RenDez-Vous techniques

n 10 - automne 2005

patrimoine

sylviculture

progrès

connaissances

économie

forêts et société

environnement

biodiversité

gestion durable



Forêts hétérogènes

Dossier p.17

Compas enregistreurs

p. 12



Office National des Forêts

RenDez-Vous techniques

Directeur de la publication
Jacques Valeix
Rédactrice en chef
Dominique de Villebonne
Comité éditorial
Yves Birot, Peter Breman, Jean-Marc Brézard, François Chièze, Jean-Luc Dunoyer, Claude Jaillet, Patrice Mengin-Lecreulx, Rémy Metz, Pierre-Jean Morel, Frédéric Mortier, Jérôme Piat, François-Xavier Rémy, Jacques Valeix, Dominique de Villebonne
Maquette, impression et routage
Imprimerie ONF - Fontainebleau
Conception graphique
NAP (Nature Art Planète)

Crédit photographique
page de couverture
En haut : futaie irrégulière (Ch. Allégrini, CRPF)
En bas : martelage au compas enregistreur (Y. Gouchet, ONF)
Périodicité
4 numéros par an, et un hors série
Rendez-vous techniques est disponible au numéro ou par abonnement auprès de la cellule de documentation technique, boulevard de Constance, 77300 Fontainebleau
Contact : dtech-documentation@onf.fr
ou par fax : 01 64 22 49 73
prix au numéro : 10 euros
abonnement : 45 euros (tarif 2005) durée 1 an
(4 numéros et un hors série 2005)
Dépôt légal : novembre 2005

Toutes les contributions proposées à la rédaction sont soumises à l'examen d'un comité de lecture.

sommaire
n°10 - automne 2005

3 connaissances
Ozone en zone forestière : observations dans le réseau Renécofor
par Erwin Ulrich et al.

12 pratiques
Déploiement des compas enregistreurs à l'ONF : faisons le point
par Myriam Legay, Dominique Drogue, James Wright et Pascal Bardeau

17 dossier thématique
Forêts hétérogènes : définitions, enjeux et principes de gestion

56 pratiques
Retour du hêtre et du sapin dans les pineraies de l'arrière pays méditerranéen
par Jean-Marc Courdier et Philippe Dreyfus

63 pratiques
Intérêt des arboreta pour la gestion forestière
par Thierry Lamant

67 pratiques
Discrimination des principales espèces de pins « à cinq feuilles »
par Thierry Lamant

éditorial

De la recherche au développement, ce numéro des « Rendez-vous techniques » explore différentes facettes de la gestion forestière durable et s'intéresse particulièrement à notre cœur de métier. En matière de recherche tout d'abord : dans quelle mesure les concentrations d'ozone varient-elles en France et comment la végétation forestière réagit-elle ? Grâce au réseau Renecofor, des résultats inédits pour la France ont pu être acquis dans ce domaine. En matière de développement, l'établissement modernise ses méthodes de travail et le martelage a bénéficié d'avancées technologiques avec le déploiement progressif des compas enregistreurs. Un bilan de cette opération est dressé dans ces colonnes.

Ce numéro ouvre également une réflexion sur la gestion des forêts hétérogènes, qu'elles soient mélangées en essences ou hétérogènes en structure. Le sujet est complexe et, de fait, beaucoup moins documenté et formalisé que celui du traitement en futaie régulière de peuplements comprenant une essence dominante.

Pour autant, il existe des pratiques et des savoir-faire tant au sein de l'établissement qu'en forêt privée ou à l'étranger. Il importe de les expertiser, de mutualiser les meilleurs savoirs et pratiques, afin de progresser dans les méthodes de diagnostic, la définition des itinéraires sylvicoles et le suivi de leur application.

Les forêts hétérogènes sont également des objets d'étude de plus en plus explorés par la recherche. Ces colonnes rendent compte des résultats pouvant éclairer la gestion.

Le dossier de ce numéro des « Rendez-vous techniques » jette ainsi des bases nécessaires à la réflexion sur ces systèmes forestiers complexes, avec un effort de définition des forêts hétérogènes, un panorama historique des traitements en futaie irrégulière, un état des forêts mélangées dans le Nord de la France et des pratiques de gestion, un développement sur la qualité du bois dans les forêts hétérogènes, enfin les grands principes de gestion de ces systèmes.

Un dossier plus pratique et centré sur la gestion et le suivi de ces peuplements paraîtra ultérieurement.

Le directeur technique et commercial bois



Jacques VALEIX

Concentrations d'ozone en zone forestière et symptômes d'ozone observés sur la végétation dans le réseau Renécofor

C'est dans les sites du réseau Renécofor que les mesures françaises de concentration d'ozone en forêt ont été réalisées parallèlement à l'observation de symptômes sur les arbres et les espèces végétales présentes. Après avoir présenté dans le numéro précédent[1] les enjeux que l'ozone pourrait faire peser à l'avenir sur les forêts, les auteurs montrent, grâce à leurs travaux nouveaux pour la France, que les niveaux de concentration de ce polluant, et les cumuls d'exposition sur la saison de végétation ont un effet sur les essences forestières ou les espèces herbacées, variable selon les espèces.

Afin d'avoir suffisamment de connaissances précises sur ce sujet en France et un moyen de jugement sur l'impact actuel de l'ozone, des mesures pluriannuelles ont été lancées. Elles s'inscrivent dans trois cadres : (1) la directive 2002/3/CE relative à l'ozone dans l'air ambiant, (2) les activités liées à la surveillance des forêts en Europe, financées par le règlement européen n°3528/86 et par plusieurs autres règlements qui en découlent et (3) la participation de la France à la convention de Genève de l'ONU sur la pollution transfrontière à longue distance. Dans ce dernier cas, le programme international concerté (PIC) Forêts s'investit depuis 20 ans dans la surveillance d'un nombre élevé de critères environnementaux en forêt, dont l'ozone depuis 2000. Le réseau Renécofor représente avec ses 102 sites la partie française d'un réseau de plus de 850 sites d'observation intensive en Europe. Dès 2000, il a servi de base pour ces mesures.

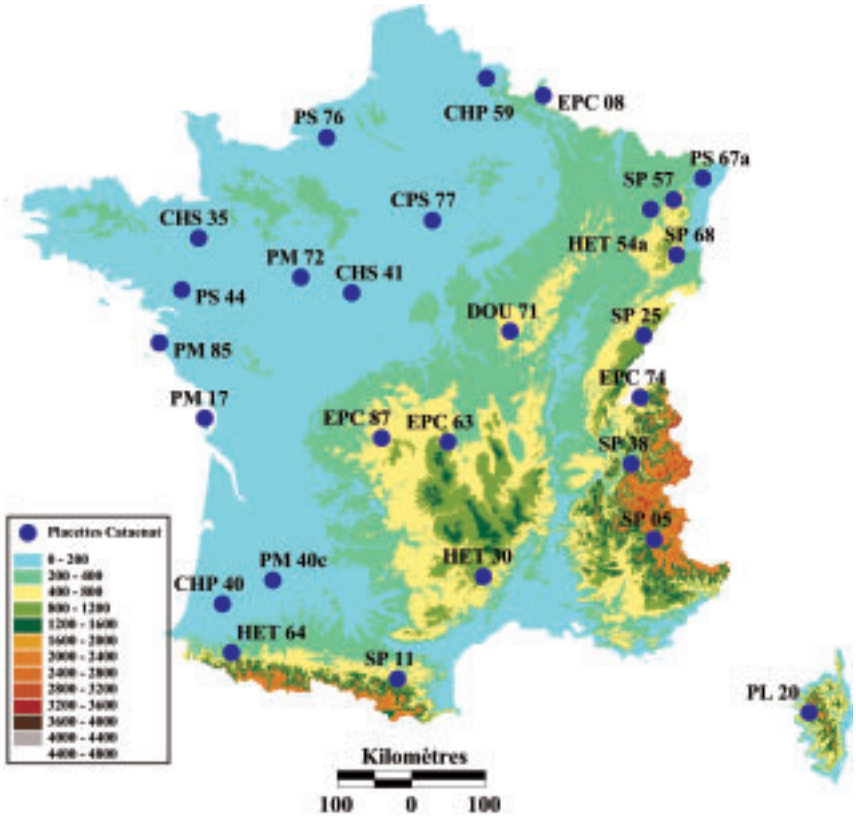


Fig. 1 : localisation des 27 lieux de mesure des concentrations d'ozone faisant partie des 102 sites du réseau Renécofor

Mesure des concentrations d'ozone

L'objectif des mesures de concentrations d'ozone a été de définir les niveaux moyens d'ozone, sachant qu'un niveau élevé est également susceptible d'entraîner un nombre plus important d'épisodes à fortes concentrations pouvant nuire à la végétation. La France ne possédait aucun dispositif de surveillance de l'ozone en zone forestière.

Les évolutions récentes des techniques de mesures de concentrations d'ozone dans l'air ont conduit à une diminution très forte du coût annuel du suivi, grâce au développement de petits capteurs

1 Effets de l'ozone sur la végétation forestière. Introduction générale dans la problématique, 2005 (RDVT n°9)

passifs, que l'on peut exposer durant une à quatre semaines. L'erreur de mesure de ces capteurs est de 5 à 7 % dans la plupart des cas.

Les capteurs ont été exposés durant des périodes consécutives de deux semaines dans 26 à 27 sites du réseau Renécofor (figure 1 et tableau 1), où l'on dispose de mesures météorologiques (photo 1). Lors de la mise en place et de l'échange des capteurs, la date et l'heure exacte sont notées, la durée d'exposition étant une entrée importante pour le calcul de la concentration moyenne.

Une répartition de l'ozone fonction de l'altitude

En trois ans, 1041 données de concentrations ont permis de définir un climat de pollution ozonique moyen pendant la période de végétation, de 66 µg/m³ sur les 26 sites. Ce chiffre semble assez élevé, car il s'agit de la moyenne de concentrations bimensuelles (de mi-avril à mi-octobre), l'AOT40[2] pour les mesures horaires étant fixé à 80 µg/m³. L'essentiel des concentrations bimensuelles se situe entre 32 et 100 µg/m³.

Les concentrations moyennes d'ozone des trois années triées par site (tableau 1) permettent de déceler des différences régionales. Les valeurs minimales les plus fortes se retrouvent majoritairement en montagne et les concentrations maximales les plus élevées sont relevées seulement en montagne. Les plus faibles valeurs moyennes (jusqu'à 65 µg/m³) sont enregistrées essentiellement en plaine, à l'exception du site des Vosges gréseuses, près d'Abreschviller (SP 57, 400 m d'altitude, situé au milieu d'un vaste massif forestier et loin des sources directes de pollution ozonique). Puis, suivent les sites de colline ou moyenne montagne, à l'exception de l'Île d'Oléron (PM 17), avec des concentrations moyennes comprises entre 65 et 77 µg/m³. Les six sites de montagne (EPC 74, HET 30, PL 20, SP 11, SP 25, SP 38) sont caractérisés par des concentrations allant de 75 à 89 µg/m³. Il existe un facteur de deux seulement entre les sites avec la moyenne la plus haute et la plus basse.



L. Croisé, ONF

Photo 1 : abri du capteur passif d'ozone, développé par IVL, fixé sur un poteau de 3 m (au milieu de la photo) près de la forêt de Ban (SP 25)

L'examen de l'amplitude (différence entre maximum et minimum) ne fait pas apparaître d'écart entre régions. Elle est vraiment spécifique à chaque lieu, en fonction de son environnement (origines des masses d'air, sources d'émissions, météorologie, etc.).

L'ensemble de ces données traduit donc une répartition générale de l'ozone en fonction de l'altitude. L'épaisseur de la couche d'air que les rayons UV (énergie nécessaire pour la production d'ozone) doivent traverser en montagne est plus faible qu'en plaine (ici en moyenne de 1000 m). Cela se traduit par plus d'énergie active en altitude. Ce gradient est assez net (figure 2), à l'exception des sites de basse altitude qui montrent une dispersion plus large. Celle-ci peut s'expliquer par des conditions d'émission de précurseurs d'ozone bien plus fluctuantes à basse altitude en raison de la plus forte variabilité de la densité et de l'activité de la population.

