^e siècle. Elle pourrait augmenter jusqu'à 5,3 °C au cours du 21^e siècle si nous ne maîtrisons pas nos émissions de gaz à effet de serre.

En 2012, la température moyenne planétaire a progressé de 0,90 °C par rapport à la moyenne du 20^e siècle. Elle pourrait augmenter jusqu'à 5,3 °C au cours du 21^e siècle si nous ne maîtrisons pas nos émissions de gaz à effet de serre.

En 2012, la température moyenne planétaire a progressé de 0,90 °C par rapport à la moyenne du 20^e siècle. Elle pourrait augmenter jusqu'à 5,3 °C au cours du 21^e siècle si nous ne maîtrisons pas nos émissions de gaz à effet de serre.

À l'occasion des Journées européennes du patrimoine 2013, une exposition spécifique sur le changement climatique et les politiques climatiques nationales a été conçue par la direction de la communication du MEDDE (Dicom) pour agrémente la visite de l'hôtel de Roquelaure. L'ONERC a contribué à la réalisation de plusieurs panneaux traitant des impacts et de l'adaptation et à leur mise à jour en 2014 à l'occasion de la publication du 5^e rapport d'évaluation du GIEC.

L'effet de serre

Les gaz à effet de serre contenus dans l'atmosphère ont un effet important dans la régulation du climat. Ils empêchent une large part de l'énergie solaire (les rayonnements infrarouges) d'être renvoyée de la Terre vers l'espace. C'est l'effet de serre global. La température moyenne sur Terre est d'environ 15 °C, tandis que sans elle serait de 18 °C.

L'impact des activités humaines

L'effet de serre est déséquilibré par les activités humaines. Celles-ci provoquent artificiellement l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et, par conséquent, accentuent le réchauffement de notre planète. Les CO₂ libérés de carbone représentent près des 2/3 des émissions mondiales de gaz à effet de serre induites par les activités humaines. C'est pourquoi on mesure usuellement l'effet des autres gaz à effet de serre en équivalent CO₂ (eqCO₂). Les émissions de CO₂ actuelles auront un impact sur les concentrations dans l'atmosphère et sur la température du globe pendant des dizaines d'années.

Au début de 2013, la DGEC et l'association Météo et Climat-Société météorologique de France ont signé une convention de partenariat dans l'optique notamment de renforcer la diffusion des supports tous publics réalisés par l'ONERC sur

les thèmes des impacts, de la vulnérabilité et de l'adaptation. Le Réseau action climat, en partenariat avec l'Ademe et l'ONERC, a développé un site web et des brochures de valorisation des publications du GIEC.

L'ONERC a contribué à la réalisation de brochures destinées à un public varié, comme *Les chiffres clés du climat*, *Le Rapport sur l'état de l'environnement en France*, plusieurs publications du RAC, la revue *Territoires 2040*, la lettre *Info climat international*. La plupart des contributions ont permis d'inclure des éléments issus du 5^e rapport d'évaluation du GIEC.

● **Les indicateurs du changement climatique**

Un séminaire sur les indicateurs du changement climatique a été organisé à Météo-France sur le site de Toulouse en juin 2013. Cette journée avait pour objet d'amener les experts à réfléchir aux développements futurs. Elle a rassemblé à la fois les acteurs déjà impliqués dans la fourniture de données et d'analyses des indicateurs actuels et les experts qui contribueront prochainement, par leurs travaux, à enrichir cette réflexion.

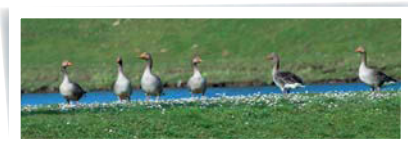
INDICATEURS du changement climatique

Évolution des populations de certains oiseaux

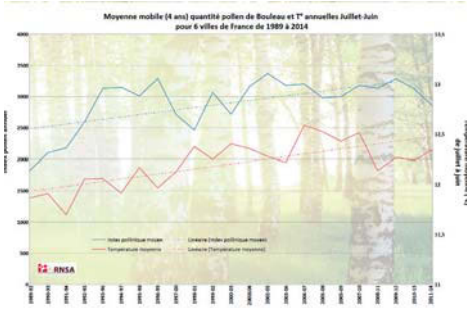
Cet indicateur présente l'évolution des populations françaises d'oiseaux les plus susceptibles de réagir au changement climatique, à partir d'effectifs nationaux ou régionaux. Depuis 2008, la Ligue de protection des oiseaux (LPO) observe une douzaine d'espèces ou groupes d'espèces.

