

# Dossier



## Expertise sécheresse et canicule 2003

La sécheresse et la canicule exceptionnelles qui ont sévi en 2003 sur l'essentiel du territoire métropolitain ainsi qu'en Europe occidentale et centrale ont suscité bien des interrogations dans la communauté forestière et chez les décideurs. Elles ont fait naître le besoin d'une évaluation poussée, qui a pris la forme d'une expertise collective, scientifique et technique, conjointe avec l'Allemagne et coordonnée par le GIP ECOFOR, pour répondre à trois questions : que sait-on actuellement ? quelles conséquences peut-on en tirer en matière de gestion ? quelles questions mériteraient d'être prises en charge par la recherche ? Faisant suite à la restitution orale qui a eu lieu à Paris en décembre 2005, ce dossier, coordonné par Guy Landmann et Sandrine Landeau, constitue la première synthèse dédiée à un lectorat de gestionnaires forestiers des résultats de l'expertise. Les contributions proposées portent sur les aspects climatiques, les symptômes visibles depuis l'été 2003, les problèmes sanitaires, les conséquences pour la gestion forestière, l'impact sur la biodiversité forestière et une synthèse finale.

- p. 14 Caractéristiques climatiques de l'été 2003 par Martine Rebetez et al.
- p. 19 Surveillance et évaluation des effets de la sécheresse et de la canicule sur le court, moyen et long terme : les outils disponibles par Sandrine Landeau et Damien Maurice
- p. 24 Conséquences visibles de l'été 2003 sur les forêts : des réactions immédiates contrastées, des incertitudes sur les conséquences à long terme par Valérie Belrose, Hubert Pauly et Fabien Caroulle
- p. 28 Les risques sanitaires consécutifs à la canicule de 2003 à la lumière de la littérature par Dominique Piou et al.
- p. 35 Que peut faire le gestionnaire forestier face au risque de sécheresse ? par Myriam Legay, Christian Ginisty et Nathalie Bréda
- p. 41 Sécheresse et biodiversité forestière : un sujet à défricher par Frédéric Archaux
- p. 46 Sécheresse et canicule : premier bilan des connaissances sur les conséquences de l'été 2003 pour les forêts françaises par Guy Landmann et Sandrine Landeau

# Caractéristiques climatiques de l'été 2003

*Cet article vise à décrire dans toutes ses composantes un épisode météorologique exceptionnel, et à le situer autant que faire se peut par rapport au contexte des changements climatiques globaux, de façon à apporter un éclairage pertinent sur les analyses de ses conséquences. Il montre combien températures et sécheresse furent extrêmes en Europe durant l'été 2003, particulièrement en juin et en août.*

**D**es températures généralement supérieures à la norme ont régné sur une grande partie de l'Europe centrale et occidentale de mai à septembre 2003. Une grande partie du continent a connu, durant ces deux mois, des températures moyennes mensuelles supérieures aux moyennes à long terme de plus de 4 °C, et dans certaines régions de plus de 7 °C. Le déficit des précipitations fut particulièrement prononcé durant l'été 2003, lié à un ensoleillement élevé et une humidité très basse. La sécheresse qui a touché la végétation durant l'été 2003 a été renforcée par la durée prolongée du déficit de précipitations et d'humidité, par les températures extrêmement élevées ainsi que par la durée prolongée de conditions présentant des valeurs élevées d'ensoleillement.

## Des températures extrêmes en Europe

Les cartes élaborées par MétéoFrance (figure 1) montrent combien les températures furent anormales en Europe durant l'été 2003. Les valeurs en fin de nuit (températures minimales) et de l'après-midi (températures maximales) furent

nettement supérieures à la norme. Sur une large partie de l'Europe, elles ont dépassé de plus de 4 °C les températures de la moyenne des années 1961-1990. Les mois de juin et d'août furent les plus extrêmes. Juillet s'est montré nettement plus chaud que la moyenne, mais dans des proportions comparativement moindres, à l'exception du Nord de l'Europe, en Suède, Finlande et Norvège. Le mois de mai, lui, fut particulièrement chaud au Sud-Est de l'Europe, de l'Italie à la Bulgarie. De mai à août, les températures minimales et maximales furent supérieures à la normale du Portugal à la Hongrie, de la Grande-Bretagne à la Grèce et du Danemark à la Sicile. Seul septembre fut plus contrasté, avec des valeurs relativement basses au Sud.

Les cartes des températures maximales montrent de fortes similarités dans la répartition des anomalies des mois de juin et d'août. Ces deux mois ont apporté des températures extrêmement élevées sur approximativement la même partie du continent. On voit que l'Est et le centre de la France, le Sud de l'Allemagne ainsi que la Suisse ont été particulièrement touchés.

## Des précipitations déficitaires sur plus d'une année

Les précipitations furent particulièrement faibles en juin et en août, mais aussi sur l'ensemble de la période de mai à août. Sur de vastes régions, les précipitations étaient déjà inférieures à la normale depuis le début de l'année 2003 et elles le sont restées jusqu'en été 2004. L'exemple des mesures effectuées à Fribourg-en-Brigau, au Sud de l'Allemagne, montre (figure 2) que chaque mois, de février 2003 à juin 2004, les précipitations ont été inférieures à la moyenne, à l'exception d'octobre 2003 et janvier 2004.

## Toute l'année, un air très sec

L'humidité relative aussi est restée nettement inférieure à la normale. L'analyse montre qu'en certains endroits, plus de 60 jours sur les trois mois de l'été se sont avérés avoir une humidité relative inférieure au percentile 10<sup>e</sup> des années précédentes ; cela signifie qu'en été 2003, ils n'ont connu pendant plus de deux mois qu'une humidité inférieure ou équivalente à celle des 9 jours les plus secs d'un été normal. Sur de vastes secteurs européens, ces conditions de

1 Le percentile 10 est le seuil dépassé par 90 % des valeurs enregistrées sur la période de référence

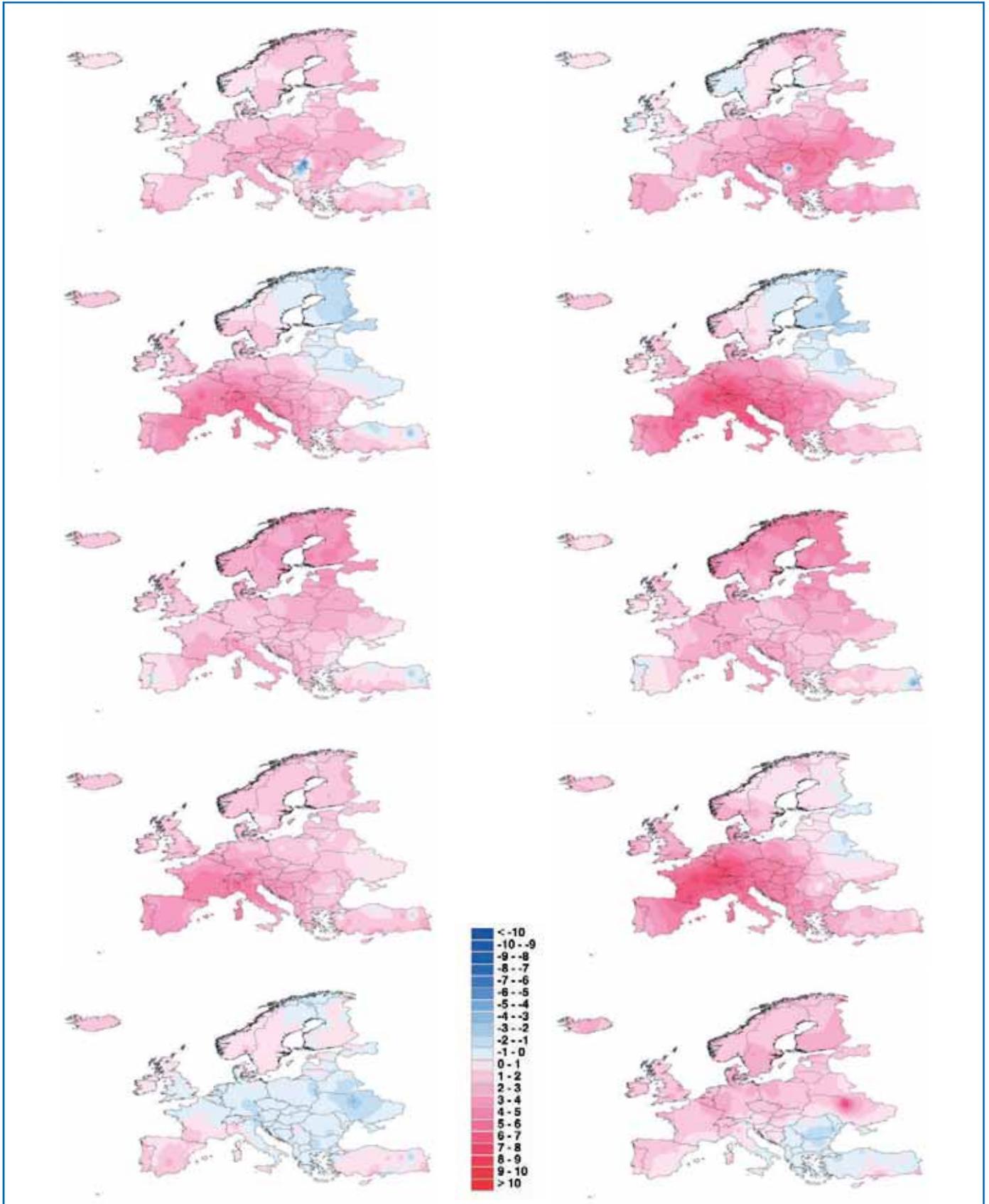


Fig. 1 : anomalies de température mensuelle (en degrés C) en Europe de mai (haut) à septembre (bas) 2003. Températures minimales sur la colonne de gauche et températures maximales sur la colonne de droite. Les anomalies, exprimées en °C, correspondent aux écarts à la normale 1961-1990.

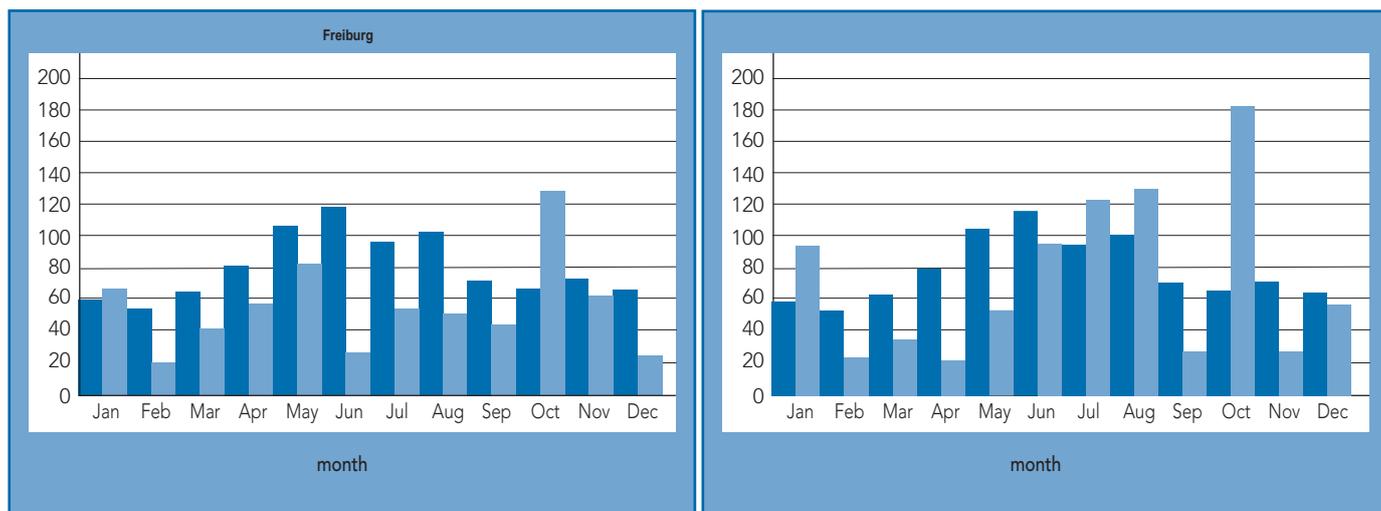


Fig. 2 : totaux mensuels de précipitations (en mm) à Fribourg-en-Brisgau (Allemagne), 269 m d'altitude  
 Comparaison entre les valeurs de 2003 (à gauche) et 2004 (à droite)  
 et celles de la période de référence 1961-1990 (en bleu foncé)

faible humidité ont duré plus de 40 jours. Là encore, le phénomène ne s'est pas restreint à l'été mais s'est étendu à l'ensemble de l'année 2003.

### Un surcroît d'ensoleillement exceptionnel

La carte élaborée par MétéoFrance (figure 3) montre que l'ensoleillement fut nettement supérieur à la moyenne en été 2003. Ce fut particulièrement le cas sur l'Est de la France, le Sud de l'Allemagne et la Suisse.

Par ailleurs, l'analyse de l'ensoleillement potentiel (paramètre prenant en compte la durée du jour, le relief, la latitude, etc., où 100 % de l'ensoleillement potentiel signifie absence totale de nuages) effectuée pour deux stations suisses, Neuchâtel, en plaine, à 487 m d'altitude, et au Säntis, en montagne, à 2 500 m, montre (figure 4) que les valeurs furent supérieures à la normale durant l'ensemble de l'année 2003, et pas seulement l'été. En montagne, l'ensoleillement des mois de février et mars était déjà très nettement supérieur à la norme. Le mois de février, par exemple, a présenté 72,2 % d'ensoleillement contre 41 % en moyenne durant le 20<sup>e</sup> siècle. En plaine, l'ensoleillement fut maximal en août, avec 71 %, mais mars fut le mois

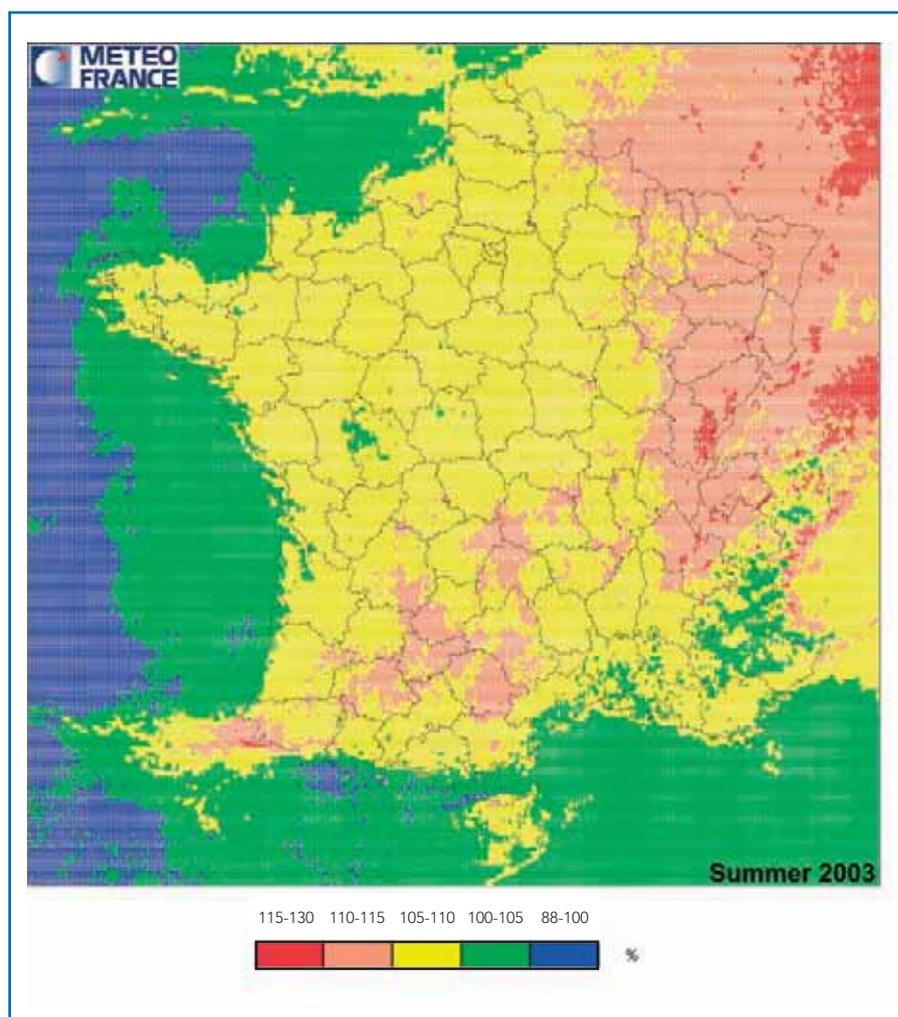


Fig. 3 : carte de l'ensoleillement de l'été 2003 (juin à août), exprimé en % de l'ensoleillement estival observé sur la période de référence 1996-2002 (données Meteosat)

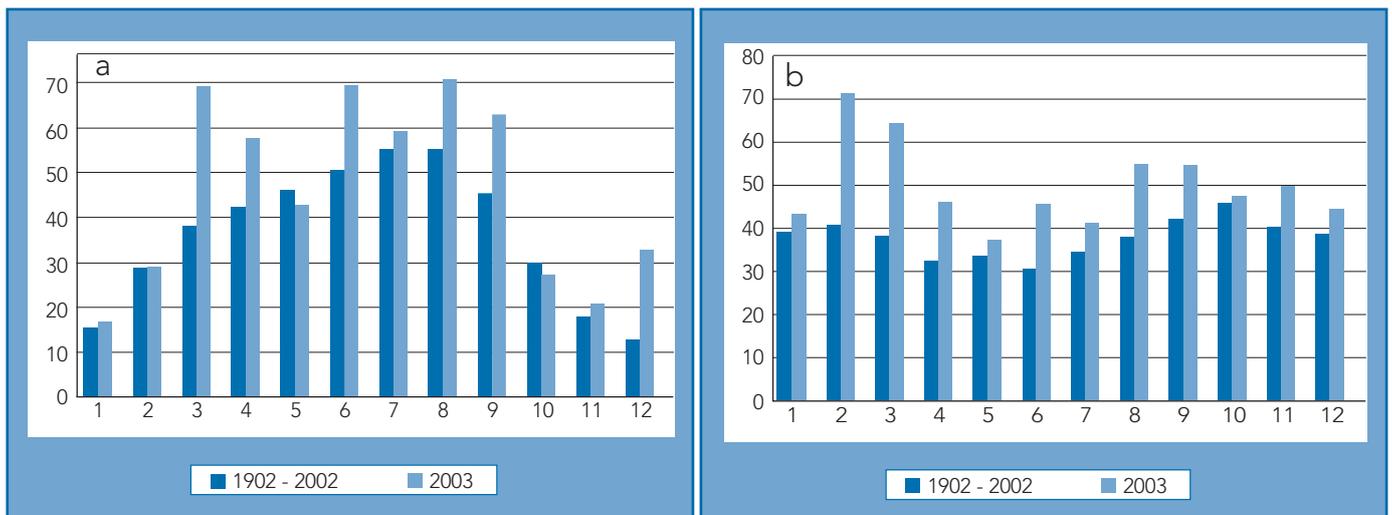


Fig. 4 : ensoleillement mensuel en 2003 comparé à la période de référence 1901-2002  
(a) Neuchâtel (Suisse, 487 m) et (b) Säntis (Suisse, 2 500 m)

le plus anormal, avec 68 % au lieu de 38 % d'ensoleillement potentiel.

### Un événement exceptionnel, même dans un contexte de réchauffement général

Les conditions météorologiques de l'été 2003 furent clairement exceptionnelles. La région la plus touchée comprend l'Est de la France, le Sud de l'Allemagne et la Suisse. L'ensemble de l'été fut extrêmement ensoleillé, sec et chaud. Sur le centre et l'ouest de l'Europe, ces conditions se sont prolongées au-delà de l'été, à l'ensemble de l'année 2003, et même jusqu'au début de l'été 2004. Les températures maximales de juin et d'août furent particulièrement supérieures à la norme. Ceci est d'autant plus remarquable que jusqu'ici, le changement climatique s'était manifesté davantage par des températures minimales supérieures à la norme.

L'analyse des températures depuis le début du 20<sup>e</sup> siècle montre que l'augmentation du nombre de jours chauds en été est manifeste (figure 5 page suivante), mais que les conditions de l'été 2003 furent tout de même exceptionnelles, même dans un contexte de réchauffement général. En moyenne pour l'ensemble du globe, les dix

années les plus chaudes jamais mesurées le furent toutes après 1990. On s'attend à la poursuite de cette augmentation générale des températures avec pour corollaire, l'augmentation du nombre de jours estivaux chauds et secs en Europe. La question de l'augmentation ou non de la variabilité des températures estivales en lien avec le réchauffement général des températures est ouverte.

On estime qu'actuellement, les émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine ont au moins doublé le risque de voir un été aussi chaud que celui de 2003. Il est hautement probable que des conditions anticycloniques persistantes équivalentes à celles de 2003 n'auraient pas entraîné des températures aussi élevées sans le changement global des températures que nous observons depuis un peu plus d'un siècle. Les conditions qui ont régné en Europe en été 2003 peuvent donc être considérées comme la résultante d'une combinaison entre le réchauffement global des températures et des conditions de répartition des pressions exceptionnelles sur l'Europe et l'Atlantique.

Les conséquences de la sécheresse ont pu être d'autant plus importantes que celle-ci ne s'est pas limitée à une brève période de l'année mais au contraire étendue à une période beaucoup plus

longue. En outre, la sécheresse due au manque de précipitations a été renforcée par les températures et l'ensoleillement exceptionnellement élevés de l'été 2003, concourant à une humidité relative particulièrement faible.

**Martine Rebetez,**

WSL Swiss Federal Research Institute,  
Lausanne, Switzerland

**Helmut Mayer,  
Dirk Schindler,**

Meteorological Institute, University of  
Freiburg, Germany

**Olivier Dupont,**

MeteoFrance, Illkirch-Graffenstaden,  
France

**Karl Gartner,**

Federal Research and Training Centre  
for Forests, Natural Hazards and  
Landscape, Vienna, Austria

**Jürgen Kropp,**

Potsdam Institute for Climate Impact  
Research, Potsdam, Germany

**Anette Menzel**

Chair for Ecoclimatology, Technical  
University of Munich, Freising,  
Germany

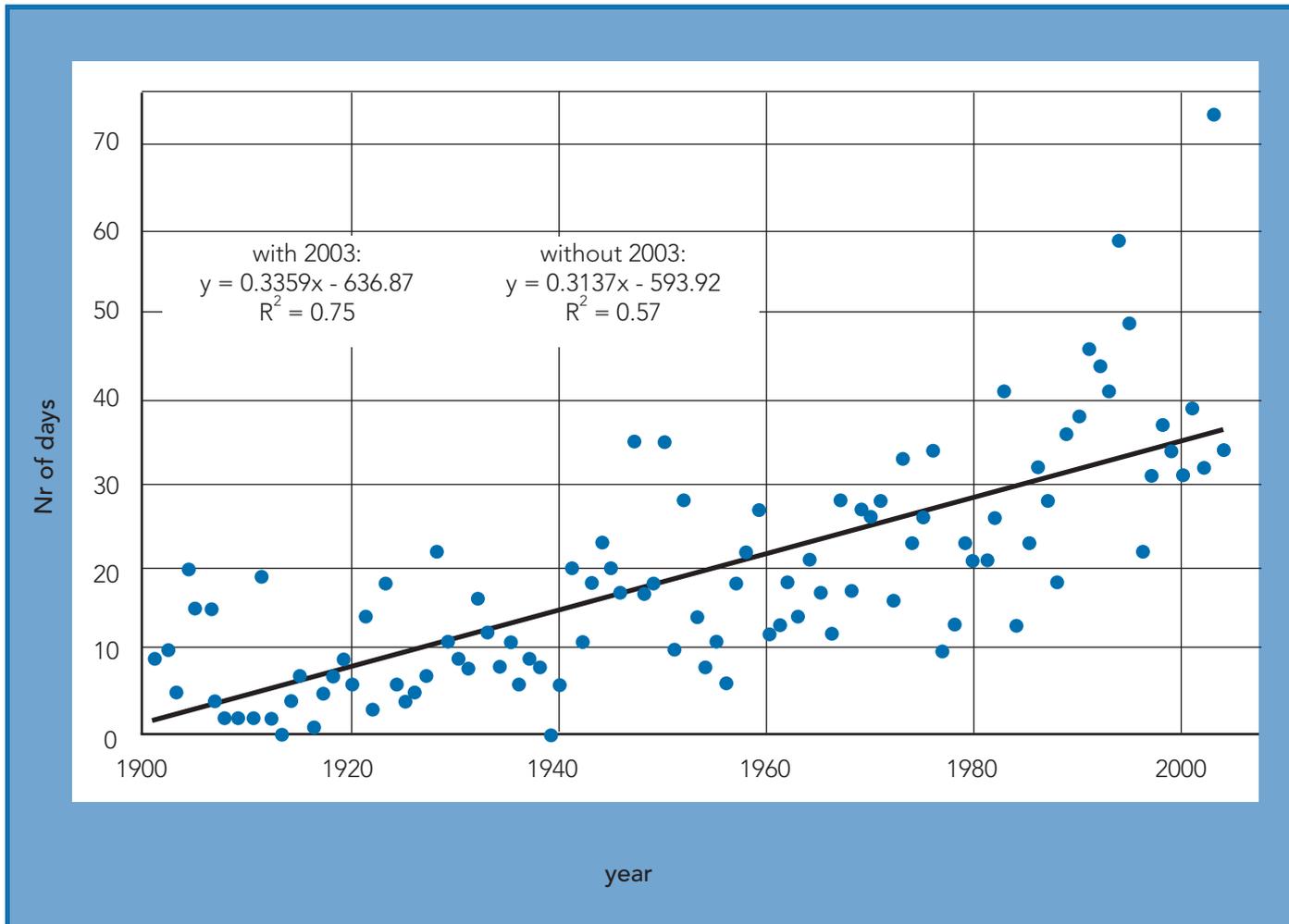


Fig. 5 : nombre de jours chauds, définis comme affichant une température minimale supérieure au percentile 80<sup>e</sup> de la période 1901-2002 durant l'été, pour chaque année de 1901 à 2003 à Neuchâtel, Suisse

## Bibliographie

Les figures sont tirées de deux articles originaux parus dans les revues « Annals of Forest Sciences » et « Climate Research » :

REBETEZ M., 2004. Summer 2003 maximum and minimum daily temperatures over a 3 300 m altitudinal range in the Alps, Climate Research 27 : 45-50.