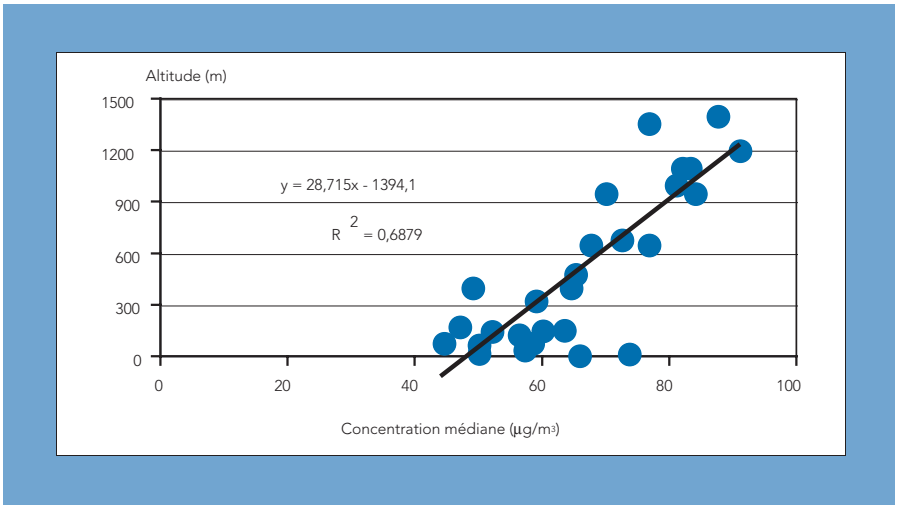


Fig. 2 : relation entre les concentrations médianes d'ozone pendant la saison de végétation (données des années 2000 à 2002) et l'altitude de chaque site

2 Accumulated exposure over a treshold of 40 ppb ou nl⁻¹ (Exposition cumulée au-dessus du seuil de 40 ppb ou nl⁻¹), qui est le seuil critique accepté au niveau international ; remarque : 40 ppb ≈ 80 µg/m³. Par exemple, si entre 13 et 14 h on a mesuré une moyenne de 121 µg/m³, on utilise 121-80 = 41 µg/m³ pour le calcul du cumul pour le AOT40.

Code placette[1]	Département	Altitude (m)	Forêt[2]	Année d'observation des symptômes	Pluviosité moyenne 2000-2002 (mm)	Nombre de données	Moyenne	Minimum	Maximum
CHP 40	Landes	20	FC de Gamarde	2002	1164	39	49	30	68
CHP 59	Nord	149	FD de Mormal	2002	1070	38	51	32	71
CHS 35	Ille-et-Vilaine	80	FD de Rennes	2002	900	39	56	38	73
CHS 41	Loir-et-Cher	127	FD de Blois	—-	830	39	56	37	78
CPS 77	Seine-et-Marne	80	FD de Fontainebleau	—-	875	52	43	19	61
DOU 71	Saône-et-Loire	650	FD d'Anost	—-	1499	38	68	38	92
EPC 08	Ardennes	480	FD de Château-Regnault	—-	1439	38	67	41	95
EPC 63	Puy-de-Dôme	950	FS de Manson	2003	1045	39	70	48	88
EPC 74	Haute-Savoie	1200	FD de Voirons	2001	1516	39	89	58	112
EPC 87	Haute-Vienne	650	FS de Monteil	—-	1394	37	77	57	97
HET 30	Gard	1400	FD de l'Aigoual	2001	2228	51	85	55	142
HET 54a	Meurthe-et-Moselle	325	FD de Hauts Bois	—-	1026	14	58	33	69
HET 64	Pyrénées-Atlantiques	400	FC d'Ance	2001	1384	39	68	54	90
PL 20	Corse	1100	FD d'Aitone	2001	1340	37	83	55	103
PM 17	Charente-Maritime	15	FD d'Oléron	2002	890	39	76	54	100
PM 20	Corse	850	FD de Zonza	2001	nm	nm	nm	nm	nm
PM 40c	Landes	150	FC de Losse	2002	832	39	58	40	79
PM 72	Sarthe	153	FD de Bercé	2002	935	39	63	38	83
PM 85	Vendée	5	FD des Pays de Monts	2002	877	38	65	40	87
PS 15	Cantal	1000	FS de Paulhac	2003	nm	nm	nm	nm	nm
PS 44	Loire-Atlantique	38	FD du Gavre	2002	981	38	57	38	72
PS 63	Puy-de-Dôme	750	FS de la Bosdonie et aut.	2003	nm	nm	nm	nm	nm
PS 67a	Bas-Rhin	175	F. Indivise d'Haguenau	2002	894	39	47	20	69
PS 76	Seine-Maritime	70	FD de Brotonne	2002	1015	39	51	25	71
SP 05	Hautes-Alpes	1360	FD de Boscodon	2001	966	38	76	50	95
SP 11	Aude	950	FD de Callong-Mirailles	2001	1171	38	84	71	106
SP 25	Doubs	1000	FD de Ban	2001	1491	39	81	59	104
SP 38	Isère	1100	FD de Saint-Hugon	2001	1556	39	80	53	110
SP 57	Moselle	400	FD d'Abreschviller	—-	1472	39	51	29	115
SP 68	Haut-Rhin	680	FD de Guebwiller	2001	1496	38	71	46	96
Total						**1041**	**66**	**19**	**142**

1 Les essences sont : CHP = chêne pédonculé, CHS = chêne sessile, CPS = mélange de chênes pédonculés et sessiles, EPC = épicéa commun, DOU = douglas, HET = hêtre commun, PL = pin laricio, PM = pin maritime, PS = pin sylvestre, SP = sapin pectiné.
2 FD = forêt domaniale ; FC = forêt communale ; FS = forêt sectionale ; n.m. = non mesuré

Tab. 1 : caractéristiques et statistiques générales par site des concentrations d'ozone mesurées par capteur passif pour 27 sites, de 2000 à 2002, pendant la période de végétation (mi-avril à mi-octobre) durant des périodes d'exposition consécutives de 14 jours. Les valeurs sont en µg/m³

Évolution des concentrations durant les trois périodes de végétation

Trois années de mesures permettent de faire une première caractérisation générale du comportement des concentrations moyennes d'ozone pour chaque site durant la période de végétation.

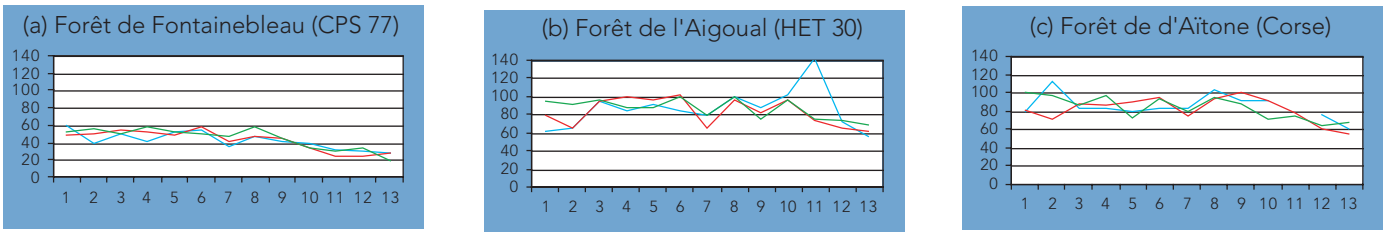


Fig. 3 : exemples de quelques évolutions des concentrations moyennes d'ozone par période de 14 jours pendant les saisons de végétation de 2000 (bleu), 2001 (rouge) et 2002 (vert) (1=mi-avril, 13=mi-octobre) : (a) relative homogénéité des concentrations d'ozone entre les années ; (b) pic d'ozone en début septembre 2000 (période 11) ; (c) haut niveau de concentrations

Une relative homogénéité des niveaux d'ozone est observée entre les années (par exemple figure 3a), ainsi qu'une diminution des concentrations du début de la période de végétation (mi-avril) vers la fin (mi-octobre). Celle-ci est liée à la baisse de la température et de l'énergie solaire, à partir de début septembre. Les concentrations sont souvent plus fortes vers mai et montrent un deuxième pic, moins fort, vers juillet-août, parfois début septembre. Les sites d'altitude (par exemple figure 3c) et PM 17 de l'Île d'Oléron présentent régulièrement les niveaux les plus élevés. Certains pics, dont HET 30 en 2000, (période 11, figure 3b), sont liés à une météorologie particulière : fort ensoleillement et faible pluviosité (sinon pluies concentrées sur quelques jours seulement), empêchant le lessivage régulier des gaz et des poussières de l'atmosphère et favorisant la production de l'ozone sur plusieurs jours.

Le cumul d'ozone pendant la saison de végétation est préoccupant dans près de 80 % des sites

Un projet très original a été initié en 2003 par Ferretti *et al.* (2004), avec entre autre, l'objectif de modéliser sur ces sites l'AOT40 qui est un indicateur du cumul d'ozone pendant la période de végétation. Les résultats de cette première tentative d'estimation sont présentés dans le tableau 2. L'AOT40 estimé, allant en moyenne de 2 251 à 22 593 µg/m^3.h, varie d'un facteur 10 entre les sites du réseau. Trois groupes se distinguent :

- les sites avec des AOT40 situés au-dessous de 6 200 µg/m^3.h en moyenne (en bleu),
- la majorité des sites ayant les AOT40 entre 6 200 et 14 400 µg/m^3.h en moyenne (en noir),
- puis quatre sites avec les AOT40 les plus importants (en rouge).

Selon ces estimations, la valeur cible de la directive européenne de 2002 (voir article du précédent numéro) de 18 000 µg/m^3.h serait dépassée dans ces quatre sites et l'objectif à long terme de 6000 µg/m^3.h dans 21 sites.

Observation des symptômes d'ozone sur la végétation forestière

L'objectif des observations est de détecter les éventuels symptômes typiques de l'ozone sur le feuillage de certains peuplements, sur la végétation herbacée et arbustive proche de ces placettes, puis de déduire l'importance de l'impact des différents niveaux d'ozone sur les peuplements étudiés. Les essences, présentant des symptômes macroscopiques probablement dus à l'ozone, ont été observées et échantillonnées par le GIEFS (Groupe international d'études des forêts sud-européennes) en vue d'une validation microscopique par le laboratoire du WSL (Centre de recherches sur la forêt, la neige et le paysage) en Suisse.

Valider les symptômes visibles d'ozone signifie collecter un faisceau de marqueurs (macro- et) microscopiques caractéristiques du mode d'action et des réactions induites par l'ozone dans les organes foliaires. Les marqueurs doivent être en nombre et qualité suffisants pour permettre un diagnostic différentiel. Par marqueur microscopique, il est entendu une altération de structure significative par sa nature et sa localisation. Une validation des symptômes visibles d'ozone est nécessaire en tant que contrôle de qualité des inventaires de Renécofor. Elle est indiquée pour certifier des symptômes peu spécifiques ou peu exprimés et pour confirmer l'ozone en tant que co-facteur dans les cas de symptomatologies multiples.

Méthode des observations de terrain et de laboratoire

Dans chaque site, les symptômes ont été notés selon le protocole du PIC-Forêts, dans la placette en forêt sur l'essence principale et les espèces herbacées prépondérantes. De plus, dans un rayon de 3 km au maximum autour de chaque placette, un site hors forêt bien ensoleillé a été choisi (clairière ou lisière). Les arbres, arbustes et plantes vivaces les plus communes y ont été répertoriés et notés. Les espèces présentant de probables symptômes

Code placette	2000	2001	2002	Moyenne	Écart-type
CHP 40	3714	6257	5573	5181	1316
CHP 59	3877	6787	4684	5116	1503
CHS 35	5340	7124	7753	6739	1252
CHS 41	5002	6729	6589	6106	959
CPS 77	1908	2048	2796	2251	478
DOU 71	10846	11099	14322	12089	1938
EPC 08	6553	12677	7598	8943	3276
EPC 63	7685	6896	9400	7994	1280
EPC 74	24530	18369	17096	19998	3976
EPC 87	12780	13207	15491	13826	1457
HET 30	12563	12057	14702	13107	1404
HET 54a	Pas de mesure	Pas de mesure	7273	—	—
HET 64	11039	13953	12793	12595	1467
PL 20	21330	17340	17384	18685	2291
PM 17	20869	23069	23841	22593	1542
PM 40c	7754	8788	8383	8308	521
PM 72	9061	10706	8374	9380	1198
PM 85	13536	14574	15047	14386	773
PS44	6214	8261	8842	7772	1380
PS 67a	4779	5679	3932	4797	874
PS 76	3082	6679	3961	4574	1875
SP 05	13784	12625	11722	12710	1034
SP 11	11114	10957	12214	11428	685
SP 25	24395	19749	19192	21112	2857
SP 38	14183	10187	9791	11387	2429
SP 57	4363	5963	5565	5297	833
SP 68	8404	9671	7509	8528	1086

Tab. 2 : estimation de l'AOT40 par modélisation en partant des mesures des capteurs passifs, effectué par Ferretti et al. (2004) pour chaque site et année de mesure. Les valeurs sont exprimées en µg/m³.h

d'ozone ont été photographiées et prélevées par le GIEFS afin de vérifier les observations visuelles.