LA PAROLE À... Philippe J. DUBOIS, ornithologue

Nous étudions les réactions d'une douzaine d'espèces, ou de groupes d'espèces, d'oiseaux au changement climatique. Parmi elles, la cigogne blanche, sur laquelle le réchauffement semble avoir un impact positif. Cette grande voyageuse, qui prend ses quartiers d'hiver en Afrique subsaharienne, reste de plus en plus dans le sud de l'Europe. Un millier de cigognes hivernent désormais en France contre seulement une dizaine il y a trente ans. Plus proches de leurs sites de nidification, elles bénéficient de périodes de reproduction plus longues et leur population augmente. À l'inverse, le réchauffement a un effet négatif sur les gaseaux aux affinités septentrionales, comme le pouillot siffleur ou le mélanège boréal. Sensibles à la hausse des températures et probablement à la raréfaction de certains insectes, ces oiseaux riches remontent vers le nord de l'Europe. En France, leur nombre a déjà diminué de 20 à 80 %, en fonction des espèces, au cours des vingt dernières années. www.lpo.fr



Les conditions d'hivernage, liées au changement climatique, permettent désormais aux oies cendrées (photo ci-dessus) d'hiverner en France. Débuté discrètement dans les années 1960, le phénomène n'a cessé de s'accroître depuis.



Annexe 2

SIGLES ET ACRONYMES

AFCLIM	Prospective agriculture, forêt, climat : vers des stratégies d'adaptation
ANR	Agence nationale pour la recherche
CAPSIS	Croissance d'arbres en peuplement et simulation d'itinéraires sylvicoles
Carbofor	Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France
Climator	Élaboration d'outils et de références pour l'analyse de la vulnérabilité des agro-écosystèmes face au changement climatique
CLIMSEC	Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol
CNRM-GAME	Centre national de recherches météorologiques-groupe d'études de l'atmosphère météorologique
CORDEX	a Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment
CRGF	Commission des ressources génétiques forestières
CTPS	Comité technique permanent de la sélection
ENSEMBLES	Ensemble-based Predictions of Climate Changes and their Impacts
FAO	Food and Agriculture Organization
FAST	Analyse et spatialisation de scénario intégré de changement global sur la forêt française
FFN	Fonds forestier national
FP	Framework Programme
GICC	Gestion et impact du changement climatique
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GIP Ecofor	Groupement d'intérêt public écosystèmes forestiers
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière
INRA	Institut national de la recherche agronomique
MFR	Matériel forestier de reproduction
PAC	Politique agricole commune
PCRD	Programme-cadre de recherche et de développement
PEFC	Programme de reconnaissance des certifications forestières
PGRN	Pôle grenoblois des risques naturels
PNACC	Plan national d'adaptation au changement climatique
REINFFORCE	Réseau infrastructure de recherche pour le suivi et l'adaptation des forêts au changement climatique
RMT AFORCE	Réseau mixte technologique consacré à l'adaptation des forêts au changement climatique
RTM	Restauration des terrains de montagne
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
WRCP	World Climate Research Program

Annexe 3

CONTRIBUTEURS ET REMERCIEMENTS

Cet ouvrage a été réalisé sous la direction de Laurent Michel, directeur de l'Observatoire national des effets du réchauffement climatique, et de Nicolas Bériot, secrétaire général.

Coordination

Le RMT AFORCE, ARTELIA et le GIP Ecofor ont assuré la coordination de la rédaction des chapitres techniques, sous la direction de Céline Perrier (CNPF-IDF, RMT AFORCE), de Rachel Jouan (ARTELIA), d'Olivier Picard (CNPF-IDF, RMT AFORCE) et de Jean-Luc Peyron (GIP Ecofor).

Technoscope a assuré la coordination du chapitre de prospective « Une balade en forêt en 2050 ».

