

A l'issue de l'expertise, des propositions de recherche et/ou d'outils ont été faites pour palier les manques identifiés au cours des travaux, que l'on peut organiser en quatre axes :

- les mécanismes fondamentaux de la réponse des arbres et des parasites exposés à la chaleur et au manque d'eau ;
- l'analyse plus systématique des espèces forestières (diversité et plasticité intraspécifiques) et des principaux ravageurs aux contraintes climatiques ;
- l'identification des zones à risques, qui passe par le rassemblement des données environnementales et le développement des modèles ;
- des outils d'évaluation économique et d'accès à l'information.

1. Recherches visant à mieux comprendre les mécanismes essentiels de la réponse des arbres aux stress hydrique et thermique

Effets physiologiques irréversibles de la chaleur

Si les mécanismes de régulation physiologique des arbres à la sécheresse commencent à être bien connus, les effets physiologiques de la chaleur restent très peu explorés, notamment dans des domaines où les effets sont irréversibles. Les situations dommageables étant celles où manque d'eau et températures élevées se combinent, ce sont bien leurs effets conjoints sur les tissus foliaires (rendement de la photosynthèse, dégradation des pigments, altération irréversible des parois tissulaires) mais aussi, domaine peu exploré, sur les tissus non foliaires (écorce, branches, bourgeons) et, finalement, les processus d'acclimatation permettant d'augmenter la résistance aux températures élevées qu'il faut décrire. On vise ici à mieux comprendre le jaunissement ou rougissement prématuré des feuilles et aiguilles, la mortalité possible de branches et de bourgeons, et des lésions parfois observées sur les troncs de certaines espèces et qu'on attribue à la chaleur. Par ailleurs, la résistance aux températures élevées est un processus inductible, et les dynamiques d'acclimatation/désacclimatation sont très mal connues et méritent notre attention.

Fonctionnement hydrodynamique au niveau sol et racines

Le fonctionnement de l'interface sol-racine-mycorhhyze est encore relativement mal connu, même s'il est établi que c'est à ce niveau que se situe la résistance maximale au transfert d'eau lorsque la disponibilité en eau du sol a induit la fermeture stomatique. La profondeur d'extraction de l'eau est ainsi une donnée fondamentale pour évaluer le risque que fait courir aux arbres un manque d'eau, mais méconnue du fait des difficultés de mesures *in situ* (observations des racines fines sur fosses profondes). Les approches que l'on peut proposer aujourd'hui combinent l'observation *in situ* par endoscopie de racines et de la phénologie racinaire en condition de dessèchement du sol, et la mise en œuvre de techniques de marquage chimique et/ou isotopique. Ces études sont pertinentes vis-à-vis du manque d'eau mais aussi pour l'excès d'eau, qui est fréquent dans les sols forestiers et risque de s'aggraver avec l'augmentation des précipitations hivernales annoncées par les scénarios climatiques.

Seuils de survie des arbres

Une des questions clés, quand on aborde les phénomènes de dessèchement prononcés comme ceux mesurés en 2003, est celle du seuil, pour les différentes essences, à partir duquel les arbres subissent des dégâts irréversibles, susceptibles d'induire à plus ou moins brève échéance des mortalités. Cette dynamique temporelle d'apparition de la mortalité doit être

documentée en temps réel sur tous les dispositifs d'observation à long terme. Il faut en effet distinguer :

- des mécanismes d'affaiblissement physiologique des arbres, souvent prédisposés par un rang au sein du peuplement défavorable ou un effet différé d'un autre accident (défoliation, bris de cime, pathogènes...). Des indicateurs écophysio­logiques sont à rechercher et calibrer pour différentes espèces ou groupes d'espèces. Cette quantification de l'état physiologique de l'arbre devrait aussi permettre de définir des seuils de vulnérabilité aux agents biotiques (insectes, maladies fongiques foliaires ou racinaires...). Enfin, des marqueurs adaptatifs de traits de résistance à la sécheresse seront à déterminer en collaboration avec les généticiens. Des perspectives à moyen terme sont envisageables pour le groupe des chênes.
- des processus de perte de compétitivité progressive de certains individus pourtant initialement dominant après sécheresse, aboutissant à des changements progressifs de rang social s'accompagnant d'une rupture brutale de leur niveau de croissance. Pour documenter ces processus, il est important de garder trace de l'histoire de chaque arbre non seulement par une caractéristique mort/vivant mais aussi par le suivi de sa position sociale. Des marques morphologiques pourraient aider à ce type de diagnostic.
- les recherches écophysio­logiques sur la réponse des arbres adultes à la sécheresse doivent être reprises avec application des contraintes hydriques jusqu'à induction de mortalité. Ceci n'a jamais été réalisé, les épisodes de sécheresse étant entrecoupés de phases de réhydratation. La compréhension des fonctions affectées qui aboutissent à la mort de l'arbre passe par ce type de manipulation sur des arbres adultes, donc dans des conditions de mise en œuvre assez difficiles et relativement coûteuses.