Plusieurs marqueurs macroscopiques spécifiques de l'ozone

Les espèces feuillues montrent macroscopiquement une ponctuation internervale plus ou moins fine et différentes décolorations qui dépendent de la lumière (photo 2a). Les aiguilles des pins présentent des réactions marbrées/tachetées (photo 2c) ou de la décoloration. Par conséquent, il n'existe pas un seul marqueur macroscopique qui soit entièrement spécifique à l'ozone et observable pour toutes les espèces.

Un schéma de réactions dans les organes commun aux espèces analysées

L'ozone pénètre dans les organes foliaires par les stomates. Il se dégrade instantanément au contact des parois cellulaires et des aérosols et induit des réactions en chaîne (stress oxydant) du type de celles fréquemment observées chez les plantes lors d'une infection ou d'un stress. En effet, de manière inhabituelle pour un stress abiotique, l'ozone induit les défenses cellulaires élaborées au cours de l'évolution contre les pathogènes, entraînant la mort cellulaire de groupes de cellules clairement délimitées (photo 2b). Dans les cellules et les tissus avoisinants, l'ozone accélère la sénescence, ce qui aboutit à une abscission[3] prématurée de l'organe foliaire. L'accélération de la sénescence est importante pour diagnostiquer un stress oxydant mais elle n'est pas spécifique d'un stress donné. Ce schéma de réaction est commun, d'après nos observations, à toutes les espèces investiguées. L'intensité des réactions et la combinaison des marqueurs induits sont toutefois partiellement spécifiques et sont la cause de la grande diversité de symptômes visibles observés. Le stress oxidatif est augmenté par l'exposition au soleil.

Validation des effets de l'ozone pour toutes les espèces étudiées par le diagnostic microscopique

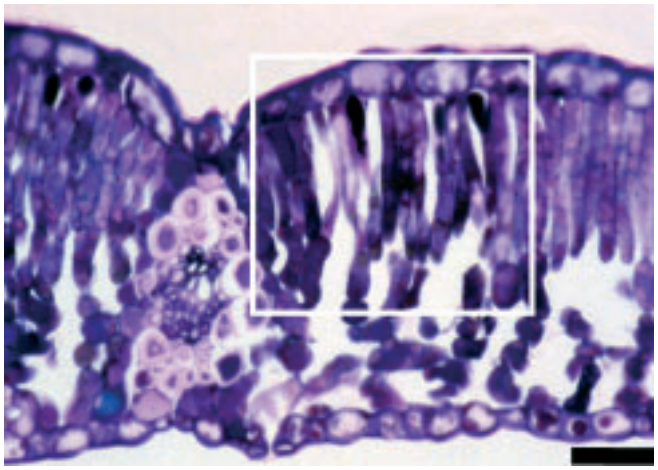
La méthode employée (développée par Vollenweider et Günthardt-Goerg) permet d'exclure que des facteurs de stress biotique ayant échappé à l'examen visuel (par exemple un champignon sans fructification) soient à l'origine des symptômes visibles observés. La microscopie différencie une source de stress abiotique d'origine racinaire (par exemple des métaux lourds absorbés dans le sol et véhiculés par la sève) de différents polluants gazeux absorbés par les stomates. Quand plusieurs agents de stress occasionnent des symptômes, de telles analyses peuvent au moins indiquer si l'ozone constitue ou non l'un de ces agents.

3 Processus préparatoire à la chute des feuilles, fleurs ou fruits. À la base du pédoncule de la feuille sénescente ou du fruit mûr, une zone de cellules se différencie assurant à la fois une séparation aisée et la formation d'une cicatrice protégeant les tissus pérennants.



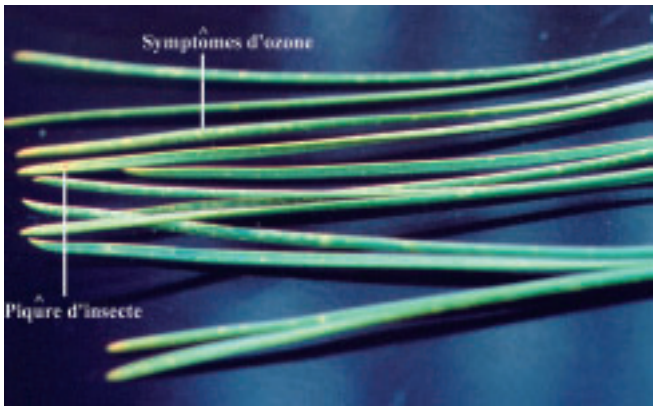
L. Dalstein

(a) Feuilles de hêtre commun présentant des symptômes semblables à l'ozone. Bronzing = zone affectée par des symptômes d'ozone. Zone d'ombre = partie intacte de la feuille, car elle a été cachée par une autre feuille



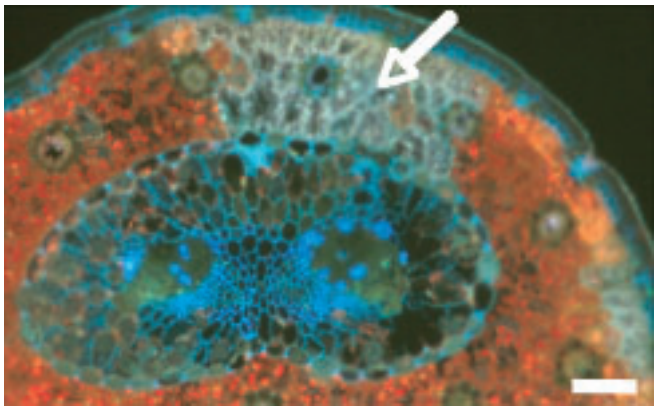
P. Vollenweider

(b) Coupe transversale d'une feuille de hêtre avec symptômes d'ozone montrant des stipples (encadré) ; cette structure résulte de l'induction d'une réponse hyper-sensible à l'ozone. Barre noire : 0,05 mm



L. Dalstein

(c) Aiguilles de pin laricio de Corse âgées d'un an, avec symptômes d'ozone ; placette PL 20



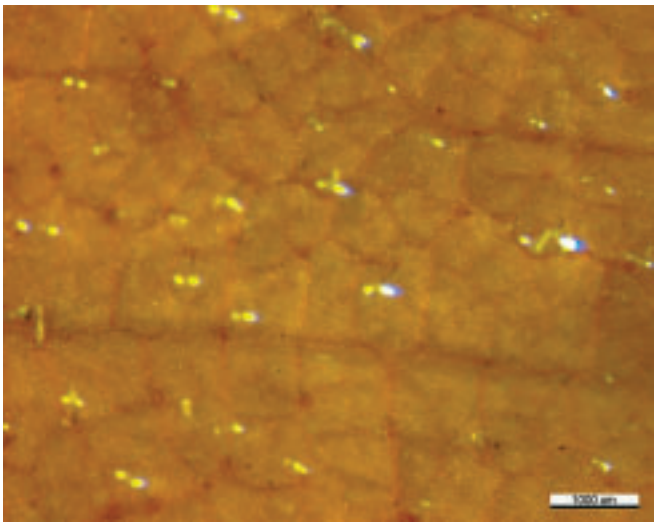
M.S. Günthardt-Goerg

(d) Coupe transversale d'une aiguille de pin laricio de Corse. La chlorophylle est dégradée et n'est plus fluorescente sous illumination UV. Barre blanche : 0,1 mm



L. Dalstein

(e) Feuilles de noisetier avec symptômes semblables à l'ozone



M.S. Günthardt-Goerg

(f) Face supérieure d'une feuille de noisetier de couleur bronze, présentant des symptômes dus à l'ozone. Barre blanche : 1 mm

Photo 2 : symptômes d'ozone macro- et microscopiques de trois essences forestières

Deux critères négatifs contribuent à la solidité de ce diagnostic :
- les nervures (ou le faisceau vasculaire), ne présentent pas de symptômes en cas de stress d'ozone peu prononcé ;
- le mésophylle (placé sous la couche pallisadique) présente moins de dégâts cellulaires que la couche pallisadique (exposée à la lumière, située sous l'épiderme supérieur).

Lorsque l'un ou l'autre de ces critères fait défaut, le stress n'est probablement pas dû à l'ozone.

Les incertitudes, quant à l'origine des symptômes visibles à l'œil nu, sont dues principalement à des infections fongiques, au vieillissement de la feuille, à un rougissement non spécifique, au stress dû à la sécheresse et à des insectes suceurs. Les résultats obtenus montrent que les effets de l'ozone sur la végétation naturelle peuvent être validés, quelles que soient les espèces ou le site.

Quelles plantes pourraient servir de bio-indicateurs ?

Beaucoup d'interrogations subsistent. En effet, la sénescence naturelle interfère avec celle induite par l'ozone rendant souvent impossible un diagnostic différentiel des symptômes observés. Vers la fin de l'été, la majeure partie de la végétation herbacée a achevé son cycle de croissance et de reproduction et les feuilles restantes sont souvent déjà sénescentes et envahies d'infections fongiques. S'il y a des symptômes d'ozone encore visibles, ils sont généralement anciens et datent probablement d'avant la floraison. D'autre part, quelques altérations spectaculaires qui reviennent souvent comme le rougissement des feuilles, ne sont pas spécifiques et peuvent être induits par la sécheresse, de fortes insolations, la sénescence ou le froid. Toutes ces raisons appellent à la prudence quand des symptômes sont observés sur des plantes herbacées. Il vaut mieux se référer aux espèces arborées pour estimer les impacts réels dans les placettes.

Des effets variables selon les essences forestières

Les chênes, les sapins et les épicéas affichent rarement des symptômes semblables à ceux induits par l'ozone, ceci quels que soient les peuplements ou les niveaux de concentration d'ozone des sites. Il semble que ces espèces soient plus résistantes à l'impact de la pollution par l'ozone. Cependant, les connaissances sur les symptômes visibles de ces essences sont moindres. D'autres mécanismes pourraient également traduire un impact de l'ozone, sans que cela se voit sur le feuillage, comme par exemple, chez les chênes, la chute plus intensive de petites branches entières, avec des feuilles « saines », ce mécanisme pouvant être accéléré *via* des réactions biochimiques internes.

Les hêtres ne montrent pas de symptômes lorsque le peuplement est fermé mais en revanche, développent plus facilement des symptômes bien repérables lorsque les arbres sont isolés et bien éclairés, notamment dans les clairières ou dans la lisière. Les symptômes visibles résultent en effet d'une synergie entre l'ozone et le stress photo-oxydant (photo 2a). De telles différences entre les sites en peuplement et ceux en découvert sont typiques pour l'ozone et sont aussi observées dans d'autres pays.

Les pins ont un houppier laissant bien passer la lumière, et en France les pinèdes de la région méditerranéenne connaissent une pollution importante liée à l'ozone comme décrit par Dalstein et Vas (Water Air and Soil Pollution, 2005). Globalement, malgré les atteintes parasitaires, les forêts de pins montrent systématiquement plus de symptômes d'ozone (photo 2c) que les autres essences. Les aiguilles âgées de deux ans ont systématiquement plus de symptômes que les aiguilles âgées d'un an ou celles de l'année en cours. Seules, les placettes PL 20 (Corse), PS 76 (Normandie) et PM 17 (Île d'Oléron) (comme PM 20, en Corse) affichent déjà une atteinte dès la première année. Les arbres plus sensibles des placettes PL 20 et PM 20, atteints dès la première année, montrent une dégradation marquée les années suivantes, ceci, quelle que soit la concentration d'ozone de l'année en cours. Les placettes PS 76 et PS 67a semblent afficher une atteinte, mais les jaunissements des aiguilles de ces arbres permettent de soupçonner l'influence d'autres facteurs, par exemple des problèmes de nutrition minérale mis en évidence par l'analyse foliaire pour le magnésium. Cependant, surtout pour la placette PS 67a (Alsace), les symptômes semblables à l'ozone repérés sur les hêtres et arbustes hors de la placette permettent de penser que l'ozone joue également un rôle sur les pins sylvestres de cette forêt.