REBETEZ M., MAYER H., DUPONT O., SCHINDLER D., GARTNER K., KROPP J., MENZEL A., 2005. Heat and drought 2003 in Europe : a climate synthesis. Annals of Forest Sciences, submitted.

2 Le percentile 80 est le seuil qui n'est dépassé que par 20 % des valeurs enregistrées sur la période de référence

# Surveillance et évaluation des effets de la sécheresse et de la canicule sur le court, moyen et long terme : les outils disponibles

## Mieux utiliser les dispositifs de terrain grâce aux possibilités offertes par les systèmes d'information

Face à un aléa climatique comme celui de l'été 2003, on aimerait tirer parti du vivier d'informations représenté par les nombreux dispositifs de suivi et d'observation installés en forêt. Pourtant la démarche n'est pas si simple : comment repérer les plus pertinents dans un cas particulier ? comment en recueillir et en synthétiser les informations ?

Les sites, réseaux, bases de données, observatoires etc. constituent une richesse à structurer : individuellement ils apportent déjà beaucoup, mais leur ensemble pourrait, moyennant quelques évolutions, représenter bien plus que la simple somme des parties.

**D**ès l'été 2003 et immédiatement après, chercheurs et gestionnaires ont cherché comment évaluer à court terme les impacts de la sécheresse et de la canicule, exceptionnelles cette année-là, et comment en anticiper les conséquences à plus long terme.

Pour cela une des pistes suivies a été de chercher à mobiliser les dispositifs d'observation et de suivi des écosystèmes, au-delà des grands réseaux dédiés à la santé des forêts que sont Renécofor ou le réseau européen. Leur richesse, bien qu'imparfaitement évaluée, laissait en effet espérer des possibilités intéressantes. L'idée était, dans le cadre de l'expertise scientifique et technique pilotée par Ecofor, d'évaluer dans quelles conditions mobiliser cet ensemble encore mal connu et comment toutes ces ressources pouvaient, séparément et surtout ensemble,

contribuer à suivre et à comprendre les impacts de la sécheresse.

### Une richesse : des dispositifs nombreux

L'observation et le suivi à plus ou moins long terme des forêts sont des activités généralement peu visibles, mais essentielles à la compréhension du fonctionnement des écosystèmes forestiers. Les sites et réseaux, qui assurent cette veille sont aujourd'hui très divers. Un premier aperçu de cette diversité peut être donné par le cd-rom *Les chemins de l'information forestière* (C. Fort et J.C. Bergonzini, Ecofor, 2001) : voir le tableau. Sans être exhaustif ni actualisé, il donne déjà une idée du potentiel dont nous disposons : près de 70 dispositifs (sites, réseaux d'essais, bases de données, observatoires régionaux...) y sont répertoriés, de forme, d'objet d'étude et d'objectifs variés :

■ certains ont un **objectif d'abord statistique** et cherchent à donner des éléments de réponse à des questions comme « quelles sont les ressources disponibles ? qui les possède ? comment sont-elles gérées ? quels sont les acteurs qui interviennent en forêt ? comment sont organisées les filières socio-économiques ? ». Ils organisent l'information sur la forêt et ses acteurs. Exemples : *Inventaire forestier national*, *Service central des études et enquêtes statistiques*, *base de données EcoPlant*, *base de données « factuelle » de l'ONF*, *base de données CORINE LAND COVER* ;

■ d'autres s'intéressent prioritairement à la **santé des forêts** : il s'agit de suivre la santé et la vitalité des forêts afin de poser un diagnostic pertinent et de mettre en œuvre le cas échéant des mesures adaptées. Exemples : *réseau européen de suivi des dommages forestiers*, *réseau de correspon-*

Extraits du sommaire des Chemins de l'information forestière (CD-rom, C. Fort et J.-C. Bergonzini, ECOFOR, 2001, actualisation partielle en février 2005)

Objectif	Approche	Exemples
Statistiques forestières	Statistiques forestières au sens strict	Inventaire forestier national (IFN), Service central des études et enquêtes statistiques (SCESS)
	Bases de données floristiques et phytosociologiques	BASECO, SOPHY, EcoPlant
	Bases de données forestières	Bases de données factuelles de l'ONF, base de données « matériel de base forestier », Prométhée, SIG Aquitaine
	Bases de données sol et aménagement du territoire	Basse de données cantonales « analyse de terre », CORINE LAND COVER, DONESOL, base de données géographiques au 1/100000e.
Santé des forêts	Suivi phytosanitaire	Réseau européen de suivi des dommages forestiers, réseau de surveillance phytosanitaire des forêts françaises, réseau de surveillance des principaux ravageurs forestiers, suivi de l'état sanitaire des forêts de pin maritime en Aquitaine, observatoire de la Harth
	Dépôts atmosphériques	Réseau DEMENT, réseau « mousses – métaux »
Risques	Avalanches	Enquête permanente sur les avalanches
	Tempête	Observatoire des dynamiques naturelles après tempête, observatoire des peuplements mités après tempête
	Sécheresse	Limite pin d'Alep – pin sylvestre, réseau pin d'Alep – bilan hydrique
	Incendies	Réseau vert, réseau « coupures de combustibles », réseau des équipes de brûlage dirigé, réseau de surveillance, d'alerte et de détection des incendies de forêts en région méditerranéenne, réseau de prévention et de prévision des incendies de forêts dans les Landes de gascogne, enquête « recherche des causes des incendies en forêt, enquête annuelle « feux de forêts » hors zone méditerranéenne, suivi de l'impact de la répétition des incendies sur la biodiversité des sols
Gestion et fonctionnement des écosystèmes (développement)	Croissance et gestion des peuplements forestiers	Coopérative de données sur la croissance des peuplements forestiers, réseau AFI – ENGREF, réseaux et sites expérimentaux « croissance et dynamique des peuplements forestiers du Cemagref, réseau de sites « croissance et production » de l'INRA
	Fonctionnement	Réseau des hêtraies du nord-est, Renecofof, réseau des sites-ateliers landais, F-ORE-T, site-atelier d'Ychoux, OFORA (Observatoire des forêts d'Aquitaine)
	Amélioration génétique	Réseaux expérimentaux d'évaluation des variétés forestières améliorées, réseau expérimental du programme « génome, diversité et sélection » de l'INRA
	Sylvopastoralisme et bassins versants	Réseaux et essais sylvopastoraux, site-atelier « bassins versants vosgiens acides, bassin versant du Strangbach (observatoire hydro-géo-chimique de l'environnement)
Gestion et fonctionnement des écosystèmes (recherche)	Réseaux d'essais de l'AFOCEL	Pin maritime, peuplier, Douglas, épicéa, eucalyptus principalement, avec deux bases de données : génétique et modélisation de la croissance
	Réseaux des dispositifs d'expérimentation et de démonstration des CRPF	Peuplements signalés, placettes de référence, placettes de démonstration et placettes d'expérimentation concernant principalement : alisiers, aulnes, bouleau, cèdres, charme, châtaignier, chêne, cormier, Douglas, épicéa, érables, frêne, hêtre, mélèze, merisier, noyers, peupliers, pins, sapins, tilleuls...
	Réseaux du pôle expérimentation Forêt Privée Française	Réseau « expérimentations peuplier », réseau « expérimentations dépressage et éclaircies résineux »
	Réseaux des sites expérimentaux de l'ONF	Divers réseaux portant sur le choix du matériel végétal, l'installation du peuplement, sa conduite, sa protection et son exploitation.
Surveillance et conservation du milieu naturel	Connaissance et surveillance du patrimoine naturel	ZNIEFF, ZICO, réseaux de correspondants pour le suivi de la faune sauvage, réseau SAGIR, réseau hydrobiologique et piscicole
	Conservation et restauration des espèces animales et végétales les plus menacées	Réseau des conservatoires botaniques nationaux
	Constitution d'un réseau international d'espaces protégés, représentatif de la biodiversité	Réseau des réserves biologiques dirigées et intégrales, réseau des réserves naturelles françaises, sites ateliers du programme Monitor, réseau Natura2000
	Gestion et conservation des ressources génétiques	Réseau mondial des réserves de biosphère, réseau national de gestion et de conservation des ressources génétiques des principales essences forestières, réseau des arboretums

dants — observateurs du Département de la santé des forêts, observatoire de la forêt de La Harth, le réseau « mousse — métaux » ;

■ d'autres privilégient une approche **risques et aléas** : il s'agit de suivre la fréquence et les conséquences de certains aléas auxquels sont soumises les forêts françaises (avalanches, tempêtes, incendies, sécheresses). Exemples : enquête permanente sur les avalanches, réseau de surveillance, d'alerte et de détection des incendies de forêt en région méditerranéenne, observatoire des dynamiques naturelles après tempêtes, réseau pin d'Alep — bilan hydrique ;

■ certains sont plus particulièrement orientés vers **la gestion et le fonctionnement des écosystèmes forestiers**, avec une approche recherche ou développement selon les cas. Ils visent plusieurs grands types d'objectifs : comprendre le fonctionnement des écosystèmes forestiers, analyser les interactions entre la forêt et son environnement, appréhender l'évolution future des écosystèmes forestiers. Exemples : GIS coopérative de données sur la croissance des peuplements forestiers, observatoire de recherche en environnement F-ORE-T, réseaux du pôle « expérimentation » Forêt Privée Française ;

■ d'autres enfin concernent en premier lieu **la surveillance et la conservation du patrimoine naturel** : ils participent à la politique de protection, de gestion ou de restauration des éléments remarquables du patrimoine naturel. Exemples : réseau de correspondants pour le suivi patrimonial de la faune sauvage, réseau Natura 2000, réseau national de gestion et de conservation des ressources génétiques des principales essences forestières.

Tous ces dispositifs qui suivent, observent, évaluent, analysent différents éléments des écosystèmes forestiers à des échelles de temps et d'espace variables stockent des informations nombreuses, sous des formes variées. Comment toutes ces données et observations peuvent-elles contribuer à évaluer un impact immédiat ou différé d'un événement



Jérôme Ngao

marqué comme la sécheresse et la canicule de l'été 2003 ?

### Quelques exemples des possibilités offertes par ces dispositifs

À l'évidence, certains dispositifs vont contribuer à l'évaluation des impacts de cet épisode climatique et, dans le même temps, à une meilleure compréhension du fonctionnement des écosystèmes forestiers. Leurs gestionnaires ont en effet soit mis en place des mesures ou observations spécifiques (c'est le cas par exemple de certains sites-ateliers de recherche, mais aussi de l'IFN), soit observé et parfois quantifié l'impact de l'été 2003 à partir des données relevées en routine (par exemple dans les réseaux d'essais clonaux de l'Afocel ou de l'Inra). Ces résultats sont utiles de différentes façons : ils peuvent servir directement à évaluer statistiquement les impacts de la sécheresse et de la canicule (réseau européen de suivi des dommages forestiers), permettre des généralisations à partir de résultats de placettes (réseau d'essais Inra ou Afocel) ou bien venir appuyer des résultats de modélisation (essais de chaulage dans la Vôge).

On peut citer ici à titre d'exemples<sup>1</sup> :

■ sur le réseau européen de suivi des dommages forestiers, le nombre d'arbres dont la mort a été constatée lors de la campagne estivale de notation est en nette augmentation en 2004 et dépasse les taux enregistrés depuis la création du réseau en 1989 (si l'on excepte les mortalités dues aux tempêtes). Les essences les plus concernées en 2004 sont le douglas, l'épicéa, le sapin pectiné et le sapin de Vancouver. Il est cependant difficile d'estimer le taux exact de mortalités dues à la sécheresse car un nombre important d'arbres ont été exploités sans que leur état sanitaire soit connu ;

■ l'IFN a mis en place en 2004 dans les neuf départements alors en cours de levé une mesure spécifique : l'accroissement radial 2003. Les données de sept de ces neuf départements sont actuellement traitées. La tendance globale est à une perte de croissance en 2003, avec des disparités relativement fortes. Certains départements sont ainsi plus touchés que d'autres : dans l'Aisne, l'ensemble des essences accuse des pertes de croissance d'au moins 19 % par rapport aux accroissements annuels déduits des quatre années précédentes, alors que dans la Haute-Vienne les différences entre l'accroissement 2003 et l'accroissement moyen théorique ne sont pas significatives.

<sup>1</sup> Ces exemples sont issus d'un dossier technique « Sécheresse et canicule 2003 : suivi et évaluation des effets immédiats et à court terme sur les forêts (réseaux, enquêtes) en préparation, à paraître au premier semestre 2006, coordonné par S. Landeau et G. Landmann, présentant les résultats issus des dispositifs de suivi et d'observation des écosystèmes forestiers (une vingtaine de contributions).

Les essences montrent également des réactions différentes : en Haute-Vienne le hêtre, le châtaignier, le pin sylvestre, l'épicéa commun, le douglas et l'épicéa de Sitka ont subi des pertes de croissances significatives, alors que les chênes, le charme, le mélèze ou le noisetier ont au contraire un accroissement 2003 supérieur à l'accroissement moyen théorique (cette différence positive n'est toutefois significative que dans le cas du chêne pédonculé) ;

- l'Inra a analysé les mortalités de plants dans des plantations comparatives d'essences et de provenances en Languedoc-Roussillon : les essences qui semblent les plus prometteuses en termes de résistance et de potentialité d'adaptation sont le cèdre du Liban et le cormier. Les sapins méditerranéens ont au contraire été plus touchés qu'on ne pouvait s'y attendre ;
- le réseau d'essais clonaux et sylvicoles de l'Afocel pour le peuplier permettent également des analyses intéressantes à partir des mesures effectuées en routine dans ces essais : une perte de croissance de proportion variable (en moyenne 22 %), a été mise en évidence. Selon les premières analyses, les facteurs stationnels et génétiques seraient les principaux facteurs explicatifs des variations de la perte de croissance observée, l'âge ou la densité paraissant n'avoir que peu d'influence ;
- des dispositifs plus ponctuels viennent aussi apporter des éléments de réflexion intéressants. Ainsi sur des essais d'amendement calco-magnésien dans la Vôge, les hêtres sont beaucoup moins touchés par les pertes foliaires très importantes, accompagnées de microphyllie, de nécrose du limbe et de dessèchement de rameaux, observées sur plusieurs centaines d'hectares alentour. Cela semble confirmer l'importance de la nutrition dans la réaction à des stress abiotiques tels que ceux survenus en 2003.

## Une limite importante : la difficulté de repérer et de mutualiser l'information

Si ces résultats ne manquent pas d'intérêt et confirment le potentiel des

divers dispositifs de suivi et d'observation de la forêt, ils ne doivent pas masquer les difficultés qui se dressent dès que l'on veut aller au-delà qu'une simple compilation de leurs résultats.

Le premier obstacle, nous l'avons vu, c'est d'avoir une vision globale de l'existant ; cette difficulté d'accès à l'information nuit à la bonne valorisation du travail réalisé. La communauté forestière ne dispose pas encore d'un outil permettant d'identifier rapidement les différents acteurs de l'information forestière (producteurs et gestionnaires de données, utilisateurs intermédiaires — qui produisent des données à partir de celles fournies par d'autres —, utilisateurs finaux...).

Même si on passe outre cette difficulté, il reste que ces dispositifs ont, par nature, des objectifs très variés, des échelles de travail, aussi bien spatiales que temporelles, différentes et que cette richesse limite la mise en commun et les généralisations. Les divers acteurs qui les gèrent travaillent dans des instituts, des programmes, des logiques différents, ce qui freine l'émergence de projets coordonnés sur le long terme. Les données produites sont ainsi abondantes et généralement de bonne qualité, mais aussi dispersées, peu accessibles et donc sous valorisées. Dans le cas qui nous intéresse ici, celui de la sécheresse et de la canicule 2003, des informations utiles pour mieux comprendre les impacts à long terme de la sécheresse seront relevées par certains dispositifs, mais elles ne viendront pas alimenter la réflexion collective et ne seront pas valorisées car peu connues ou peu accessibles.

En outre, certains dispositifs sont menacés à plus ou moins long terme, à cause d'un manque de financements ou au moins d'un manque de financements pérennes. Il est vrai que certains éléments de ce riche patrimoine expérimental commun sont devenus moins utiles du point de vue des institutions qui les ont créés. D'autres, souvent lourds et coûteux, doivent être rationalisés. Ces évolutions nécessaires ne

doivent pas amener, par méconnaissance des potentialités de ce patrimoine, à entraver notre capacité à répondre à de nouvelles questions, à de nouveaux défis.

## Un intérêt considérable pour la communauté forestière

Au-delà de l'épisode de la sécheresse et de la canicule 2003, les dispositifs de suivi et d'observation des écosystèmes forestiers doivent en effet alimenter les réflexions et les travaux non seulement des scientifiques mais aussi des gestionnaires.

Dans un environnement (écologique et socio-économique) de plus en plus incertain, le gestionnaire forestier a en effet besoin pour agir au mieux de s'appuyer sur :

- une bonne compréhension du fonctionnement des écosystèmes qui lui sont confiés et des évolutions possibles ;
- une bonne connaissance du contexte socio-économique ;
- des outils qui lui permettent de suivre et d'évaluer les effets de ses décisions.

Le suivi et l'observation des écosystèmes fournissent des données qui peuvent aider à identifier et quantifier les changements environnementaux, à prévoir et scénariser les évolutions grâce à la modélisation. La richesse des dispositifs existants permet d'envisager qu'ils puissent apporter des éléments à différentes échelles spatiales et temporelles, alimentant les réflexions à différents niveaux de gestion ou de recherche. La durée de vie de beaucoup d'entre eux (au moins une décennie) rend possibles des suivis à moyen et à long terme. Tout cela nécessite de synthétiser les données et observations des différentes sources pour les mettre au service de l'action.

Ils peuvent également servir d'appui au suivi et à l'évaluation des effets des décisions prises, et de système d'alerte en détectant précocement des évolutions, positives ou négatives.

## Des pistes pour progresser

Pour que les dispositifs de suivi et d'observation de la forêt puissent jouer un tel rôle, il reste cependant un important chemin à faire, dont on peut tracer ici les grandes étapes en deux axes indissociables :

### Axe 1 : le travail sur l'information

■ La première étape consiste à mieux connaître ce dont nous pouvons disposer : quels sont les dispositifs qui existent, les sources d'informations sur la forêt ? quelles sont les données relevées et leur accessibilité ? comment rendre les acteurs intéressés conscients de ce potentiel ? Ces thèmes préoccupent Ecofor depuis plusieurs années et un des éléments de réponse que nous pouvons apporter est la production et la mise à disposition sur le web d'un catalogue des sources d'information sur la forêt, projet qui devrait voir le jour en 2006, et s'insérer à terme dans le système d'information sur la nature et les paysages piloté par le Ministère de l'écologie et du développement durable.

■ La deuxième étape est une plus grande mutualisation et, à terme, une meilleure circulation des informations : comment recueillir et synthétiser des données issues de plusieurs dispositifs pour alimenter une réflexion à plus grande échelle ? comment mettre en commun des informations qui touchent un même thème en l'abordant sous des angles différents ? Le catalogue des sources d'information sur la forêt sera un point de départ pour réfléchir à des éléments de réponse. L'intérêt des démarches de mutualisation est incontestable – le succès du Système d'Information régionale Partagée ([www.sinpa.ifn.fr](http://www.sinpa.ifn.fr)), qui rend service à tous les partenaires investis, en est un exemple.

### Axe 2 : les liens à tisser entre recherche, suivi et gestion

■ Le développement du lien entre les activités de « monitoring » (suivi continu) et de recherche doit permettre de mieux comprendre le fonctionnement des écosystèmes et les évolutions possibles : les dispositifs de suivi peuvent

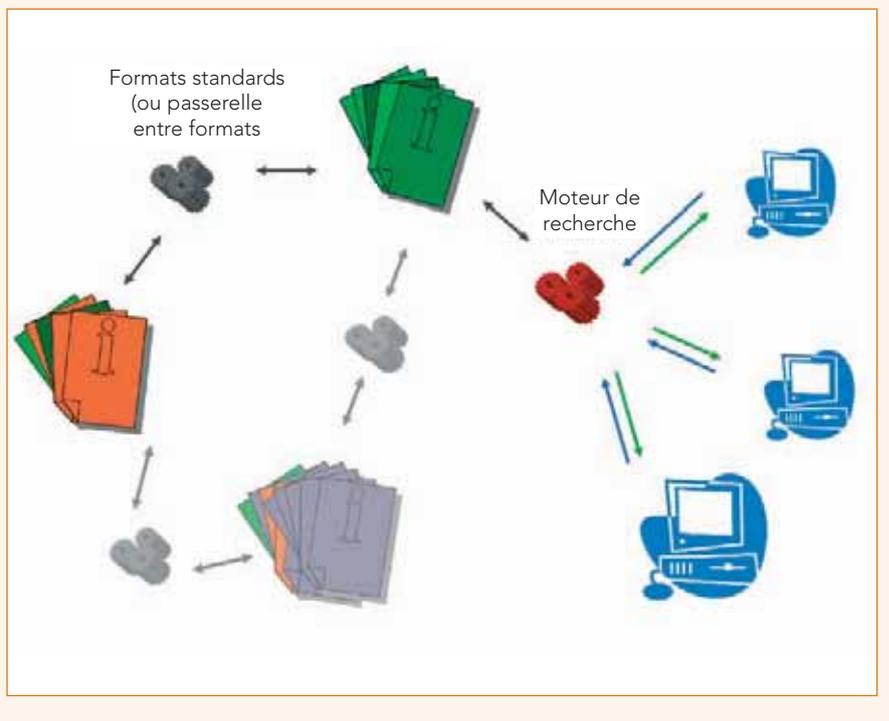
### Un système d'information, qu'est ce que c'est ?

De manière générale, un tel système est constitué par l'ensemble des moyens qui permettent de collecter, mémoriser, traiter, distribuer et utiliser les informations dont l'établissement a besoin dans le domaine d'activité considéré (définition proposée par René Pelfresne, site Web de la Direction des Systèmes d'Information du CNRS).

La facilité de l'accès à l'Internet et le progrès des technologies associées orientent le développement de tels systèmes sur la base de sites web.

En aval du système, l'utilisateur peut extraire l'information via un moteur de recherche (interface Web) dédié à la nature de l'information gérée.

En amont, l'ajout d'information au système peut se faire via l'utilisation d'un formulaire de saisie en ligne et/ou du traitement automatique d'un fichier soumis au format adéquat par exemple. La standardisation et la normalisation, d'une part des langages et services autour du Web et d'autre part de l'information (métadonnées, information géographique,...) permettent aux systèmes d'évoluer vers l'interopérabilité, rendant ainsi possible l'échange et le partage d'informations.



par exemple permettre de tester des modèles de fonctionnement élaborés sur les dispositifs de recherche ;

■ Le développement du lien entre cet ensemble « suivi – recherche » et la gestion, pour la construction commune d'une gestion plus adaptative : le suivi de l'état de la forêt, couplé à un suivi des activités en forêts devrait servir de base à l'aménagement forestier (à l'échelle d'une forêt, d'un massif ou d'un territoire).

Les outils techniques dans le domaine informatique ont fait des progrès considérables et permettent aujourd'hui

d'hui toutes ces évolutions, mais sans une réelle prise de conscience à tous les niveaux des enjeux et de l'intérêt d'une telle démarche, leur potentiel ne pourra bénéficier pleinement à la communauté forestière.

**Sandrine LANDEAU,**  
Ecofor c/o UMR EEF Inra Nancy  
[landeau@gip-ecofor.org](mailto:landeau@gip-ecofor.org)

**Damien MAURICE,**  
Ecofor c/o Inra,  
[damien.maurice@nancy.inra.fr](mailto:damien.maurice@nancy.inra.fr)

## Conséquences visibles de l'été 2003 sur les forêts : des réactions immédiates contrastées, des incertitudes sur les conséquences à long terme

*Il y a 20 ans, l'irruption de la thématique « pluies acides » avait pris au dépourvu les forestiers, qui n'avaient aucune référence précise sur l'état antérieur et l'évolution de la santé des forêts. Grâce à une gamme étendue d'outils de surveillance, la situation actuelle est toute différente, et les dégâts immédiats et différés, directs et indirects (par le biais d'insectes ravageurs et de pathogènes) sont bien décrits à défaut de pouvoir être parfaitement interprétés. Cet article expose les principaux résultats acquis à ce jour et propose un point rapide sur l'importance globale des dégâts et l'évolution prévisible.*

L'été 2003 a été marqué par un déficit pluviométrique important aggravé par une canicule intense et prolongée (voir article Rebetez, ce même numéro). Si l'année 2004 a connu des températures plus clémentes, les déficits pluviométriques qui ont été enregistrés ont certainement accru le déficit hydrique subi par les arbres et donc les conséquences de l'été 2003. La même remarque vaut pour l'été 2005, ce qui signifie qu'il faudra ultérieurement considérer la période de 2003-2005 comme une succession de sécheresses, bien que l'été 2003 reste la période la plus remarquable en terme de température excessive.