Enfin, les études dendrochronologiques de peuplements victimes de dépérissement attribués à la sécheresse doivent impérativement inclure la sous population d'arbres qui meurent. Ceci est généralement impossible en raison d'une récolte des arbres au stade dépérissant et non morts. Une collaboration étroite sera nécessaire avec les gestionnaires afin de conserver, sur certains sites, les individus jusqu'à mortalité et échantillonnage.

Ces recherches sont indispensables pour améliorer notre compréhension des effets différés des sécheresses et progresser dans les estimations des probabilités d'occurrence de mortalité et de dépérissements, qui est la question posée avec le plus d'insistance par les sylviculteurs.

Facteurs d'expression des parasites les plus favorisés par la sécheresse : étude des communautés de champignons endophytes.

Les parasites opportunistes s'exprimant lorsque leur hôte subit un stress hydrique sont généralement déjà présents à l'état asymptotique (infection latente ou endophytique). L'expression du pouvoir pathogène pourrait dépendre à la fois de l'état de l'hôte et de la composition de la microfaune fongique endophytique. La connaissance de ces champignons est encore très lacunaire, y compris au niveau taxonomique. Il a ainsi été montré récemment que *Sphaeropsis sapinea* (un des principaux agresseurs des pins) correspond en fait à plusieurs espèces et sous-espèces génétiques qui présentent des virulences et des réponses à la sécheresse différentes (études réalisées en Afrique du Sud et Etats-Unis). Afin de préciser les risques liés à ce type de parasites, en particulier en Europe, il est indispensable de réaliser une

étude de la diversité spécifique, génétique et biologique (virulence potentielle en interaction avec un stress hydrique) des communautés fongiques endophytes des arbres forestiers (notamment des pins), en analysant les effets hôtes (par exemple, espèces de pins indigènes vs introduites, provenances ou descendances maternelles de différentes espèces), la distribution spatiale et les voies de dissémination (spores, insectes, semences, plants asymptomatiques).

2. Etablir la sensibilité des espèces forestières et des principaux parasites aux stress hydriques et thermiques

Etude des réponses des différentes espèces ou provenances forestières à la contrainte hydrique

La perspective d'événements plus fréquents et plus accusés doit nous conduire à élargir le spectre des essences analysées. Des possibilités intéressantes sont offertes par :

- le suivi voire la mise en place de plantations comparatives de provenances et d'écotypes,
- la caractérisation climatique des aires d'origine des essences introduites,
- l'analyse des mortalités et de la croissance en fonction du climat dans les arboretums.

Au niveau écophysiological, il s'agit de caractériser les différentes espèces en fonction de leur tolérance à la sécheresse, en prenant en compte la diversité intra-spécifique de réponse. Les classements proposés jusqu'ici reposaient principalement sur la régulation des échanges gazeux et l'efficacité d'utilisation de l'eau, mais s'avèrent insuffisants. Il paraît indispensable de prendre en compte la vulnérabilité des tissus conducteurs à la cavitation, l'étude des composés de réserves, et l'anatomie des feuilles et du bois. Les récents progrès réalisés dans le domaine de l'analyse à haut débit devraient grandement faciliter ces études, dès lors que les équipements modernes d'analyse seront disponibles.

