

Le hêtre face aux changements climatiques

Plusieurs modèles annoncent que la place du hêtre en France pourrait se réduire singulièrement d'ici à 2100 sous l'effet des changements climatiques. Cet article fait le point sur les fondements, la crédibilité et les limites d'un tel scénario et passe en revue les divers « points faibles » du hêtre constatés plus ou moins récemment, notamment après l'été 2003. Au-delà du choc que suscite une telle perspective et des recommandations de bon sens que l'on peut formuler pour limiter les incidences des changements climatiques à venir, il reste à mettre au point une stratégie réaliste directement utilisable par les forestiers : celle-ci nécessitera un travail conjoint des scientifiques et des gestionnaires.

Eté 2004 : la publication par les médias de cartes montrant, avec une grande précision apparente, l'évolution possible de la forêt française d'ici à la fin du 21^e siècle suscite l'émotion dans les milieux forestiers français : on y voit notamment, selon un scénario d'évolution qualifié de « relativement optimiste » du climat par les auteurs, le couvert forestier français se modifier considérablement d'ici à la fin du 21^e siècle. L'aire du hêtre régresserait fortement, se cantonnant au Nord-Est et aux régions de montagne. Au-delà du choc visuel provoqué par ces cartes, issues du projet français CARBOFOR, on assiste à la prise de conscience, dans les milieux forestiers, de l'importance des enjeux du changement climatique. Mais n'y a-t-il pas une part d'inquiétudes infondées ? « Ils ont vu (les cimes décharnées), ils ont cru (aux pluies acides) » écrivait le sociologue Philippe Roqueplo à propos de l'impact des pluies acides (Roqueplo, 1988). Assiste-t-on aujourd'hui à un phénomène analogue ?

Dans cet article, nous souhaitons fournir au gestionnaire forestier des éléments lui permettant de mieux comprendre les bases scientifiques, mais aussi les limites, des projec-

tions alarmistes faites par la communauté scientifique pour cette fin de siècle. En conclusion, nous aborderons la question des mesures par lesquelles on peut espérer s'adapter non pas à une nouvelle situation mais à un environnement en perpétuelle évolution.

Le déplacement des aires de végétation sous l'influence du changement climatique en cours n'est pas une problématique nouvelle dans le milieu scientifique. Dans un fascicule dédié en 1992 aux recherches sur les écosystèmes forestiers, Dupouey (1992) indiquait que « l'amplitude des déplacements (des aires) va de quelques centaines à plusieurs milliers de kilomètres selon les espèces et les modèles. Ces déplacements entraîneront des dépérissements massifs sur les limites sud des aires de répartition, ou à la base de certains étages de végétation. Il est à remarquer que la France est presque absente des recherches menées dans ces domaines ».

Les enseignements à tirer des modèles climatiques pour la gestion des forêts avaient également suscité des réflexions dès le début des années 1990. Ainsi, Bouhot et Barthod (1993) rapportaient que « la force qu'a prise la référence à

ces modèles climatiques vulgarisés par les travaux du Groupe intergouvernemental d'étude du climat (GIEC) est telle que les responsables forestiers de nombreux pays européens et nord-américains ont dû rapidement examiner la possibilité de prendre des mesures d'adaptation de la sylviculture et du choix des essences [...] sous peine d'apparaître irresponsables ». Mais d'un rapide examen des connaissances disponibles, ils concluaient alors que : « ces quelques recommandations (de bons sens) ne permettent en aucun cas de s'engager dans une réelle stratégie d'adaptation des choix sylvicoles aux conditions climatiques prédites globalement par les modèles actuellement disponibles ». Les travaux scientifiques français dans ce domaine n'ont réellement émergé qu'à la fin des années 1990, avec plus particulièrement les travaux de l'INRA à Nancy (J.-L. Dupouey, V. Badeau) dans le cadre du projet CARBOFOR (Badeau et al., 2004, 2005), ceux du CNRS, au Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive, à Montpellier (I. Chuine) et au Laboratoire d'écologie alpine (LECA, Université de Grenoble, Thuiller et al. 2005).

* Pour l'explication du vocabulaire spécialisé marqué du signe « * », voir le glossaire du hors série RDVT n° 1 « diversité génétique des arbres forestiers, un enjeu de gestion ordinaire »

Le hêtre en France en 2100 : la portion congrue ?

Le travail réalisé récemment par l'INRA (Badeau et al., 2005) a été réalisé en deux temps :

- dans un premier temps, on a recherché le modèle statistique expliquant au mieux la présence et l'absence, en France, de l'espèce à partir des variables climatiques et édaphiques disponibles : on calcule ainsi une aire potentielle ;

- le modèle de répartition du hêtre pour la période actuelle étant établi, on remplace alors les variables climatiques actuelles par leurs valeurs prédites pour le milieu ou la fin du 21^e siècle dans certains scénarios climatiques. Le calcul indique que l'aire de répartition potentielle du hêtre en 2100 connaîtrait une forte régression et serait alors confinée au quart Nord-Est de la France et aux régions de montagne (figure 1).

L'aire de répartition des espèces : modèles statistiques ou basés sur les processus

L'aire de répartition actuelle des arbres et la composition des peuplements forestiers sont la résultante de trois facteurs principaux : 1/les exigences écologiques des essences (réponse au climat, mais aussi aux conditions édaphiques, potentiel de migration, aptitude à la compétition ou la coopération avec les autres espèces), 2/la répartition spatiale des contraintes de l'environnement (géographiques comme la présence de barrières montagneuses, climatiques, édaphiques) et 3/la dynamique antérieure de ce couple biosphère/environnement. L'aire potentielle, déterminée par la niche climatique et pédologique de l'espèce, peut être très différente de l'aire réalisée (observée) qui dépend également des interactions biotiques, avec l'homme en particulier, des capacités de dispersion de l'espèce et des aléas historiques. Un exemple classique est celui du pin de Monterey (*Pinus radiata*) du nom de la baie californienne à laquelle se restreint son aire de répartition et qui a été employé à grande échelle au niveau mondial (notamment dans l'hémisphère sud) pour des boisements de production. On voit nettement dans ce cas que l'aire potentielle de ce pin dépasse très largement les limites de son aire réalisée. L'approche statistique du problème repose sur la recherche des corrélations entre la présence ou l'absence d'une espèce et les paramètres du milieu (climatiques, édaphiques, historiques, etc.). On vise ainsi à cerner au mieux l'écologie des espèces, à préciser les différentes composantes de leur niche. Une part plus ou moins importante peut être attribuée aux différents facteurs écologiques : on peut choisir de « tout » intégrer dans ces modèles ou de s'intéresser uniquement, par exemple, aux contraintes climatiques. Enfin, on peut simuler le devenir des niches climatiques en fonction des conditions futures. Ces modèles sont dits « empiriques » car on les bâtit à partir de l'observation de l'aire actuelle des espèces.