Nous résumons dans cet article les principales observations réalisées depuis l'été 2003 par le Département de la santé des forêts (DSF) en insistant principalement sur le comportement des différentes essences au cours du temps. Pour une information plus complète, on pourra se reporter aux publications du DSF en ligne sur le site Internet du Ministère de l'agriculture et de la pêche<sup>1</sup>. Une mise en perspective à l'échelle nationale et par rapport au moyen terme (15 ans) est esquissée dans la synthèse (Landmann et Landeau, ce même volume).



Brûlure sur feuille de chêne. Août 2003, région Centre

### Un ensemble d'outils mis en œuvre pour diagnostiquer et suivre les dégâts liés à l'été 2003

Le Département de la santé des forêts s'est doté, en plus de ses réseaux de collecte conventionnels d'information (Réseau européen de suivi des dommages forestiers, abrégé par Réseau européen dans la suite du texte, et

observations « spontanées » réalisées par les correspondants-observateurs du DSF), de moyens spécifiques permettant d'évaluer les conséquences de ces événements climatiques exceptionnels :

- une enquête nationale à dire d'expert réalisée par les correspondants-observateurs à l'automne 2003 afin de dresser un premier bilan cartographique des symptômes anormaux

<sup>1</sup> [http://www.agriculture.gouv.fr/spip/ressources.themes.foretbois.santedesforets\\_r314.html](http://www.agriculture.gouv.fr/spip/ressources.themes.foretbois.santedesforets_r314.html)

pour les principales essences ;

- des observations supplémentaires sur les arbres de 250 placettes du Réseau européen réalisées à l'automne 2003 pour quantifier l'état du feuillage ;

- un réseau complémentaire semi-permanent de 377 placettes mis en place à l'automne 2003 au sein de peuplements forestiers présentant des symptômes liés aux événements climatiques (Pauly *et al.*, 2005). La notation de l'état du feuillage des arbres en automne 2003 puis chaque été jusqu'en 2007 fournira des informations sur l'évolution d'arbres présentant des symptômes suite à l'été 2003. Toutefois il faut noter que ce réseau, constitué de placettes mises en place en fonction de la présence de critères particuliers, n'est pas représentatif de l'espace forestier métropolitain.

### Des symptômes étalés sur les années 2003 et 2004, et des relations à l'été 2003 de plus en plus incertaines à mesure qu'on s'éloigne de l'été 2003

À la fin de l'automne 2003, les observations supplémentaires sur les arbres du Réseau européen ont montré que :

- l'incidence visuelle de la canicule était plus forte sur feuillus que sur résineux : les dessèchements, altérations de couleur et chute de feuilles ont parfois touché des houppiers entiers de feuillus,

alors que des symptômes aussi massifs sont rares chez les résineux, seule une fraction des cohortes d'aiguilles étant le plus souvent concernée ;

- les feuillus les plus touchés par des jaunissements ou brunissements prématurés ont été le charme, le châtaignier, le hêtre, le bouleau et le chêne pubescent ;

- les résineux les plus affectés par des chutes d'aiguilles et des changements de couleurs anormaux étaient les épicéas, sapins et douglas alors que les pins et mélèzes ne montraient que peu de symptômes.

D'autres symptômes sont apparus plus tard, comme des fentes et nécroses corticales sur tronc, phénomènes discrets repérés lors d'opérations sylvicoles durant l'hiver 2003-2004, ou encore une floraison et une fructification particulièrement abondantes souvent accompagnées de microphyllie.

À mesure qu'on s'éloigne de l'été 2003, il devient plus difficile d'établir une relation certaine entre les évolutions notées et ses causes. On sait que des effets différés d'une ou plusieurs années peuvent se produire au niveau de la densité foliaire des cimes de certains résineux et aussi des chênes notamment, le temps nécessaire aux arbres pour reconstituer leurs réserves (Bréda et Dreyer, 2003). En outre, des effets indirects liés notamment à des attaques d'insectes ravageurs et de pathogènes (Piou *et al.*, ce volume) et de

nouveaux stress (sécheresses des étés 2004 et 2005 par exemple) se superposent aux effets directs de l'été 2003.

### ... et peut-être des réactions à la sécheresse de 2003 amplifiées par des événements antérieurs

Les observations sur le Réseau européen en 2003 ont été, conformément au protocole, majoritairement réalisées en juillet de façon à éviter des symptômes pré-automnaux. Pour les feuillus, elles révèlent un fort accroissement du déficit foliaire, ce qui ne peut s'expliquer par la canicule, survenue début août. On a peine à croire qu'il s'agit du seul effet de la sécheresse du printemps, d'autant que les réactions de pertes foliaires suite à un déficit hydrique sont généralement décalées dans le temps (la dégradation du hêtre s'exprime d'ailleurs surtout en 2004). Des analyses plus détaillées seront nécessaires afin d'identifier d'éventuels facteurs qui pourraient expliquer cette observation (défoliations par les insectes phytophages, excès d'eau les années précédentes, autres ?).

### Les symptômes aigus de 2003 ne se traduisent pas toujours par une perte de vitalité

Le suivi individuel des arbres réalisé sur les placettes du Réseau européen et

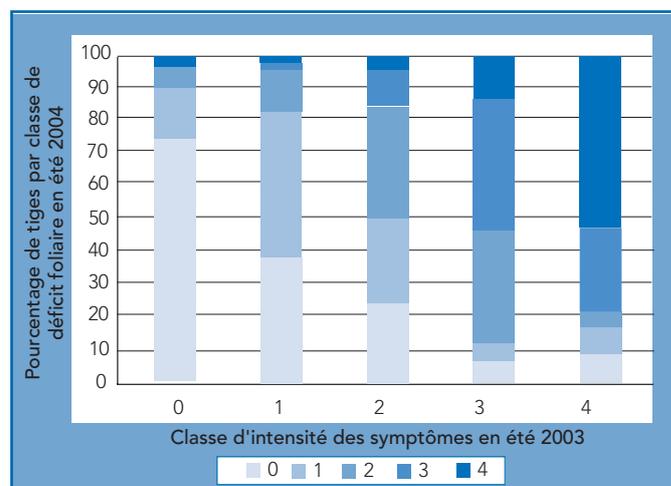
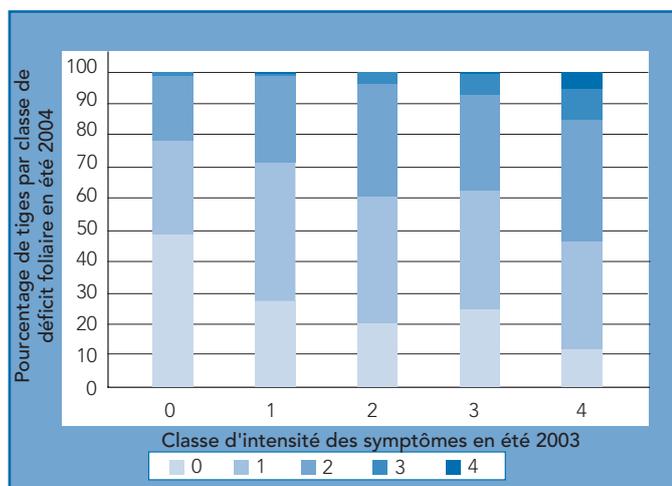


Fig. 1 : répartition des arbres du « Réseau complémentaire sécheresse et canicule » en pourcentage, par classe de déficit foliaire en 2004, des **tiges feuillues à gauche**, des tiges **résineuses à droite**, en fonction de leur classe d'intensité des symptômes à l'automne 2003. L'augmentation du chiffre de la classe traduit l'augmentation d'intensité des symptômes

du Réseau complémentaire a permis de mettre en évidence des évolutions contrastées entre 2003 et 2004 pour les feuillus et les résineux comme l'illustre la figure 1 (page précédente).

Pour les feuillus, les arbres très défeuillés à l'automne 2003 n'ont en général pas présenté de déficit foliaire aussi marqué en 2004, ce qui indique que les symptômes alarmants de 2003 relevaient chez ces arbres de mécanismes d'évitement permettant de préserver au mieux les organes pérennes (voir encadré). En revanche, des arbres apparemment peu affectés à l'issue de l'été 2003, c'est-à-dire n'ayant pas mis en place cette stratégie d'évitement, ont présenté des niveaux importants de déficit foliaire un an après.

Pour les résineux, on a observé en 2004 des processus de dépérissement ou d'attaques de scolytes sur des arbres dont l'aspect visuel en 2003 n'avait que peu trahi leur affaiblissement ; c'est notamment le cas du sapin pectiné et de l'épicéa. A l'inverse des feuillus, les résineux fortement détériorés en 2003 présentent toujours, un an après, de forts taux de déficit foliaire, ce qui confirme leurs plus faibles potentialités de récupération (voir encadré).

### La hausse des mortalités en 2004 a concerné surtout les résineux

Le nombre d'arbres dont la mort a été constatée lors de la campagne estivale de notation sur le réseau européen de suivi des dommages forestiers est en nette augmentation en 2004, plus particulièrement pour les résineux (figure 2). Cette observation est cohérente avec les différences connues de contrainte hydrique sous feuillus et résineux : la durée de la période de contrainte hydrique 2003 a été significativement plus longue sous résineux, qui interceptent l'eau toute l'année, donc plus dommageable aux arbres (voir Legay *et al.*, ce volume).

Exceptés les dommages dus aux tempêtes, il s'agit de la plus forte mortalité observée depuis la création du réseau.

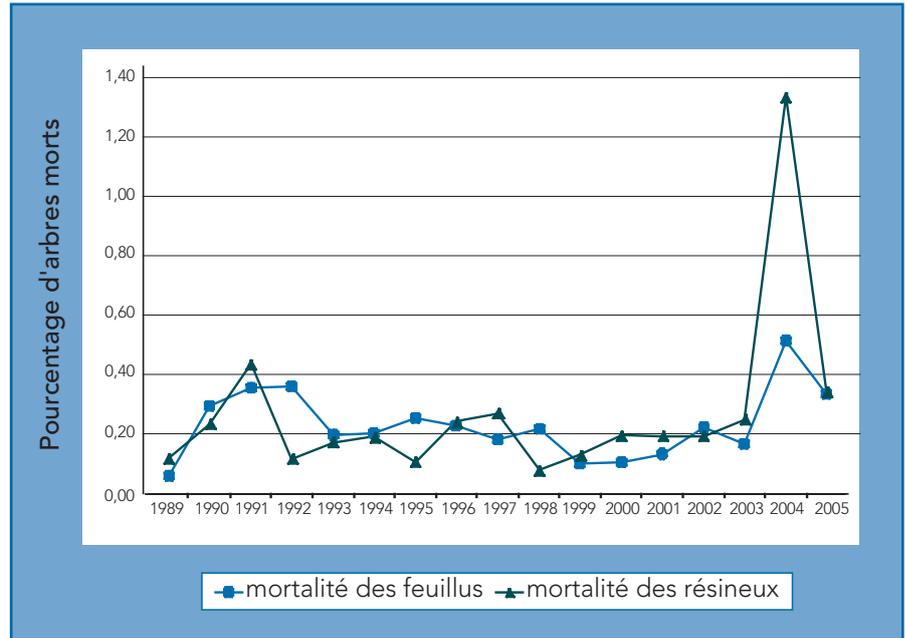


Fig. 2 : évolution du taux de mortalité (%) dans le Réseau européen entre 1989 et 2005 (l'effectif annuel des arbres suivis pendant cette période varie de 10 100 à 10 800, répartis sur 509 placettes)

Deux essences se distinguent en particulier : l'épicéa et le bouleau, pour lesquels le taux de mortalité a été respectivement de 4 et 6 % en 2004-2005 (cumul des deux années). On sait sur la base d'autres observations que le sapin de Vancouver, peu représenté dans le Réseau européen, est également sévèrement touché (Legrand, 2005).

### En conclusion : un point rapide sur l'importance des dégâts

Sur la base de l'ensemble des données collectées par le DSF, l'épicéa commun et le sapin pectiné figuraient à la fin 2005 parmi les grandes essences sociales ayant subi les plus gros dommages suite à la sécheresse et à la canicule de 2003, avec de très forts volumes de bois scolytés récoltés en 2004 dans le Nord-Est de la France : cette situation, aggravée dans certaines régions par la sécheresse de l'été 2005, est encore préoccupante. Par comparaison, les mortalités de douglas sont restées globalement d'importance modérée, y compris en Bourgogne et en Auvergne où le déficit hydrique et les dégâts immédiatement visibles étaient importants.

La situation de certains peuplements de hêtre du Nord-Est, ainsi que de certaines chênaies pédonculées et sessiliflores réparties sur l'ensemble du territoire, est également préoccupante : les dépérissements déclenchés ou amplifiés par la sécheresse et la canicule de 2003 en liaison avec divers facteurs biotiques, stationnels ou sylvicoles, se sont confirmés en 2005 et des mortalités sont vraisemblablement à attendre ces prochaines années.

Il est cependant aujourd'hui difficile et risqué d'établir des pronostics quant aux dégâts imputables à la sécheresse et à la canicule de 2003 dans les années à venir : ils dépendront essentiellement des conditions climatiques et du développement éventuel de divers parasites.

Afin de pouvoir suivre l'évolution de la situation et d'être en mesure d'évaluer, à terme, l'ensemble des conséquences de la sécheresse et de la canicule de 2003 (et, de façon moins évidente, des étés 2004 et 2005) sur la forêt française, le DSF et ses correspondants-observateurs vont poursuivre ces prochaines années les observations sur les différents réseaux.

Il est cependant possible de tirer dès à présent parti des observations déjà constatées. Par exemple il semble possible d'établir pour les résineux un diagnostic sanitaire assez fiable sur la base des symptômes immédiats, ce qui peut permettre la mise en œuvre d'opérations sylvicoles économiquement intéressantes. Il faut également rappeler la nécessité impérieuse de respecter l'adaptation de l'essence à la station, en particulier en matière de disponibilité en eau (Legay *et al.*, ce même volume).

**Valérie Belrose, Hubert Pauly,  
Louis-Michel Nageleisen,**  
Département de la santé des forêts

**Nathalie Bréda,**  
INRA Ecologie et Ecophysiologie  
Forestières, Nancy

## Bibliographie

BELROSE V., NAGELEISEN L. M. et  
RENAUD J. P. 2004. Les conséquences  
de la canicule et de la sécheresse sur la  
santé des forêts : bilan à la fin de l'an-  
née 2003. La santé des forêts [France]  
en 2003.  
[http://www.agriculture.gouv.fr/spip/IM  
G/pdf/canicule\\_secheresse-3.pdf](http://www.agriculture.gouv.fr/spip/IMG/pdf/canicule_secheresse-3.pdf)

BRÉDA N. et DREYER E. Sécheresse et  
canicule : une conjonction durable  
exceptionnelle en 2003. *La lettre du  
DSF* n° 28. Octobre 2003.

BRÉDA N., GRANIER A., AUSSENAC  
G. 2004. La sécheresse 2003 dans le  
contexte climatique des 54 dernières  
années : analyse écophysiologique et  
influence sur les arbres forestiers.  
*Revue forestière française*, LVI, 2, 2004,  
109-131.

LEGRAND P. 2005. Le douglas face à la  
sécheresse-canicule de l'été 2003. La  
santé des forêts [France] en 2004.  
[http://www.agriculture.gouv.fr/spip/IM  
G/pdf/2004\\_douglas.pdf](http://www.agriculture.gouv.fr/spip/IMG/pdf/2004_douglas.pdf)

### Comment sécheresse et canicule combinent leurs effets pour causer des dommages visibles

Les différentes essences subissent un déficit hydrique d'intensité variable (voir Legay *et al.*, ce volume), ce qui explique, au moins en partie, la variabilité de leurs réactions. Quelles sont les bases physiologiques de ces différences ?

La diminution de la réserve hydrique du sol en dessous du seuil de déficit hydrique provoque la fermeture progressive des stomates, qui réduit la photosynthèse et entraîne un ralentissement puis un arrêt de la croissance des arbres. Lorsque la régulation stomatique est insuffisante ou que la sécheresse se prolonge, des dysfonctionnements hydrauliques (embolies) apparaissent, provoquant chute de feuilles ou d'aiguilles, dessèchements de rameaux, de branches ou de parties de houppier. Ces effets sont plus ou moins marqués selon les essences, en fonction de leur tolérance au stress hydrique liée :

- à leur capacité à réguler plus ou moins efficacement la fermeture stomatique,
- à leur faculté de réduire leur surface foliaire par perte de feuilles,
- à la capacité de leur système racinaire à mobiliser les eaux en profondeur,
- à la vulnérabilité de leur système conducteur à l'embolie.

Conjugué à la sécheresse installée depuis de longs mois avant la mi-août 2003, l'effet de la canicule a pu entraîner des nécroses (mortalité localisée des tissus) aussi bien au niveau des feuilles que d'autres organes : bourgeons, rameaux, écorces fines de certaines essences... conduisant dans les cas extrêmes à la mort de l'arbre. L'arrêt prématuré de la fixation du carbone par photosynthèse, qu'il soit lié à la longue période de régulation stomatique ou à la chute prématurée du feuillage, s'est accompagné d'une reconstitution limitée des réserves glucidiques. Ceci est particulièrement marqué pour les résineux : la perte normale d'aiguilles âgées, accentuée par la sécheresse, s'est souvent accompagné en 2003 de nécrose et chutes d'aiguilles de l'année (sapin, épicéa, douglas) qui assurent normalement la majeure partie de la fixation de carbone (et y contribuent encore significativement l'année suivante). La faiblesse des réserves diminue les capacités de défense ou de survie des arbres : moindre résistance au froid, faibles réserves disponibles pour assurer le démarrage de la croissance et la mise en place du feuillage au printemps suivant (difficultés de débourrement effectivement constatées sur hêtre en 2004), moindre résistance à une agression biotique et faculté dégradée de récupérer ensuite. C'est pourquoi, lorsque les contraintes climatiques de 2003 se combinent à d'autres agressions (biotiques ou abiotiques), des processus de dépérissement peuvent s'enclencher, ou s'accélérer s'ils étaient déjà entamés. Ainsi, une large fraction des problèmes signalés en 2004 en lien avec l'été 2003 implique également d'autres facteurs : scolytes, pissode, *Sphaeropsis sapinea*, dégâts liés aux tempêtes, ou encore problèmes de tassement de sol.

NAGELEISEN L. M. 2004. Recrudescence des insectes sous-corticaux à la suite des extrêmes climatiques de 2003. La santé des forêts [France] en 2003.

[http://www.agriculture.gouv.fr/spip/IM  
G/pdf/insectes\\_souscorticaux.pdf](http://www.agriculture.gouv.fr/spip/IMG/pdf/insectes_souscorticaux.pdf)

NAGELEISEN L. M. 2005. Insectes sous-corticaux: des mortalités records dans l'Est de la France en 2004. La santé des forêts [France] en 2004.

[http://www.agriculture.gouv.fr/spip/IM  
G/pdf/insectes\\_sous\\_corticaux.pdf](http://www.agriculture.gouv.fr/spip/IMG/pdf/insectes_sous_corticaux.pdf)

PAULY H., BELROSE V. 2005. Sécheresse et canicule de l'été 2003 : (1) observation en 2004 des consé-

quences sur les peuplements forestiers adultes, (2) observation en 2004 des conséquences sur les peuplements forestiers adultes - essences feuillues, (3) observation en 2004 des conséquences sur les peuplements forestiers adultes - essences résineuses.

[http://www.agriculture.gouv.fr/spip/res  
sources.themes.foretbois.santedesfo  
rets\\_r314.html](http://www.agriculture.gouv.fr/spip/resources.themes.foretbois.santedesforêts_r314.html)

RENAUD J. P. et NAGELEISEN L. M. 2005. Les résultats 2004 du réseau européen de suivi des dommages forestiers. La santé des forêts [France] en 2004.

[http://www.agriculture.gouv.fr/spip/IM  
G/pdf/reseau\\_europeen\\_2004-2.pdf](http://www.agriculture.gouv.fr/spip/IMG/pdf/reseau_europeen_2004-2.pdf)

# Les risques sanitaires consécutifs à l'été 2003 à la lumière de la littérature

Dès 1909, Duggar mentionnait que "la fréquence d'un très grand nombre de maladies fongiques est directement liée à ou conditionnée par les facteurs climatiques... facteurs qui peuvent affecter indépendamment l'hôte et le parasite et qui peuvent également affecter les interrelations entre ces organismes."

Dans le cadre de l'expertise "sécheresse et canicule 2003", une analyse bibliographique en deux volets (Rouault et al., 2005 et Desprez-Loustau et al., 2005) a été menée pour éclaircir ces différents effets et participer à l'évaluation des risques sanitaires. Les résultats apportent des éclairages intéressants pour les gestionnaires.

## La chaleur ou l'humidité agissent directement sur les parasites

### Durant leur dispersion

**Les champignons sont particulièrement sensibles aux conditions hydriques** durant leur phase de dispersion et d'infection ; ils requièrent pour la plupart une humidité importante, voire de l'eau libre, pour la dissémination et la germination des spores. Cette contrainte est particulièrement limitante pour les pathogènes réalisant de nombreux cycles infectieux au cours de la saison de végétation. **Une sécheresse a donc un impact immédiat négatif sur la dispersion de la plupart des pathogènes foliaires** : les signalements au DSF d'oïdium, de rouilles foliaires, de cylindrosporiose et les pertes foliaires sur peuplier et merisier – essences particulièrement sujettes aux maladies foliaires – observées sur le réseau européen ont ainsi nettement diminué en 2003.

**Les insectes sont, eux, sensibles à la température lors de leurs vols de dispersion** : au-delà de 30 °C, on observe chez beaucoup d'espèces une hyperactivité, un comportement de

recherche de conditions plus favorables puis, si la température augmente encore, un état de léthargie qui précède la mort. Ceci explique probablement le fait que contrairement aux années antérieures, de très faibles captures de typographe ont été enregistrées durant la première quinzaine d'août 2003 dans les pièges phéromonaux mis en place par le DSF dans le Nord-Est de la France. Les températures de l'air observées durant cette période ont en effet été largement supérieures aux températures optimales de vol de l'insecte (22-26 °C).

### Durant leur développement

Après l'infection, le développement des champignons est dépendant du taux d'humidité des tissus de l'hôte, mais **de nombreux pathogènes présentent une croissance encore significative (50 % de l'optimum) à des niveaux de stress hydriques sévères pour leurs hôtes.**

**Beaucoup de champignons et d'insectes réagissent positivement à une élévation des températures moyennes :**

- *Sphaeropsis sapinea* voit ainsi sa croissance mycélienne doubler entre

20 et 28 °C de température moyenne (Peterson, 1981). La température optimale de croissance du mycélium de la majorité des champignons pathogènes est similaire à celle de la plupart des plantes supérieures et des animaux et se situe entre 20 et 30 °C (Tainter et Baker, 1996) ;

- les insectes capables de faire plusieurs générations dans l'année réagissent également de façon spectaculaire à une augmentation des températures moyennes. Dans le Nord-Est de la France en 2003, le DSF a pu observer deux générations d'*Ips typographus* à moyenne altitude et même trois dans certains peuplements de plaine contre respectivement une et deux en année normale.

**Cet effet positif est cependant limité par l'existence d'un seuil de température létal variable selon les espèces et les stades de développement<sup>1</sup> :**

- des mortalités importantes d'œufs et de jeunes larves de processionnaire du pin ont été rapportées en 2003 dans les zones éloignées des côtes atlantiques, notamment dans le centre de France et dans la zone d'extension de l'insecte au nord de la Loire. Ces mortalités ont été beaucoup plus faibles le long de la façade atlantique probablement parce

<sup>1</sup> La problématique des températures létales supérieures des insectes est cependant compliquée par les phénomènes d'acclimatation, c'est-à-dire par le fait qu'elles peuvent varier suivant l'histoire thermique des populations testées (Bursell, 1964).

que les températures atteintes début août ont été inférieures au seuil léthal des jeunes larves mais aussi parce que le vol des adultes étant plus précoce le long de la côte, les stades les plus sensibles étaient décalés dans le temps. Ce phénomène pourrait expliquer que la répartition géographique des dégâts a été profondément modifiée entre 2002 et 2004 (cf. Figure 1). Les larves de typographe sous des écorces exposées au soleil ont été confrontées en août 2003 à de très fortes températures (supérieures à 50 °C) qui se sont probablement révélées mortelles dans certains cas ;



L.M. Nageleisen

*Ips typographus*

■ Pour les champignons, les températures létales supérieures sont généralement plus élevées mais dépendent également de la durée d'exposition. Quelques minutes à 70° sont fatales à la plupart (Tainter et Baker, 1996). Le mycélium d'*Heterobasidion annosum* meurt après deux heures à 38-45 °C (Korhonen et Stenlid, 1998).

### Le synchronisme phénologique, un phénomène très dépendant des conditions climatiques

Le synchronisme entre le stade virulent d'un parasite et le stade sensible d'un

hôte – **coïncidence entre élongation des pousses de pin et émission des spores de rouille courbuse, entre débourrement de l'hôte et éclosion des œufs de défoliateurs printaniers** (tordeuse verte du chêne, tordeuse grise du mélèze, cheimatobie) – est souvent déterminant dans l'épidémiologie d'une maladie ou dans le développement d'un insecte ravageur ou d'un parasitoïde. Il **dépend surtout des conditions climatiques, de l'hiver ou du printemps, mais les températures estivales peuvent également avoir une influence**, comme le mon-

trient les travaux menés par P. du Merle (1999) sur la tordeuse verte du chêne : L'éclosion des œufs de ce ravageur au printemps, est non seulement dépendante des conditions de l'hiver précédent, mais aussi de l'été de l'année antérieure.