L'approche écophysiological n'a d'intérêt que couplée à une approche génétique visant à caractériser la diversité (notamment dans les tests de comparaisons de provenances ou famille); des exemples de couplages de ces approches sont disponibles sur différentes essences. Un effort important doit être entrepris pour automatiser des tests expérimentaux (sécheresses contrôlées) et des mesures (croissance, fonctions physiologiques). Par ailleurs, la mise en œuvre d'approches de génomique mobilisant les outils modernes de la biologie devrait permettre de progresser dans l'identification de gènes puis de fonctions impliquées dans la réponse à la sécheresse, puis éventuellement de la diversité de ces gènes en populations naturelles. Ces approches sont envisageables sur peupliers, chênes, pins,

Ces connaissances sont utilisables pour le choix des essences (y compris les essences dites exotiques) ou provenances de reboisement à préconiser dans le perspective du changement climatique. Il s'agit également d'améliorer nos connaissances sur les essences actuellement dites secondaires (érables, tilleul, robinier, merisier,...) dont on apprécie mal le rôle qu'elles pourraient jouer dans le contexte d'un climat davantage marqué par les sécheresses.

Outre le comportement des différentes espèces (provenances, etc.), de fortes interrogations subsistent sur le rôle de la diversité des essences dans la résistance aux contraintes hydriques de la communauté d'arbres (dans une progression logique des échelles : arbres > population

d'arbres d'une même espèce > communauté d'arbres d'espèces différentes). Des approches expérimentales et épidémiologiques (du type projet Orphée) peuvent être mise en oeuvre : il s'agit de tester l'effet de la diversité des essences forestières d'une communauté (peuplement en mélange) sur sa capacité de résistance et de résilience au changement climatique (y compris la composante sécheresse), en manipulant à la fois le nombre et l'identité des espèces en mélange. Le caractère retenu pour choisir les essences d'identités différentes est la phénologie du développement foliaire.

Biodiversité et résistance de la végétation forestière accompagnatrice

La végétation forestière constitue un maillon essentiel des chaînes trophiques mais sa réaction aux sécheresses est très mal connue. Une première approche pour combler cette lacune consisterait à conduire *in situ*, à l'instar de ce qui est suggéré sur arbres adultes (cf. supra), sur des petites placettes des sécheresses expérimentales d'intensité et de fréquence variables dans des conditions stationnelles et de peuplements (stade, essences dominantes) variées. Ce type d'expérimentation permettrait :

- de vérifier si la végétation forestière réagit dans son ensemble à la sécheresse ou si s'opère un glissement de composition des communautés floristiques pendant et après la sécheresse,
- si ce glissement n'apparaît qu'après une succession de sécheresses et
- d'identifier des traits écologiques (par exemple, profondeur du système racinaire ou longévité) et d'autres attributs (par exemple, espèces en limite d'aire) qui confèrent aux espèces une meilleure résistance à la sécheresse.

Parallèlement, il est nécessaire de quantifier les évolutions à long terme de la végétation forestière pour vérifier si les espèces ou groupes d'espèces qui déclinent ou deviennent plus fréquentes sont bien celles/ceux identifié(e)s par l'approche expérimentale. Cela suppose de maintenir ou développer des programmes de suivi à long terme de type RENECOFOR.

Etude de la réponse des principaux ravageurs et maladies à la contrainte hydrique

On vise ici le développement d'une typologie des ravageurs et maladies vis-à-vis de la contrainte hydrique et la définition de seuils d'alerte de sécheresse induisant une augmentation de la vulnérabilité des arbres hôtes à ces agents.

Pour réaliser une telle typologie, il faudrait, à la suite du travail réalisé dans le cadre de la méta-analyse, mettre au point des « tables de conversion » entre données climatiques et potentiel de base des arbres en combinant les données stationnelles et les essences, station x essence, compléter les connaissances sur les seuils critiques de cavitation (voir ci-dessus), revisiter la base de données du Département de la Santé des Forêts, en comparant notamment les dégâts pour des paires d'années contrastées sur le plan climatique, et pour diverses combinaisons entre agent, essence et station ou site.

3. Evaluer les dommages à court et moyen terme et déterminer des zones à risque

Evaluation et suivi des dégâts de sécheresse par télédétection : développement et expérimentation d'une stratégie d'évaluation

L'approche à privilégier est la combinaison de données spatiales à faible et haute résolution et l'intercalibration avec des données au sol. Ce travail peut concerner les dégâts immédiats observés fin 2003 et les dégâts différés. Une telle cartographie des dégâts prendrait tout son sens par la confrontation du résultat avec la cartographie des zones à risque obtenue par spatialisation du bilan hydrique (ci-après) ou d'autres analyses de risque.