Les modèles basés sur les processus, apparus au début des années 1980 (Shugart, 1984), prennent en compte de façon explicite tout ou partie des principaux mécanismes contrôlant la présence des espèces : reproduction, dispersion, croissance, compétition, mortalité... Ils sont établis à l'échelle du peuplement, de la région ou du biome, pour des espèces ou des groupes d'espèces (types fonctionnels).

Il existe actuellement une grande diversité de modèles biogéographiques, depuis les modèles purement statistiques jusqu'aux modèles basés purement sur les processus. Ces différents modèles donnent des résultats convergents dans la mesure où ils prévoient tous un déplacement important des aires potentielles des essences forestières vers le Nord et vers des altitudes plus élevées, mais cette information est encore insuffisante pour les besoins de la gestion forestière locale.

Seuls les modèles statistiques développés par l'INRA-Nancy et le LECA donnent pour le moment des projections de l'évolution de l'aire de répartition potentielle du hêtre, les travaux sur les modèles basés sur les processus spécifiques à cette espèce n'étant pas encore suffisamment avancés.

Pour ceux qui s'intéressent à l'actualité scientifique, les résultats de ces simulations n'ont rien de surprenant ou de déroutant. Si les incertitudes qui pèsent sur ce résultat sont nombreuses – nous les passerons en revue –, ce type de scénario reste très vraisemblable.

Reprenons les étapes du travail une à une. Il est basé sur une approche simple mais robuste qui utilise, pour la première fois, des données non disponibles jusque-là ou qui n'avaient pas encore été agrégées à l'échelle nationale :

- **données de l'Inventaire forestier national (IFN) :** on dispose depuis peu d'une cartographie précise (environ 1 point de relevé pour 130 ha de forêt) de la plupart des espèces forestières en France. Au total, la présence de 67 essences ligneuses a été relevée dans un peu plus de 100 000 points de sondage de l'IFN entre 1985 et 2001, dont 36 549 points où la présence du hêtre est notée.

- **données climatiques :** les données de base (températures, précipitations, nombre de jours de gel), depuis peu disponibles à une échelle fine (1 km) sur tout le territoire grâce aux interpolations réalisées par Météo France (modèle AURELHY), et les cartes de rayonnement solaire décadaire issues d'observations satellitaires (période 1996-2002) ont été utilisées.

À partir de ces données, plusieurs variables synthétiques ont été calculées comme l'évapotranspiration potentielle (ETP) ou le déficit pluviométrique (précipitations — ETP). Pour ce qui concerne les scénarios de prévision à long terme du climat, les modèles n'intègrent pas encore parfaitement tous les processus qui influencent le climat mais des progrès considérables ont été réalisés au cours des quinze dernières années. Le modèle ARPEGE que nous avons utilisé a été élaboré par Météo France. Il fait partie du cercle restreint des modèles de prévision à long terme du climat les plus utilisés au niveau mondial. Arpegé est un modèle à

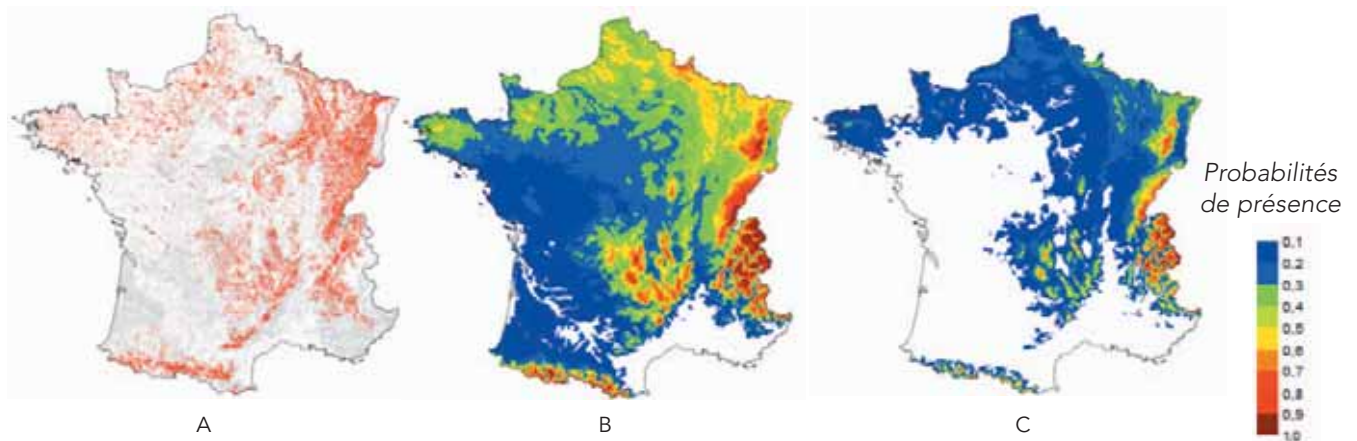


Fig. 1 : A – répartition du hêtre observée par l'Inventaire forestier national ;
 B – modélisation de l'aire actuelle de répartition du hêtre (AURELHY) ;
 C – extrapolation de l'aire de répartition du hêtre en 2100 (ARPEGE) (Badeau et al., 2004)

maille variable centré sur la Méditerranée : plus on s'en éloigne, plus la maille est lâche ; sur la France, la résolution est de 100-150 km. Il faut noter que l'évolution climatique prévue (ici selon le scénario d'émissions dit B2) fait plutôt partie des prévisions « optimistes », c'est-à-dire que l'hypothèse d'augmentation de température se situe dans la partie inférieure de la palette des divers scénarios disponibles, et donc que les résultats présentés ici (figure 1) ne représentent en aucun cas une hypothèse très pessimiste.