Auteurs principaux :

Olivier Picard, CNPF-IDF

Myriam Legay, ONF

Guy Landmann, GIP Ecofor

Frédéric Berger, IRSTEA

Philippe Riou-Nivert, CNPF-IDF

Philippe Guillet, Chambre d'agriculture de la Sarthe

Matthieu Rebendenne, Chambre d'agriculture de la Sarthe

Jean-Luc Peyron, Ecofor

Alain Bailly, FCBA

Isabelle Bellin, Technoscope

Bertrand Reysset, Observatoire national des effets du réchauffement climatique

Jérôme Duvernoy, Observatoire national des effets du réchauffement climatique

Sylvain Mondon, Observatoire national des effets du réchauffement climatique

Contributeurs thématiques

Certains paragraphes ou encadrés ont été rédigés intégralement par des auteurs extérieurs. Ils sont indiqués en gras.

Vincent Badeau, INRA (chap. B, encadré 2)

Vincent Boulanger, ONF (chap. B, encadré **4**)

Nathalie Bréda, INRA (chap. B)

Isabelle Chuine, CNRS (chap. B)

Éric Collin, IRSTEA (chap. D, encadré **12**)

Claude Consandey, CNRS (chap. C)

Thomas Cordonnier, IRSTEA (chap. D, encadré **9**)

Alexis Ducousso, INRA (chap. D)

Meriem Fournier, AgroParisTech (chap. B, encadré **6**)

André Granier, INRA (chap. B)

Hervé Le Bouler, ONF (chap. B, encadré **2**)

Jean-Michel Leban, INRA (chap. B)

Xavier Morin, CNRS (chap. B)

Bruno Moulia, INRA (chap. B, encadré **6**)

Céline Perrier, CNPF-IDF (chap. A et D, encadré **13**)

Christelle Robinet, INRA (chap. B)

Alain Roques, INRA (chap. B)

Bernt Zeller, INRA (chap. B)

Personnes ayant contribué à la relecture

Vincent Bourcier, Observatoire national des effets du réchauffement climatique

Nathalie Bréda, INRA

Pierre Brender, MEDDE

Alain Canet, Arbre et Paysage 32, et Association française d'agroforesterie (AFAF)

Romain Cailleton, MEDDE

Thierry Caquet, INRA

Stéphanie Croguennec, MEDDE

Gilles Croquette, MEDDE

Thomas Curt, IRSTEA
Ophélie Darses, MEDDE
Sylvain Delzon, INRA
Yue Dong, MEDDE
Cécile Goubet, MEDDE
Olivier de Guibert, MEDDE
Rachel Jouan, Artelia
Anne Le Maréchal, Chambre d'agriculture 72
Hervé Le Bouler, ONF
François Lefèvre, INRA
Myriam Legay, ONF
Joseph Lunet, MEDDE
Catherine Mayer, AFAC-Agroforesteries
Pascale Meeschaert, Technoscope
Frédérique Millard, MEDDE
Sabine Moraud, MEDDE
Xavier Morin, CNRS
Jean-Paul Nebout, CRPF Auvergne
Céline Perrier, CNPF-IDF
Jean-Luc Peyron, GIP Ecofor
Olivier Picard, CNPF-IDF
Christophe Plomion, INRA
Laetitia Poffet, MAFF
Philippe Riou-Nivert, CNPF-IDF
Christelle Robinet, INRA
Bernard Roman-Amat, AgroParisTech
Jurgis Sapijanskas, MEDDE
Marie-Françoise Slak, IGN
Antonin Vergez, MEDDE

Remerciements

Les auteurs principaux remercient particulièrement pour leur relecture critique des chapitres techniques : Thierry Caquet, Ophélie Darses, Rachel Jouan, Sabine Moraud, Céline Perrier, Laetitia Poffet, Jurgis Sapijanskas, Marie-Françoise Slak, ainsi que tous les autres lecteurs cités ou restés anonymes.

Isabelle Bellin remercie vivement Jean-Luc Peyron, Myriam Legay, Céline Perrier, Olivier Picard, Philippe Riou-Nivert, Jean-Paul Nebout et Thomas Curt, pour leur aide dans la construction de l'histoire racontée sur la forêt en 2050.