En outre, même si cela reste difficile à quantifier, les parasites des arbres sont eux-mêmes l'objet de prédateurs et de parasitismes. Le synchronisme de leur développement est donc un autre élément conditionnant l'extension des parasites. Les conditions climatiques, et notamment les températures esti-

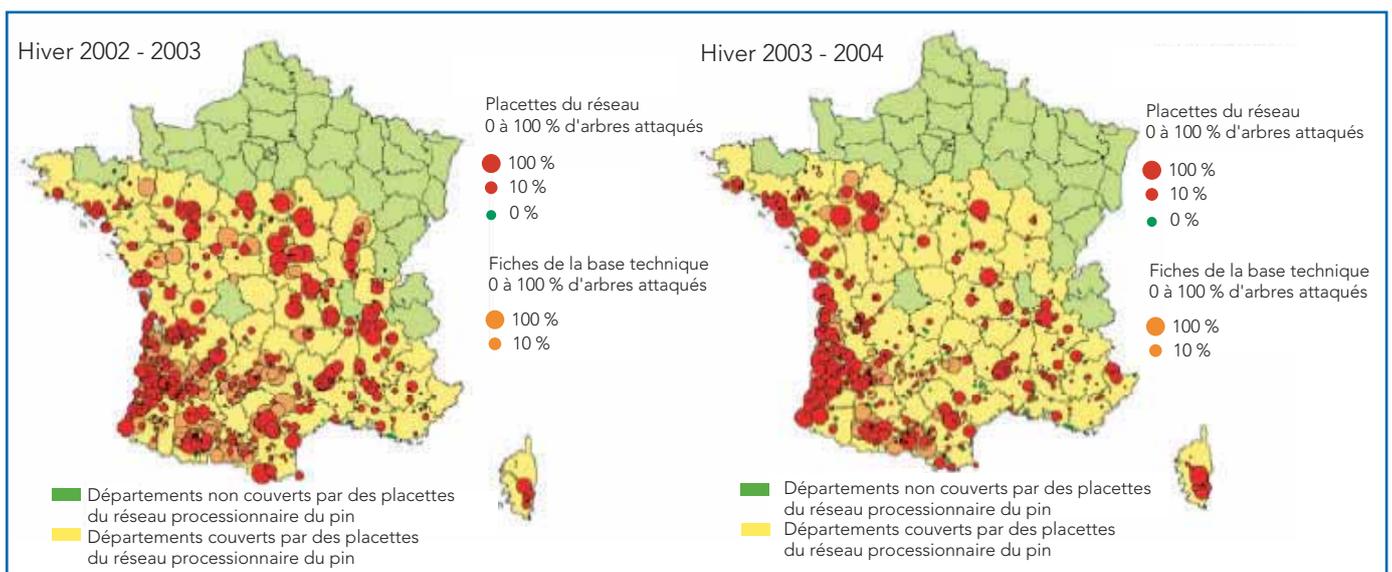


Fig. 1 : observation des attaques de la processionnaire du pin lors des hivers 2002 – 03 et 2003 – 04. Les populations du centre et de l'est semblent avoir été les plus affectées par la canicule de l'été 2003 (Laurence Bouhot-Delduc)

vales, jouent là encore un rôle probablement important mais très peu étudié.

### L'altération de la physiologie de l'hôte : un effet indirect complexe des conditions climatiques sur la sensibilité aux parasites et ravageurs

Les effets d'un stress hydrique sur la sensibilité de l'hôte à des parasites ou ravageurs ont fait l'objet d'expérimentations nombreuses conduites le plus souvent sur de jeunes plants, en conditions très contrôlées. Les résultats de cette approche éclairent les mécanismes en jeu.

#### Les réactions de défense

Lorsqu'un stress hydrique modéré survient, la croissance des arbres est rapidement affectée. La photosynthèse l'est également mais à un moindre degré. Cette différence dans la cinétique des deux processus fait qu'une quantité plus importante d'hydrates de carbone est disponible pour la synthèse de composés chimiques de défense (lignine, phénols, terpènes, phytoalexines<sup>2</sup>, composés spécifiques...). Ces composés sont généralement toxiques vis-à-vis d'un grand nombre d'insectes et/ou de champignons. De ce fait, il est communément admis qu'un **faible stress conduit à une augmentation des capacités de résistance des arbres et à une moindre sensibilité aux parasites.**

En cas de **stress hydrique sévère**, la photosynthèse cesse et la synthèse des composés de défense diminue alors rapidement.

#### La capacité nutritive des tissus

La résistance des arbres ne dépend pas uniquement de leur capacité à produire des composés de défense, mais aussi de leur qualité nutritive. Lors d'un stress hydrique, des changements biochimiques interviennent dans l'arbre, notamment pour maintenir la pression osmotique et limiter les pertes en eau.

**En cas de stress limité, on observe ainsi une augmentation des sucres et**



*Armillaria ostoyae*

L.M. Nageleisen

**une conversion des protéines en acides aminés solubles, ce qui accroît la disponibilité en azote.** Or, un taux d'azote soluble plus important pourrait favoriser les performances d'insectes phytophages<sup>3</sup> (Mattson et Haack, 1987), mais aussi des armillaires (Lung-Escarmant *et al.*, 2005). De même, et quel que soit le stress, on constate une augmentation de la teneur en sucres réducteurs et en glucose dans les racines, ce qui pourrait favoriser le développement des armillaires par exemple.

**En cas de stress hydrique sévère, les concentrations en nutriments et en eau dans les tissus chutent au point de les rendre inconsommables par de nombreux phytophages**, limitant de facto leur développement (diminution de la croissance larvaire, de la fécondité des femelles, du taux d'éclosion des œufs...). En revanche, la plupart des champignons présente une plasticité importante vis-à-vis de la concentration en eau des tissus de l'hôte (cf. plus haut).

#### Une résultante difficile à établir

Les effets d'un stress hydrique sur la concentration des tissus en composés toxiques et sur la qualité nutritive des

tissus évoluent donc en fonction du temps et de la sévérité du stress, mais pas forcément de façon synchrone ni parallèle. De plus, tous les tissus ne sont pas affectés de façon identique par ces différents processus. Les tissus vasculaires se chargeraient moins de composés toxiques que les autres tissus ce qui affecterait moins les insectes piqueurs suceurs par exemple. Enfin les différents mécanismes de résistance des principales essences forestières face aux parasites et à la sécheresse sont loin d'être tous élucidés : la réponse à des combinaisons de stress abiotiques (hydrique, nutritif, compétition) et biotiques, les conséquences à long terme des stress et leur répétition dans le temps sont également mal connues.

Le bilan final est dès lors souvent difficile à établir compte tenu des effets contraires qui peuvent entrer en jeu. **Même si des contre-exemples existent, il ressort malgré tout qu'en conditions contrôlées, les insectes corticaux et xylophages et les piqueurs suceurs se développent généralement mieux sur arbres stressés ce qui n'est pas le cas des insectes gallicoles<sup>4</sup> et des défoliateurs.**

<sup>2</sup> Le terme de phytoalexine désigne des molécules dont la synthèse est induite chez les végétaux en réponse à différents facteurs de stress et qui possèdent un pouvoir inhibiteur à l'égard d'un large éventail de microorganismes. Le caractère inductible de ces molécules les distingue des molécules toxiques constitutives. Chaque espèce de plante possède ses phytoalexines particulières (Lepoivre, 2003).

<sup>3</sup> Insectes qui consomment les tissus végétaux

<sup>4</sup> Qui créent des galles

## De l'expérimentation aux observations en forêt

Passer de la compréhension de mécanismes testés lors d'expérimentations contrôlées à la compréhension de phénomènes observés en forêt est un exercice délicat. La littérature abonde d'exemples dans lesquels les gradations d'insectes en nature semblent associées à des sécheresses (Speight et Wainhouse, 1989 ; Allen et Breshears, 1998 ; Breshears *et al.*, 2005), mais il n'est pas forcément aisé de faire la part réelle des sécheresses et celle d'autres facteurs qui pourraient coïncider avec elles.

### Une liaison claire entre sécheresse et scolytes

La sensibilité après sécheresse des forêts de résineux aux attaques d'insectes corticaux et xylophages est maintenant largement documentée tant en Europe (Lieutier *et al.*, 2005) que dans les forêts tempérées des autres continents. Normalement cantonné aux arbres physiologiquement déficients, le typographe est susceptible de s'attaquer lors de phases épidémiques à des arbres moins affaiblis, voire à des arbres sains : le succès des attaques dépend alors essentiellement des niveaux de population des scolytes et de la capacité des arbres à mobiliser leurs mécanismes de résistance. Tout affaiblissement, notamment du fait de



L.M. Nageleisen

*Sphaeropsis sapinea*

conditions climatiques sévères, diminue donc le seuil d'attaque des scolytes. C'est ce qui a été constaté à la suite de la sécheresse de 2003 avec une reprise importante des mortalités d'épicéa alors qu'elles avaient tendance à diminuer depuis 2002. Des observations identiques ont été réalisées en Suisse (Meier *et al.*, 2004) ou en Bade-Wurtemberg (Meining *et al.*, 2004).

Un autre scolyte, le curvidenté du sapin (*Pityokteines curvidens*), semble lui aussi avoir été favorisé par les conditions climatiques de l'été 2003 : plus de 400 000 m<sup>3</sup> de bois ont été touchés en 2003 et 2004. Il est difficile dans ce cas de faire la part entre une action directe des températures, l'augmentation de l'attractivité liée à l'émission de composés terpéniques et l'affaiblissement des sapins.

Dans le Nord-Est de la France, ce sont au total plus de 750 000 m<sup>3</sup> de bois résineux qui ont été scolytés en 2004, niveau record depuis 1989 (Nageleisen, 2005).

### Une liaison plus floue pour les autres ravageurs

Pour les autres guildes, il est encore plus difficile de mettre en évidence un effet "canicule". De nombreuses attaques de défoliateurs ont été signalées depuis 2003 mais dans de nom-

breux cas, l'augmentation des niveaux de population avait été constatée bien avant cette date. Les signalements d'insectes gallicoles, ne semblent pas avoir particulièrement augmenté et ceux d'insectes piqueurs suceurs ne sont pas cohérents pour en déduire une tendance générale.

### Un nouveau regard sur les pathogènes favorisés par un stress hydrique

Les impacts de la sécheresse sur les relations entre les agents de maladie foliaire et leurs hôtes ont été peu étudiés, du fait de l'effet directement négatif de la sécheresse sur ces agents (voir plus haut). De même, les impacts sur les relations entre les agents de chancre susceptibles de se développer sur arbres sains et leurs hôtes ont été peu étudiés car on n'observe ni augmentation ni diminution nettes de la fréquence de ces problèmes après les sécheresses. C'est le cas pour les chancres du châtaignier, du hêtre, du mélèze ou du cyprès par exemple.

À l'inverse, les pathogènes du corps ligneux (tiges ou racines) des genres *Sphaeropsis*, *Botryosphaeria*, *Cytospora*, *Biscognauxia*, et *Entoleuca* (*Hypoxylon*) ont été très étudiés, ce qui est cohérent avec l'augmentation des fréquences d'observation des dégâts imputés à



L.M. Nageleisen

Attaques de curvidenté sur sapin

ces agents après sécheresse (augmentation des signalements de *Sphaeropsis sapinea* dans la base DSF en 1989-90 ou après 2003 par exemple).

La plupart de ces champignons ont été longtemps qualifiés de parasites opportunistes, de faiblesse ou secondaires, c'est-à-dire susceptibles de se développer sur des arbres préalablement affaiblis par divers stress. **Beaucoup sont en réalité des endophytes, c'est-à-dire des organismes qui se développent à l'intérieur d'une plante sans provoquer de symptômes. Certains auteurs font l'hypothèse que des champignons de ce type ne deviendraient virulents que lorsque l'équilibre avec l'arbre est rompu en faveur du pathogène (vieillesse des tissus ou stress hydrique).** Si le stress s'interrompt avant que le pathogène n'ait totalement détruit l'organe, on peut observer des cicatrifications qui prennent une allure chancreuse.

### La sécheresse, révélatrice et amplificatrice des effets des pathogènes et des ravageurs

**Certains champignons sont à même de se maintenir sur des arbres vivants, non comme endophytes mais en créant des lésions permanentes plus ou moins contenues par l'hôte.** Ce type de lésions est fréquent au niveau racinaire et peut conduire à des systèmes racinaires très déficitaires (*Armillaria sp.*, *Phytophthora sp.*, *Collybia fusipes*). Dans la plupart des cas, les hôtes sont à même de compenser les effets de cette infection lorsque les conditions d'alimentation en eau ne sont pas limitantes. **À l'occasion d'une sécheresse, cette compensation s'avère impossible ce qui provoque la mort de l'arbre.**

L'exemple des mortalités récentes de châtaigniers attaqués par des *Phytophthora* racinaires illustre bien cette dynamique. Bien que limité, le nombre de peuplements dans lesquels ces pathogènes ont été identifiés a nettement progressé en 2003 et 2004 (Saintonge, 2005), ce qui peut s'expli-

quer par un enchaînement d'évènements climatiques favorables. Le climat très humide de 1999 à 2002 a permis la multiplication des *Phytophthora* au sein des châtaigneraies, notamment sur stations à sols très hydromorphes ou très limoneux ou sur sols tassés. En 2003, ces attaques ont fortement perturbé l'alimentation en eau des arbres atteints et provoqué indirectement leur mort.

Un autre exemple est celui de *Collybia fusipes*, associée à des dépérissements fréquents de chêne pédonculé en sol non hydromorphe et sableux (Camy et al., 2003). Cet impact n'est pas lié à une plus grande sensibilité du chêne pédonculé dans ce type de sol, mais au fait qu'à niveau donné de destruction racinaire, les arbres attaqués présentent suite à une sécheresse plus de symptômes de dépérissement sur les sols à faible réserve en eau.

Le rôle des pathogènes racinaires dans la mortalité n'est pas toujours clair. En Europe, *Armillaria mellea* et *gallica* sont fréquents sur des chênes moribonds. Ils sont certes capables de se maintenir sous forme de lésions latentes sur des arbres sains, mais ils n'envahissent le système racinaire qu'à l'occasion d'un stress. De ce fait, ils sont considérés comme des opportunistes agissant comme facteurs aggravants (ou secondaires), c'est-à-dire accentuant et amplifiant les effets d'un stress et non comme des facteurs prédisposants, c'est-à-dire agissant depuis longtemps et soumettant l'arbre à un stress plus ou moins permanent susceptible d'induire un affaiblissement général (Legrand et al., 2005).

La sécheresse vient parfois ajouter ses effets à ceux de stress antérieurs multiples, en particulier des attaques de ravageurs et/ou de pathogènes. Elle peut alors intervenir comme **facteur déclenchant d'un dépérissement** dont l'intensité dépend des stress subis, des conditions stationnelles, de la concurrence et de l'âge du peuplement.

La distinction entre facteurs prédisposants, déclenchants et aggravants a été conceptualisée et schématisée sous la

forme de « **la spirale du déclin** » par Manion (1981), puis adaptée aux conditions françaises par Landmann et Nageleisen (1994) (Figure 2). Nageleisen (2005) a récemment retracé **l'historique de nombreux dépérissements de feuillus dans lesquels la sécheresse apparaît quasiment toujours comme facteur déclenchant.**

### Conséquences en terme de gestion

Le gestionnaire forestier intègre très facilement les notions de contraintes édaphiques ou climatiques. Il sait que « les arbres ne poussent pas n'importe où ». Il intègre plus difficilement les contraintes biotiques, les considérant parfois comme de simples « contrariants » dont l'impact pouvait être minimisé par des méthodes appropriées de lutte active.

Les changements climatiques obligent à aller au-delà de cette approche. En effet, la répétition de sécheresses et de canicules estivales, associée à une augmentation des températures moyennes hivernales et à une évolution de l'aire des hôtes, risque d'une part de modifier profondément la répartition géographique des épidémies et des gradations d'insectes et d'autre part de diminuer les capacités de résistance des arbres.



L.M. Nageleisen

Dépérissement hêtre

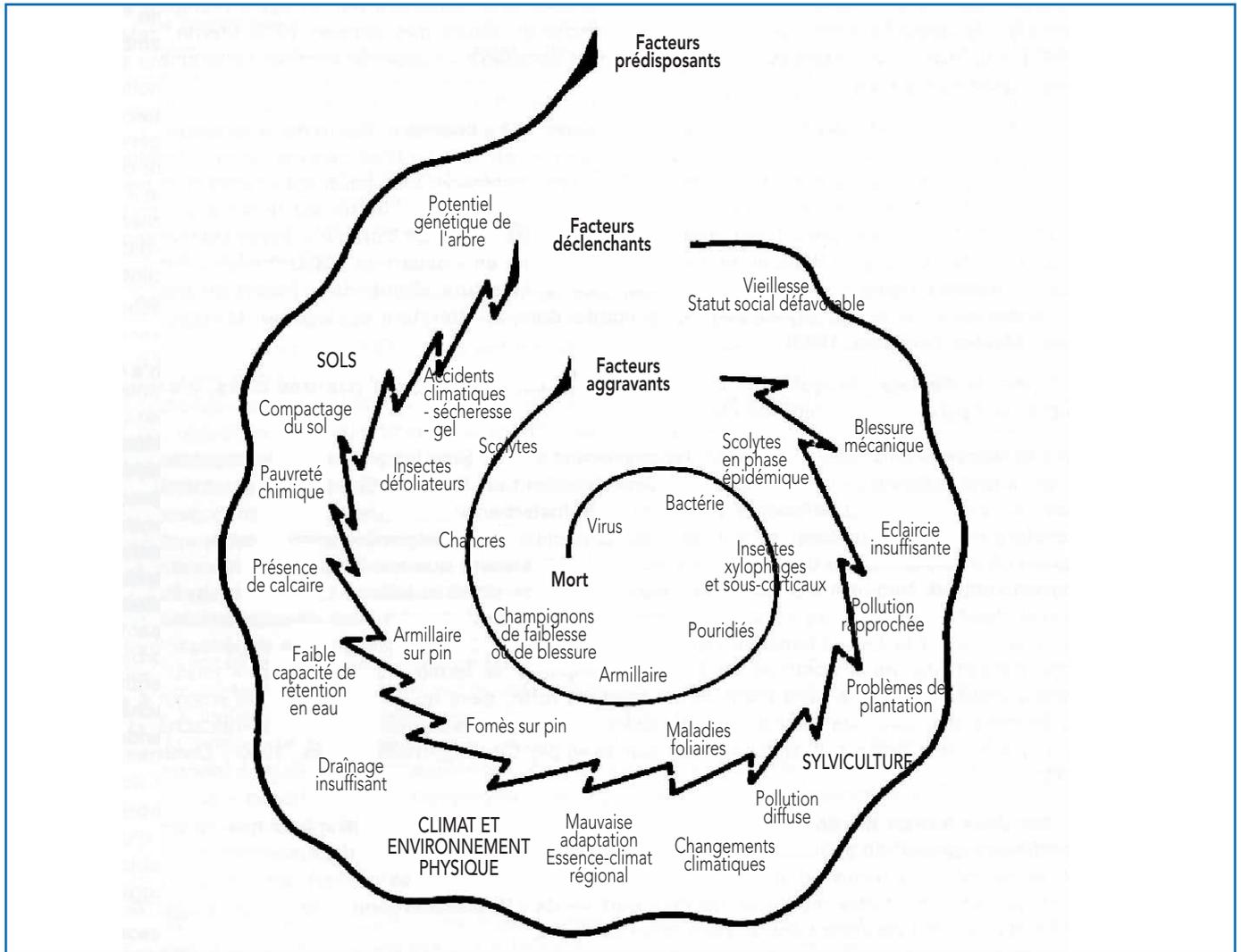


Fig. 2 : hiérarchisation des principaux facteurs impliqués dans les processus de dépérissement d'après Manion (1981) adaptée aux conditions françaises (Landmann, 1994)

Le gestionnaire forestier se doit de limiter les risques sanitaires en respectant les exigences autécologiques des essences et en adaptant la sylviculture (Legay, ce volume), mais aussi en prenant des précautions pour ne pas transporter les parasites dans des zones devenues favorables. La diffusion récente du chancre du châtaignier dans le Nord de la France à l'occasion de transports de plants ou de bois contaminés en est un exemple probant. La diffusion des *Phytophthora* à partir des pépinières risque à terme d'induire des problèmes non négligeables dans les chênaies de l'Ouest de la France. Des précautions simples en pépinière et à la récep-

tion des plants permettraient en partie d'éviter certains risques.

**Dominique Piou,**

DSF, INRA Pierroton (piou@pierroton.inra.fr)

**Louis-Michel Nageleisen,**

DSF, INRA Champenoux (nageleisen.dsf@wanadoo.fr)

**Marie-Laure Desprez-Loustau,**

INRA Bordeaux (loustau@bordeaux.inra.fr)

**Jean-Noël Candau**

INRA Avignon (jean-noel.candau@avignon.inra.fr)

## Bibliographie

ALLEN CD, BRESHEARS DD - 1998 - Drought-induced shift of a forest-woodland ecotone: rapid landscape response to climate variation. Proc. Natl. Aca. Sci. 95: 14839-14842

BRESHEARS DD, COBB NS, RICH PM, PRICE KP, ALLEN CD, BALICE RG, ROMME WH, KASTENS LOYD ML, BELNAP J, ANDERSON JJ, MYERS OB, MEYER CW - 2005 - Regional vegetation die-off in response to global-change-type drought - Proc. Natl. Acad. Sci. USA 102: 15144-15148

BOUHOT-DELDUC L - 2004 - La gradation de la chenille processionnaire du pin a culminé sur la façade atlantique lors de l'hiver 2003-2004 - La santé des forêts (France) en 2004 - [http://www.agriculture.gouv.fr/spip/IMG/pdf/processionnaire\\_pin\\_2003\\_2004.pdf](http://www.agriculture.gouv.fr/spip/IMG/pdf/processionnaire_pin_2003_2004.pdf)

BURSELL E, - 1964.- Environmental aspects: Temperature. p. 283-321. In M. Rockstein (ed.), *The physiology of Insecta*. v. 1. Academic Press, New York, 640p.

CAMY C.; VILLEBONNE D. de; DELATOUR C.; MARÇAIS B.- 2003 - Soil factors associated with infection by *Collybia fusipes* and decline of oaks. - *Forest Pathology* 33 (4): 253-266

DESPREZ-LOUSTAU ML, MARÇAIS B, NAGELEISEN LM, PIOU D, VANNINI A - 2005 - Interactive effects of drought and pathogens in forest trees (soumis)

DUGGAR BM - 1909 - *Fungous Diseases of Plants* - Ginn and Co., N.Y.

DU MERLE P -1999 - Egg development and diapause: ecophysiological and genetic basis of phenological polymorphism and adaptation to varied hosts in the green oak tortrix, *Tortrix viridana* L.(Lepidoptera : Tortricidae) - *Journal of Insect Physiology* 45 (6): 599-611

KORHONEN K, STENLID J -. 1998 - Biology of *Heterobasidion annosum*. In: *Heterobasidion annosum. Biology, ecology, impact and control*. Eds Woodward S, Stenlid J, Karjalainen R, Hüttermann A - CAB International, 43-70.

LANDMANN G - 1994 - Concepts, définitions et caractéristiques générales des dépérissements forestiers - *Revue Forestière Française* XLVI (5) : 405-415

LEGRAND P, MARÇAIS B, GUILLAUMIN JJ, LUNG-ESCHARMANT B - 2005 - Prédiposition des arbres et sensibilité à l'armillaire - In *l'armillaire et le pourridié-agaric des végétaux ligneux* - Eds Guillaumin - INRA Paris - 221-237

LEPOIVRE, P. - 2003 - Les mécanismes de résistance et la spécificité parasitaire. In Lepoivre, P. (dir.), *Phytopathologie*, Presses Agronomiques de Gembloux & De Boeck, Bruxelles. 161-191

LIEUTIER F, DAY KR, BATTISTI A, GREGOIRE JC, EVANS HF - 2004 - Bark and Wood Boring Insects in Living Trees in Europe, a Synthesis - Kluwer Academic Publ, Netherlands - 569 p.

LUNG-ESCHARMANT B, GUILLAUMIN JJ, BOTTON B - 2005 - Relations entre les armillaires et leurs hôtes ligneux. In *l'armillaire et le pourridié-agaric des végétaux ligneux* - Ed. Guillaumin - INRA - 251-269

MATTSON WJ, HAACK RA - 1987 - The role of drought stress in provoking outbreaks of phytophagous insects. In *Insect outbreaks* - Eds Barbosa P, Schultz JC - 365-407

MANION P. D - 1981 - *Tree disease concepts*. xv + 399 pp

MEIER F, ENGESSER R, FORSTER B, ODERMATT O - 2005 - Protection des forêts: vue d'ensemble 2004 - Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), Birmensdorf, 20 p.

MEINING S, SCHRÖTER H, WILPERT K - 2004 - Waldzustandsbericht 2004 der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, 58 p.

NAGELEISEN LM - 1994 - Dépérissement actuel des chênes - *Revue Forestière Française* XLVI (5) : 504-511

NAGELEISEN LM - 2005 - Insectes sous-corticaux : des mortalités records dans l'est de la France en 2004 - La santé des forêts [France] en 2004) Min. Agri. et Pêche.(DGFAR), Paris, France, 6 p.

[http://www.agriculture.gouv.fr/spip/resources.themes.foretbois.protection-delaforet.santedesforets\\_r314.html](http://www.agriculture.gouv.fr/spip/resources.themes.foretbois.protection-delaforet.santedesforets_r314.html)

NAGELEISEN LM - 2005 - Les sécheresses, principal facteur déclenchant de dépérissement au cours du XX<sup>e</sup> siècle. *Forêt Entreprise* N°162, Avril 2005/2, p. 35-37.

PETERSON G. W. - 1981 - Pine and juniper diseases in the Great Plains. In *General Technical Report, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, USDA Forest Service*. 47p

ROUAULT G, CANDAU JN, LIEUTIER F, MARTIN JC, GRÉGOIRE JC, NAGELEISEN LM - 2005 - Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe (soumis)

SAINTONGE F. X. - 2005 - En 2003 et 2004, l'encre et le chancre du châtaignier restent d'actualité. La santé des forêts [France] en 2004.