Des résultats cohérents avec les connaissances sur l'écologie de l'espèce

Le modèle statistique indique que la présence du hêtre est très fortement corrélée au niveau du déficit pluviométrique cumulé des mois de juin et juillet ; avec cette seule variable, la présence du hêtre est correctement reproduite sur la totalité du territoire.

Cette corrélation entre présence/absence du hêtre et climat traduit-elle une causalité ? De solides indications vont dans ce sens. Parmi les travaux récents sur le hêtre, on mentionnera ceux sur :

- **la croissance radiale** : l'analyse de la croissance radiale du hêtre sur les plateaux calcaires de

Lorraine (Badeau, 1995 ; Granier et al. 1995) a montré que près de 70 % de la variance interannuelle des accroissements pouvait être expliquée par les déficits hydriques de juin à août de l'année en cours et de l'année précédente. Ce résultat a été vérifié par Lebourgeois et al. (2005) pour diverses régions françaises à l'aide du réseau RENE-COFOR, et il reste valide à l'échelle européenne (Dittmar et al., 2003 ; Lebourgeois, 2005). La précocité d'apparition d'un déficit hydrique au cours de la saison de végétation est un paramètre déterminant l'arrêt de croissance, donc la largeur du cerne annuel (Lebourgeois, 2005). Il faut souligner que c'est l'interaction entre climat, type de sol (réserve utile) et peuplement (indice foliaire) qui détermine *in fine* le niveau de stress hydrique et donc le potentiel de croissance radiale.

- **les variations de l'état des cimes**, estimé visuellement dans les réseaux de surveillance, qui, dans le cas du hêtre, apparaissent étroitement corrélées à l'intensité des stress hydriques estivaux de l'été précédent (Badeau et al., 1997). L'effet différé de la sécheresse sur l'accroissement des pousses a également été bien illustré sur le hêtre en Grande-Bretagne par Power (1994) et Stribley et Ashmore (2002).

La prise en compte des températures maximales d'octobre a permis d'améliorer, du point de vue statistique, la qualité du modèle qui prédit alors de façon plus réaliste la présence du hêtre dans toute la moitié nord du territoire et dans les régions de montagne tout en limitant sa présence sur la côte Atlantique et dans la vallée de la Garonne.

Le modèle final permet de prédire avec une très bonne précision les points où l'espèce est réellement présente. Mais on raisonne toujours par rapport à un seuil de probabilité : le modèle utilisé donne pour chaque point de l'IFN une valeur de probabilité comprise entre 0 et 1. Idéalement, l'aire de distribution d'une espèce devrait pouvoir être parfaitement reconstruite à partir de ces valeurs de probabilité en considérant que l'espèce est présente au-dessus du seuil de 0,5 et absente en dessous. Pour obtenir un tel résultat, il faudrait néanmoins que l'espèce étudiée soit réellement observée sur tous les points où elle est climatiquement susceptible d'être présente. Dans le cas du chêne vert par exemple, il est rare : i) de l'observer en dehors de la zone méditerranéenne et ii) de ne pas l'observer en zone méditerranéenne. Le modèle climatique est dans ce cas très tranché. Dans le cas du hêtre,

la dispersion sur le territoire français n'est pas aussi nette, cette essence étant absente d'un grand nombre de points IFN où elle pourrait être présente d'un point de vue climatique : la dynamique forestière, naturelle ou liée à la sylviculture, n'a pas permis l'installation du hêtre dans ces sites. Il n'est pas aisé de quantifier ces « fausses absences » (du point de vue climatique). Une confrontation très attentive des cartes observées (données IFN) et des cartes calculées (probabilités) permet cependant d'arriver, pour certaines essences, à un ajustement satisfaisant. Dans le cas du hêtre, le seuil de probabilité correspondant le mieux aux enveloppes de présence observées par l'IFN est de l'ordre de 0,3. Avec ce seuil, le modèle prédit plus de 80 % des points où le hêtre est réellement présent. À des seuils de probabilité inférieurs (couleurs bleues sur les cartes), le hêtre est beaucoup moins représenté dans les milieux forestiers inventoriés par l'IFN mais il n'en est pas totalement exclu (voir par exemple la Flore Forestière de Rameau).

Un résultat entaché de fortes incertitudes

Les simulations de déplacement de la niche des espèces au cours du 21^e siècle reposent sur des hypothèses climatiques sur lesquelles pèsent encore de fortes incertitudes.

■ **Les modèles climatiques** globaux se sont nettement améliorés depuis dix ans mais sont encore susceptibles d'évoluer par la prise en compte d'un certain nombre de mécanismes imparfaitement connus (aérosols, évolution de la nébulosité, changements d'utilisation du sol, etc.).

■ Même si les modèles climatiques ne cessent d'évoluer, des incertitudes considérables existent concernant les **scénarios d'émissions de gaz à effet de serre** à l'échelle du prochain siècle : ils dépendent en effet d'hypothèses sur le développement



Un hêtre (sain) en habits d'automne

L.-M. Nageläsen, DSF

économique et démographique de la planète, la place respective des combustibles fossiles et des énergies renouvelables, la nature des combustibles (gaz, pétrole, charbon) qui seront employés et, bien entendu, l'efficacité des politiques de réduction des gaz à effet de serre. Dans le rapport 2001 du GIEC¹, 6 scénarios d'émissions avaient été retenus. Pour le prochain rapport (à paraître en 2007), la palette des simulations sera étendue. C'est probablement aujourd'hui la principale source d'incertitude dans toute prévision liée au changement climatique.

De plus, les modèles biogéographiques présentés ici ne prennent en compte que les paramètres climatiques, et ne s'intéressent donc qu'à l'évolution de la niche climatique potentielle des essences. Celle-ci peut être très différente de la niche effectivement réalisée, pour diverses raisons :

■ Dans le cadre d'une sylviculture principalement orientée vers la régénération naturelle, les espèces devront migrer pour réinvestir leur nouvelle aire climatique. Selon la vitesse de migration des essences, il apparaîtra donc un décalage plus ou moins important entre niche

potentielle et niche réalisée. Or, la **capacité à migrer des espèces** est encore très mal connue, même si certains modèles en cours de développement au CNRS (PHENOFIT) ou au LECA (BIOMOVE) visent à simuler la dynamique de l'aire de répartition sur un pas de temps annuel en utilisant des estimateurs de vitesse de migration issus des données palynologiques fossiles et en incluant les stades plantules et juvéniles aux processus.