Les pinèdes présentent des gravités variables de symptômes d'ozone selon leur situation géographique. La placette des Landes PM 40c fait exception car les pins n'y ont aucun symptôme. Ce peuplement ne subit pas l'influence de grands centres industriels et urbains car les masses d'air traversant les Landes proviennent avant tout de l'Atlantique.

Symptômes observés dans les clairières

Les zones, où le plus grand nombre de plantes présentant des symptômes d'ozone a été repéré, se situent dans le Cantal (PS 15), la Sarthe (PM 72), la Corse (PL 20) et le Puy-de-Dôme (EPC 63) (figure 4). La détection des symptômes d'ozone sur la végétation naturelle de Corse est intéressante parce que ces placettes sont loin de toute influence urbaine. Plusieurs raisons peuvent justifier la présence de réactions vis-à-vis de l'ozone :
- l'ozone peut provenir du continent : d'Italie et/ou de la métropole ;
- la végétation corse serait plus sensible ;
- le climat local pourrait plus favoriser l'expression des symptômes.

Ce qui compte n'est pas seulement la valeur moyenne de concentration d'ozone dans un lieu donné mais l'évaluation des symptômes visibles, car cette dernière porte la réelle

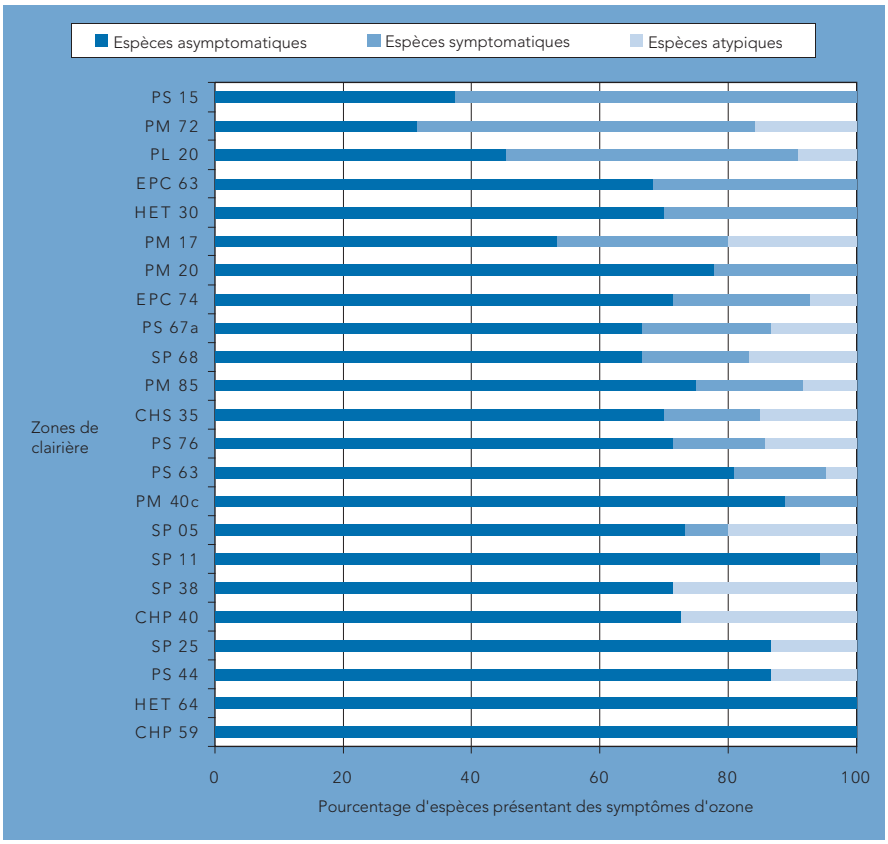


Fig. 4 : pourcentage des espèces asymptomatiques ou avec des symptômes établis ou atypiques dans les 23 zones de clairière

signature prouvant les réactions de la végétation.
Pour l'ensemble de la végétation de clairière observée dans cette étude, les arbres, arbustes ou herbacées les plus sensibles sont le hêtre (*Fagus sylvatica*), le noisetier (*Corylus avellana*), le charme (*Carpinus betulus*), le saule (*Salix caprea, Salix viminalis*), la ronce (*Rubus fruticosus*), le framboisier (*Rubus idaeus*) et même des plantes ornementales telle que la symphorine (*Symphoricarpos sp.*).

Symptômes observés lors de l'analyse microscopique

En 2001 et 2002, 110 plantes différentes ont été examinées sous microscope comprenant 18 arbres de forêt et 92 plantes de clairière. Sur 18 placettes en forêt, six ont montré des symptômes validés d'ozone, six ont montré d'autres symptômes (généralement d'origine biotique ou multi-symptômes, dont le stress dû à l'ozone n'était pas nettement reconnaissable), six n'ont pas montré de symptômes ; 32 échantillons des clairières ont montré des symptômes d'ozone et 60 ont été attribués à d'autres facteurs de stress.
Parmi les arbres, les hêtres (*Fagus sylvatica*) ont montré des symptômes dus à l'ozone sur 9 des 10 clairières et les pins sur 5 des 6 placettes. Ce sont de bons indicateurs pour le stress dû à l'ozone comme le noisetier (*Corylus avellana*), le frêne (*Fraxinus excelsior*) et le framboisier (*Rubus idaeus*).
Les pinèdes et les clairières des placettes PS 67a (Alsace) et PS 76 (Normandie) affichent quatre espèces présentant des symptômes induits par l'ozone, bien que les valeurs d'ozone mesurées soient relativement faibles. À l'inverse, deux placettes et clairières, aux concentrations d'ozone relativement élevées, ne présentent pas de symptômes d'ozone (HET 64 dans les Pyrénées, SP 25 dans l'Est de la France). Sur la côte Ouest de la France, les sites « voisins » PM 17 et PM 85, ne montrent pas les mêmes concentrations d'ozone (PM 17 ayant les plus élevées), alors que le nombre d'espèces présentant des symptômes dus à l'ozone est comparable. Si la dose d'ozone ambiant est responsable des symptômes sur les feuilles, les conditions climatiques peuvent aussi influer sur l'entrée de l'ozone par les stomates. De même, interviennent le statut physiologique, l'âge des feuilles, d'autres stress simultanés et la sensibilité propre de l'espèce.
Des dégâts d'ozone accrus ont été observés pour une concentration moyenne d'O_3 de 63-90 µg/m^3 (2000 - 2002) pendant la période de végétation et pour une valeur estimée de l'AOT40 (en 2001 ou 2002) de 8-24 mg/m^3.h.
Parmi les 130 espèces observées dans les 23 clairières, 30 présentaient des symptômes validés en laboratoire sur au moins un site (tableau 3).

Conclusions

Les premières mesures harmonisées des concentrations d'ozone et des observations des symptômes en zone forestière ont permis de confirmer que les concentrations d'ozone y sont régulièrement élevées et que les cumuls d'ozone sur la période de végétation (AOT40) doivent conduire à un impact négatif sur la végétation. Celui-ci a pu être confirmé sur les espèces les plus sensibles, dans des lieux géographiquement éloignés l'un de l'autre. Même en supposant une certaine incertitude sur ces mesures et observations, la probabilité reste forte que des dommages réguliers sur les plantes contribuent à leur affaiblissement en les rendant plus vulnérables à des attaques d'insectes ou de champignons. Les premiers symptômes détectés représentent la phase des effets à court terme (voir article le précédent numéro) pour la plupart des espèces. Certaines d'entre elles révèleraient déjà des effets à moyen terme.

Nom latin de l'espèce	Nombre de sites	Nom latin de l'espèce	Nombre de sites
Bignonia sp.	1	*Ribes uva crispa*	1
Carpinus betulus	3	*Robinia pseudoacacia*	1
Celtis australis	1	*Rosa canina*	1
Cornus sanguinea	4	*Rubus fruticosus*	4
Corylus avellana	2	*Rubus idaeus*	6
Crataegus oxyacantha	1	*Salix caprea*	1
Fagus sylvatica	9	*Salix viminalis*	1
Fraxinus angustifolia	1	*Scabiosa sp.*	1
Fraxinus excelsior	2	*Sorbus aucuparia*	1
Galeopsis tetrahit	1	*Symphoricarpos sp.*	1
Lonicera periclymenum	1	*Syringa sp.*	1
Mentha sp.	1	*Trifolium sp.*	1
Persea gratissima	1	*Ulmus glabra*	1
Plantago lanceolata	1	*Urtica urens*	1
Quercus ilex	1	*Vaccinium myrtillus*	1

Tab. 3 : espèces observées dans les clairières affichant des symptômes d'ozone validés et nombre de sites sur lesquels ces symptômes ont été observés

En conclusion, cette première approche d'observation des symptômes d'ozone sur les sites du réseau Renécofor, permet de confirmer l'impact de ce polluant. La contribution précise de l'ozone sur l'état sanitaire de ces peuplements est encore difficile à quantifier. Cependant, il joue sans doute un rôle non négligeable parmi certains peuplements dits « sensibles » tels que les pinèdes, hêtraies et d'autres essences arbustives ou herbacées courantes. Comme indiqué par différentes recherches, l'ozone inhibe la photosynthèse, perturbe la translocation des assimilats et force les végétaux à investir dans des processus de défense coûteux en énergie et sans avantages pour la plante concernant les effets de l'ozone (réactions de type allergique).

La circulation automobile, les rejets atmosphériques industriels, sont responsables en grande partie des valeurs fortes en ozone mesurées l'été autour des grandes agglomérations, voire dans des zones rurales plus reculées. Les recherches récentes montrent déjà, mais pour l'instant de manière lacunaire, que les capacités d'adaptation varient beaucoup d'une espèce à l'autre. Ce travail souligne l'intérêt et peut-être l'urgence de pratiquer à long terme des suivis de symptômes d'ozone sur des peuplements forestiers et sur la végétation dans son ensemble. À longue échéance, si les niveaux d'ozone ne diminuent pas, l'enjeu est de taille afin de ne pas assister à la régression progressive de forêts à forte valeur écologique au profit de l'apparition d'autres espèces plus résistantes. Seule, une politique soutenue de réduction des émissions des précurseurs d'ozone et d'autres photo-oxydants pourrait ramener les concentrations à un niveau non nuisible à long terme pour la végétation forestière.

Erwin ULRICH
Sébastien CECCHINI
ONF, direction technique
département recherche
réseau Renécofor
erwin.ulrich@onf.fr
sebastien.cecchini@onf.fr

Laurence DALSTEIN
Nicolas VAS
Groupe international d'études des forêts sud-européennes
GIEFS
ldalstein@aol.com

Madeleine S. GÜNTHARDT-GOERG
Pierre VOLLENWEIDER
Institut fédéral de recherches Suisse WSL
Centre de validation des symptômes d'ozone pour l'Europe centrale
goerg@wsl.ch, pierre.vollenweider@wsl.ch

Gunilla Pihl KARLSSON
IVL Svenska Miljöinstitutet, Institut suédois de l'environnement
gunilla.phil.karlsson@ivl.se

Bibliographie

Pour plus de détails et une liste bibliographique complète, veuillez consulter le document suivant :
Ulrich E., Dalstein L., Günthardt-Goerg M.S., Vollenweider P., Cecchini S., Vas N., Sjöberg K, Skarman T., Karlsson G.P., 2005 : Renécofor - Effets de l'ozone sur la végétation, concentrations d'ozone (2000-2002) et symptômes d'ozone sur la végétation forestière (2001-2003). Éditeur : Office national des forêts, Direction technique, Département recherche ISBN 2-84207-300-2, sous presse.

Remerciements

Les travaux présentés ici ont bénéficié d'un soutien financier de l'Union européenne (DG Agriculture), de l'Office national des forêts, du ministère de l'Agriculture et de la pêche et de l'Agence gouvernementale de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe). Nous les remercions de nous avoir permis d'acquérir ces connaissances importantes. Nous remercions également les 60 responsables et suppléants des placettes citées dans le tableau 1 pour la réalisation des mesures d'ozone, sans lesquelles cette synthèse n'aurait pas vu le jour.

Déploiement des compas enregistreurs à l'ONF : faisons le point

Le martelage est une activité qui pèse lourd dans le planning des personnels et donc dans les charges de l'établissement : de l'ordre de 120 000 hj (chiffres 2001), ce qui donne la mesure de l'enjeu d'un gain de productivité sur cette tâche ! À l'issue du premier marché d'acquisition de compas, il nous a semblé important d'organiser un retour d'expérience sur ce déploiement, en interrogeant le réseau informatique de terrain, ainsi que les responsables techniques territoriaux.