Détermination de zones à risques (quantification de l'intensité et de la récurrence de la contrainte hydrique)

La détermination d'un bilan hydrique fiable à différentes échelles d'espace (massif forestier, région, France entière) et de temps (événement extrême particulier mais aussi chronologies de référence) par modélisation de l'eau disponible dans les sols et de la contrainte imposée aux arbres est une étape centrale pour l'appréhension des risques, dont dépend la possibilité de délimitation de zones à risques de limitation de croissance, de dépérissement, et de mortalité.

L'approche préconisée repose principalement en l'adaptation du modèle SIM (composé de trois modèles, météorologique, échange au niveau végétation – sol, et hydrologique) de Météo France, plus particulièrement dans sa composante fonctionnement de la végétation, et sur l'utilisation de la télédétection pour (i) la spatialisation fine de la phénologie et (ii) en cas de nouvelle sécheresse, la production de cartes des dégâts à confronter avec l'approche bilan hydrique. Aujourd'hui, le verrou majeur de cette approche est l'absence de carte de réserve utile des sols forestiers. Un travail spécifique à la fois sur le choix des fonctions de pédo transferts adaptés aux sols forestiers et sur la spatialisation à l'échelle du territoire de cette donnée est indispensable.

Développement d'un modèle spatial (à l'échelle du paysage) rendant compte des interactions entre sécheresse, insectes ravageurs, arbres hôtes et conditions stationnelles

Dans le cadre de l'expertise, la comparaison entre les observations de dégâts des principaux ravageurs des forêts suite à la sécheresse de 2003 avec les connaissances sur les effets de la sécheresse sur les insectes forestiers ont montré que les dégâts de la sécheresse dépendent généralement de l'intensité de celle-ci, de la guildes à laquelle appartient l'espèce de ravageur, de l'état physiologique de l'arbre hôte et des conditions stationnelles.

Il est nécessaire d'avancer vers une analyse quantitative des interactions entre ces facteurs à l'échelle du paysage. Les données nécessaires sont les dégâts causés par les ravageurs (données du Département de la Santé des Forêts, éventuellement en relation avec le projet sur l'utilisation de la télédétection pour l'estimation des dégâts (cf. supra) mais aussi des données biologiques (date d'émergence, mortalité) et démographiques (résultats de piégeage, nombre de générations par an) et des données climatiques (relatives aux insectes – températures, pluviométrie – et à l'état physiologique des hôtes (éventuellement en relation avec le projet de recherche sur la détermination du bilan hydrique, cf. supra). L'analyse statistique visera à :

- identifier les facteurs les plus importants dans l'occurrence et l'intensité des dégâts causés par les insectes ravageurs,
- identifier, en se fondant sur les interactions entre sécheresse, insectes ravageurs et conditions stationnelles, des zones à risque suite à la sécheresse de 2003,
- faire un travail exploratoire sur les zones à risque dans le cas de futures sécheresses sur la base de simulations avec différents degrés de sévérité de sécheresse et en se fondant sur les simulations disponibles du climat sur une trentaine d'années (à gestion forestière constante dans un premier temps).

L'analyse pourra porter dans un premier temps sur une espèce de ravageur par guildes (soit 4 espèces) dans la mesure où les données de dégâts sont suffisamment nombreuses et précises.

4. Travaux génériques ayant un intérêt pour la connaissance de l'impact des sécheresses

Développement de modèles économiques génériques

En France et en matière économique, les modèles font cruellement défaut de manière générale. Il ne s'agit pas seulement d'appliquer à la sécheresse ou même au risque de manière générale des modèles existants pour répondre aux principales questions qui se posent en matière de prévention ou de gestion des crises. Il faut en fait, de manière plus générale, que des outils génériques soient établis qui puissent, dans un second temps, être appliqués aux problèmes spécifiquement posés par les risques et notamment par ceux dus à la sécheresse.