■ Les déplacements d'aires de répartition concernent potentiellement toutes les espèces, qu'elles soient ligneuses, herbacées, animales ou microbiennes. Leur déplacement entraînera la formation de **nouvelles combinaisons d'espèces** et, donc, l'établissement de nouvelles relations de compétition, de symbiose ou de parasitisme, qui pourront limiter ou favoriser l'extension de certains ligneux. Ces interactions ne sont pas prises en compte dans la plupart des modèles actuels. Enfin, certains facteurs temporels ou spatiaux ne sont pas pris en compte dans les modèles de niche utilisés ici.

■ **La variabilité génétique** actuelle du hêtre, ou celle qui pourra apparaître sous la pression des change-

¹ Le Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat réalise périodiquement (tous les 5 ans) un état de l'art complet des connaissances scientifiques sur l'effet de serre et les changements climatiques.

ments climatiques, permettront-elles à l'espèce de s'adapter à ces changements ? Nos connaissances des processus adaptatifs sont encore trop faibles pour répondre précisément à cette question même si elles suggèrent que des évolutions génétiques rapides auront lieu même chez des espèces à temps de génération long telles que les essences forestières (Davis et al. 2005). Le programme européen EVOLTREE, piloté par l'INRA Bordeaux (A. Kremer) vise à identifier les gènes majeurs d'adaptation au climat, et il serait envisageable, à terme, de créer des modèles intégrant l'évolution génétique des processus modélisés. Sans aller jusque-là, la variabilité génétique présente au sein des populations d'une espèce est encore très peu prise en compte dans les modèles de biogéographie. Certains modèles comme PHENOFIT intègrent cette variabilité en utilisant des paramètres différents selon les provenances actuelles.

■ La teneur en dioxyde de carbone (CO₂) de l'atmosphère joue aussi un rôle direct dans la croissance et la physiologie des arbres, via la photosynthèse, et indépendamment des changements climatiques. Des travaux menés par l'INRA Nancy en condition de double teneur en CO₂ (hypothèse utilisée également dans les scénarios climatiques utilisés ici) ont induit chez les chênes une fermeture des stomates, régulation qui permet une consommation moindre d'eau. Mais chez le hêtre, cet effet antitranspirant du CO₂ dans l'air n'a pas été observé et ses exigences en eau pourraient être augmentées.

■ Les cartes publiées ne prennent que partiellement en compte la variabilité des conditions de station dans les forêts françaises. En particulier, il n'existe pas de données précises, spatialisées, sur la réserve en eau utile des sols forestiers sur lesquelles s'appuyer. Ces cartes n'ont donc qu'une valeur régionale et ne permettent pas de descendre à l'échelle du massif.

Les faiblesses actuelles du hêtre

À long terme, seule une meilleure connaissance des processus écologiques (phénologie, reproduction, mortalité...) permettra une approche réaliste, via des modèles, de ce qui pourra se passer en forêt sous l'influence du changement du climat. Le renforcement des recherches sur l'écologie des espèces ligneuses devra être complété par un renforcement des données de suivi à long terme qui permettront notamment d'alimenter et de valider ces modèles.

De nouveaux outils seront nécessaires. Le projet de Système d'information phénologique pour l'étude et la gestion des changements climatiques (SIP-GECC), piloté par le CNRS (I. Chuine) et couvrant les divers types de végétation s'inscrit dans cette perspective. Le projet QDiv (*Quantifying the effects of global environmental change on terrestrial plant diversity*, Quantification des effets des changements globaux sur la diversité des plantes terrestres), initié en janvier 2006, regroupant notamment des unités INRA, CNRS et le réseau d'arboretums publics, permettra de développer un modèle basé sur les processus pour le hêtre.

Mais les outils de suivi déjà en place fourniront également des données précieuses. À ce titre, l'analyse des variations de l'état des cimes (estimation visuelle, mesure de la surface foliaire à partir des chutes de litière ou à l'aide de mesures de lumière sous couvert) et l'analyse de la croissance devraient permettre d'affiner la modélisation de l'impact d'un certain nombre de contraintes environnementales comme les sécheresses.

Nous passons ci-après rapidement en revue les principaux facteurs de « fragilité » du hêtre actuellement connus avec l'idée que certains de ces facteurs pourraient jouer un rôle significatif dans l'évolution future de l'espèce, tout en gardant à l'esprit qu'il n'est souvent pas possible de mesurer, à ce stade, quels seront leurs rôles précis.

Sécheresse et état sanitaire du hêtre

L'augmentation du déficit foliaire du hêtre observée en 2004 suite à l'été chaud et sec de 2003 (données du réseau européen de suivi des dommages forestiers, Renaud et Nageleisen 2005, figure 2) est conforme aux analyses réalisées sur l'incidence des stress hydriques sur l'état des houppiers du hêtre (Badeau, 1999a, b). En dépit de sa

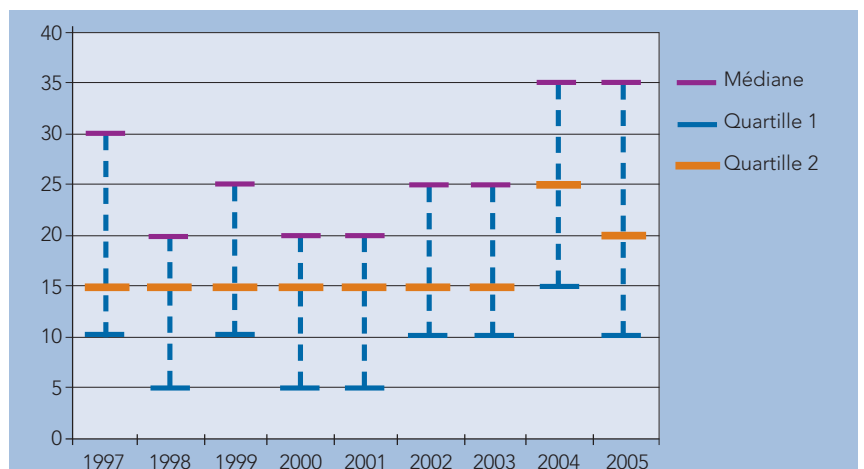


Fig. 2 : évolution du taux de déficit foliaire médian du hêtre, dans le réseau de suivi des dommages forestiers (16 x 16 km) — Source : Ministère de l'agriculture et de pêche (DSF)