[http://www.agriculture.gouv.fr/spip/IMG/pdf/maladies\\_chataignier\\_2004.pdf](http://www.agriculture.gouv.fr/spip/IMG/pdf/maladies_chataignier_2004.pdf)

SPEIGHT MR, WAINHOUSE D - 1989 - Ecology and management of forest insects - Clarendon Press; Oxford; UK - x + 374 pp.

TAINTER FH, BAKER FA - 1996 - Principles of forest pathology - xvi + 805 pp. John Wiley and Sons; New York; USA

## Que peut faire le gestionnaire forestier face au risque de sécheresse ?

Le stress hydrique est l'une des principales contraintes écologiques auxquelles les forêts doivent faire face dans de nombreuses régions françaises ; l'été 2003 nous l'a brutalement rappelé. Les scénarios de changement climatique prévoient de surcroît une aggravation de cette contrainte, avec une diminution des précipitations estivales accompagnée d'une augmentation des températures. Or, si l'effet de la canicule a été relativement peu étudié, de nombreux travaux ont porté sur les conséquences de la contrainte hydrique sur les arbres et les peuplements. Faisons le point sur ce que l'on peut en tirer au plan pratique.

### Porter un diagnostic... avec prudence

Lorsque l'état de sécheresse a été reconnu, et que des symptômes se manifestent dans les peuplements, les gestionnaires sont amenés à porter un diagnostic sur l'impact de l'épisode, pour porter à connaissance de la collectivité, ou pour prévoir les travaux, les coupes voire les modifications éventuelles d'aménagement nécessaires pour gérer ces dégâts.

Les travaux du DSF nous montrent que l'on doit se garder de rendre des conclusions hâtives : il y a très peu de lien entre les symptômes observés juste après la sécheresse et l'état sanitaire des arbres l'année suivante, en particulier pour les feuillus, pour lesquels les symptômes observés peuvent correspondre à des stratégies d'évitement de la sécheresse (Belrose et al., dans ce même numéro). En 2003, ce sont les symptômes provoqués par la canicule qui ont révélé la gravité de la sécheresse. Il faut donc se garder des récoltes hâtives dans l'hiver suivant une sécheresse, et **mieux vaut attendre le débourrement au printemps suivant pour marquer les récoltes de pro-**

**duits accidentels feuillus.** Pour les résineux, le diagnostic précoce d'après l'état des houppiers est plus fiable.

Soulignons qu'une récolte rapide ne se justifie que dans le cas des bois scolytés, ou pour les bois qui se dégradent

vite (comme le hêtre). Encore faut-il dans ce dernier cas s'assurer des débouchés commerciaux avant l'exploitation, car les bois se dégradent plus vite après abattage que sur pied (Flot, 2004).

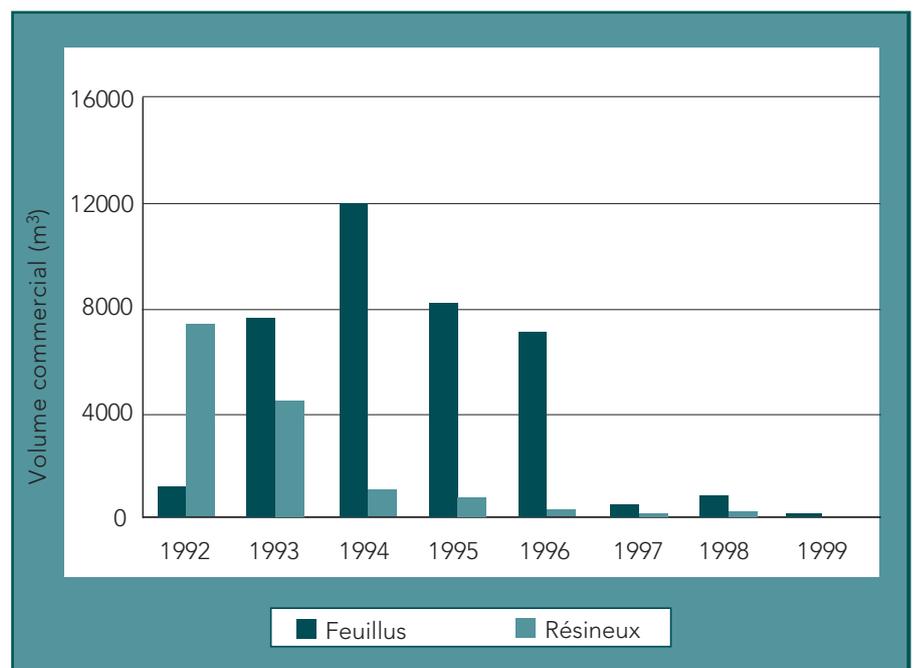


Fig. 1 : récoltes de bois secs et dépérissants en Forêt Domaniale de la Harth suite à l'épisode de sécheresse 1989-1991 (source ONF Mulhouse)

Pour les peuplements de chêne de grande qualité, pour les chênes de haute valeur patrimoniale, ou encore pour les placettes de suivi à long terme, la mesure des réserves sous forme d'amidon (par un test colorimétrique simple sur des mini-carottes prélevées à l'empatement) pourrait permettre de porter un diagnostic de survie fiable. Cet outil est en cours de validation à l'INRA.

En ce qui concerne les plantations, une méthode quantitative de diagnostic des pertes à l'échelle de la parcelle a été élaborée à l'occasion de l'épisode 2003 (note de service ONF 04-D-254 du 23/04/04 et Mortier dans RDVT n°8), qui pourra être remise en œuvre pour tout épisode de mortalité importante. Pour les régénérations naturelles, a priori moins sensibles, on pourra utiliser la méthode REGENAT (Sardin, 2004- méthode, fiche de relevé et application sur WorkAbout disponibles sur intraforêt).

Les sécheresses dont les conséquences ont été suivies sur plusieurs années nous apprennent que les récoltes de produits accidentels consécutifs à ces épisodes s'étalent couramment sur 4 à 5 ans. **La quantification de ces récoltes est importante** (non seulement au niveau du massif, mais si possible au niveau de la parcelle) pour évaluer a posteriori la gravité du phénomène et faire progresser l'expertise : mieux connaître la sensibilité des peuplements en fonction des différents facteurs, mais aussi connaître l'importance des pertes imputables à l'évènement (par rapport aux récoltes annuelles, à d'autres épisodes de dépérissement, etc.). Voir figure 1 page précédente.

### Protéger les peuplements affectés

Suite à un stress abiotique tel que sécheresse ou tempête, l'accumulation de bois dépérissant peut provoquer un essor des parasites de faiblesse (insectes ou champignons opportunistes), susceptibles de provoquer des dégâts sur les tiges affaiblies. En particulier il faut récolter les bois scolytés avant la sortie de la deuxième génération d'insectes, afin de limiter l'es-

sor des populations. Dans le cas du typographe de l'épicéa (*Ips typographus*), la pullulation permet même la réussite d'attaque sur des arbres sains, transformant ce parasite de faiblesse en ravageur primaire (Nageleisen, 2005). Pour connaître les éléments diagnostics et les méthodes de lutte, on se référera aux fiches du Département Santé des Forêts, disponibles sur internet.

D'une façon générale, les arbres déjà affaiblis par la sécheresse sont particulièrement vulnérables en cas d'attaques de ravageurs (cf. Piou *et al.*, ce même numéro). Une invasion de chenilles, contre laquelle le forestier n'interviendrait pas en temps normal, peut justifier une lutte active dans un peuplement ayant souffert de la sécheresse à une ou plusieurs reprises au cours des années récentes.

Dans tous les cas, on se conformera aux prescriptions du Département Santé des Forêts, auprès duquel on pourra prendre un conseil spécifique.

## Composer des peuplements adaptés

### Bien choisir l'essence objectif

L'action principale du forestier face au risque de sécheresse consiste à implanter ou favoriser des espèces adaptées aux conditions du milieu :

■ climat (en particulier bilan hydrique en période de végétation, c'est-à-dire différence entre pluies et évapotranspiration potentielle),

■ sol (profondeur, réserve utile estimée à partir des textures des différents horizons prospectables),

■ position topographique.

Les exemples de mauvaises introductions sont nombreux : par exemple, la vague de plantation de feuillus précieux (merisier, noyer,...) engagée dans les années 1980 et 1990 a induit de nombreuses plantations sans avenir car implantées dans des milieux qui ne convenaient pas à ces essences exigeantes tant pour l'alimentation hydrique que minérale. De même, les dégâts observés sur douglas et mélèze lors de 2003 montrent bien la prudence

qu'il faut avoir pour l'utilisation de ces essences dans les plaines de l'Ouest de la France.

Par ailleurs, on ne le répétera jamais assez, les chênes pédonculés installés sur des stations inadaptées payent un lourd tribut à chaque sécheresse. Dans les chênaies comportant, pour des raisons historiques (anciens TSF notamment) une forte proportion de pédonculés hors station, il faut exercer un effort constant pour réduire la proportion des pédonculés, qui ont naturellement tendance à reprendre le dessus à chaque régénération, par la vigueur de leur croissance juvénile. On n'hésitera pas à marteler ce type de peuplement à la feuille, au stade des premières éclaircies (alors que le sous-étage est encore discret) pour pouvoir favoriser les chênes sessiles.

C'est principalement au moment de la révision du document d'aménagement que les questions de choix des essences sont étudiées ou lors des phases de rédaction des Directives Régionales (SRA, DRA). Il convient ensuite de faire un diagnostic précis lors de la mise en régénération (naturelle ou artificielle) et de confronter les caractéristiques de la parcelle avec les conditions d'autécologie des essences envisagées comme essences objectif.

### Veiller à la provenance et à la qualité génétique

Lorsqu'on renouvelle par plantation, une attention particulière doit être portée à la « provenance » des plants et donc leur origine et qualité génétique : une grande diversité génétique (« base génétique large »), gage d'une grande capacité d'adaptation, est généralement considérée comme une sécurité. Le principe généralement admis consiste à privilégier la région de provenance à laquelle appartient le site.

Le classeur « Conseils d'utilisation de matériels forestiers de reproduction » (octobre 2003), coordonné par le Cemagref est une référence essentielle pour le choix des provenances à utiliser en reboisement. Ces conseils sont valables même si le changement clima-

### Des stratégies différentes

Le manque d'eau dans le sol induit dans l'arbre un ensemble de réactions physiologiques, la première de ces manifestations étant la réduction de la transpiration par la fermeture des stomates. Lorsque le déficit hydrique est installé, les différentes espèces y font face avec des stratégies différentes.

Le frêne, le noyer, le peuplier ou le bouleau, mal armés contre la sécheresse édaphique, régulent mal leur consommation d'eau, et en sont parfois réduits à sacrifier leurs feuilles, au prix d'un arrêt total des échanges gazeux (photosynthèse et transpiration) pour la saison de végétation en cours, signifiant un arrêt prématuré de fabrication des composés de réserve. Ceci peut compromettre la reprise de végétation au printemps suivant.

D'autres, comme les pins, sont prudentes, et ferment précocement leurs stomates, ce qui réduit leur consommation d'eau, mais aussi leur croissance. D'autres encore maintiennent leur croissance à des **potentiels hydriques** plus bas, et tolèrent une part d'**embolie**, comme les chênes sessile ou pédonculé.

Enfin certaines espèces sont capables de supporter sans dommage un dessèchement important des tissus, comme les espèces méditerranéennes : Cèdres, Chêne vert, chêne pubescent, Pin d'Alep ou le Pin de Salzman. Ces différents exemples permettent de comprendre pourquoi il est difficile de classer les espèces selon un axe unique de résistance à la sécheresse édaphique, et que le choix des espèces doit aussi se raisonner en référence aux caractéristiques précises de la station. Ainsi, à réserve utile égale, un sol filtrant profond sera plus propice au chêne, dont la résistance à la sécheresse tire parti de la puissance de son enracinement, qu'un sol argileux superficiel. Le choix des espèces doit aussi tenir compte des objectifs de la gestion : maintien d'un couvert résistant à des sécheresses sévères ou recherche d'une production soutenue en année normale peuvent conduire à des choix très différents.

**Potentiel hydrique** : Il caractérise l'énergie qu'il faut développer pour extraire l'eau d'un volume unitaire de matière (cette grandeur est homogène à une pression). Le potentiel hydrique des tissus de l'arbre est égal à celui du sol en l'absence de transpiration (avant le lever du soleil), et devient inférieur lorsque la transpiration s'amorce.

**Embolie** : En dessous d'une valeur seuil dépendant des essences (en fait des caractéristiques hydrauliques de leurs tissus conducteurs), il y a rupture des colonnes d'eau dans les vaisseaux (cavitation), et entrée d'air. Les vaisseaux embolisés ne peuvent plus conduire l'eau. La perte de feuilles vertes chez certaines essences traduit une embolie des vaisseaux conducteurs des pétioles.

parti a l'avantage, en cas d'effet brutal du changement climatique, d'atténuer des situations de dépérissement traumatisantes, ou de permettre la recolonisation du peuplement « mité », par les composantes résistantes du mélange.

Néanmoins la conduite de ce type de peuplement est souvent délicate et insuffisamment maîtrisée. Par ailleurs, il ne faut pas négliger les autres facteurs d'exposition à la sécheresse du peuplement : un peuplement mélangé mal géré (par exemple trop dense, ou de composition inadaptée ou instable) peut être plus exposé qu'une futaie régulière bien conduite.

### Améliorer la résistance des peuplements

#### Respecter les règles de plantation et protéger les régénérations

Si l'on choisit de régénérer par plantation dans une station présentant des risques de sécheresse, il conviendra d'être attentif à la conception du chantier, au conditionnement et à la mise place des plants, puis à l'entretien de la plantation :

■ **Conception du chantier** : Le maintien d'abri peut préserver un microclimat plus frais. Ainsi, dans une clairière dont le diamètre est de l'ordre de deux à trois fois la hauteur du peuplement environnant, l'évapotranspiration potentielle est significativement réduite par rapport à un plein découvert (Aussenac, Bréda, 2006).

■ **Choix des types de plants** : l'âge, la hauteur et le mode d'élevage des plants sont importants à étudier. Depuis 15 ans, on assiste dans ce domaine à une certaine évolution des pratiques avec notamment une part grandissante des plants en conteneurs, aux dépens des plants à racines nues. L'avantage des plants en conteneurs est relativement net pour les espèces à reprise difficile (pin laricio, pin maritime). Par contre leur faible taille (< 15 cm en résineux, < 30 cm en feuillus), leur coût et les risques de

tique n'a pas pu être pris en compte dans cette réflexion ; la connaissance sur ce sujet est aujourd'hui encore nettement insuffisante pour que l'on puisse intégrer quantitativement les différents scénarios d'augmentation de température moyenne, de variation de pluviométrie ou d'augmentation de la fréquence des événements extrêmes (froid, sécheresse, chaleur,...) dans les préconisations d'emploi des essences. Cependant, ces scénarios peuvent être pris en compte au titre du « principe de précaution », en évitant plus que jamais d'installer ou de favoriser des essences ou des provenances en conditions limites, surtout sur le plan de l'alimentation en eau.

#### Favoriser les mélanges

Nous ne pouvons entrer ici dans le débat complexe sur les mérites ou inconvénients relatifs de la futaie régulière monospécifique (dominée par une essence principale objectif) et de la futaie hétérogène (en composition et en structure) pour lequel nous renvoyons le lecteur au dossier thématique de RDVT n° 10. Cependant, il paraît recommandable de rechercher le mélange des peuplements dans les situations où le choix de l'essence principale est délicat, ce qui devrait améliorer la résilience de ces peuplements, c'est-à-dire leur capacité à se rétablir après un aléa. Dans le cas d'essences compatibles et adaptées au milieu, ce

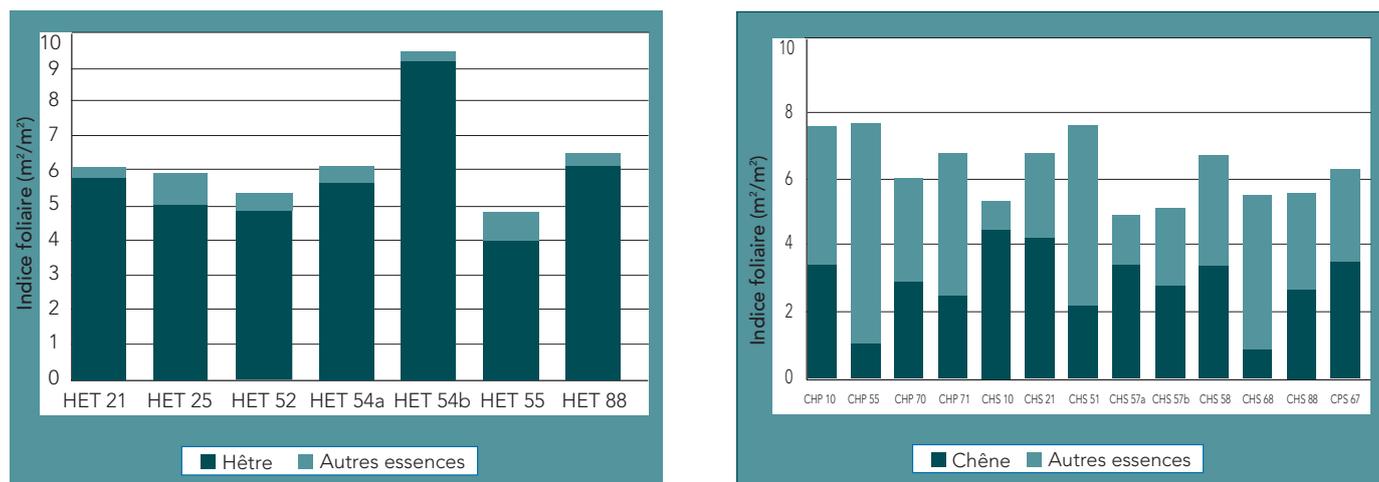


Fig. 2 : exemples de valeurs d'indices foliaires en chênaies et en hêtraies pour quelques placettes RENÉCOFOR en 1996. L'indice foliaire a été déterminé à partir des collectes de feuilles et permet de distinguer la contribution de l'essence principale (chêne ou hêtre) des essences d'accompagnement. (Adapté d'après Bréda, 2003, *Journal of Experimental Botany*, 54, 392)

déformations racinaires (donc de mauvaise stabilité à terme) sont autant de facteurs négatifs à regarder de près. Sur ce point, l'évolution des techniques d'élevage et notamment l'utilisation des « paniers ajourés » limite sensiblement les risques de déformation réhibitoire des systèmes racinaires. Dans les stations à fort déficit hydrique estival, le choix de conteneur de grand volume assure généralement une meilleure reprise.

■ **Transport et mise en jauge ou conservation sur le chantier** : ce sont aussi des étapes importantes : il faut absolument éviter le dessèchement des parties racinaires.

■ **Mise en terre** : une mise en terre soigneuse est un gage de réussite de la plantation. Le potet ouvert, ou au moins travaillé, garantit un bon positionnement des racines et une bonne cohésion racine-sol. Un tassement modéré achève la mise en terre : le planteur forestier tasse souvent du bout du pied ou du talon ; les jardiniers préconisent l'arrosage comme moyen de tasser la terre.

La vitalité d'une plantation et sa résistance à un épisode de sécheresse sont largement dépendantes de ces opérations et des choix successifs. Le raisonnement basé uniquement sur la minimisation des coûts immédiats (des

plants, de la mise en place) est généralement un mauvais calcul !

Enfin, au cours des premières années suivant la plantation, le contrôle de la végétation adventive est déterminant. C'est aussi valable pour les régénérations naturelles : il y a compétition pour l'eau et pour la lumière entre les végétaux herbacés, semi-ligneux ou ligneux qui colonisent les zones de régénération et de découvert et les semis ou les plants installés, dont les racines, encore superficielles, exploitent les mêmes horizons.

Ainsi, des dégagements manuels mécaniques et/ou chimiques doivent être programmés : l'absence d'entretien est trop souvent responsable de mortalité et disparition des semis et plants. De nombreux exemples et résultats d'essais démontrent l'efficacité des dégagements notamment chimiques. Bien sûr, l'utilisation des herbicides doit être raisonnée : elle ne doit pas devenir systématique ; elle nécessite des applicateurs et gestionnaires bien formés, attentifs et raisonnables. Les herbicides sont des outils, au même titre que les outils de préparation (broyeurs, travail du sol) et de dégagement (du croissant au broyeur) : ils sont à utiliser à bon escient. La note technique « Herbicides pour la forêt » du Cemagref, dont la mise à jour paraîtra courant 2006, constituera à ce titre une référence utile.

### Adapter la sylviculture des peuplements en place

En ce qui concerne les peuplements adultes, de nombreux résultats montrent que la sylviculture peut modifier leur régime hydrique, en agissant sur leur évapotranspiration, sur l'interception des pluies ou sur les conditions microclimatiques.

En particulier, la demande en eau des peuplements est proportionnelle à leur indice foliaire (la surface cumulée des feuilles du peuplement ramenée à la surface occupée au sol par le peuplement). De même, l'interception des précipitations est dépendante de cet indice. Or il peut varier dans une gamme importante, en fonction notamment de la sylviculture (figure 2). Il n'est pas simple, pour autant, de relier l'indice foliaire aux caractéristiques dendrométriques du peuplement (densité et surface terrière).

**Dans les stations soumises au risque de sécheresse, des éclaircies énergiques et régulières doivent contrôler la surface foliaire.** Dans les peuplements comportant un sous-étage dense (en particulier les peuplements issus de taillis sous futaie en voie de régularisation), les éclaircies doivent **intervenir également dans le sous-étage, et éviter en particulier qu'il ne rejoigne l'étage principal.** Il ne s'agit donc pas de réduire les peuplements à

une seule strate, mais de maintenir dans toutes les strates une densité compatible avec les ressources en eau disponibles, faute de quoi la mortalité naturelle se chargera de rétablir l'équilibre à la prochaine sécheresse.

Faut-il craindre que ces éclaircies portant à la fois sur l'étage principal et sur le sous-étage ne favorisent une strate herbacée gourmande en eau ? Il a pu être montré (Bréda et Peiffer 1999) que la concurrence pour l'eau de la couverture herbacée n'était pas réellement limitante pour les peuplements adultes, car la transpiration des herbacées, maximale au début du printemps, se réduit ensuite avec la feuillaison du couvert arboré (figure 3 page suivante). Par ailleurs, les herbacées prospectent des horizons plus superficiels et sont moins performantes pour extraire l'eau du sol que les arbres.

### Mais aussi préserver les sols en évitant le tassement

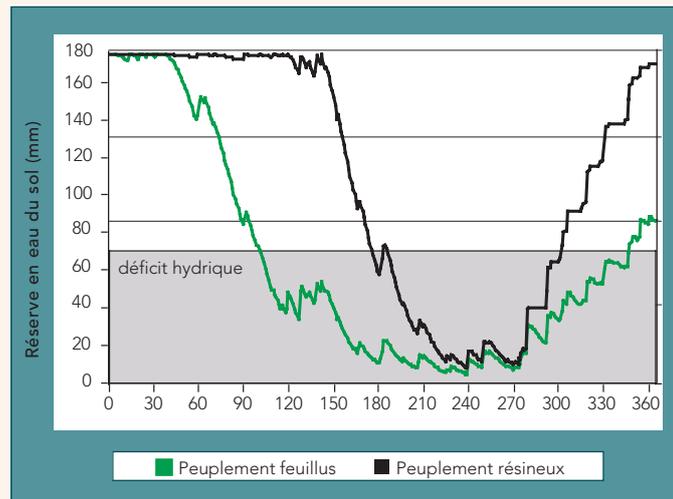
Le tassement des sols altère leur structure et écrase les porosités, notamment les macroporosités permettant la circulation de l'air et le drainage des excès d'eau. Non seulement les racines en place sont abîmées, mais le développement racinaire ultérieur est entravé, par l'augmentation de la résistance des sols à la pénétration, et par la réduction des échanges gazeux. Cette altération de l'enracinement réduit la capacité des arbres à extraire l'eau du sol en période de déficit hydrique.

Préserver les sols est donc une action importante pour maintenir le potentiel de résistance à la sécheresse des peuplements : en prévoyant des cloisonnements de débardage, en régulant l'accès des engins aux parcelles sensibles lorsque les sols sont engorgés ou mieux encore, en développant des techniques de débardage à faible impact, les gestionnaires peuvent limiter ou éviter les dégâts d'exploitation, qui ne doivent pas être considérés comme une fatalité (cf. dossier « Tassements du sol dus à l'exploitation forestière », RDVT n° 8).

## Ce p è r e s

### ■ Sécheresse climatique et sécheresse dans le sol

La sécheresse ressentie par les arbres à une date donnée ne dépend pas directement du **déficit hydrique climatique**, mais de l'état des réserves en eau du sol. Celui-ci dépend de la capacité de stockage en eau du sol, de la quantité de pluie arrivée au sol et des prélèvements faits par les arbres eux-mêmes.



Graphique : évolution calculée du contenu en eau du sol au cours de l'année 2003 sous peuplement feuillu et résineux, sur un sol à forte réserve utile (180 mm). Données climatiques sources : Météo France, station de Tomblaine (54). (D'après Bréda et al., *Revue Forestière Française*, 2004) : Le feuillage persistant des résineux **intercepte** toute l'année une partie des pluies et transpire, c'est-à-dire consomme de l'eau plus tôt en saison que celui des feuillus : les résineux connaissent, à station égale, une période de déficit hydrique plus longue, généralement tolérée grâce à une résistance plus grande de leur système conducteur.