Les modèles nécessaires sont de quatre ordres :

- modèles comptables : un intérêt primordial de la comptabilité est de fournir un cadre à l'intérieur duquel peuvent être structurées les informations économiques ou autres dont on dispose ; une expérience française a été développée dans ce domaine et demanderait encore à être mise en œuvre de manière opérationnelle ; l'intérêt vis-à-vis de l'analyse des risques serait alors de pouvoir s'appuyer sur une référence à partir de laquelle des évaluations de pertes pourraient être faites dans divers domaines : valeur des bois et autres produits, protection des eaux, de l'air et des sols, biodiversité, récréation ;
- modèles de secteur forestier : par rapport aux modèles comptables, les modèles de secteur forestier présentent l'intérêt d'être dynamiques et d'autoriser des simulations de manière à répondre à des questions du type : que se passe-t-il si... ? Dans le cas des risques, ils permettent particulièrement de décrire les effets induits par les dommages en forêt sur les activités des industries du bois et, au contraire, l'effet des perturbations dans l'industrie du bois sur la gestion de la crise en forêt ;
- modèles d'équilibre général : ils ajoutent la possibilité de traduire les répercussions en chaîne d'un événement non seulement à l'intérieur de la filière-bois mais encore dans l'ensemble de l'économie, en s'appuyant par exemple sur les grands secteurs liés à la forêt et au bois : industrie en général (emballage), les services (papier), bâtiment génie civil (charpentes, menuiseries, coffrages), ménages (ameublement, objets divers, bois de feu, loisirs), secteur énergétique... ;
- modèles d'aide à la décision, plus particulièrement à la décision sylvicole (simulation ou optimisation) en présence de risque et d'incertitude.

Les trois premiers types de modèle permettraient notamment d'améliorer significativement la mesure des phénomènes et l'évaluation des décisions prises pour les contrer. La quatrième a pour objectif de mieux préparer les peuplements forestiers aux crises futures, à la fois en diminuant les dommages et en atténuant les conséquences.

Développement d'un système d'information permettant un meilleur accès aux données forestières

Divers réseaux forestiers, certains dédiés à la surveillance sanitaire, les autres ayant des vocations diverses, enregistrent les conséquences immédiates et différées de l'été 2003.

Parfois, des mesures supplémentaires ont été réalisées. Le potentiel de l'ensemble est incomparablement supérieur à celui des années 1970 (et particulièrement 1976). Certes, l'information est de pertinence variable selon les sources mais encore faut-il pouvoir jauger la nature des informations pour évaluer la situation. La description des effets de la sécheresse n'étant pas, à l'évidence et pour de bonnes raisons, prioritaire pour tous les gestionnaires de réseaux, et les modalités d'accès à cette information (pour une expertise par exemple) restant très inégales, le rendement d'une « enquête » auprès des gestionnaires de réseaux (telle que celle réalisée dans le cadre de l'expertise) n'est pas optimal. Une mise à disposition d'informations descriptives précises de ce qui est disponible et, mieux, de tout ou partie des données, assurerait une fluidité accrue de l'information, permettrait ainsi d'élargir le cercle d'experts qui pourraient en tirer un meilleur parti, d'augmenter la valorisation des sources et de faire avancer la connaissance. Pour ce faire, une évolution de la gestion des données et une politique plus libérale de mise à disposition des données seront nécessaires.

Il y a donc nécessité à engager un travail de fond sur la production, l'organisation et la mise à disposition des données. Ce travail permettrait de contribuer à une diversité de questions potentielles (notamment sur les conséquences des aléas) et répondrait au souhait de nombre d'acteurs de ce domaine de voir mieux se structurer le domaine en évolution du suivi des écosystèmes. Cet effort s'inscrit dans l'ambition, plus large, de structuration de l'information environnementale, notamment dans le cadre du système d'information sur la nature et les paysages (SINP) porté par le MEDD. Il serait une contribution à la mise en pratique des engagements de transparence de l'information environnementale. Il bénéficie aujourd'hui des récents progrès dans le domaine technique (outils informatiques) des systèmes d'information.

Le recensement des sources de données sur la forêt est la première étape de ce travail ; c'est le sens du projet de *Catalogue des Sources d'Information sur la Forêt (Ca-SIF)*, initié par ECOFOR en 2006, qui recensera, décrira et rendra visible les sources d'informations sur la forêt au sens large, (écosystèmes, gestion forestière, économie forestière) pour la métropole et les collectivités françaises d'outre-mer. Ce travail reposera sur participation de la communauté technique et scientifique rassemblant producteurs et utilisateurs de données autour de l'information forestière.