forte sensibilité au manque d'eau, évoquée plus haut, le hêtre apparaît ainsi comme une essence capable d'une récupération rapide et très importante, ne subissant que des mortalités très limitées, parmi les plus basses enregistrées dans les réseaux de surveillance des forêts. On a pu évoquer à ce propos le « paradoxe » du hêtre. Cependant l'analyse des dépérissements passés de hêtre liés à la sécheresse, en particulier suite à la période sèche 1989-1991 (Nageleisen, 1993, 1995), incite à la prudence dans l'interprétation des informations recueillies sur un réseau à maille large tel que le réseau européen de suivi des dommages forestiers ; il ne permet pas en effet de mettre en évidence des phénomènes parfois marqués mais très localisés. Suite à la sécheresse et la canicule de 2003, des observations de mortalité de branches et de descente de cime dans diverses régions montrent que l'impact est loin d'être négligeable et des effets cumulatifs avec d'autres aléas restent possibles.

Excès d'eau

Moins de précipitation en été, davantage en hiver, c'est ce que prédisent de façon récurrente les modèles climatiques à long terme. Le risque est une augmentation de l'engorgement du sol en durée et en intensité dans des stations où le hêtre occupe une place importante (luvisols plus ou moins rédoxyques). Au stade juvénile, cette essence est très sensible à l'ennoyage avec une forte mortalité racinaire liée à l'absence de mécanismes spécifiques d'adaptation (Belgrand, 1983) et un dysfonctionnement de la photosynthèse (Dreyer, 1994). Ceci explique qu'en régénération, dans ces milieux, les semis lèvent difficilement ou meurent rapidement (Becker, 1983, Lévy *et al.*, 1989, Lévy et Lefèvre 2001). Au stade adulte, le hêtre est également sensible à une augmentation de la hauteur de la nappe. Des dépérissements localisés après les

hivers et printemps très pluvieux sont souvent observés. De même, la création de conditions anoxiques de surface, suite à un tassement anthropique du sol, est préjudiciable à l'état de santé du hêtre, comme cela a été montré en forêt de Soignes (Herbauts *et al.*, 1998) et observé en forêt de Chaux par exemple. Si les processus sous-jacents sont encore mal connus, il semble que l'altération d'une partie du système racinaire, souvent traçant, suffise à induire des dépérissements en liaison avec un amoindrissement de la résistance à la sécheresse. D'où l'importance d'une sensibilisation des acteurs impliqués aux effets de la mécanisation sur la qualité des sols (Lamandé *et al.*, 2004).

Anomalies thermiques (canicules, hivers doux, gels)

Revenons au deuxième paramètre climatique qui apparaît dans le modèle biogéographique de répartition actuelle du hêtre, à savoir la température ; il est intéressant de noter que parmi les facteurs climatiques qui ont récemment affecté le hêtre figurent des chutes brutales de température en automne, alors que l'endurcissement des arbres n'était encore que partiel. C'est du moins l'hypothèse sur laquelle travaille une équipe de l'INRA à Clermont Ferrand (T. Ameglio) après les observations de terrain réalisées en Ardenne belge et française à la suite de l'épisode marquant de novembre 1998 qui a, sinon causé des mortalités massives, du moins gravement déprécié plus de deux millions de m³ de bois de hêtre dans cette région transfrontière (Belgique, France, Luxembourg, Rhénanie-Palatinat) (Huart et Rondeux, 2001 ; Nageleisen et Huart, 2005). Dans les modèles climatiques cherchant à expliquer les variations interannuelles de croissance, cette période apparaît également importante. L'augmentation de la respiration d'entretien des tissus de l'arbre, induite par l'augmentation de

la température, à une période de l'année où la photosynthèse est terminée, pourrait amener à une consommation augmentée des réserves carbonées (Bréda *et al.*, 2002), entraînant une péjoration du bilan carboné annuel de l'arbre. Les modèles basés sur les processus, couplés à des recherches sur la gestion des réserves, devraient permettre à moyen terme de tester cette hypothèse. Dernière observation allant dans le même sens, des températures hivernales élevées apparaissent défavorables à la croissance en hauteur du hêtre (Seynave *et al.*, 2005). La température moyenne de janvier serait même aussi importante que les conditions estivales pour expliquer les variations de l'indice de fertilité (hauteur dominante à un âge donné) des hêtraies dans le Nord de la France. La clémence des températures automnales et hivernales et ses conséquences sont certainement des facteurs à analyser plus avant.

Tempêtes

Suite aux récentes tempêtes de 1990 et surtout 1999, la crainte d'une fréquence accrue d'événements tempétueux s'est fait jour, et la question d'une gestion plus spécifique ce risque également. Alors que l'augmentation de la fréquence des tempêtes reste débattue, la réflexion sur les composantes d'une gestion adaptée au risque vent est en cours, sur la base des recherches engagées dans le cadre de programmes coordonnés par le GIP Ecofor. Concernant le hêtre, le rôle clé de la hauteur et de la structure des peuplements, en interaction avec les contraintes stationnelles, a été bien mis en évidence par Bock *et al.* (2006). Dans le contexte des changements climatiques discuté ici, on notera que le détrempage des sols, identifié comme un facteur qui a pesé lourd dans l'importance des dégâts des dernières tempêtes, nous ramène à la question des précipitations hivernales évoquée plus haut :

toutes les futures tempêtes ne se produiront pas sur des sols aussi détrempés que les dernières mais, en tendance, la probabilité de retrouver une situation de type 1999 augmente.