- **Évapotranspiration potentielle** : Elle est définie comme la transpiration d'un couvert végétal fermé bien alimenté en eau. Elle dépend de l'humidité de l'air, de la température, du vent et du rayonnement. L'évaporation réelle est inférieure ou égale à l'ETP.
- **Déficit hydrique climatique** : C'est le bilan des pluies moins l'évapotranspiration potentielle (ETP). Ainsi défini, le déficit hydrique est donc uniquement lié au climat du lieu.
- **Réserve utile** : C'est la quantité d'eau maximale stockée dans un sol qui peut être mobilisée par la végétation. Elle dépend de la profondeur prospectable par les racines, ainsi que de la charge en éléments grossiers, de la texture, et de la densité des différents horizons.
- **Interception des précipitations** : quantité d'eau retenue par le feuillage lors d'une pluie et réévaporée sans atteindre le sol.

### Conclusion et perspectives

En conclusion, le gestionnaire doit jouer un rôle actif dans le façonnage de peuplements plus résistants à la séche-

resse, en particulier au stade du choix des essences en fonction des contraintes de la station, et dans la conduite des peuplements en place.

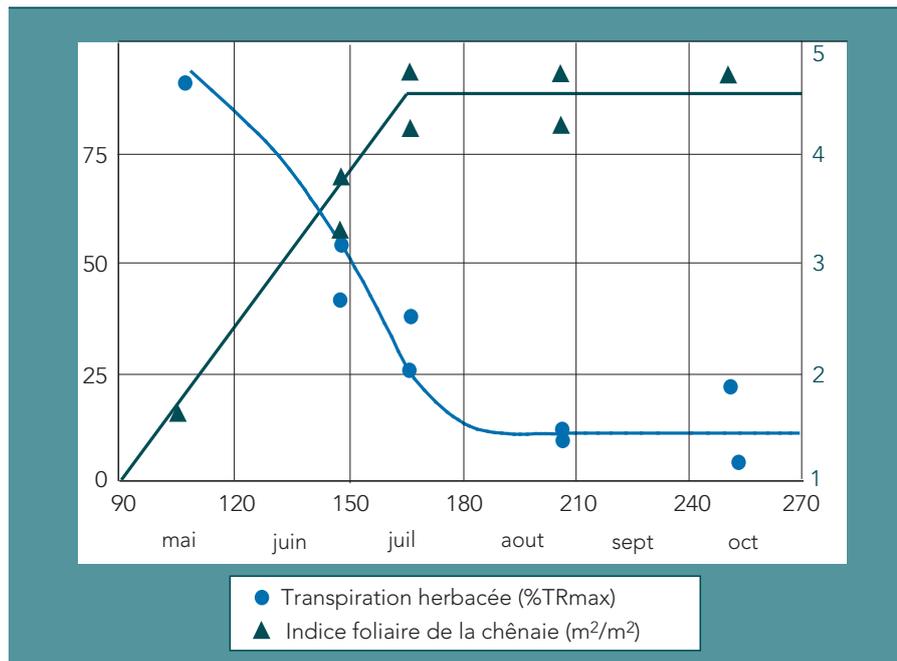


Fig. 3 : exemple d'évolution saisonnière de la transpiration herbacée (à base de pâturin des bois ou de houlque molle) en forêt domaniale de la Harth. L'évolution de l'indice foliaire du peuplement (futaie sur souche de chêne sessile) est représentée. (D'après Bréda et Peiffer, 1998)

L'effort d'expérimentation et de développement sur les techniques de plantation, qui s'est nettement ralenti depuis une dizaine d'années, mériterait d'être repris et adapté aux exigences sociales et économiques actuelles (réduction des moyens et souci croissant de respect du milieu), ainsi qu'à l'évolution des techniques de production des plants.

Quant aux connaissances relatives à l'autoécologie des essences, elles mériteraient la mise au point de synthèses pratiques et d'outils d'aide à la décision, ainsi que la reprise de travaux d'écophysiologie comparative.

La mise au point d'itinéraires sylvicoles prenant en compte la surface foliaire ouvre quant à elle un champ nouveau à la recherche forestière pratique. Il reste à introduire le « LAI » (= leaf area index ou surface foliaire), ce paramètre clef du fonctionnement des peuplements forestiers, dans les expérimentations sylvicoles voire les modèles de croissance, afin de mieux connaître son dosage en fonction de la sylviculture, et de mettre au point des itinéraires sylvicoles prenant en considération le régime hydrique du peuplement.

Les dispositifs de la coopérative de données sur la croissance des peuplements forestiers, dans lesquels l'ONF s'implique activement depuis 14 années, aux côtés de ses partenaires de la recherche scientifique, semblent un terrain idéal pour développer ces investigations.

**Myriam Legay,**

Chargée de recherche développement INRA/ONF, interface R&D changement climatique

**Christian Ginisty,**

CEMAGREF, Ecosystèmes forestiers, Les Barres

**Nathalie Bréda,**

INRA Ecologie et Ecophysiologie Forestières, Nancy

## Bibliographie

AUSSENAC G., BRÉDA N., 2006 : Adapter la sylviculture aux contraintes hydriques, Revue Forestière Française, n° spécial Journées Scientifiques et Techniques de l'INRA 2005 (à paraître).

BRÉDA N., PEIFFER M., 1999 : Etude du bilan hydrique des chênaies de la

Forêt Domaniale de la Harth (Haut-Rhin) et impact des épisodes de sécheresse sur la croissance radiale des chênes. Programme INTERREG II, Rapport final convention ONF-INRA, juillet 1999, 60 p.

BRÉDA N., GRANIER A., AUSSENAC G., 2004 : La sécheresse de l'année 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiologique et influence sur les arbres forestiers. Revue Forestière Française LVI-2, 109-131.

BRETHES A., CHARNET F., 2005 : Pour une gestion respectueuse des sols, Rendez-Vous Techniques n° 8, pp 24-26.

FLOT J.L., 2004 : Sécheresse et canicule 2003 : du diagnostic à la gestion, Rendez-Vous techniques n° 3, pp 56-60.

GAMA, A (à paraître en 2006) : Herbicides pour la forêt, note technique du Cemagref.

MAPAAR. Direction générale de la forêt et des affaires rurales, Cemagref 2003. Conseils d'utilisation des matériels forestiers de reproduction : régions de provenance, variétés améliorées. 174 p.

MORTIER F., CHOPART J.C., SARDIN T., 2005 : Conséquences de la sécheresse et de la canicule 2003 : bilan pour les plantations des forêts publiques en 2004, Rendez-Vous Techniques n°8, pp 52-56.

NAGELEISEN L.M., 2005 : Insectes sous-corticaux, des mortalités record dans l'Est de la France en 2004, Département Santé des Forêts.

RANGER J., LAMANDÉ M., LEFÈVRE Y., 2005 : Perturbations au sol liées à l'exploitation forestière et conséquences pour l'écosystème, Rendez-Vous Techniques n° 8, pp 27-35.

SARDIN T., 2004 : Ma régénération est-elle réussie ?, Rendez-Vous Techniques n° 4, pp 15-16.

# Sécheresse et biodiversité forestière : un sujet à défricher

*La réponse de la biodiversité forestière à la sécheresse et à la canicule est mal connue. La flore y semble cependant particulièrement résistante. Des sécheresses récurrentes auront certainement des conséquences à long terme pour la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes, mais il est difficile d'en prédire l'ampleur.*

La spectaculaire défoliation des arbres qu'a provoqué la sécheresse/canicule en 2003 a soulevé plusieurs interrogations sur l'impact de la sécheresse et de la canicule sur la biodiversité forestière :

- comment les espèces surmontent-elles ces épisodes climatiques extrêmes ?
- les conséquences sur la biodiversité perdurent-elles et altèrent-elles le fonctionnement des écosystèmes forestiers ?
- doit-on s'attendre à des bouleversements dans les décennies à venir avec des sécheresses plus fréquentes et plus intenses ?

Si les mécanismes qui permettent aux organismes de survivre à ces événements climatiques exceptionnels sont relativement bien connus, on sait en revanche peu de chose sur les conséquences des sécheresses - et encore moins de la canicule - sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes forestiers. En effet, les recherches se sont surtout focalisées en milieu prairial. En milieu forestier, les études portent surtout sur les essences productives et leurs pathogènes, en particulier en zone méditerranéenne. Enfin, ces études documentent essentiellement des changements à court terme - moins de dix ans après une sécheresse naturelle ou expérimentale - ; les réseaux de suivis de la biodiversité sont également trop récents pour documenter des changements à moyen ou à long terme provoqués par des sécheresses naturelles.



L.-M. Nagelaisen

*Exemple d'évitement : défoliation d'un chêne pédonculé dans les Vosges  
Août 2003*

## Éviter la sécheresse, y résister ou disparaître

En période de sécheresse et de canicule, les organismes doivent impérativement limiter les pertes d'eau (stress hydrique) et l'impact des fortes radiations UV qui désorganisent les tissus (stress oxydant). Différentes adaptations morphologiques, physiologiques, écologiques ou comportementales permettent aux organismes soit d'échapper à la sécheresse (par exemple en recherchant des zones humides pour un organisme mobile),

soit d'y faire face (par exemple, en limitant ses déplacements en journée) (Tableau 1). Les animaux à sang chaud comme les mammifères supportent mal les fortes températures mais peuvent se réfugier dans des zones moins exposées. Les animaux à sang froid, comme les reptiles ou les insectes, sont moins mobiles mais, en revanche, supportent mieux les fortes températures. Les plantes ont développé des adaptations physiologiques et morphologiques parfois complexes leur permettant de compenser, au moins partiellement, leur immobilité, comme un enraci-

Organisme	Évitement de la sécheresse	Résistance à la sécheresse
Animal	Déplacements vers des lieux moins exposés Diapause estivale	Contrôle de la respiration et de la transpiration
Végétal	Fermeture des stomates Défoliation rapide Adaptations morphologiques Banque de graines	Production de composés antioxydants Changement de la composition des membranes cellulaires

Tab. 1 : mécanismes d'évitement et de résistance à la sécheresse.

nement profond, des feuilles petites, avec une cuticule épaisse ou pourvues de poils. Une stratégie extrême, suivie par certaines espèces d'insectes et de plantes, consiste à passer l'été en vie ralentie sous forme d'œuf, de larve ou même d'adulte, ou de graines. Ce phénomène est connu chez les insectes sous le terme de diapause estivale, c'est le cas par exemple de la grande tortue, un grand papillon orangé qui passe l'été au repos dans des endroits ombragés.

Les facteurs qui prédisposent les individus à l'impact de la sécheresse sont nombreux (Tableau 2). Il est ainsi bien connu que les arbres les plus jeunes (plantations) et les plus vieux sont ceux qui paient le plus lourd tribut aux sécheresses. S'il semble y avoir un certain lien entre la biodiversité et la résistance à la sécheresse de l'écosystème prairial, ce lien n'a jamais été étudié en milieu forestier ; on ne sait donc pas si des écosystèmes forestiers dégradés par les activités humaines sont plus sensibles à la sécheresse que des écosystèmes plus préservés.

### À court terme, des impacts contrastés selon les groupes taxonomiques

La photosynthèse permet aux plantes de constituer les réserves énergétiques nécessaires à la croissance et à la reproduction de la plante, ainsi qu'au débourrement l'année suivante pour les espèces vivaces. En période de sécheresse, la fermeture des stomates réduit l'activité photosynthétique des plantes ; si les conditions climatiques deviennent à nouveau favorables, la photosynthèse peut reprendre un niveau normal. À un stade de stress hydrique plus avancé, la défoliation

provoque l'arrêt irréversible de la photosynthèse (jusqu'au printemps suivant). La baisse de l'activité photosynthétique, qui stoppe la croissance des plantes, et l'augmentation de la mortalité entraînent presque toujours une diminution significative de la productivité des écosystèmes forestiers en période de sécheresse. S'y ajoute fréquemment une baisse de la fécondité qui peut altérer la dynamique de l'espèce. L'activité bactérienne est également diminuée : au final, c'est tout l'écosystème qui fonctionne au ralenti. Cependant, le programme RENECOFOR de suivi à long terme de la végétation forestière a montré que la sécheresse et la canicule 2003 ont eu un impact modéré sur la composition des communautés végétales à court terme (Fig. 2 de l'Encadré).

Un suivi analogue est effectué annuellement en France sur les oiseaux nicheurs communs (programme STOC). Ce programme a montré que la majorité des espèces forestières, et en particulier les espèces granivores,

sédentaires et migratrices transsahariennes, ont connu un succès de reproduction en 2003 supérieur à la moyenne malgré la très forte sécheresse printanière. Cependant, cet effet bénéfique de la sécheresse sur la reproduction est moins net pour les espèces migratrices partielles (qui n'hivernent pas en Afrique subsaharienne), pour les espèces se nourrissant de vers de terre et d'escargots comme la grive musicienne et surtout pour les espèces déjà en déclin comme les mésanges nonnette et boréale, le pouillot fitis ou le bouvreuil pivoine. Les espèces forestières en déclin sont souvent soit des espèces spécialistes, soit des espèces en limite sud de répartition chez nous. Enfin, la sécheresse qui a sévi en 1995 en Angleterre a favorisé plus d'espèces de papillons, de carabes et de plantes qu'elle n'en a défavorisées. Les insectes les plus mobiles et/ou liés aux milieux chauds et secs et les plantes annuelles et bisannuelles ont été les plus favorisés.

Niveau	Facteur
Organisme	Emplacement (exposition, limite de distribution) Age
Espèce	Morphologie (taille des feuilles, organes souterrains de stockage, profondeur de l'enracinement) Préférences écologiques (milieux frais ou secs) Taux de reproduction Niveau de mobilité Possibilité de diapause Capacité compétitive et le niveau de compétition
Ecosystème	Niveau d'intégrité Risque potentiel d'incendie, de pollution chimique, d'attaque de pathogènes ou d'invasion par des espèces exotiques

Tab. 2 : facteurs qui interviennent dans la susceptibilité à la sécheresse des organismes, des espèces et des écosystèmes forestiers.

**Le réseau RENECOFOR : un outil pertinent pour suivre les variations interannuelles de la végétation**

Quel est l'impact de la variabilité interannuelle du climat sur la végétation herbacée forestière ? Est-ce que la richesse spécifique, la composition en espèces des communautés ou leur valeur indicatrice changent d'année en année, et quelle est l'amplitude de ces variations ? Quelle est finalement la fréquence optimale d'échantillonnage pour le suivi à long terme des modifications de la végétation ? Afin de répondre à ces questions, la végétation herbacée fait l'objet d'un suivi annuel depuis 10 ans dans 14 placettes du réseau Renecofor. Chaque placette a été échantillonnée une ou deux fois par an, selon la région climatique. Dans chaque site, huit sous-placettes de 100 m<sup>2</sup> ont été inventoriées. Les analyses, encore en cours, montrent 2 résultats principaux :

- après une phase initiale d'augmentation, d'autant plus forte et longue que la placette est riche, on observe une stabilisation du nombre cumulé d'espèces observées (figure 1). Cette augmentation initiale, qui peut durer jusqu'à 5 ans, est principalement due à un effet « apprentissage » des observateurs et secondairement à l'apparition d'espèces dites accidentelles.

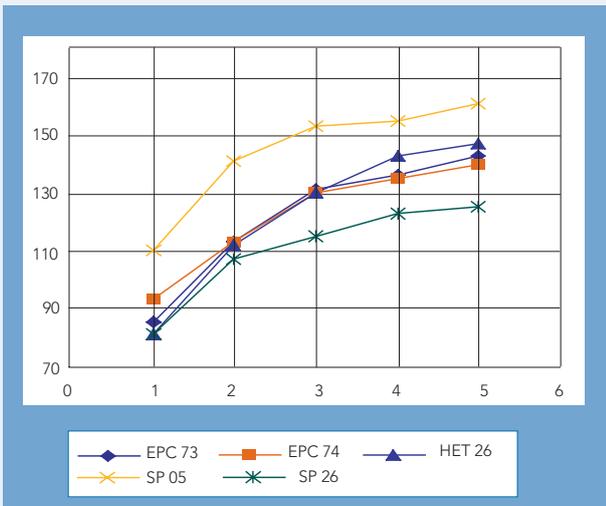


Fig. 1 : nombre cumulé d'espèces observées dans 5 placettes du réseau Renecofor, au cours des 5 premières années d'observation.

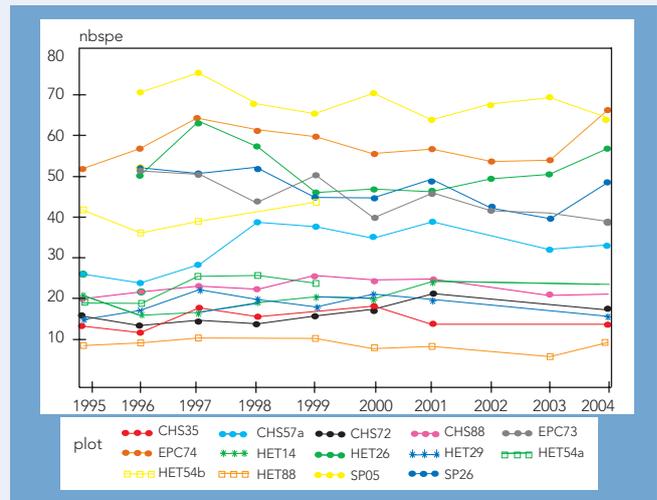


Fig. 2 : nombre d'espèces observées chaque année dans les strates herbacée et arbustive basse de 14 placettes du réseau Renecofor.

- en dehors de cette phase, le nombre d'espèces observées reste stable d'une année à l'autre (figure 2). Les variations ne portent que sur les espèces à très faible fréquence de présence. Durant les années de forte sécheresse, la richesse en espèces décroît légèrement, surtout en fin de saison et dans la strate muscinale. Mais la valeur indicatrice des communautés est peu affectée par ces variations.

En conclusion de ces résultats préliminaires, les communautés végétales des forêts tempérées, très largement dominées par les espèces pérennes, ne montrent donc que peu de variabilité inter-annuelle, ce qui accroît leur intérêt dans le cadre de la surveillance des dérives à long terme de l'environnement. Le principal enjeu de cet outil reste la maîtrise des effets observateurs, du moins au cours des premières répétitions d'observations et pour l'estimation de la richesse en espèces.

**Jean-Luc Dupouey & Jean-François Picard, INRA-Nancy**  
**Jean-François Dobremez, Laurence Bourjot & Sylvaine Camaret, Université de Chambéry**  
**Françoise Forgeard & Myriam Lebret, Université de Rennes**  
**Erwin Ulrich, ONF-Fontainebleau**

**À moyen terme, des conséquences qui peuvent perdurer**

Les plantes qui ont souffert lors de la sécheresse peuvent en porter longtemps les stigmates ; c'est le cas notamment des espèces qui vivent longtemps,

comme les ligneux. Fragilisés, ils deviennent alors particulièrement susceptibles aux attaques de pathogènes ou aux autres perturbations naturelles. Le bois mort créé par la sécheresse (arbres morts ou branches mortes sur pied ou au sol) doit logiquement favoriser les espèces qui en dépendent (insectes et champi-

gnons saproxyliques, mousses, oiseaux cavernicoles comme les mésanges ou les pics...), même si le phénomène n'a pas encore été étudié. En milieu prairial, les sécheresses contiennent les plantes les plus compétitives, qui ont tendance à constituer des tapis monospécifiques comme les graminées ; les sécheresses

permettent ainsi à des espèces à fortes capacités de colonisation, comme les plantes disséminées par le vent (cas des épilobes et des séneçons), mais peu compétitives de s'installer.

La récurrence de sécheresses maintiendrait ainsi une partie de la biodiversité, tant que la fréquence et l'intensité des sécheresses demeurent modérées. Il n'est pas exclu qu'il en soit de même dans les jeunes peuplements forestiers ou les peuplements clairs où la compétition entre espèces est forte.

## À long terme, beaucoup d'incertitudes

On n'a que très peu d'idées sur l'impact qu'auront les sécheresses répétées que nous prédisent les climatologues dans les décennies à venir. Ces sécheresses s'accompagneront en effet d'autres changements de grande ampleur (que l'on regroupe sous le terme de changement global au sens de changement affectant tout le « globe » terrestre). Certains de ces changements sont prévisibles, comme l'augmentation de la fréquence des tempêtes ou des inondations hivernales ; d'autres sont en revanche imprévisibles, comme l'ampleur de la dégradation des habitats.

Aussi en est-on réduit à formuler des prédictions très générales et essentiellement qualitatives sur l'impact à long terme des sécheresses sur la biodiversité. Il est vraisemblable que certaines espèces méridionales adaptées aux nouvelles conditions climatiques pourront coloniser de nouveaux territoires devenus favorables, tandis que d'autres, en limite sud de répartition disparaîtront. Les capacités de dispersion des espèces joueront un rôle majeur dans ces phénomènes. La sélection naturelle des individus les plus résistants ne suffira probablement pas à maintenir localement des espèces sensibles à la sécheresse ou en marge de distribution. En effet, le phénomène semble trop rapide et trop intense. Par ailleurs, l'examen des pollens fossiles a montré que les exigences climatiques de nombreuses essences forestières sont remarquablement stables depuis des dizaines de milliers d'années au moins, malgré des changements brusques et forts du climat qu'ils ont pu connaître (par exemple, le petit

âge glaciaire qui a duré 400 ans du début du 15<sup>e</sup> siècle au milieu du 19<sup>e</sup> siècle).

## Sécheresse ou diminution de l'âge d'exploitabilité : quel moindre mal ?

Compte tenu de ce que la sécheresse et la canicule 2003 ont apparemment eu peu de conséquences sur la biodiversité forestière, il semble prématuré de préconiser des pratiques de gestion qui limiteraient l'impact de sécheresses futures.

Par contre, nous pensons qu'il est nécessaire de s'attarder sur les recommandations que donnent les économistes de dynamiser la sylviculture en intervenant plus fréquemment dans les peuplements et en raccourcissant les cycles sylvicoles pour prévenir les pertes financières causées par la mortalité d'arbres d'avenir sous l'effet de perturbations devenant plus fréquentes et plus violentes. Si l'ouverture des peuplements forestiers peut constituer une opération favorable pour une partie de la biodiversité - la lumière constitue en effet le principal élément limitant pour la flore -, il en va autrement concernant la réduction de la durée des âges d'exploitabilité. En effet, la sylviculture axée sur la production de bois à son optimum économique court-circuite déjà les stades forestiers les plus vieux au détriment de la biodiversité forestière qui est liée au bois mort ou pourrissant, comme les insectes saproxyliques et les oiseaux cavernicoles. Il n'est pas impossible que les orientations sylvicoles mises en œuvre pour diminuer l'impact des sécheresses sur les peuplements forestiers en raccourcissant les âges d'exploitabilité s'avèrent aussi négatives pour la biodiversité forestière que les sécheresses elles-mêmes (au moins pour les espèces spécialistes des vieux stades forestiers). Les mesures préconisées par l'ONF depuis 1993 dans ses directives pour la prise en compte de la diversité biologique dans l'aménagement et la gestion forestière qui portent en particulier sur le mélange des essences et la conservation des stades âgés du cycle sylvigénétique (bois mort, arbres morts ou sénescents isolés de préférence de gros diamètre ou en îlots de vieux bois) sont donc plus que jamais d'actualité.

## La nécessité d'approfondir les connaissances

Les exigences climatiques des principales essences d'arbres forestiers autochtones ou introduites et de leurs pathogènes - insectes, champignons ou bactéries - commencent à être bien cernées. En couplant ces exigences climatiques aux prévisions du climat des prochaines décennies, il est d'ores et déjà possible de dessiner le futur visage de la forêt française, tel qu'il sera probablement dans cinquante ou cent ans. Ainsi les espèces méridionales, connaîtraient une forte expansion vers le nord, en particulier celles du Sud-Ouest, telle le pin maritime, tandis que le hêtre, présent actuellement dans les trois quarts du pays, se retrouverait relégué dans le Nord-Est. Les arbres de basse et moyenne montagne partiraient à l'assaut des sommets, désertant le piémont des massifs.

Néanmoins, pour la majorité des espèces animales ou végétales (hormis les arbres) forestières, les informations sur leur résistance ou leur résilience à la sécheresse ou à la canicule font toujours défaut, de même que leur capacité à coloniser des terrains favorables. En outre, le lien entre sécheresse, biodiversité et fonctionnement de l'écosystème forestier est également très mal compris. En particulier, un milieu appauvri par la gestion est-il plus sensible à la sécheresse ? Dans quelles conditions la perte de biodiversité causée par une sécheresse altère-t-elle le fonctionnement de l'écosystème ? Ou bien est-ce la perturbation du fonctionnement de l'écosystème causée par la sécheresse (comme la diminution de la minéralisation de la litière par exemple) qui est responsable de la perte de biodiversité ? De toutes ces considérations, il découle que les opérations de suivi à long terme de la biodiversité forestière, comme les programmes RENECOFOR ou STOC, doivent être maintenues - ou développées pour les groupes taxonomiques qui ne font actuellement l'objet d'aucun suivi (comme les insectes forestiers non ravageurs). Ces programmes, dont certains se mettent en place dans le cadre du projet Vigie-Nature coordonné par le Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris, permettront de documenter les changements de biodiversité ; ils pourront être



# Repères

**Perturbation naturelle** : événement naturel qui modifie brusquement l'état et le fonctionnement d'un milieu ou d'un écosystème. Les principales perturbations naturelles sont les sécheresses, les tempêtes et les incendies (même si les activités humaines peuvent en accroître la fréquence ou l'intensité).

**Résistance** : capacité à garder son état initial pendant une perturbation.

**Résilience** : capacité à retrouver l'état initial après une perturbation. Une espèce très résistante est généralement peu résiliente.