Une longue histoire

Le compas électronique a été développé par la société IAS (Info Adapt'Services), en étroite collaboration avec des personnels ONF, à partir de 1991. De 1992 à 1995, trois campagnes de martelage successives ont permis de tester l'appareil dans un nombre croissant d'équipes dans diverses régions, sous la coordination de Philippe Demarq, la société IAS faisant évoluer son prototype au fur et à mesure de ces essais.

Après cette campagne de test et de développement de l'appareil, 120 unités ont été achetées entre 1995 et 2001, selon deux versions commerciales successives : le CBI 100, remplacé par le CBI 200 à partir de 2000. Sur le CBI 100, le carnet de terrain (Psion modèle XP) était directement fixé sur le compas. Le CBI 200 fonctionne avec le Workabout, que l'utilisateur porte à sa convenance, les deux appareils dialoguant par liaison radio (voir description dans l'encadré ci-contre).

Le passage à un équipement plus systématique n'a été possible qu'après appel à la concurrence, organisé en juin 2001, sous forme d'un appel d'offres sur performance à l'issue duquel le marché a été attribué à la société IAS.

Entre juillet 2002 et décembre 2004, 537 compas ont été acquis au titre de ce premier appel d'offres. Un second appel d'offres a été lancé en 2005. Deux offres ont été reçues, l'une de la société IAS, l'autre – non retenue – proposant un compas équipé de son propre carnet de terrain.

Les enjeux perçus avant déploiement

Résumons en quelques mots comment l'intérêt du compas électronique pouvait être analysé en 2001, avant son déploiement.

La tâche de pointeur, fastidieuse et peu valorisante, immobilisait un personnel pendant la durée du martelage. À l'issue du travail sur le terrain, la fiche de martelage suivait une chaîne de traitement, traditionnellement composée des étapes suivantes : saisie par des secrétaires, édition papier, retour au terrain pour contrôle, puis retour au centre de saisie des données dans le logiciel CBP (coupe bois sur pied), pour correction éventuelle ou validation.

Globalement, les tests coordonnés par Philippe Demarq entre 1992 et 1995 permettaient d'espérer **un gain de temps net de l'ordre de 5 à 10 %, et ainsi d'amortir le coût élevé de l'investissement en quelques années de martelage**, alors que l'espérance de vie du matériel acquis pouvait être évaluée à dix ans.

Le compas CBI 200

Le compas électronique se compose d'un compas forestier (allégé par le choix des matériaux) muni d'un boîtier amovible, fixé sur la poignée mobile du compas, et comportant un petit écran et un bouton de validation (deux boutons en fait, pour permettre la réversibilité). Toutes les données sont saisies en agissant sur l'écartement des becs du compas, une équivalence (échelle) ayant été préalablement définie entre les plages d'écartement et les différents codes possibles pour un champ donné (essence, hauteur etc.). Le boîtier « lit » le déplacement grâce au défilement sur les pôles magnétiques intégrés dans la tige du compas. Les données sont envoyées au fur et à mesure au Workabout du manipulateur, par échange radio.

Par ailleurs, de nombreux bénéfices qualitatifs pouvaient être attendus de cet équipement :

- une plus grande rapidité de constitution du catalogue.
- Un retour direct à l'équipe, en sortie de parcelle, des données de synthèse du martelage : volume martelé total, à l'hectare, répartition par essences et catégories de produits. Ce retour direct permettait d'espérer une amé-

lioration progressive de l'expertise des personnels concernant les estimations de volume, et la possibilité de mieux apprécier le lotissement et l'estimation de la coupe.

■ Une plus grande souplesse dans l'organisation du martelage, possible en toute petite équipe (sans immobiliser un pointeur), comme en grandes équipes (ingérables avec des appels vocaux).

Il convient aujourd'hui, après trois années de déploiement, de confronter ces éléments de décision au retour d'expérience.

Le niveau d'équipement atteint

Le parc de compas électroniques va atteindre 743 unités à la fin de l'année 2005, ce qui est assez proche du rythme de déploiement envisagé dès l'engagement du premier appel d'offres, lequel prévoyait d'atteindre un parc de 800 compas fin 2005. Le niveau du parc des différentes directions territoriales comme leur dynamique de déploiement offrent cependant un tableau varié (voir tableau ci-après et figures 1 et 2 page suivante).

Des chiffres fournis par quatre directions territoriales totalisant ensemble 5314 hommes.jours de martelage sur la saison 2004/2005, dont 60 % effectués avec des compas électroniques, il ressort qu'un compas électronique sert en moyenne pour 14 jours de martelage par saison (moyenne 13,8 jours, écart-type 1,44).

Les difficultés rencontrées

Des problèmes matériels mal vécus

Les personnels qui ont participé activement, et souvent avec passion, aux débuts de cette longue odyssée, en évoquent volontiers les épisodes épiques : la transmission des données par branchement direct du carnet de terrain sur une ligne de la mini-informatique, ou l'effacement des pack mémoire à la machine à ultra-violet.

Cependant, les difficultés que les pionniers surmontent avec enthousiasme s'avèrent très pénalisantes pour le déploiement du matériel auprès de publics moins convaincus. Aujourd'hui, **la principale critique faite au compas électronique concerne sa fiabilité matérielle, jugée insuffisante**. Un certain nombre de difficultés matérielles ont, de fait, été rencontrées au cours du déploiement des compas. Elles ont toutes été réglées à l'amiable avec le fournisseur, mais ont néanmoins laissé des traces dans les esprits. **Il convient donc de souligner que les problèmes suivants, encore souvent évoqués, n'affectent plus les compas aujourd'hui livrés :**

■ le dysfonctionnement au froid (série 3.8, distribuée entre octobre et novembre 2004),
■ les problèmes d'étanchéité des boîtiers,
■ le décalage de l'échelle de 5 à 6 mm,
■ la fragilité des becs (le bec aluminium est en option sans surcoût).

Direction territoriale	Marché 2002-2004	Commande 2005	Équipement fin 2005
Alsace	97	0	**97**
Auvergne-Limousin	9	12	**21**
Bourgogne – Champagne-Ardenne	78	16	**94**
Centre-Ouest	77	78	**155**
Franche-Comté	37	0	**37**
Île-de-France – Nord-Ouest	84	18	**102**
Lorraine	54	0	**54**
Méditeranée	15	5	**20**
Rhône-Alpes	60	30	**90**
Sud-Ouest	56	17	**73**
	567	176	**743**



Y. Gouchet, ONF

Reste la question de l'autonomie des appareils – compas et Workabout.

Les batteries sont de fait le point faible de la plupart des appareils électroniques portatifs. Cependant, de la rigueur dans la mise en oeuvre des appareils permettrait d'éviter de nombreuses pannes ou désagréments de fonctionnement (ralentissement du dialogue entre compas et WA). L'encadré ci-dessous rappelle quelques règles à respecter.

Batteries, quelques règles à respecter

■ Mettre compas et Workabout en charge dès le retour à la maison forestière : la charge se fait en 16 h et atteint son maximum d'efficacité en fin de processus.
■ Tenir compte de la nature du martelage pour anticiper les problèmes (la consommation d'énergie est proportionnelle au nombre de saisies à effectuer).
■ Tenir compte de l'évolution des performances des batteries, plus faibles pour des batteries neuves ou trop anciennes.
■ Attention : les performances des batteries sont moindres par temps froid.
■ Renouveler les batteries lorsqu'elles donnent des signes de faiblesse (soit environ tous les deux ans).

Qu'en est-il des problèmes que l'on craignait avant déploiement ?

Ces problèmes de rigueur n'étaient pas forcément ceux que l'on anticipait avant déploiement. Inversement, certaines

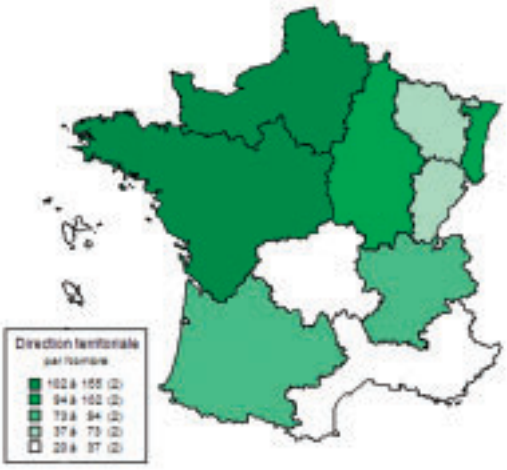


Fig. 1 : nombre de compas par DT fin 2005

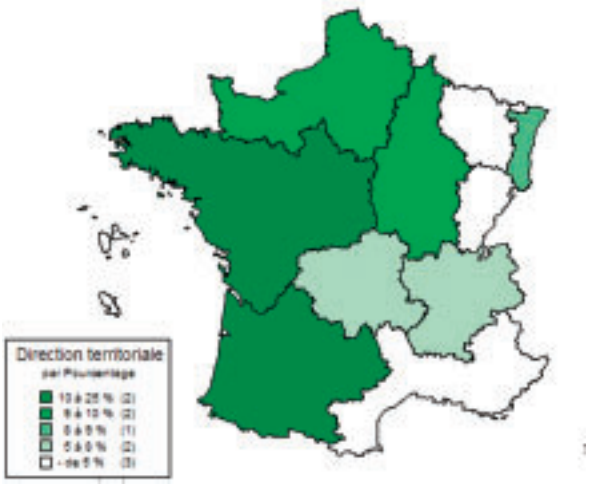


Fig. 2 : taux d'équipement (nombre de compas/effectif de personnels fonctionnaires, en équivalent temps plein) fin 2005

craintes *a priori* se sont révélées excessives ou infondées.

Contrôle de la hiérarchie : l'une des inquiétudes récurrentes liées au compas, est la possibilité virtuelle de contrôler le nombre de tiges martelées par chacun des agents, à des fins de pression ou d'attribution de primes. Le cas, qui serait à notre sens un détournement de l'outil, ne s'est à notre connaissance jamais produit. Ces données enregistrées sur les différents Workabouts ayant participé au martelage sont regroupées sur le Workabout maître. Au moment du transfert, on perd cette information qui est absente du fichier texte généré.

Perte des données : cet accident, toujours possible (y compris avec une fiche de martelage papier !) semble ne pas s'être produit très souvent. Un responsable d'UT fait état de la perte des données d'une parcelle sur trois campagnes de martelage.

Erreurs de saisie : l'ensemble des tests a montré un écart entre le pointage à la voix et le compas enregistreur inférieur à la précision du martelage (évaluée à 5 % sur le nombre de tiges par Duplat et Perrotte), s'avérant parfois, en cas de contrôle, en faveur du compas électronique, qui requiert une plus grande attention individuelle. Par ailleurs, les erreurs liées à la ressaisie des fiches papiers sont totalement éliminées. Enfin, si la clôture de la fiche de martelage est bien faite à la sortie de la parcelle, comme il se doit, les éventuelles données aberrantes peuvent être contrôlées immédiatement.

En revanche, **si l'agent quitte la logique de pointage attendue par le compas, suite à une fausse manœuvre, et ne contrôle pas les données enregistrées par l'appareil en surveillant son écran, il enregistre une suite de données qui n'a aucun sens. De ce type d'incidents proviennent la plupart, sinon la totalité, des saisies incohérentes**. C'est pourquoi l'appareil requiert un surcroît d'attention et de rigueur de la part de l'agent marteleur.

Un outil demandant une rigueur accrue

L'utilisation du compas enregistreur, comme celle de tout appareil électronique, requiert une rigueur certaine de la part de l'utilisateur (voir encadré ci-contre). Ainsi de nombreux incidents peuvent survenir si les appareils ne sont pas convenablement chargés avant usage, si l'utilisateur ne vérifie pas périodiquement sur l'écran le bon déroulement des opérations. De même, la procédure mise au point pour la gestion des fiches de martelage (création de la fiche sur un seul carnet, partage des données, avec les autres, puis collecte des données de martelage sur le carnet maître), perçue comme excessivement rigide, a été conçue pour limiter les risques d'erreur ou de fraude.