Insectes ravageurs et champignons pathogènes

Globalement, le hêtre est une essence qui présente un cortège de ravageurs et de pathogènes nettement plus réduit que ceux de la plupart des essences feuillues (Nageleisen, 2002). Cependant, c'est moins le nombre de parasites qui importe dans la perspective des changements climatiques que l'existence de quelques-uns qui peuvent, sous certaines conditions (largement inconnues à l'heure actuelle), avoir des phases épidémiques et causer des dommages importants. Ainsi, la cochenille du hêtre (Perrin, 1977) a-t-elle causé au cours des années 1970 un dépérissement du hêtre en Normandie qui a perturbé la gestion locale de l'espèce (Mormiche, 1995). Il convient surtout de s'interroger sur les types de ravageurs ou de pathogènes qui pourraient tirer parti d'un climat plus chaud, plus sec, etc. À ce titre, les observations réalisées par le département de la santé des forêts dans le cadre de la « maladie du hêtre des Ardennes », mentionnée précédemment, sont très intéressantes. En effet, si les scolytes xylophages mis en cause ou les champignons lignivores observés font partie du cortège classique des endémiques de la hêtraie, ils ont connu lors de cet événement un développement explosif jamais vu auparavant. Le facteur déclenchant semble avoir été le gel intervenu à la mi-novembre 1998, à un moment où les arbres étaient sans doute insuffisamment endurcis, ce qui a provoqué des lésions importantes favorisant la pénétration de champignons et à l'origine de suintements abondants et très attractifs pour certains insectes xylophages. Enfin, il faudra prendre en compte



Hêtre mal feuillé au printemps 2006 dans la Vôge

Ces symptômes sont apparus après à l'été 2005 dans un contexte de nutrition calco-magnésienne déficitaire

L.-M. Nageleisen, DSF

la possible émergence de parasites, encore inconnus ou absents en France actuellement, qui pourraient profiter de nouvelles conditions climatiques. Une surveillance phytosanitaire intensive est à ce titre plus que jamais d'actualité pour éviter ou au moins gérer le plus tôt possible de telles éventualités.

Les interactions entre divers aléas, enfin, sont à prendre en compte. Il faut reconnaître que, globalement, et au-delà de l'idée bien ancrée que de tels modes d'action pourraient être importants, les cas bien établis sont peu fréquents et leur importance potentielle mal évaluée.

Un exemple qui s'impose aux observateurs de terrain est que les hêtraies fragilisées par des trouées de chablis multiples à la suite des tempêtes de 1999 ont subi de manière accentuée les effets de l'été 2003. En 2004, on a ainsi assisté à une multiplication des coups de soleil avec décollement d'écorce irrémédiable sur les fûts ou à des mortalités de la moitié supérieure du houppier dans les hêtraies clairiérées. Ces phénomènes sont encore plus accentués dans le cas d'un tassement du sol lié à l'exploitation sans précaution

des chablis. Ces effets cumulés peuvent se traduire dans certains cas par la disparition de la hêtraie et la nécessaire substitution par une autre essence (chêne sessile par exemple) dans les cas où le sol a été durablement perturbé.

Les interactions soupçonnées – ou établies seulement en conditions contrôlées difficilement extrapolables – comme celles entre sécheresse et ozone ou sécheresse et altération des sols sous l'effet des retombées atmosphériques ne doivent pas non plus être perdues de vue. Une observation faite sur le hêtre après la sécheresse de 2003 sur des sols très pauvres dans la région naturelle de la Vôge (département des Vosges) est particulièrement intéressante car des hêtraies ayant bénéficié d'un amendement calco-magnésien présentent nettement moins de dommages que les autres. Cette observation, bien qu'inédite, est cohérente avec les résultats acquis antérieurement, en particulier dans le cadre des recherches sur les pluies acides. Elle fait l'objet d'investigations plus approfondies. Modifications de la phénologie, de la reproduction ou de la croissance, tous les divers problèmes auxquels le hêtre sera exposé au cours des décennies à venir doivent être ana-

lysés, quantifiés et intégrés dans les modèles basés sur les processus pour comprendre ce qui risque de se passer réellement entre maintenant et 2100 (figure 1). On mesure l'ampleur de la tâche.

Le temps de la décision ?

Qu'advient-il du hêtre d'ici 2100 ? L'examen des connaissances oblige à dire qu'on ne sait pas vraiment, même si on doit retenir l'idée que des modifications importantes interviendront pour cette essence.

Les gestionnaires forestiers, très conscients des évolutions à venir, souhaitent connaître les mesures d'adaptation qui permettraient de minimiser les inconvénients liés à ces modifications.

Certaines recommandations de bon sens ont été formulées sous des formes proches depuis une dizaine d'années (Bouhot et Barthod, 1993 ; Landmann, 2000 ; Riou-Nivert, 2005) :

- ne pas maintenir le hêtre dans des conditions stationnelles qui lui sont défavorables, en particulier du point de vue hydrique ;
- limiter la compétition pour l'eau par une sylviculture réduisant la densité des tiges ou, selon des modalités à définir, l'indice foliaire (qui détermine largement le besoin en eau). Une telle conduite devrait également réduire le risque vis-à-vis du vent.

Ces deux recommandations visent à prévenir et diminuer les risques. D'autres recommandations classiques, telles que le recours aux mélanges d'essences sont d'une efficacité plus difficile à évaluer, l'idée étant que les essences moins vulnérables pourraient prendre le relais en cas de dépérissement d'une autre d'entre elles. Le comportement respectif des différentes essences dans le climat futur sera déterminant, et mérite des investigations plus poussées.

D'autres précautions résultent directement de l'examen de la situation actuelle du hêtre : sensi-

bilité au tassement des sols, sensibilité aux tempêtes, ou de la connaissance de l'évolution des facteurs limitants : les risques de carences nutritives pour une essence dont l'augmentation de productivité passée est considérable restent à surveiller, de même, bien sûr, que les divers agents biotiques connus ou pouvant se manifester.

À quand alors une stratégie précise c'est-à-dire adaptée à l'échelle où le gestionnaire réalise ses plans d'aménagements (de la « région » à la « forêt ») ? Faut-il suggérer d'attendre dix ans, et de nouveaux progrès de la recherche ? Une autre stratégie semble actuellement se dégager, qui s'appuie sur deux constats :

- les recommandations listées ci-dessus nécessiteront une mobilisation coordonnée des outils disponibles (notamment des catalogues de station) et sans doute la mise au point d'outils de diagnostic nouveaux qui appréhendent mieux les paramètres importants comme la réserve en eau des sols. La cartographie des stations reste une étape incontournable. On pourra alors s'orienter vers une mise en adéquation plus poussée des essences et des stations ;
- la stratégie d'adaptation devra être révisée régulièrement en fonction des derniers résultats de la recherche scientifique et de la surveillance de la forêt.