**RENECOFOR** : réseau national de suivi intensif des écosystèmes forestiers créé et coordonné par l'ONF, constitué de 102 sites d'observation permanents qui seront suivis pendant au moins 30 ans (1992-2022), en collaboration avec de nombreux instituts de recherche et universités. Il constitue la partie française d'un ensemble de placettes permanentes de suivi des écosystèmes forestiers installées dans 34 pays européens.

**STOC-points d'écoute** : programme national de « Suivi Temporel des Oiseaux Communs » basé sur des points d'écoute réalisés chaque année par des ornithologues amateurs (854 carrés de 10 points d'écoute suivis en 2003), créé en 1989 et coordonné par le Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris. Un second volet du programme STOC comprend des captures au filet.

utilement complétés à la fois par des expérimentations pour décrypter les mécanismes biologiques et par des actions de gestion adaptative associant étroitement gestionnaires et scienti-

fiques (voir encadré). À terme, ces mesures permettront de recommander des pratiques sylvicoles limitant l'impact des sécheresses sur la biodiversité.

**Frédéric ARCHAUX**

CEMAGREF Centre de Nogent-sur-Vernisson, Équipe biodiversité  
frederic.archaux@cemagref.fr

## Bibliographie

BADEAU V., DUPOUEY J.L., CLUZEAU C., DRAPIER N., 2005. Aires potentielles de répartition des essences forestières d'ici 2100. Dossier " la forêt face aux changements climatiques ". Forêt Entreprise n°162, pp 25-29.

MORECROFT M.D., BEALEY C.E., HOWELLS E., RENNIE S., WOIWOD I.P., 2002. Effects of drought on contrasting insect and plant species in the UK in the mid-1990s. Global Ecology and Biogeography n°11, pp 7-22.

SVENNING J.-C., 2003. Deterministic Plio-Pleistocene extinctions in the European cool-temperate tree flora. Ecology Letters n°6, pp 646-653.

WARDLE D.A., BONNER K.I., BARKER G.M., 2000. Stability of ecosystem properties in response to above-ground functional group richness and composition. Oikos n°89, pp 11-23.

### La gestion adaptative, un outil au service des générations futures

La gestion adaptative consiste à améliorer les pratiques de gestion à partir des leçons tirées des résultats des pratiques antérieures. Elle diffère de la gestion « adaptée » que pratiquent habituellement les gestionnaires (pour prendre en compte le contexte écologique et socio-économique) en ceci qu'elle repose sur une démarche et des outils scientifiques et surtout qu'elle inverse la flèche du temps : l'un des objectifs de la gestion adaptative est qu'elle ne se limite pas à tirer aujourd'hui des leçons du passé mais qu'elle permette à nos successeurs de tirer des leçons dans le futur.

Deux grands types de gestion adaptative sont classiquement distingués :

- la gestion adaptative passive, qui consiste à mettre en place un système de suivi de la gestion pour évaluer si une gestion pratiquée remplit les objectifs qu'elle poursuivait ; c'est à la fois la forme la plus pauvre — en termes de nouvelles connaissances — et la plus réaliste de gestion adaptative ;

- la gestion adaptative active, qui consiste à pratiquer différentes gestions en parallèle pour pouvoir les comparer les unes aux autres, par exemple en lien avec des hypothèses écologiques ; elle est difficile à mettre en place sur des surfaces importantes, et fait l'hypothèse implicite que les comparaisons ou questions identifiées aujourd'hui comme cruciales le seront encore pour les générations futures. Il est également possible de varier délibérément les gestions pratiquées, en renseignant — par exemple sur les sommiers, les SIG... — ce qui est fait, sans préjuger des questions auxquelles elles permettront de répondre (gestion adaptative pro-active).

Le contexte relationnel, institutionnel et social est probablement plus "limitant" en gestion adaptative active qu'en gestion plus ordinaire ; il ne faut donc surtout pas tendre à la généraliser à toutes les questions. Tout au plus peut-on proposer de tester cette démarche dans des contextes favorables.

Pour plus d'information, cf. GOSSELIN F., 2004. Intégrer recherche scientifique en écologie et gestion dans le cadre de l'ingénierie écologique : intérêts et limites. Ingénieries EAT n° spécial, pp113-120.

**Frédéric Gosselin, Cemagref Nogent-sur-Vernisson**

# Sécheresse et canicule : premier bilan des connaissances sur les conséquences de l'été 2003 pour les forêts françaises

**R**édigée deux saisons de végétation après l'été 2003, cette première synthèse vise à dégager en quelques points saillants les conséquences pour la forêt et le gestionnaire forestier de cet événement climatique exceptionnel. Elle s'appuie sur l'expertise « sécheresse et canicule 2003 » (Expertise dans la suite du texte) dont les principaux résultats sont développés dans les pages précédentes<sup>1</sup> (voir encadré ci-contre). Cette Expertise est pour l'essentiel appuyée sur les connaissances disponibles avant 2003 – les résultats des observations et recherches ponctuelles mises en œuvre depuis (pour partie dans le cadre de l'expertise, mais surtout issues d'initiatives spontanées) étant venues alimenter les réflexions en cours. L'état des connaissances présenté ici reste provisoire : tout le potentiel du matériel rassemblé n'a pas encore été exploité et les réflexions « transversales », qui rapprochent et confrontent les informations issues de plusieurs disciplines et différents niveaux d'approche, se poursuivent. Le lecteur pourra mesurer les progrès réalisés depuis deux ans en se reportant à l'état des réflexions à l'automne 2003 (Landmann *et al.*, 2003).

## L'été 2003, un événement climatique hors normes

Les caractéristiques de l'été 2003 (Rebetez *et al.*, ce numéro ; Dupont, 2006) en font un événement climatique majeur : ampleur géographique (une bonne partie de l'Europe occidentale et centrale), intensité des déviations de température, de rayonnement et, quoique de façon un peu moindre, des précipitations. L'analyse historique



## Repères

L'expertise « sécheresse et canicule 2003 »

■ **La demande et l'offre.** Les ministères chargés de la forêt et de l'environnement ont souhaité que la mobilisation des connaissances prenne la forme d'une expertise collective scientifique et technique. Ce souhait a trouvé une communauté scientifique déjà mobilisée puisque François Houllier, alors chef du département "Forêts et milieu naturel" de l'INRA\*, avait dès août 2003 initié des discussions avec les chercheurs français et des collègues allemands, également très concernés.

La coordination de cette expertise conjointe avec l'Allemagne a été confiée à ECOFOR, qui avait déjà coordonné sur des bases proches l'expertise sur les conséquences des tempêtes de décembre 1999. L'arrière-plan du travail a été donné par la formulation des « questions d'utilisateurs » sur la base de consultations organisées par les deux ministères commanditaires.

■ **L'animation.** L'expertise a été placée sous la responsabilité d'un groupe de pilotage franco-allemand : Guy Landmann (ECOFOR), Erwin Dreyer (INRA), et François Charnet (IDF) pour la France ; Heinrich Spiecker (Institut de recherche sur la sylviculture de l'Université de Fribourg-en-Brigau), Konstantin von Teuffel et Horst Delb (Centre de recherches forestières du Bade-Wurtemberg, Fribourg-en-Brigau) pour l'Allemagne. Sandrine Landeau (ECOFOR) a assuré les fonctions de secrétariat.

Une trentaine d'experts de 5 pays différents ont participé à l'expertise, les experts français étant les plus nombreux.

■ **Les manifestations :** une conférence franco-allemande s'adressant particulièrement aux gestionnaires et décideurs (Strasbourg, mars 2004, 100 participants), un colloque scientifique international (Fribourg-en-Brigau, novembre 2004, 115 participants) et la journée de restitution finale (Paris, décembre 2005, 140 participants).

■ **Pour en savoir plus :** en attendant les parutions prévues pour 2006, une grande partie des exposés présentés lors de ces manifestations est consultable sur le site Internet d'ECOFOR, <http://www.gip-ecofor.org>

\* devenu depuis département "Ecologie des forêts, des prairies et des milieux aquatiques" (EFPA)

classe l'été 2003 « hors normes » : il est très atypique par rapport aux étés connus depuis le début des mesures instrumentales et statistiquement les

durées de retour<sup>2</sup> associées à l'été 2003 dépassent plusieurs siècles (Dupont, 2006). En fait, s'il n'y avait la perspective des changements climatiques, il y

<sup>1</sup> Voir également sur [www.gip-ecofor.org](http://www.gip-ecofor.org)

<sup>2</sup> La durée de retour représente l'inverse de la probabilité d'occurrence de l'événement au cours d'une année quelconque. De façon imagée, elle mesure la durée moyenne qui sépare deux occurrences de l'événement.

**L'expertise collective, une démarche scientifique, une expérience humaine**

La démarche d'expertise collective est née en France il y a une dizaine d'années, d'abord à l'INSERM, puis à l'IRD (Institut de Recherche sur le Développement), au Cemagref et à l'INRA, et a été peu à peu formalisée depuis. L'idée est que, face à une situation exceptionnelle et/ou particulièrement complexe, les « décideurs » responsables de la définition ou de la mise en œuvre d'une politique publique ont besoin de s'appuyer sur des connaissances scientifiques et techniques solides.

En réponse à une question posée par un « décideur », traduite en termes scientifiques, il s'agit donc d'identifier un panel d'experts et les faire travailler ensemble pour établir un état de l'art des connaissances scientifiques dans le domaine concerné. Sous sa forme canonique, l'expertise repose très largement sur une recherche bibliographique qui permet de choisir les experts et la documentation qui va servir de base à leurs travaux les modalités varient cependant en fonction des contraintes propres à chaque expertise.

Au-delà de compétences complémentaires au service d'un objectif commun, l'expertise rassemble des hommes et des femmes pour une expérience humaine forte, entre difficultés traversées et richesses partagées. L'expertise est en effet souvent un révélateur de tensions et demande à chacun des efforts d'humilité, de compréhension et de tolérance. Dans le même temps, elle est également le lieu de vécus très positifs : générosité de ceux qui donnent leur temps sans compter, apports des cultures différentes, enthousiasme et foi des uns venant tempérer scepticisme et doute des autres, engagement de nouvelles coopérations.

La démarche d'expertise scientifique et technique repose sur la certitude de la réelle fécondité du travail collectif, certitude que l'expérience de l'expertise « sécheresse et canicule 2003 » ne dément pas.

aurait moins de raisons de s'inquiéter du retour d'un tel événement que de celui de tempêtes comme celles de 1999 ! Cette perspective change en effet profondément la façon de considérer un événement comme l'été 2003, qui de rare « hier », pourrait devenir presque banal « demain » (voir encadré page 28). Ce constat nous incite à analyser avec le plus grand soin les conséquences de ce qu'on appelle encore l'« anomalie climatique » de l'été 2003.

**Des symptômes et réactions immédiats (2003) souvent spectaculaires**

Les symptômes observés au cours de l'été et de l'automne 2003 ont été décrits par le Département de la santé des forêts (DSF) (Belrose *et al.*, ce numéro) :

- flétrissements importants de feuillages dans la moitié Est de la France (canicule exceptionnelle touchant des arbres luttant déjà contre le manque d'eau) ;
- fortes mortalités dans les plantations

récentes des régions les plus touchées par la sécheresse (Flot, 2005 ; Mortier *et al.*, 2005) ;

- rougissement de nombreux Douglas ;
- accroissement des populations de scolytes alors en baisse après une forte gradation suite aux tempêtes de 1999 (Piou *et al.*, ce numéro).

Ces symptômes, mis en parallèle avec les observations qui avaient été faites après d'autres grandes sécheresses comme celle de 1976 (Marion, 1976 ; INRA, 1977), ont rapidement fait naître l'idée que cet épisode climatique avait et aurait des conséquences sérieuses. L'effet immédiat et à court terme de l'été 2003 sur la croissance des arbres n'est pas encore quantifié. Par référence à l'importante baisse de croissance consécutive à la sécheresse de 1976 (intensité et durée), la baisse de croissance des arbres suite à l'été 2003 devrait être importante. Des mesures réalisées par l'Inventaire forestier national (IFN) dans le cadre de son nouveau plan d'échantillonnage devraient permettre d'en savoir plus dans un délai court. En termes économiques, les pertes liées à la baisse de croissance

seront probablement très supérieures aux pertes causées aux plantations (Peyron *et al.*, 2006).

**Des effets à « court » terme (2004 et 2005) qui confirment l'intensité de l'onde de choc**

En 2004 et 2005, quelques éléments ont pu nourrir un certain soulagement après les vives inquiétudes de l'été 2003 (Belrose *et al.*, ce numéro) : une grande partie des feuillus dont le feuillage avait flétri brutalement à l'été 2003 ont bien récupéré, leur état en 2004 étant sans rapport étroit avec l'intensité des symptômes en 2003 ; le pic de mortalité a surtout concerné les résineux et la mortalité a nettement reculé dès 2005 ; les mortalités de Douglas sont restées à un niveau relativement modéré.

Cependant, la comparaison des observations 2004 et 2005 avec les séries d'observations enregistrées depuis la mise en place du suivi continu de la santé des forêts tempère ces éléments.

Les *taux de mortalité* ont atteint en 2004 des niveaux jamais atteints depuis que le territoire métropolitain est surveillé chaque été à l'aide du réseau à maille carrée 16 km par 16 km (1989) : plus de 2 % par exemple pour les peuplements matures d'épicéa (9,2 %) et de châtaignier (4,5 %), ainsi que pour les jeunes peuplements de hêtre (2,9 %) et de pin sylvestre (3 %). Le taux de mortalité 2004 toutes essences confondues, près de 1 %, a atteint cinq fois le taux moyen sur les 15 dernières années. A titre de comparaison, sur le même réseau, le taux de prélèvement annuel moyen par la sylviculture est d'environ 2 % (Nageleisen, 2006). Une fraction des arbres prélevés entre deux observations pouvant concerner des arbres morts, il y a un risque de sous-estimation de la mortalité. Autre façon d'exprimer l'importance des effets à court terme de l'été 2003, la mortalité 2004 serait donc de l'ordre d'une demi-récolte annuelle à l'échelle nationale, soit nettement plus que le pic enregistré au moment de la période sèche 1989-1991 (l'importance du pic de mortalité lié à 1976 n'est pas connue).

### L'été 2003, un été comme les autres d'ici la fin du 21<sup>e</sup> siècle ?

On sait que les météorologues prévoient pour les prochaines décennies une élévation des températures et une diminution des précipitations en période estivale, et donc une augmentation des contraintes hydriques moyennes pour les arbres.

Des travaux récents menés notamment en France dans le cadre du projet IMFREX (Impact des changements anthropiques sur la fréquence des phénomènes extrêmes de vent, de température et de précipitations, MétéoFrance, EDF, CSTB, CERFACS, CNRS, IPSL) se sont concentrés sur les valeurs extrêmes dans divers scénarios de changements climatiques. Pour tous les scénarios de changement climatique considérés, il apparaît que les vagues de chaleurs estivales seront à la fois plus fréquentes, plus longues et plus intenses et que les périodes de sécheresse seront plus longues en été.

À titre d'exemple, les sorties cartographiques des modèles pour un indicateur de température et un indicateur de pluviométrie sont présentés ci-contre (modélisations selon le scénario A2 du GIEC\*, réalisées dans le cadre du projet IMFREX). Source : MétéoFrance

Une autre façon de traduire l'impact du changement climatique sur les extrêmes de températures consiste, à partir des mêmes modélisations, à analyser les étés les plus chauds. Pour la période récente, l'été 2003 fait bien sûr exception (M. Rebetz et al. dans ce volume), mais les modèles indiquent que la température moyenne estivale des 30 dernières années de ce siècle pourrait être sensiblement la même que celle de l'été 2003, et un été sur deux serait alors au moins aussi chaud que l'été 2003.

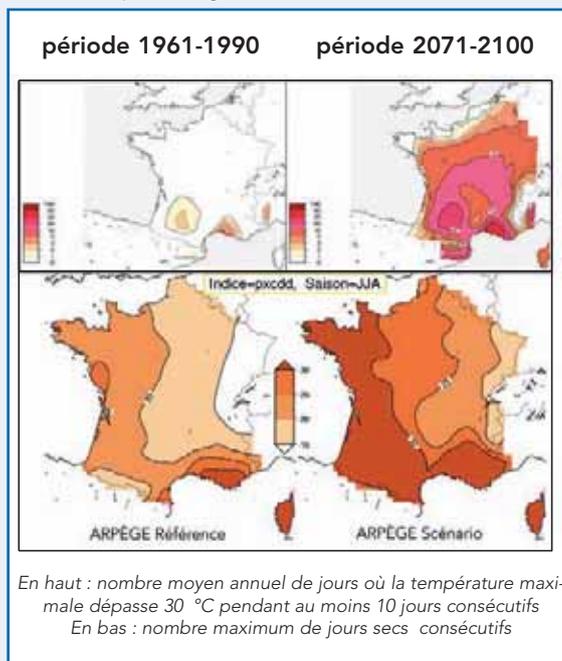
#### Pour aller plus loin :

<http://medias.cnrs.fr/imfref> : projet IMFREX financé par le programme Gestion et impact du changement climatique (GICC) du Ministère de l'écologie et du développement durable.

<http://www.greenpeace.fr/impactsclimatiques/webrapportintegral.pdf> : Changements climatiques, quels impacts en France ? Rapport scientifique. 2005, Greenpeace. Voir notamment les articles : Changements climatiques futurs en France (S. Planton, Météo France) et Impacts sur les forêts (D. Loustau et J.-L. Dupouey, INRA).

<http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/onerdocfrancaise.pdf> : Un climat à la dérive. Comment s'adapter ? Rapport de l'ONERC au Premier Ministre et au Parlement, le 24 juin 2005.

\* Ce scénario du Groupe international d'experts sur le climat correspond à un monde hétérogène, à développement économique obéissant des stratégies régionales, où la croissance économique par habitant et le progrès technologique sont plus fragmentés et plus lents que dans d'autres scénarios.



En haut : nombre moyen annuel de jours où la température maximale dépasse 30 °C pendant au moins 10 jours consécutifs  
En bas : nombre maximum de jours secs consécutifs

L'état des cimes des arbres montre une dégradation générale sur la période 2002-2005 (avec seulement une légère baisse pour les résineux en 2004). L'évolution est plus marquée pour les feuillus que pour les résineux, avec un quasi-doublement de la proportion des arbres « endommagés » (présentant un déficit foliaire de plus de 25 %) depuis 2000. Une comparaison avec la période 1989-1997 n'est pas possible en France en raison d'un changement méthodologique, mais des critères observés de façon comparable depuis 1989 montrent par exemple que la proportion de hêtres avec des feuilles anormalement petites n'a jamais été aussi forte qu'en 2004.

Une « reprise » des dépérissements (dégradation continue des cimes des arbres pouvant déboucher sur des mortalités parfois significatives) était prévisible en référence aux dépérissements notés

après les sécheresses de 1921, 1947-49, 1976, 1989-90. Elle semble d'ores et déjà effective pour plusieurs essences (chêne pédonculé, hêtre, sapin pectiné), même si son ampleur reste difficile à évaluer (Nageleisen, 2006). On signale par exemple l'accélération des récoltes accidentelles dans des forêts déjà affaiblies, à l'exemple de la forêt de Vierzon, où l'on a récolté en quelques années près de 200 000 m<sup>3</sup> de bois rond dont environ un tiers pour la seule année 2004. Dans le Nord-Est, c'est l'état sanitaire du hêtre qui suscite l'inquiétude.

### Ravageurs et pathogènes peuvent accentuer les effets de la sécheresse

Une sécheresse intense comme celle de 2003 affaiblit les arbres ; après un tel événement, l'état sanitaire des

arbres dépend de différents facteurs, dont les attaques de ravageurs et pathogènes.

L'analyse de la littérature mondiale dans le domaine de l'expérimentation (Jactel et al., 2006) montre que :

- la sécheresse n'induit pas systématiquement l'apparition ou l'aggravation des dégâts dus aux ravageurs et pathogènes en forêt ;
- les guildes de parasites réagissent différemment (les insectes défoliateurs et les piqueurs-suceurs sont plutôt défavorisés par exemple) ;
- les effets sur les ravageurs et les pathogènes (et/ou sur les interactions avec leurs hôtes) dépendent de l'intensité du déficit hydrique, ce qui est banal en soi, mais complique l'interprétation des observations car ce déficit est rarement bien connu sur le terrain.

### Télédétection et santé des forêts : toujours des promesses ?

La télédétection a été une composante importante des recherches sur le « dépérissement des forêts » au cours des années 1980 avec la mise au point d'une méthodologie éprouvée (mais une application relativement limitée) de quantification de symptômes de perte de vitalité des arbres (défoliation, altération de la couleur) en infrarouge, à l'aide de photographies aériennes et de premiers essais d'utilisation d'images satellitaires. Depuis, malgré la multiplication de systèmes d'observation nouveaux depuis l'espace, on a l'impression que le progrès est lent et des jugements sévères sont parfois portés sur l'utilisation de la télédétection en milieu forestier. Pourtant les possibilités sont réelles, les demandes plus précises et certaines applications déjà opérationnelles.

**Un objet complexe :** la complexité des écosystèmes forestiers français est réelle (relief, mélanges variés et fréquents d'espèces, etc.). Dans le cas relativement simple des Landes (une espèce dominante, absence de relief), les applications opérationnelles (ex. suivi des coupes) sont équivalentes à celles mise en œuvre en Scandinavie.

**Une demande encore ponctuelle, mais en évolution :** la demande du monde forestier en matière de télédétection est restée jusqu'ici moins forte et plus dispersée que pour d'autres milieux ou usages : sécheresses et tempêtes restent rares et attaques sanitaires généralement d'ampleur limitée. Le besoin d'indicateurs de toutes sortes constitue cependant une demande nouvelle et l'attrait d'un temps de réponse rapide pourrait changer la donne.

**Des applications concluantes et prometteuses :** les images SPOT et Landsat ont été utilisées avec succès pour cartographier la défoliation par le bombyx disparate dans les années 1990, les images NDVI ou MODIS permettent de montrer la réaction de la végétation à des aléas climatiques à l'échelle de l'Europe (même si l'interprétation reste délicate dans le détail) et des éléments fondamentaux du fonctionnement des forêts (indice foliaire, phénologie, etc.) sont suivis.

**Une panoplie de nouveaux outils :** aux outils les plus utilisés actuellement va s'ajouter une panoplie de nouveaux outils intéressants par leur fréquence de passage et/ou leur résolution : *Pléiades* HR (lancement en 2008-2009 ; 0,7 m de résolution en panchromatique, 4 bandes spectrales, fréquence de revisite inférieure à 24 heures, champ de 20 km), *Cosmo Skymed* (lancement en 2007-2008 ; constellation de 4 satellites avec un radar en bande X, résolution de 3 à 100 m), *SMOS* (*Soil Moisture and Ocean Salinity*), *VENμS* (*Vegetation Environment on a New Micro Satellite*) et *MISTIGRI* (infrarouge thermique).

**Un programme européen opérationnel :** GMES (Global Monitoring for Environment and Security) est un programme de la Commission européenne et de l'Agence Spatiale Européenne dont l'objectif est de mettre en place des services opérationnels de suivi et d'observation. Un des aspects développés porte sur l'observation de « l'occupation des sols, l'eau, l'agriculture, et les forêts ». Fait remarquable, on y trouve un module spécifiquement forestier (GSE Forest Monitoring, piloté par un opérateur allemand), auquel participent, depuis cet automne, des opérateurs français pilotés par l'IFN.

**Une meilleure consultation des utilisateurs :** depuis quelques années des réflexions stratégiques associent, notamment dans le cadre de GMES, les acteurs de l'offre de services et les utilisateurs pour tenter de mieux accorder les deux.

D'une façon générale il faut s'attendre, après une sécheresse à une augmentation des dégâts dus à des insectes défoliateurs, des pucerons, des champignons endophytes comme *Sphaeropsis sapinea*, des scolytes secondaires, et à une baisse des dégâts dus aux pyrales, aux chancres, à l'Armillaire du pin ou aux *Phytophthora*. Il y a à ce sujet une bonne convergence entre la démarche expérimentale (conditions contrôlées) et la « présomption de causalité » déduite de corrélations faites à partir d'observations de terrain. Bien entendu, l'augmentation et la baisse respective de ces agents ne sont pas nécessairement liées à une sécheresse.

En 2004 et 2005, on a observé en France une reprise des attaques des ravageurs secondaires (typographe sur épicéa, curvidenté sur sapin – avec une récolte de sapin estimée à 400 000 m<sup>3</sup> contre moins de 5 000 m<sup>3</sup> en 2001 et 2002) et de fortes attaques de *Sphaeropsis sapinea* (d'apparition assez récente en France). On manque malheureusement de recul historique pour comparer ces observations à d'autres sécheresses (seule la récente période sèche 1989-91 a été bien documentée par le DSF qui venait d'être créé). Globalement, comme pendant la phase de dépérissements des années 1980, ces facteurs biotiques n'expliquent cependant qu'une faible part des déviations de l'état sanitaire géné-

ral observées depuis 2003 – sauf pour certaines essences, notamment l'épicéa qui est très touché par le typographe (Belrose et al., ce volume).

### Sécheresse et biodiversité forestière

L'Expertise a montré qu'on sait très peu de choses à l'échelle internationale sur cette question, tout particulièrement en milieu forestier (Archaux, ce volume). Cela reflète probablement le fait que les équipes travaillant sur la conservation de la biodiversité d'une part et sur le fonctionnement des écosystèmes d'autre part sont encore relativement disjointes. Comme les acteurs de la conservation ont récemment pris

conscience des implications des changements climatiques dans leur domaine, la situation pourrait évoluer relativement vite.