Accompagner l'investissement financier par un investissement humain

Ce retour d'expérience illustre à quel point une innovation technique peut-être perçue de façon radicalement différente selon la façon dont son déploiement est vécu, et surtout selon l'accompagnement dont elle bénéficie. Comme la plupart des innovations qui peuvent être apportées à la pratique forestière, elle n'a aucun caractère incontournable : contrairement à une nouvelle machine dans une usine, le compas peut être évité, voire rejeté (une UT a d'ailleurs rendu ses compas). **L'adoption et la valorisation de l'in-**

Les six points de rigueur de l'agent utilisateur

- **Charger** correctement les appareils (voir encadré « batteries »).
- Être vigilant lors des **phases d'échange de données**, en début et fin de martelage.
- Être attentif lors de la sélection de la **parcelle à marteler.**
- Être attentif au **mode** en cours (mono-essence ou pluri-essence) et aux changements de mode.
- Être attentif à l'énoncé des **modalités de martelage** : saisie des hauteurs (moyenne par catégorie ou tige par tige), saisie des essences (l'essence principale pouvant être déclarée essence par défaut).
- Surveiller régulièrement la **cohérence** des saisies sur l'écran du compas.

vestissement consenti lors de l'achat des compas nécessitent un management technique proactif, et donc un investissement humain à la hauteur (voir encadré ci-dessous).

Les bénéfices constatés

Les gains de productivité sont-ils au rendez-vous ?

Le compas électronique permet virtuellement des gains de productivité :

- dans l'action même de martelage, du fait de l'économie du pointeur,
- dans le traitement des données, du fait de l'automatisation des transferts sans resaisie.

Certaines agences ou UT avancent des gains de productivité de l'ordre de ceux évalués par les tests, voire supérieurs, soit de 15 à 20 %. Il est à noter que cette évaluation intègre probablement les effets d'autres évolutions des pratiques de martelage, intervenues simultanément, comme l'évolution des modes de marquage.

Cependant, la plupart des personnels interrogés ne se sont pas prononcés sur cette question perçue comme sensible dans le contexte de la contractualisation. D'autres enfin estiment que les gains de productivité ont été absorbés jusqu'ici par le règlement des incidents techniques et la maintenance. Ces gains de productivité dépendent par ailleurs assurément du type de peuplement, et sont plus élevés sur des peuplements peu mélangés en plaine.

Ce retour d'expérience ne permet donc pas d'affirmer que les compas acquis « ont bien payé leur prix ». Peut-être l'analyse de l'évolution de la productivité des martelages en parallèle avec l'évolution du taux d'équipement des agences permettrait-elle d'éclairer cette question plus objectivement.

Cependant, l'économie de temps de travail administratif, perçue comme négligeable au regard du temps de martelage lors de l'analyse de la situation en 2002, semble mieux reconnue, car elle a permis de redéployer le temps de travail administratif ainsi dégagé vers d'autres tâches plus valorisantes. Il faut cependant souligner que cette économie de temps peut être aujourd'hui dissociée du compas électronique, et réalisée avec d'autres outils de saisie informatisée, comme le lecteur de codes barre associé à une planchette de saisie, le compas électronique ayant eu le mérite d'ouvrir la voie au développement de ces solutions.

Des bénéfices qualitatifs appréciés

L'outil permet **une plus grande souplesse** dans l'organisation des martelages : de 2 marteleurs pour des petits bouts de parcelle isolés, jusqu'à 9 pour de grandes surfaces, ou pour des peuplements très homogènes. Là réside d'ailleurs une des composantes du gain de productivité potentiel. Le compas enregistreur commencerait également à être utilisé pour la reconnaissance de chablis, et son utilisation pour des expertises serait envisagée. Il est également couramment utilisé pour des inventaires.



Y. Gouchet, ONF

L'enregistrement individuel des tiges rend possible la suppression totale ou partielle des appels. Cette modification de la pratique, accusée par certains de favoriser un travail cloisonné des différents marteleurs, est très appréciée par la plupart. Les appels contribuent à la pénibilité du martelage et leur suppression laisserait au contraire **plus de place à la concentration et aux échanges techniques**. Plusieurs témoignages, notamment en provenance de la chênaie, évoquent ainsi des martelages de meilleure qualité. Comme signalé dans l'encadré page suivante, le maintien, ou la suppression d'une partie ou de la totalité des appels doit être raisonné en fonction des conditions du martelage : étalement de la virée, topographie, peuplement, etc., et ce point doit faire l'objet de directives claires.

Le retour immédiat au marteleur des données de synthèse de son martelage : volume de bois prélevé, répartition par catégorie, etc., est un **facteur de progrès technique** confirmé. L'acquisition d'une expertise directe en matière d'évaluation volume d'une action sylvicole doit être considérée à sa juste valeur dans le contexte actuel de recherche d'amélioration des prévisions de récolte.

Sept conseils pour réussir le déploiement des compas

- Identifier un correspondant informatique de terrain (niveau agence ou DT), lui donner des moyens à la hauteur de sa tâche, et en particulier le temps d'assurer sa formation continue.
- Procéder au déploiement UT par UT, en ciblant au départ les UT les plus pertinentes (par exemple : petites forêts dispersées) et les plus motivées.
- Lorsqu'une UT est équipée, la former (2 jours), puis laisser un temps d'adaptation avec un bon accompagnement technique (de l'ordre de 5 jours de martelage).
- Viser ensuite rapidement un taux maximal de martelage avec le compas électronique (professionnalisation).
- Responsabiliser chaque personnel dans la maintenance de son appareil (privilégier un taux d'équipement de 100 %).
- Identifier une personne-ressource au niveau de chaque UT, capable de relayer le correspondant informatique de terrain, et de régler les incidents mineurs. Il vaut mieux attendre qu'une vocation émerge, plutôt que d'imposer cette tâche *a priori*.
- Mettre au point et formuler des directives d'utilisation du compas électronique adaptées aux spécificités du terrain : maintien ou non des appels, ou d'une partie des appels, effectif maximal d'une virée, etc.

La pleine mesure du bénéfice des compas ne s'apprécie cependant qu'avec l'automatisation de l'ensemble de la chaîne de traitement des données de coupe, non encore réalisée partout (voir encadré ci-dessous).

Perspectives d'avenir

Les jours du Workabout sont comptés, mais nous laissent malgré tout le temps de récolter les fruits de l'effort de développement fourni autour du compas. En effet, l'arrêt de la production du Workabout par la société PSION est annoncé pour juin 2006, la fourniture de pièces de rechange et la maintenance étant assurées par le constructeur jusqu'en juin 2011.
On peut imaginer ainsi que le concept du compas relié par radio au Workabout sera utilisé à l'ONF jusqu'à cette échéance, moyennant des redéploiements internes, avec une phase de partage du territoire avec une solution nouvelle progressivement déployée, entre 2007 et 2011.

Il convient ainsi de commencer dès maintenant à réfléchir au successeur de l'actuel concept, en ayant présent à l'esprit que la recherche de solutions très étroitement adaptées à l'ONF, et à la diversité de ses situations, ira à l'encontre de l'ouverture à la concurrence la plus large des offres. De même, le concept de compas relié à un carnet de terrain susceptible d'assurer la succession du Workabout est une option possible, mais ne doit pas être retenu *a priori*, la bonne démarche consistant à rédiger un cahier des charges fonctionnel aussi épuré que possible de tout présupposé technologique, mais aussi de toute spécification non indispensable, héritée de la pratique. La rédaction de ce cahier des charges fonctionnel devra résolument se situer du point de vue de l'utilisateur, placé au centre d'une analyse ergonomique globale de l'action de martelage, et non du point de vue de l'outil.



Y. Gouchet, ONF

Les outils informatiques pour la mobilisation des bois

Esus[1], *Marculus*[2] et CBP[3], sont trois applications qui contribuent à l'informatisation des procédures du martelage à la création du catalogue de vente.
Sur le Workabout, le logiciel *Esus* permet la saisie des arbres sur pied. Les données peuvent être enregistrées manuellement au clavier, avec un lecteur et une planchette de codes à barres ou avec le compas électronique. De nombreux paramètres permettent de s'adapter aux différentes pratiques locales comme la saisie des hauteurs tige par tige ou moyennes, la saisie de la qualité des bois ou encore la gestion de la délivrance.
Si la prévision d'état d'assiette a été réalisée dans *Marculus*, les fiches de martelage, créées automatiquement, peuvent être importées dans *Esus*.
Pendant le martelage, l'utilisateur peut à tout moment connaître le nombre de tiges désignées, le volume total, le diamètre et le volume de l'arbre moyen ou la surface terrière prélevée.

Les données saisies en forêt sont ensuite transférées sur le PC de terrain pour être envoyées directement dans CBP à l'agence, ou traitées dans *Marculus* par les personnels de terrain.

L'importation dans *Marculus* permet l'édition du recto et du verso de la fiche de martelage. Les informations comme les tarifs commerciaux, les hauteurs moyennes peuvent être complétées si nécessaire.
Après avoir rempli les éléments de la fiche d'article, il est possible de visualiser les estimations argent et matière (D1.3 volets A et B).
Les données validées et complétées sont ensuite exportées vers l'agence par connexion électronique. À la réception du fichier, les données sont intégrées dans CBP. Après validation du D1.3 provisoire par le terrain, le catalogue de vente peut être imprimé.
Un autre logiciel, *Metensis*[4], développé localement en Lorraine, est conçu pour une saisie manuelle des martelages sur le Workabout, optimisée pour l'exploitation des bois façonnés en régie. Les données peuvent être traitées de la même manière qu'avec le logiciel *Esus*.

Les logiciels Cube, Loti, Calepin et CBF couvrent également le domaine des bois façonnés et proposent un traitement informatique complet de la chaîne.

1 Divinité Celte, parfois dieu de la terre, de la végétation ou dieu bûcheron.
2 Racine du mot marteau, à l'origine de martelage.
3 CBP : coupe bois sur pied, CBF : coupe bois façonnés.
4 Qui vient de la ville de Metz.

Myriam LEGAY
direction technique,
département recherche
myriam.legay@onf.fr

Dominique DROGUE
direction financière,
département informatique
responsable informatique de terrain
dominique.drogue@onf.fr

James WRIGHT
direction des ressources humaines
formateur au campus de Velaine
james.wright@onf.fr

Pascal BARDEAU
direction territoriale Centre-Ouest
agence de Blois
UT du Blésois
pascal.bardeau@onf.fr

Dossier



Forêts hétérogènes : définitions, enjeux et principes de gestion

Diversifiées du fait de leur histoire, mais également de leur composition, leur structure ou leurs objectifs, les forêts hétérogènes constituent un enjeu d'importance pour la gestion des forêts publiques. Différents auteurs, par leurs réflexions et leurs travaux, nous permettent d'explorer quelques facettes de cette diversité. C'est un préalable indispensable à une approche technique en termes d'aménagement et de sylviculture. Ils sont évoqués ici à travers l'exemple de la Franche-Comté. Ils seront approfondis lors d'un dossier ultérieur.

- p. 18 Futaies hétérogènes : pour une meilleure prise en compte dans la gestion des forêts publiques — par Thierry Sardin et Jean-Luc Dunoyer
- p. 22 Quelques enjeux autour des forêts hétérogènes tempérées — par Jean-François Dhôte, Thomas Cordonnier, Philippe Dreyfus et Noël le Goff
- p. 32 Historique des traitements irréguliers en Europe — par Jean-Philippe Schütz
- p. 36 Panorama : les forêts mélangées dans le Nord de la France — par Jérôme Bock, Claudine Richter et Alain Franc
- p. 43 Est-on en mesure aujourd'hui de prévoir la qualité du bois dans les peuplements hétérogènes ? — par Gérard Nepveu
- p. 48 Principes majeurs de gestion des peuplements irréguliers. L'expérience de la Franche-Comté — par Marie-Claire Maréchal et Pierre-Jean Morel

Futaies hétérogènes : pour une meilleure prise en compte dans la gestion des forêts publiques

Les connaissances en matière de gestion des peuplements hétérogènes sont encore incomplètes, parfois même insuffisantes (pour le suivi par exemple), dispersées et trop souvent locales et relativement intuitives. Être en mesure de gérer durablement ces peuplements, largement représentés à l'échelle des forêts publiques, nécessite une approche globale et concertée, en vue de mettre au point des outils de décison, de gestion, de suivi et de contrôle : un véritable plan d'action en trois volets que nous exposent les auteurs.