Ce double constat incite à un travail conjoint entre scientifiques et gestionnaires plus poussé que ce qui a pu être le cas jusqu'ici. La meilleure façon de s'y prendre reste à découvrir, mais la volonté des deux parties d'aller dans cette direction semble acquise. La co-construction d'une stratégie, qui se situe sur le terrain de l'expertise, doit permettre de répondre à des questions plus complexes, par exemple : faut-il, et si oui, comment envisager une transformation active des hêtraies de l'Ouest ? les orientations et recommandations techniques en vigueur concernant

le hêtre vont-elles toutes dans le bon sens ? etc. Cette analyse doit également tenir compte de l'évolution socio-économique dont l'influence sur la forêt pourra peser lourdement sur la gestion de la hêtraie française : c'est un défi que de gérer conjointement les deux dimensions – écologique et socio-économique – de cette question.

Guy LANDMANN

GIP ECOFOR, Paris
landmann@gip-ecofor.org

Jean-Luc DUPOUEY

Vincent BADEAU

Yves LEFEVRE

Nathalie BREDA

UMR INRA-UHP 1137

Écologie et Écophysiologie Forestières
Équipe Phyto-écologie forestière, Nancy
dupouey@nancy.inra.fr
badeau@nancy.inra.fr
lefevre@nancy.inra.fr
breda@nancy.inra.fr

Louis-Michel NAGELEISEN

DSF Antenne spécialisée, INRA
Nancy
nageleisen.dsf@wanadoo.fr

Isabelle CHUINE

CNRS-CEFE Équipe BIOFLUX,
Montpellier
isabelle.chuine@cefe.cnrs.fr

François LEBOURGEOIS

UMR INRA-ENGREF 1092
LERFOB, Équipe Ecologie Forestière
ENGREF Nancy
lebourggeois@engref.fr

Bibliographie

BADEAU V., 1995. Etude dendroécologique du hêtre (*Fagus sylvatica* L) sur les plateaux calcaires de Lorraine : influence de la gestion sylvicole. Thèse, Université de Nancy I Henri Poincaré. 222 p.

BADEAU V., BRÉDA N., LANDMANN G., 1997. La récente crise de vitalité du hêtre en plaine semble largement liée aux déficits hydriques. Les

Cahiers du DSF, n°1-1997 (La Santé des Forêts [France] en 1996). Paris : Ministère de l'agriculture et de la pêche DERF, pp. 60-63

BADEAU V., 1999a. Étude des relations entre l'état sanitaire des peuplements forestiers et les conditions de l'environnement : premiers résultats de l'analyse spatio-temporelle de la partie française du réseau européen de suivi des dommages forestiers. Rapport final à la CE et à la DERF. Nancy : INRA. 172 p. + annexes.

BADEAU V., 1999b. Causes des variations de l'état des cimes : quelques enseignements tirés du réseau européen de suivi des dommages forestiers. Les Cahiers du DSF, n° 1-1999 (La Santé des Forêts [France] en 1998). Paris : Ministère de l'agriculture et de la pêche DERF, pp. 70-74

BADEAU V., DUPOUEY J.L., CLUZEAU C., DRAPIER J., LE BAS C., 2004. Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières françaises. In : Rapport final, CARBOFOR. Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France : quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles. Volet D1. Programme GICC, INRA Bordeaux, 101-111 <en ligne : <http://www.nancy.inra.fr/extranet/com/carbofor/carbofor-D1-resume.htm> >

BADEAU V., DUPOUEY J.L., CLUZEAU C., DRAPIER J., 2005. Aires potentielles de répartition des essences forestières d'ici 2100. Forêt Entreprise, n°162, pp. 25-29

BECKER M., LEVY G., 1983. Installation et dynamique d'une population de semis de chêne en milieu hydromorphe sous l'influence de divers facteurs (lumière, régime hydrique, compétition herbacée). Acta Oecologica. Oecologia Plantarum, vol. 4 (18), n°3, pp. 299-317

BELGRAND M., 1983. Comportement de jeunes plants feuillus (chêne

pédonculé, chêne rouge, chêne sessile, hêtre) sur substrat ennoyé : adaptations racinaires : application à la mise en valeur forestière des pseudogleys. Thèse INA-PG. 188 p.

BELROSE V., NAGELEISEN L.M., RENAUD J.P., 2004. Les conséquences de la canicule et de la sécheresse sur la santé des forêts : bilan à la fin de l'année 2003. Information Santé des Forêts, décembre 2004. Paris : Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche et de la ruralité DGFAR. 14 p.

BOCK J., VINKLER I., DUPLAT P., RENAUD J.P., BADEAU V., DUPOUEY J.L., 2005. Stabilité au vent des hêtraies : les enseignements de la tempête de 1999, Revue Forestière Française, vol. 57, n° 2 spécial « L'avenir du hêtre dans la forêt française », pp. 143-158

BOUHOT L., BARTHOD C., 1993. Utilisation des prévisions des modèles météorologiques pour le choix des essences forestières et la conduite des peuplements. La Santé des forêts [France] en 1992. Paris : Ministère de l'agriculture et de la pêche DERF, pp. 65-68

BREDA N., BARBAROUX C., DUFRENE E., 2002. Comparaison des dynamiques saisonnières de croissance, phénologie et réserves glucidiques chez le chêne sessile et le hêtre commun. Groupe d'Étude de l'Arbre, Biologie hivernale, Saint Flour, 22-22 mars 2002, Améglio T., Donès N. eds, Cdrom, ISBN 2-7380-1188-8

BREDA N., GRANIER A., AUSSENAC G., 2004. La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers. Revue Forestière Française, vol. 56, n° 2, pp. 109-131

CHUINE I., BEAUBIEN E., 2001. Phenology is a major determinant of temperate tree range. Ecology Letters, n° 4, pp. 500-510

DITTMAR C., ZECH W., ELLING W., 2003. Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe : a dendroecological study. Forest Ecology and Management, vol. 173, pp. 63-78