À court terme, les communautés faunistiques et floristiques ne semblent pas bouleversées. L'impact pourrait même être globalement positif pour la flore, et le bois mort (non récolté) lié aux effets des sécheresses constitue sûrement, comme celui issu des tempêtes de décembre 1999, un facteur positif pour la biodiversité. Cependant, il existe certainement des seuils de fréquence et d'intensité des sécheresses au-delà desquels la biodiversité décroît, mais la multiplicité des causes de variation (autres que la sécheresse) et la complexité des chaînes trophiques ne facilitent pas les analyses. La biodiversité va par ailleurs réagir de façon complexe aux changements globaux (notamment la température, la concentration en CO<sub>2</sub>, seuls ou en combinaison). On comprend donc qu'ici également, le suivi à long terme est déterminant pour évaluer l'évolution temporelle de la biodiversité à grande échelle, faire progresser la connaissance et anticiper les changements.

## Le gestionnaire forestier face à la sécheresse

L'article de Legay *et al.* (ce volume) résume la réflexion actuelle sur les conséquences à tirer pour la gestion des connaissances actuelles.

L'Expertise n'a pas fait une analyse approfondie des stratégies de protection des peuplements affectés (récolte des bois dépérissant, gestion des attaques de scolytes, etc.) et de la marge de progrès que l'on peut espérer dans ce domaine. On s'accorde généralement pour dire que cette marge existe mais n'est pas forcément considérable et que le contexte local détermine largement ce qu'il est possible et raisonnable d'entreprendre.

L'enjeu le plus important se situe dans le domaine de la **prévention** et de l'**adaptation** à long terme, notamment par le choix des essences en fonction des contraintes hydriques des stations et par la

conduite des peuplements en place. Tout est loin d'être au point dans ces domaines, et l'enjeu est de raisonner la question « contrainte hydrique exceptionnelle » de façon spécifique tout en intégrant les autres aspects liés au long terme : évolution du climat, gestion de la biodiversité notamment. Il s'agit de mettre au point des synthèses pratiques, des outils d'aide à la décision, des itinéraires sylvicoles prenant en compte de façon explicite l'économie de l'eau. Cette démarche est difficile sur un plan scientifique et nécessite un dialogue approfondi entre scientifiques et gestionnaires.

## Des besoins de recherche spécifiques et des goulets d'étranglement plus généraux ont émergé

Dans le cadre de l'Expertise, un certain nombre de besoins de recherche ont été identifiés (voir encadré page 51) : spécifiquement sur les effets de la sécheresse et de la canicule, mais aussi plus généraux (recherches à caractère générique, s'intéressant à un ensemble d'aléas dont la sécheresse et la canicule).

Évaluation des connaissances, mise en œuvre de technologies avancées, évaluation systématique d'un grand nombre d'espèces, expérimentations à long terme, suivi, modélisation, combinaison des approches aérienne et au sol : ces quelques mots-clés montrent que les approches suggérées par l'Expertise sont variées, qu'elles nécessitent de rapprocher les communautés scientifiques. La construction d'une gestion scientifiquement fondée est à ce prix.

## Conclusions

L'Expertise a permis de rassembler une **information scientifique abondante**. Plusieurs publications sont en cours (*Annals of forest science*, *Symposcience*) et seront disponibles

dans les mois à venir sur Internet. Des **pistes de recherche** ont été identifiées. Si l'Expertise ne répond pas, pour diverses raisons, à toutes les questions qui se posaient au départ, elle offre des réponses et, sur les points difficiles, une **base de discussion** pour les divers destinataires du travail – commanditaires et gestionnaires forestiers en particulier.

La réflexion sur l'**adaptation de la gestion forestière** aux risques sécheresse et canicule s'est révélée, comme on s'y attendait, délicate, mais un jalon important a été posé. Pour que les conclusions des scientifiques ne restent pas inutilisées, et que les inflexions décidées par les gestionnaires soient fondées, il apparaît nécessaire que ces partenaires travaillent conjointement à la définition et à l'évaluation d'options sylvicoles.

La forêt est d'ores et déjà, et pour les années à venir, sous **étroite surveillance**. Effets immédiats et différés sur l'état des cimes, pics de mortalité, « reprise » des dépérissements : nous avons aujourd'hui pour la première fois les moyens et le recul nécessaires pour suivre et analyser en direct les effets à court, moyen et long terme d'un épisode majeur sur la forêt, chose qui n'avait pas été possible au début des années 1980, dominées par la spéculation et l'émotion liées au « dépérissement des forêts » (Landmann, 2006).

Pour cela, de nouvelles approches reposant en grande partie sur la **modélisation** font leur apparition aux côtés des approches de terrain dédiées à la santé des forêts. Développées notamment par les météorologues et les physiciens, leurs objectifs ne sont pas spécifiquement forestiers mais les résultats nous intéressent. Cela doit nous inciter à prendre la mesure des possibilités offertes par ces nouveaux outils et à participer à leur construction pour y insérer des éléments déterminants pour les forêts, comme l'état hydrique des sols forestiers (voir encadré page 52).

**Principaux besoins de recherche identifiés dans le cadre de l'expertise « sécheresse et canicule 2003 »  
(Landmann et al., 2006)**

Recherches spécifiques aux contraintes « sécheresse » et « chaleur » :

■ **Effets physiologiques irréversibles de la chaleur** sur des feuilles dont les stomates sont fermés par la sécheresse. Approche : écophysiologie de combinaisons de stress hydrique et thermique. Paramètres : rendement de la photosynthèse (seuil d'irréversibilité), synthèse des chlorophylles (seuils de dégradation). Application : jaunissement ou rougissement prématuré des feuilles et aiguilles.

■ **Résistance intrinsèque des différentes espèces à la sécheresse.** Approche : écophysiologie comparative utilisant les progrès en matière d'analyses à hauts débits. Paramètres : régulation des échanges gazeux, efficacité d'utilisation de l'eau, vulnérabilité à la cavitation, étude des composés de réserves.

■ **Fonctionnement hydrodynamique au niveau sol et racines,** notamment profondeurs d'extraction de l'eau. Approche : techniques de marquage, observations *in situ*, phénologie racinaire. Application au manque et à l'excès d'eau.

■ **Survie des arbres** : seuils selon les essences et l'intensité des déficits hydriques. Approches : développement d'indicateurs écophysiologiques, architecture des cimes. Applications : compréhension des effets différés, estimation des probabilités d'occurrence de mortalité et de dépérissements. **Cas particulier de la reprise des plantations** : évaluation approfondie des connaissances au regard de l'évolution des pratiques de plantation.

■ Détermination d'un **bilan hydrique fiable à différentes échelles d'espace et de temps** : modélisation de l'eau disponible dans les sols et de la contrainte imposée aux arbres ; délimitation de zones à risques, etc.. Approche : amélioration du modèle SIM de MétéoFrance (composantes météorologique, d'échange au niveau végétation – sol, et hydrologique).

■ Développement d'une **typologie des ravageurs et maladies** vis-à-vis de la contrainte hydrique et la définition de seuils d'alerte pour quelques couples essences – ravageurs, basée sur la méta-analyse réalisée sur la réponse des ravageurs au déficit hydrique.

■ **Expression des champignons endophytes** sous l'influence de la sécheresse. Exemple : *Sphaeropsis sapinea* (un des principaux agresseurs des pins). Approche : analyses génétiques de la structure spatiale et de la virulence des populations.

■ Développement d'un **modèle spatial (à l'échelle du paysage)** rendant compte des **interactions entre sécheresse, insectes, arbres hôtes et conditions stationnelles.** Application : identification des facteurs les plus importants et définition de « zones à risque ».

■ **Téledétection** : développement et expérimentation d'une stratégie d'évaluation des dégâts de sécheresse (effets immédiats et effets différés). Approches : combinaison de données spatiales à faible et haute résolution et intercalibration avec des données au sol.

■ **Biodiversité et résistance des espèces forestières à la sécheresse.** Approches : développement d'une base de données, maintien ou développement de programmes de suivi à long terme, expérimentations spécifiques.

Besoins génériques :

■ Développement d'un **système d'information**, permettant un meilleur accès aux données (Landeau et Maurice, ce numéro) et optimisation du « réseau des réseaux forestiers ».

■ Développement d'un **modèle économique** générique permettant d'évaluer l'impact de divers aléas.

Une autre piste de réflexion est celle de la gestion (ou plutôt exactement de ce qu'on appelle la gouvernance<sup>4</sup>) de l'entreprise fictive constituée par les **réseaux d'études et de surveillance** (Landeau et Maurice, ce volume). Les divers acteurs ont lancé, dans l'urgence et de façon indépendante, un ensemble d'actions qui nous offre un matériel riche, mais ce « programme de surveillance » des effets de la sécheresse n'est ni optimisé, ni forcément optimal en terme d'utilisation des fonds publics.

**De quoi les années à venir seront-elles faites ?** Une des questions

d'utilisateurs posée à l'origine de l'Expertise était : « existe-t-il des techniques applicables à la prévision d'une éventuelle vague de mortalité d'arbres adultes et à la détermination de son ampleur éventuelle (indicateurs précoces) ? ». Plutôt qu'une technique, il semble possible de bâtir une **démarche associant modèles** (en commençant sans doute par des modèles relativement simples) **et indices mesurés sur le terrain.** Un tel travail pourrait aider à mieux cadrer les conséquences des étés secs et chauds et à identifier les situations à risque et des seuils cri-

tiques. Il s'agit de ne pas combiner des données et des grandeurs qui ne doivent pas l'être, sous peine d'aboutir à une « soupe » – pour reprendre l'expression critique du pathologiste américain Paul Manion à propos des discussions sur les dépérissements des années 1980 – qui brouille les idées et empêche la nécessaire mise en perspective des informations.

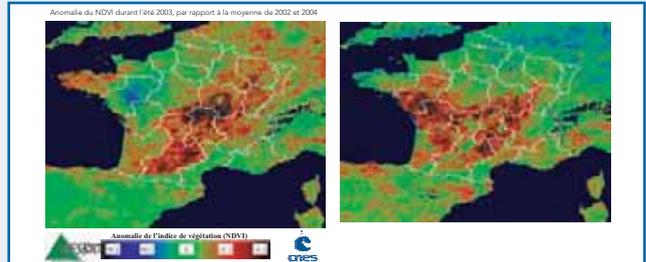
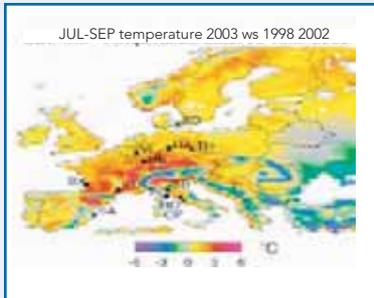
Les **pronostics** formulés jusqu'ici sur les conséquences à moyen terme de l'été 2003 sont très prudents, assortis de nombreux conditionnels, ce qu'on justifie généralement par les

<sup>4</sup> Une des définitions de la gouvernance est : « La gouvernance d'entreprise (ou de toute autre institution) est l'ensemble des organes et règles de décision, d'information (transparence) et de surveillance permettant aux ayants-droits et partenaires d'une institution, de voir leurs intérêts respectés et leurs voix entendues dans le fonctionnement de celle-ci. » (Wikipedia).

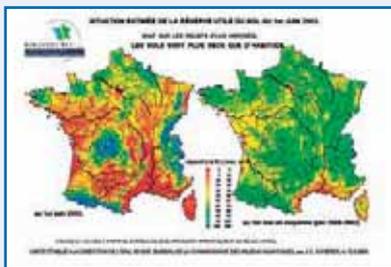
**La sécheresse et ses effets en France, en Europe, dans le monde : kaléidoscope**

La série d'illustrations présentée ici est une juxtaposition de résultats obtenus par des démarches indépendantes et non harmonisées. Elle a pour but de montrer quelques-uns des produits que la recherche peut fournir.

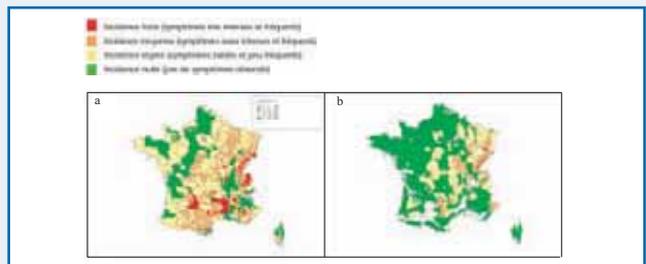
**Climat 2003** : déviations de température des mois de juillet à septembre par rapport au climat moyen. Source : Centre commun de recherches de la Commission européenne (Ispra, Italie).



**Réaction de la végétation caractérisée par l'indice de végétation normalisé (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index)**, qui rend compte de l'activité chlorophyllienne) fourni par le satellite VEGETATION en 2003 (à gauche) et 2005 (à droite). Cette signature reste qualitative et n'a pas été « standardisée » pour les différents types de végétation (gradient de « stress » croissant : bleu, vert, rouge, noir). Source : O. Hagolle, CNES, Toulouse.

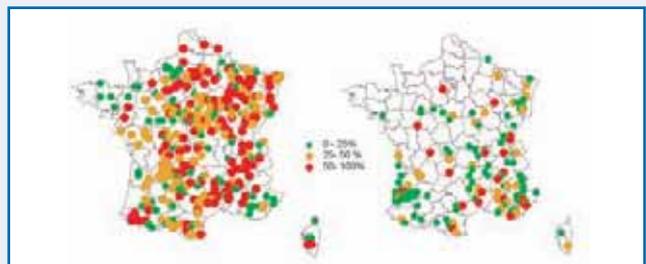
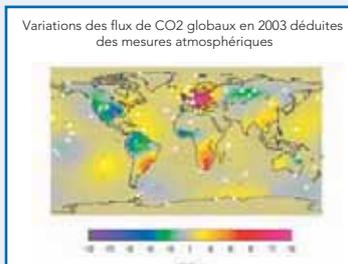


**Déficit hydrique des sols** au 1<sup>er</sup> juin 2003 établi par la Direction de l'Eau du Ministère de l'Ecologie et du Développement durable. Depuis peu, cette estimation se fait sur la base de la chaîne de modèles « SIM » (Safran-Isba-Modcou) développée par MétéoFrance (Toulouse).

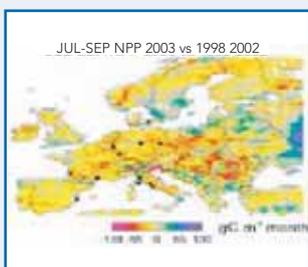


**Impact visuel de la canicule et de la sécheresse à l'automne 2003** sur les feuillus (à gauche) et les résineux (à droite). Évaluation à dire d'expert réalisée par les correspondants-observateurs du DSF (pour chaque région forestière, moyenne des notes par essence, pondérées par la surface des essences considérées dans la région). Source : Ministère de l'agriculture et de la pêche, DSF.

**Variations de flux de CO<sub>2</sub> en 2003 à l'échelle mondiale** : le calcul des flux présentés repose sur un modèle de transport atmosphérique et des mesures issues d'un réseau mondial. Les résultats montrent que la fixation de carbone sur l'Europe a été très nettement réduite. Source : P. Peylin, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, LSCE, CEA, Saclay.



**Proportion d'arbres par placette dont l'état du houppier s'est détérioré entre 2002 et 2005 dans le réseau 16 km X 16 km.** On considère que l'état du houppier se détériore si l'écart de déficit foliaire entre 2005 et 2002 est supérieur à 5 %. À gauche : placettes de feuillus ; à droite : placettes de résineux. Les jeunes peuplements de 20 ans et moins sont exclus de ces calculs. (détérioration croissante du vert au rouge). Source : Ministère de l'agriculture et de la pêche, DSF.



**Productivité primaire nette en Europe pendant l'été 2003** (fixation de carbone par photosynthèse moins respiration des organes vivants ; la respiration liée à la dégradation de la matière organique n'est pas prise en compte) estimée avec le modèle ORCHIDEE\* : les

flux sont calculés à partir d'un modèle basé sur des processus biogéochimiques et calé grâce aux mesures des tours à flux installées en forêt pour mesurer des flux de carbone, d'énergie et d'eau. Source : P. Ciais, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, LSCE-CEA, Saclay.

\* développé par l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL, Paris), en collaboration avec le Laboratoire d'Ecologie Végétale (LEV, Orsay), et le Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO, Toulouse)

## interview

**Expertise sécheresse et canicule 2003 : quels enseignements, quels messages ?**

Guy Landmann (ECOFOR) réagit ici aux principales conclusions formulées par François Houllier (INRA), initiateur de l'expertise, lors de la journée de restitution de l'expertise (14 décembre 2005).

**François Houllier :** Je suis très attaché au fait qu'une grande diversité de sensibilités soit associée au travail d'expertise. Ce ne fut sans doute pas assez le cas au cours de celle-ci, mais le débat et la composition de la salle aujourd'hui montrent qu'il y a eu une réappropriation.

Guy Landmann : Effectivement, une audience composée pour moitié de non chercheurs est un résultat très positif pour ECOFOR. Au-delà de cette journée, notre site Internet et diverses publications, en particulier ce dossier dans Rendez-vous techniques, permettent que les résultats soient largement diffusés et débattus, notamment au sein des organismes de gestion forestière.

**FH :** En ce qui concerne l'intégration temporelle et spatiale de la contrainte hydrique, nous devons être capables de construire une vision consolidée en France ou, plus globalement, en Europe. La combinaison des sources d'information est essentielle.

GL : Ce besoin a été clairement identifié. Des discussions sont en cours entre les opérateurs de recherche (INRA notamment), Météo France et l'IFN pour tenter d'avancer. Le Centre commun de recherches de la Commission européenne serait également un partenaire intéressant.

**FH :** Un message (de l'exposé de Myriam Legay sur la sylviculture) est qu'il faut retraduire les résultats de recherche en questions sur les innovations dans le domaine sylvicole.

GL : Il ne s'agit pas en effet de la notion classique d'application directe des résultats de recherche. L'effort que fait l'INRA en offrant des postes (pour une durée de quelques années) dans ses équipes de recherche forestière à des personnes issues de la gestion et qui retourneront à la gestion ou au développement est une voie très intéressante pour traiter de ce type de question.

**FH :** La restitution aux commanditaires est importante, d'abord car ceux-ci interviennent au bénéfice d'un certain nombre d'acteurs, ensuite en reconnaissance pour le travail effectué par les experts qui ont souligné des opportunités interdisciplinaires et enfin parce que le sujet est durablement d'actualité.

GL : ECOFOR s'efforcera d'assurer une continuité dans le suivi de l'évolution des connaissances et des actions dans ce domaine et participera aux réflexions interdisciplinaires qui résultent de l'expertise avec le souci de déboucher sur des actions de recherche.

**FH :** Nous devons nous ouvrir à l'international car nous ne pouvons pas nous contenter de nos seuls moyens d'observation et de recherche. Hervé Jactel nous a montré que ses méta-analyses s'opèrent à l'échelle mondiale.

GL : Il est délicat en effet de trouver la bonne « maille » pour une expertise : on travaille mieux entre gens qui se connaissent déjà, mais on a besoin d'experts très aguerris donc rares qui travaillent souvent dans des environnements et des cultures variés. Il n'y a pas de recette miracle.

**FH :** Un dernier message d'ouverture : une journée comme celle-ci présente l'intérêt de s'ouvrir à d'autres communautés que celle des forestiers. Dans le domaine du réchauffement climatique, il existe paradoxalement un retard dans le monde de l'agriculture.

GL : Nous avons conscience d'être plutôt bien lotis, grâce à une culture ancienne d'acquisition de données dans l'environnement forestier. Dans le domaine de l'information, ECOFOR développe des liens, avec les autres milieux naturels que la forêt. Des opérations à bénéfices réciproques peuvent certainement être développées.

lacunes de connaissances et le caractère relativement imprévisible de la nature. Pourtant, l'été 2003 a déjà provoqué un pic de mortalité sans précédent depuis vingt ans au moins, la situation sanitaire en 2005 (état des cimes) est probablement la plus détériorée de celles mesurées depuis 20 ans (et peut-être davantage), l'accumulation des déficits hydriques entre 2003 et 2005 génère une situation à hauts risques. Ces éléments dessinent les premiers traits d'un scénario préoccupant : une forte augmentation des dépérissements semble inéluctable, quelles que soient les conditions climatiques à venir, entraînant des dégâts qui dépasseraient ceux connus depuis plusieurs décennies.

Bien entendu, le pire n'est jamais sûr, ce qui est une façon de dire que certains éléments du scénario peuvent se révéler inexacts, mais il s'agit d'une perspective qui doit nous inciter collectivement à améliorer dès maintenant :

- nos connaissances et nos outils de suivi pour déceler le plus rapidement possible les éléments confirmant ou infirmant ce scénario ;

- nos outils de gestion de crise et d'aménagement pour gérer la situation difficile qui pourrait se présenter.

Cet investissement collectif sera de toute façon incontournable si l'on veut comprendre le rôle des futures grandes sécheresses dans l'évolution des forêts et mettre à la disposition des gestionnaires des éléments pour définir une stratégie d'adaptation aux changements climatiques.

**Guy Landmann,**

ECOFOR, Paris

landmann@gip-ecofor.org

**Sandrine Landeau,**

ECOFOR, Nancy

landeau@gip-ecofor.org

## Remerciements

Nos remerciements sincères vont à l'ensemble des participants à l'expertise : F. Archaux (Cemagref), N. Bréda (INRA), J.-N. Candau (INRA), S. Couture (ENGREF/INRA), M. Deshayes (Cemagref), M.-L. Desprez-Loustau (INRA), E. Dreyer (INRA), O. Dupont (MétéoFrance), K. Kartner (Centre fédéral de recherche et de formation sur les forêts, les risques naturels et le paysage, Autriche), A. Granier (INRA), D. Guyon (INRA), O. Hagolle (CNES), R. Huc (INRA), L. Ibanez (ENGREF/INRA), H. Jeanjean (CNES), A. Jolly (ONF), J. Kropp (PIK, Institut de recherche sur l'impact du changement climatique de Potsdam, Allemagne), J.-G. Küppers (BFH, Institut fédéral de recherches sur la forêt et le bois de Hambourg, Allemagne), F. Lieutier (Université d'Orléans), B. Marçais (INRA), J.-C. Martin (INRA), H. Mayer (Université de Fribourg-en-Brissgau, Allemagne), A. Menzel (Université technique de Munich, Allemagne), L.-M. Nageleisen (DSF), J.-L. Peyron (ECOFOR), D. Piou (DSF), M. Rebetz (WSL, Institut de recherches sur la forêt, la neige et le paysage, Suisse), G. Rouault (INRA), D. Schindler (Université de Fribourg-en-Brissgau, Allemagne), N. Stach (IFN), A. Vanini, N. Warzée (Université libre de Bruxelles, Belgique), V. Wolters (Université Justus-Liebig, Giessen, Allemagne).

Ainsi qu'à celles et ceux qui, en participant à la rédaction des articles de ce dossier ont contribué à une phase complémentaire du travail : V. Belrose (ONF précédemment DSF), C. Ginisty (Cemagref), M. Legay (INRA/ONF), D. Maurice (ECOFOR/INRA), H. Pauly (DSF).

Ce texte – et particulièrement ses conclusions – n'a pu, pour des raisons de délai, être discuté avec l'ensemble des experts. Les commentaires des lecteurs sont les bienvenus : ils peuvent être adressés par courrier électronique aux auteurs.

## Bibliographie

DUPONT O., 2006. L'été 2003 et le risque de retour de tels évènements. \*

FLOT J.-L., 2005. Dommages causés aux plantations forestières par la sécheresse et la canicule de 2003. 4 p. <en ligne :

[http://www.agriculture.gouv.fr/spip/IMG/pdf/2004\\_plantations.pdf](http://www.agriculture.gouv.fr/spip/IMG/pdf/2004_plantations.pdf)>

INRA, 1977. La sécheresse de 1976. INRA, janvier 1977.

JACTEL H., PETIT J., DESPREZ-LOUSTAU M.-L., PIOUS D., 2006. Sécheresse et dégâts phytosanitaires en forêt : une méta-analyse. \*

LANDMANN G. 2006. Le « Déperissement des forêts attribué à la pollution atmosphérique » - du contexte passionnel des années 1980 au diagnostic. Et depuis ? \*

LANDMANN G., BRÉDA N., DREYER E., DESHAYES M., JEANJEAN H., CANDAU J.-N., PIOUS D., NAGELEISEN L.-M., DESPREZ-LOUSTAU M.-L., ARCHAUX F., PEYRON J.-L., MAURICE D., LANDEAU S., 2006. Besoin d'outils et lacunes de connaissances identifiées par l'expertise : des propositions pour progresser. \*

LANDMANN G., BRÉDA N., HOULLIER F., DREYER E., FLOT J.-L., 2003. Sécheresse et canicule de l'été 2003 : quelles conséquences pour les forêts françaises ? Revue forestière française, vol. 55, n° 4, pp. 299-308

MARION J., 1976. Quelques conséquences de la sécheresse pour les sylviculteurs. Forêts de France et action forestière, n° 203, oct. 1976.

MORTIER F., CHOPART J.-C., SARDIN T., 2005. Conséquences de la sécheresse et de la canicule 2003 : bilan pour les plantations des forêts publiques en

2004. Rendez-vous techniques n° 8, pp. 52-56

NAGELEISEN L.-M., 2006 L'évolution de l'état sanitaire des forêts depuis 2003\*.

PEYRON J.-L., THOROE C., COUTURE S., IBANEZ L., KÜPPERS J.-G., 2006. Conséquences économiques. Recommandations de gestion\*.

RENAUD J.-P., NAGELEISEN L.-M., 2005. Les résultats 2004 du réseau européen de suivi des dommages forestiers. 25 p. en ligne : [http://www.agriculture.gouv.fr/spip/IMG/pdf/reseau\\_europeen\\_2004-2.pdf](http://www.agriculture.gouv.fr/spip/IMG/pdf/reseau_europeen_2004-2.pdf)

\* présentations consultables sur [www.gip-ecofor.org](http://www.gip-ecofor.org) (journée d'information et de débat ECOFOR des 13-15 décembre 2005)