Le terme d'hétérogène pour qualifier des peuplements forestiers est utilisé de plus en plus fréquemment par les forestiers. Ce terme regroupe en fait deux notions qui ont des conséquences importantes en gestion : le mélange des essences et la structure irrégulière. Les futaies hétérogènes comprennent donc les futaies mélangées, lorsque le mélange est significatif (le couvert de l'essence principale est d'au plus 70-75 %), et les futaies irrégulières (au sens de la structure et non du traitement) où plusieurs catégories de grosseur d'arbre se côtoient sur une unité de surface réduite. Ces deux notions se combinent, de nombreuses futaies irrégulières étant mélangées, comme l'expose de façon plus détaillée l'article de J.-F. Dhôte *et al.* page 22.

Les futaies hétérogènes sont largement représentées dans les forêts publiques françaises. Cette richesse est une conséquence de la diversité des contextes stationnels mais aussi un héritage de la gestion passée (voir l'article de J.-P. Schütz page 32). L'analyse de la structure et de la composition de ces peuplements et forêts hétérogènes montre clairement le lien avec le passé. Pour s'en convaincre il suffit de lire l'article de J. Bock *et al.* (page 36) qui rend compte d'une étude menée dans le Nord de la France sur les forêts mélangées.

La gestion de ces futaies hétérogènes est dès lors un enjeu pour l'Office national des forêts. Pour mieux répondre aux besoins de connaissances d'une part et d'outils de gestion d'autre part, un plan d'actions spécifique à cette thématique a été mis en place par la direction technique.

En effet, la gestion des futaies hétérogènes peut être plus complexe que celle des futaies régulières pures. Le mélange conduit à devoir connaître, pour accompagner ou corriger lors des opérations de martelage ou de travaux, la dynamique relative des différentes essences en présence. Le choix du traitement en futaie irrégulière conduit à juxtaposer des opérations d'amélioration et de régénération sur de petites unités de surface. Les méthodes d'aménagement sont spécifiques, il n'y a pas d'effort de régénération en surface qui puisse être calculé. Les méthodes de suivi de la gestion ne peuvent donc pas être les mêmes.

Les connaissances en matière de gestion des futaies hétérogènes sont loin d'être négligeables, en forêt publique comme en forêt privée, mais méritent d'être approfondies pour beaucoup de contextes. C'est ainsi que beaucoup de projets de recherches ont vu le jour ces dernières années sur cette thématique (voir troisième partie du présent article).

Parallèlement à ces recherches, le plan d'action mis en place en liaison avec les services techniques territoriaux comporte trois axes :

- mise au point d'une méthode pour le suivi du renouvellement des peuplements ;
- réalisation d'un état des lieux des pratiques et des attentes en matière d'aménagement et de sylviculture ;
- développement de la coopération et la mutualisation en interne comme en externe.

Suivre le renouvellement des peuplements traités en irrégulier : une méthode en cours de mise au point

Quels que soient le contexte forestier et le traitement appliqué, le suivi du renouvellement est indispensable au gestionnaire afin d'éclairer et valider les décisions à prendre au niveau de la parcelle, ainsi qu'à l'échelle de la forêt. Ce suivi permet aussi de rendre compte au propriétaire de l'état et de l'évolution de son patrimoine.

La méthode de suivi ne peut toutefois pas être identique pour toutes les forêts, elle est dépendante du traitement choisi, car le renouvellement n'y est pas conduit selon le même concept. Deux grandes familles de traitements en futaie coexistent :

■ les traitements en futaie régulière où la régénération est localisée dans la parcelle,
■ les traitements en futaie irrégulière où la régénération est diffuse dans la parcelle.

Dans le premier cas, les peuplements où la régénération est recherchée sont identifiés et localisés, le suivi peut être fait par mesure de la surface des différents stades de régénération. Dans le second cas, la régénération est diffuse et ne peut être localisée et cartographiée. Le seuil de perception de 50 ares a été retenu pour distinguer ces deux modes de suivi.

Ces deux méthodes de suivi conduisent à regrouper au sein du régime de la futaie les traitements selon le tableau suivant.

Le fait que la régénération soit diffuse en traitement irrégulier ne signifie pas pour autant que sur une durée d'aménagement elle soit nécessairement recherchée sur chaque unité de gestion. Ce cas de figure se limite à la futaie jardinée en équilibre. Une régénération qualifiée de continue en futaie irrégulière exprime le fait qu'elle est simplement souhaitée chaque fois qu'un arbre adulte est récolté, sans que cela puisse être fixé à l'avance dans l'espace et le temps. Dans les traitements où la régénération est localisée, les opérations d'amélioration et de régénération sont bien distinctes et sont conduites sur des unités de surface délimitées sur le terrain et cartographiées dans l'aménagement ou le sommier. Dans les traitements où la régénération est diffuse, cette distinction n'existe pas et les opérations sont intimement mêlées.



T. Sardin, ONF

Mélange chêne sessile-pin sylvestre (région Centre)

Méthodes de suivi du renouvellement	Traitements avec suivi en surface de la régénération		Traitements sans suivi en surface de la régénération	
Traitements du régime de la futaie	Futaie régulière	Futaie irrégulière par parquets	Futaie jardinée[1]	Futaie irrégulière[1]
Méthode d'aménagement	Semblable, diffère par le fait que les zones en régénération sont élevées au rang d'unité de gestion uniquement en futaie régulière		Identique (sauf distinction éventuelle par bouquets ou par pieds d'arbres)	
Sylviculture	Identique (dès lors que l'on se situe dans une zone soit en régénération soit en amélioration)		Semblable, si ce n'est la distinction éventuelle par bouquets ou par pieds d'arbres	
Recherche de l'équilibre	Au niveau de la forêt (série)		Parcelle	Forêt (série) [2]

(1) par bouquets et/ou par pieds d'arbres
(2) toutefois, à très long terme, le traitement « implique un équilibre sur la plus petite surface possible (largement inférieure à celle de la parcelle d'aménagement), à la fois du matériel producteur, du renouvellement, de l'ensemble des fonctions naturelles… » B. de Turckheim, M. Bruciamacchie

La méthode de suivi du renouvellement des peuplements par surface, mise au point et appliquée depuis plusieurs années dans certaines régions, a été précisée en 2005 par note de service. Un outil de suivi par base de données (base de données régénération, BDR) est en cours de déploiement dans les territoires. La méthode de suivi du renouvellement des peuplements conduits en futaie irrégulière ou en futaie jardinée restait à mettre au point. La méthode retenue sera diffusée début 2006 et reposera sur un échantillonnage statistique au niveau de le forêt avec suivi de deux indicateurs, la régénération basse (entre ≈ 30 cm et 3 m) et la densité des perches.

Mieux connaître les pratiques et les attentes des gestionnaires publics

Un état des lieux est en cours de réalisation ; il devrait être achevé pour la fin de l'année 2005. Il consiste à rencontrer les personnes ressources des directions territoriales dans les domaines de l'aménagement et des sylvicultures.

En matière d'aménagement et de sylviculture, des savoir faire se sont développés et mériteraient d'être complétés et mutualisés (voir l'article de M.-C.. Maréchal et P.-J. Morel page 48, qui donne les grands principes retenus, en Franche Comté). La très grande diversité des contextes rencontrés, le fait historique que de nombreux peuplements hétérogènes soient dans une phase transitoire entre le traitement en taillis-sous-futaie et la futaie, renforcent la nécessité d'analyser puis de mutualiser les meilleures pratiques, notamment au sein de guides de sylvicultures rénovés.

En matière d'orientation, tous les documents d'aide à la gestion prônent le mélange car les bénéfices qui peuvent en être tirés sont bien connus et admis par tous (biodiversité, meilleure réaction aux changements globaux, paysage…). En général, il est préconisé de maintenir le mélange là où il existe et de le créer lorsque les peuplements sont purs. Dans quelques contextes toutefois, nos connaissances doivent être approfondies et notre gestion prudente, car les dynamiques naturelles peuvent conduire à des peuplements où l'essence objectif principale serait amenée à disparaître (exemple : dynamique plus forte du hêtre par rapport au chêne qui conduit naturellement à des hêtraies pures dans certains habitats). À l'occasion de l'établissement des directives régionales d'aménagement et des schémas régionaux d'aménagement (DRA et SRA, en cours d'élaboration), il doit être précisé quels sont les mélanges souhaités en fonction de (ou des) l'essence(s) objectif principale(s) et des grands contextes stationnels.

Pour ce qui est du choix du traitement, les orientations ne sont pas partout clairement explicitées et formalisées. Il demeure plusieurs explications à ce fait :

- sylvicultures en futaie irrégulière moins bien connues, moins étudiées, paraissant ainsi plus complexes,
- principales opérations sylvicoles non localisées (régénération et amélioration intimement mêlées),
- méthode de suivi du renouvellement des peuplements qui restait à préciser,
- difficulté plus importante qu'en futaie régulière pour estimer la production et les prélèvements.

C'est pourquoi le plan type des DRA et SRA prévoit explicitement un chapitre sur le choix du traitement. Pour chaque contexte forestier, les directions territoriales doivent analyser les différents critères à prendre en compte pour déterminer le choix du traitement (voir tableau ci-dessous).

Si la structure actuelle est un élément important pour le choix du traitement, car la contraindre sur de courtes périodes conduit à multiplier les risques de sacrifices d'exploitabilité, il ne faut pas oublier qu'il existe un *continuum* entre une structure très régulière et une structure jardinée. En présence de peuplements intermédiaires sur l'échelle de l'hétérogénéité pour lesquels il est difficile de dire si la structure est plutôt régulière ou plutôt irrégulière (avec le seuil de perception de 50 ares), les deux possibilités de traitement sont envisageables. Ce sont alors les autres critères qui permettent d'établir le choix. Dans ces situations peu tranchées, mais fréquentes, les sacrifices d'exploitabilité seront évités en prenant soin de rechercher l'équilibre lié au traitement à un rythme étudié et en adaptant la sylviculture.

EXEMPLES DE CRITÈRES PRIS EN COMPTE POUR LE CHOIX DU TRAITEMENT

Critères	Traitements irréguliers	Traitements réguliers
Structure en place	Structure irrégulière	Structure régulière
Objectif principal	Protection en forêt de montagne vis-à-vis de l'aléa avalanche Accueil du public	
Composition actuelle	Mélange intime d'essences avec des dates d'exploitabilité très différentes	Mélange de chêne et de hêtre avec le chêne comme essence objectif
Stations	Stations hydromorphes avec risque de blocage du processus de régénération en cas d'ouverture sur de grandes surfaces Stations hétérogènes à l'échelle décamétrique	Stations homogènes sans contrainte particulière pour l'obtention de la régénération

L'analyse de ces critères pour le choix du traitement ne sera efficace que si la définition de chaque traitement est explicite et commune à tous. La décision de mettre en œuvre deux méthodes distinctes de suivi du renouvellement pour chacune des deux grandes familles de traitement, avec ou non suivi en surface de la régénération, doit y contribuer.

Développer la coopération et la mutualisation

Parmi les futaies hétérogènes, la gestion en futaie irrégulière pose des difficultés à de nombreux gestionnaires car les pratiques en la matière ne sont pas aussi développées que pour les futaies régulières. Il est donc apparu utile de proposer des formations aux personnels. Afin de profiter de toutes les connaissances éparses en forêt publique comme en forêt privée, il a été validé de monter des sessions de formation communes.

La première session de ce type a eu lieu en octobre de cette année. Elle a été organisée et coanimée par l'Engref, l'IDF et l'ONF. Les stagiaires provenaient de toutes les régions françaises (ainsi qu'un Espagnol) et de tous les organismes. Ce stage s'est déroulé en Haute-Saône (forêt privée et forêt publique) et Haute-Marne (forêts publiques). Cette expérience a été accueillie de manière très favorable par les participants. Le même stage sera proposé en 2006, des stages d'approfondissement liés à des contextes particuliers suivront (chênaies par exemple).

Cette ouverture partenariale s'est aussi traduite par l'adhésion de l'ONF (représenté par la direction technique) à l'association *Pro Silva*. Des échanges sont organisés au niveau national ainsi que dans chaque direction territoriale où un correspondant *Pro Silva* est nommé.

Enfin, dans le domaine des questions posées à la recherche forestière, des projets impliquant l'ONF sont menés conjointement avec l'Inra (laboratoire d'étude et de recherche sur la forêt et le bois de Nancy), le Cemagref et l'IDF. Parmi les thèmes d'études le plus souvent abordés, on peut citer la lumière et



T. Sardin, ONF

Coupe en futaie jardinée résineuse (Croatie)

ses conséquences sur la croissance et la qualité (de la régénération, des perches…), la réactivité des perches feuillues à une intervention, la modélisation, la dynamique des mélanges, la qualité du bois (voir l'article de G. Nepveu page 43)… Le département recherche de l'ONF coordonne ces actions de recherches soit en y participant directement soit en effectuant des commandes aux organismes précités.