DREYER E., 1994. Compared sensitivity of seedlings from 3 woody species (*Quercus robur* L, *Quercus rubra* L and *Fagus sylvatica* L) to water-logging and associated root hypoxia : effects on water relations and photosynthesis. Annales des Sciences Forestières, vol. 51, pp. 417-429

DUPOUEY J.L., 1992. Déplacement des aires de répartition des essences forestières et évolution de la composition des peuplements. In : Landmann G. (ed.), Les recherches en France sur les écosystèmes forestiers : actualités et perspectives. Paris : Ministère de l'agriculture et de la pêche (DERF), pp. 57-58

DAVIS M.B., SHAW R.G., ETTERSON J.R., 2005. Evolutionary responses to changing climate. Ecology, vol. 86, pp. 1704-1714

GRANIER A., BADEAU V., BREDA N., 1995. Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. Revue Forestière Française, vol. 47, n° spécial « modélisation de la croissance des arbres forestiers et de la qualité des bois », pp. 59-68

HERBAUTS J., EL BAYAD J., GRUBER W., 1998. L'impact de l'exploitation forestière mécanisée sur la dégradation physique des sols : le cas des sols limoneux acides de la forêt de Soignes (Belgique). Revue Forestière Française, vol. 50, n°2, pp. 124-137

HUART O., RONDEUX J., 2001. Genèse, évolution et multiples facettes d'une maladie inhabituelle affectant le hêtre en région wallonne. Forêt wallone, n°52, pp. 8-19

LAMANDE M., RANGER J, LEFEVRE Y., 2005. Effets de l'exploitation forestière sur la qualité des sols. Coll. Les dossiers forestiers, n°15. Paris : ONF. 131 p.

LANDMANN G., 2000. Le sylviculteur face aux changements climatiques : possibilités et limites de l'intervention humaine. In : REBETEZ M., COMBE J. (éds) Quelle sylviculture pour les climats à venir ? Actes de la Journée romande, pp.37-42

LANDMANN G., BREDA 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. 229-306

LEBOURGEOIS F., BREDA N., ULRICH E., GRANIER A., 2005. Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). Trees, vol. 19, n°4, 2, pp. 385-401

LEBOURGEOIS F., 2005. Approche dendroécologique de la sensibilité du hêtre (*Fagus Sylvatica* L.) au climat en France et en Europe. Revue Forestière Française, vol. 57, n°1, pp. 33-50

LEVY G., BECKER M., GARREAU B., LEFEVRE Y., 1986. Comportement expérimental de semis de chêne pédonculé, chêne sessile et hêtre en présence d'une nappe d'eau dans le sol. Annales des Sciences Forestières, vol. 43, pp. 131-146

LEVY G., LEFEVRE Y., 2001. La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire : contraintes subies, choix des essences, interventions et gestion durable. Nancy : ENGREF. 223 p.

MORMICHE A., 1994. La gestion du dépérissement du hêtre en Normandie 1961-1988. Revue Forestière Française, vol. 46, n°5 spécial « Les dépérissements forestiers : causes connues et inconnues », pp. 586-590

NAGELEISEN L.M., 1993. Le point sur les dépérissements du hêtre. La Santé des Forêts [France] en 1992. Paris : Ministère de l'agriculture et de la pêche DERF, pp. 23-26

NAGELEISEN L.M., 1994. Le dépérissement actuel de feuillus divers : hêtre, merisier.... Revue Forestière Française vol. 46, n°5, n°spécial « Les dépérissements forestiers : causes connues et inconnues », pp. 554-562

NAGELEISEN L.M., 2002. Les principaux problèmes phytosanitaires du hêtre (annexe 4). In : Le hêtre autrement, G. ARMAND (coord.), Paris : IDF, pp. 216-229

NAGELEISEN L.M., HUART O., 2005. Problèmes sanitaires d'actualité en hêtraie : la maladie du hêtre dans les Ardennes. Revue Forestière Française, vol. 57, n° 2 spécial « L'avenir du Hêtre dans la forêt française », pp. 249-254

PERRIN R., 1977. Le dépérissement du hêtre. Revue Forestière Française, vol. 29, n°2, pp.101-126

PILARD-LANDEAU B., PIAT J., JOURDAIN M., FONTELLE D., 1994. Le dépérissement actuel du hêtre en Picardie. Revue Forestière Française, vol. 46, n° 5 spécial « Les dépérissements forestiers : causes connues et inconnues », pp. 547-553

Power S.A., 1994. Temporal trends in twig growth of *Fagus sylvatica* L. and their relationships with environmental factors. Forestry, vol. 67, pp. 13-30

RENAUD J.P., NAGELEISEN L.M., 2005. Les résultats 2004 du réseau européen de suivi des dommages forestiers. (La santé des forêts [France] en 2004) Paris : Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche et de la ruralité DGFAR. <en ligne : http://www.agriculture.gouv.fr/spip/re_ssources.themes.foretbois.protection-delaforet.santedesforets_r314.html>

RIOU-NIVERT P., 2005. Changements climatiques et sylviculture. Forêt Entreprise, n°162, pp. 49-53

ROQUEPLO P., 1988. Pluies acides : menaces pour l'Europe. Paris : Economica. 357 p.

SEYNAVE I., GEGOUT J.C., HERVE J.C., DHOTE J.F., 2005. Facteurs écologiques et production du hêtre en France, Forêt-entreprise, sous presse.

SHUGART H.H., 1984. A theory of forest dynamics : the ecological implications of forest succession models. New York : Springer Verlag. 278 p.

STRIBLEY G.H., ASHMORE M.R., 2002. Quantitative changes in twig growth pattern of young woodland beech (*Fagus sylvatica* L.) in relation to climate and ozone pollution over 10 years. Forest Ecology and Management, vol. 157, pp. 191-204

SYKES M., PRENTICE I.C., CRAMER W., 1996. A bioclimatic model for the potential distributions of north European tree species under present and future climates. Journal of Biogeography, vol. 23, pp. 203-233

THUILLER W., LAVOREL S., ARAUJO M.B., SYKES M.T., PRENTICE I.C., 2005. Climate change threats to plant diversity in Europe. Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 102, pp. 8245-8250