Et ensuite ?

Le plan d'actions relatif aux futaies hétérogènes s'inscrit dans la durée, les aspects suivants doivent être précisés.

En matière d'aménagement, il conviendra d'améliorer les méthodes d'aménagement pour les traitements sans suivi surfacique du renouvellement, ou autrement dit la futaie irrégulière (incluant la futaie jardinée, cas particulier où l'équilibre recherché au niveau de l'unité de gestion est atteint ou proche de l'être). Cette action entrera dans un chantier plus large d'adaptation du manuel d'aménagement.

Les guides de sylvicultures mutualisés à l'échelle biogéographique ou du contexte forestier intégreront des parties consacrées à la conduite des futaies hétérogènes. On peut citer le guide des sylvicultures de montagne des Alpes-du-Nord, celui des Alpes-du-Sud, le guide des chênaies continentales qui viendra compléter celui des chênaies atlantiques paru en 2005, le guide des sapinières du Massif central et des Pyrénées, le guide des forêts littorales atlantiques… tous en cours d'élaboration.

À plus courte échéance, les critères de choix du traitement et des mélanges souhaités (voir deuxième partie du présent article), en fonction du choix de l'essence objectif qui dépend lui-même de la prise en compte des changements globaux, seront précisés pour tous les grands contextes forestiers à l'occasion de l'établissement des DRA – SRA.

Les futaies hétérogènes sont un enjeu fort pour l'ONF. Pour certaines d'entre elles, nos manques de connaissances peuvent être une source de difficulté. Cela doit nous inciter à mutualiser nos pratiques, en interne comme en externe, à tirer les leçons du passé et aussi à préciser et clarifier les critères de choix du traitement, les méthodes d'aménagement et les méthodes de suivi liées au traitement en futaie irrégulière.

Thierry SARDIN
Jean-Luc DUNOYER
ONF, direction technique
département forêts
thierry.sardin@onf.fr
jean-luc.dunoyer@onf.fr

Quelques enjeux autour des forêts hétérogènes tempérées

Les forêts hétérogènes, par leurs enjeux, constituent un domaine de recherches et d'investigations particulièrement important pour la gestion. Des chercheurs nous livrent ici leurs analyses, en s'appuyant sur une synthèse bibliographique fouillée dont l'intégralité est publiée : les nombreuses références retenues pourront ainsi alimenter la réflexion des lecteurs désireux d'approfondir certains points.

Les peuplements hétérogènes recouvrent une large gamme de formes forestières (Schütz, 1990) :

- des peuplements à une seule strate de végétation mélangée ;
- des mélanges stratifiés, chacune des strates étant pure ou mélangée ;
- des formations inéquiennes dans l'une au moins des strates (taillis-sous-futaie) ;
- des futaies jardinées, régulières par parquets ou par bouquets.

Nous insisterons assez peu sur les outils de description statique, par exemple les typologies de peuplement (Bastien, 2001 ; McElhinny *et al.*, 2005). En revanche, nous tenterons de préciser quelques enjeux socio-économiques et scientifiques autour de leur dynamique, de leur fonctionnement et de leur gestion, dans le contexte particulier des forêts tempérées.



T. Sardin, ONF

Futaie irrégulière avec mélange d'essences (chênes-pins)

Situation en France métropolitaine

Le bilan suivant s'appuie sur plusieurs sources, compilées par MAP (2000). La répartition des surfaces forestières en unités de végétation homogènes indique un fractionnement prononcé : 25 % de la surface en unités inférieures à 50 ha, 37 % en unités supérieures à 500 ha. 82 % des lisières non-forestières concernent des terres agricoles, 13 % des milieux semi-naturels. Les formations *a priori* les plus pures (taillis, futaies de conifères ou de feuillus) représentent 40 % de la surface, les mélanges futaie-taillis plus du tiers, les futaies jardinées autour de 5 %.

À l'échelle nationale, le pool d'espèces en forêt est élevé : 73 espèces indigènes, 9 acclimatées, 54 exotiques. Localement, la richesse spécifique des placettes IFN se répartit comme suit : 32 % comptent une seule espèce arborée recensable, 30 % deux espèces, 21 % trois espèces, 17 % quatre et plus. Cette richesse varie entre grandes régions : les peuplements à 1 ou 2 espèces sont très abondants dans le grand Sud-Ouest, le Midi méditerranéen et le Massif central ; les peuplements les plus riches se trouvent dans les plaines, collines et reliefs de l'Est. Le degré de pureté moyen des peuplements, mesuré en pourcentage du volume, varie de 91 % quand l'essence prépondérante est le pin maritime à 50 % pour le charme. Les formations les plus pures (> 80 %) regroupent des forêts méditerranéennes ou artificialisées (pin maritime, douglas, pin noir d'Autriche) ou des milieux à fortes contraintes (pin à crochets, pin d'Alep,

mélèze). Les essences sociales cultivées de manière semi-intensive (épicéa, sapin, pin sylvestre, châtaigner, chêne sessile, hêtre) ont une pureté comprise entre 70 et 80 %. Enfin, dans la gamme 50 - 70 %, on trouve essentiellement des stades pionniers (chêne pédonculé, saules, bouleaux, tremble, frêne).

En Europe tempérée, diversité ne se confond pas avec naturalité. Dans les forêts sub-naturelles d'altitude et les forêts d'Europe orientale en conservation intégrale depuis un siècle (Leibundgut, 1982 ; Falinski, 1986 ; Korpel, 1995), la végétation climacique est relativement pauvre, par comparaison avec la riche flore des régions analogues d'Asie ou d'Amérique (Latham et Ricklefs, 1993). Du fait de la longueur du cycle sylvigénétique (200 à 350 ans), ces forêts naturelles présentent une forte prépondérance de faciès homogènes en espèces et en structure. Les stades ouverts, à forte diversité et nécessaires au retour des essences de lumière, y sont 1,5 à 3 fois moins représentés qu'en forêt gérée (Schütz et Oldeman, 1996). Les formes d'allure jardinée sont généralement très fugaces, pendant la phase de désagrégation ; elles ne se maintiennent durablement que là où les perturbations sont fortes et récurrentes et le milieu très contraignant, par exemple dans les pessières subalpines (Korpel, 1995) ou en région méditerranéenne (Fady, 2004). Ce rôle important des régimes de perturbation dans l'homogénéité structurale a un caractère très général (Tilman, 1988).

Dans le contexte européen, les forêts françaises se distinguent donc par une forte diversité, à toutes les échelles. Celle-ci est liée d'une part à la large gamme des conditions bioclimatiques, d'autre part, et sans doute dans une proportion importante, aux conséquences des usages du sol actuels et anciens : importance des structures irrégulières issues du traitement en taillis-sous-futaie, place privilégiée accordée à la régénération naturelle, importance des formations jeunes ou dégradées, structure d'ensemble très fractionnée et en forte interaction avec des milieux ouverts, agricoles ou semi-naturels.

Enjeux environnementaux et socio-économiques

Peuplements hétérogènes, pratiques de gestion et biodiversité

La biodiversité est devenue un des enjeux majeurs de la gestion durable des forêts, pour des raisons éthiques et socio-économiques (Barthod, 1996). Les relations entre gestion forestière et biodiversité sont envisagées selon deux points de vue réciproques (Millier *et al.*, 2004). Sur le plan patrimonial, quel est l'impact des pratiques sur la biodiversité ? De façon utilitariste, quels bénéfices annexes (stabilité, pérennité, moindres coûts) peut-on retirer de pratiques de promotion de la diversité ? Nous insisterons plutôt sur ce second point de vue (rôle fonctionnel de la biodiversité), en empruntant beaucoup à l'ouvrage de synthèse « *Forest diversity and function* » (Scherer-Lorenzen *et al.*, 2005).

Vis-à-vis de la biodiversité, les forêts hétérogènes apportent une contribution directe (cortège des essences ligneuses) mais surtout indirecte par l'association avec des espèces inféodées et la création de biotopes diversifiés, liés aux trouées ou lisières créées pour pérenniser le mélange (Gosselin et Laroussinie, 2004). Dans le détail, les relations entre la diversité du couvert forestier et celle des communautés associées sont très variées, selon les niches écologiques, les traits de vie et le fonctionnement des espèces d'intérêt (végétation basse, mammifères, oiseaux, insectes, champignons, micro-organismes). Par sa complexité, l'exemple de l'avifaune est intéressant (Le Tacon *et al.*, 2001) : si les conifères hébergent en général une faune moins riche que les feuillus, quatre espèces font exception dont deux exotiques (douglas, épicéa, mélèze et cèdre) ; dans le massif du Ventoux, le milieu le plus riche est la cédraie, en raison de sa végétation structurée ; en plaine, la futaie régulière est localement plus pauvre en oiseaux que le taillis-sous-futaie, mais plus riche quand on la considère globalement sur tout son cycle sylvicole. En ce qui concerne les cervidés, la disponibilité alimentaire a une répartition spatiale nettement distincte selon le mode de traitement, régulier ou jardiné, ce qui a des impacts sur la capacité d'accueil et la protection de la régénération forestière sous forte pression animale (Landmann et Muller, 1998 ; Lakière *et al.*, 2001).

En matière de conservation (Rameau, 2001), les consignes de gestion privilégient des approches souples et dynamiques, en exploitant les capacités naturelles des espèces (migrations), avec des échelles d'intervention qui dépassent fréquemment le cadre du peuplement (espèces à larges territoires diversifiés) et le contexte strictement forestier (pelouses, milieux humides). Jactel *et al.* (2005) montrent qu'un contrôle des insectes ravageurs est possible *via* l'installation d'îlots de feuillus au sein de grands massifs résineux. Bengtsson *et al.* (2000) insistent d'une part sur l'intérêt patrimonial des milieux à faible densité arborée, d'autre part sur des solutions au niveau des paysages (réseaux de sites-refuge à forte diversité au sein d'espaces gérés intensivement). Compte tenu de la variabilité des situations, Schütz et Oldeman (1996) prônent une diversification des biotopes en combinant toutes les techniques sylvicoles disponibles : « *futaies claires et sombres, irrégulières et homogènes, finement mélangées et monospécifiques […] régénérations aussi bien en grandes surfaces que très ponctuelles voire continues* ».

En résumé, si les peuplements hétérogènes ont bien des impacts significatifs sur la diversité des communautés associées, ils ne constituent qu'un outil spécifique au sein d'une stratégie patrimoniale globale.

Résistance et résilience des peuplements hétérogènes vis-à-vis des aléas

Après les chablis massifs de 1990 et 1999 en Europe, de nombreux travaux ont tenté de préciser l'effet des méthodes sylvicoles et des caractéristiques du couvert sur la sensibilité des arbres au vent (Dhôte, 2005). Au-delà des résultats classiques sur les facteurs climatiques, la station et les sensibilités spécifiques, les deux facteurs influents affectés par la sylviculture sont la taille des arbres (hauteur, surface exposée,

élancement) et la rugosité du couvert (lisières, hétérogénéité des hauteurs, ouverture suite aux éclaircies). Il n'y a pas d'amélioration de la résistance dans les couverts mélangés à une strate ; par référence à la futaie régulière, la sensibilité en taillis-sous-futaie est identique (hêtre) ou plus forte (chênes). L'avantage des peuplements hétérogènes semble plutôt résider dans une meilleure résilience : chablis de plus petite taille, régénération en attente ou plus facile à obtenir et donc retour plus rapide vers un état satisfaisant.

En ce qui concerne les insectes ravageurs, les peuplements mélangés présentent en moyenne de moindres dégâts ou des niveaux de population plus faibles, la seule exception étant le cas des insectes polyphages (Jactel *et al.*, 2005). Cette meilleure résistance repose sur un accès réduit aux hôtes, un impact plus fort des ennemis naturels et une spécialisation sur les espèces-hôte les plus sensibles. Il existe aussi des phénomènes de compensation : dans les forêts mélangées du Nord-Est canadien, la mortalité des résineux pendant les pullulations de tordeuse provoque une croissance accélérée des feuillus et enclenche la régénération des résineux (Saucier, 1997).



T. Cordonnier, ONF

Pretzsch (2005) montre que, dans les forêts mélangées de Bavière après la sécheresse de 1976, la réaction négative du hêtre a été plus faible et de plus courte durée que celle de l'épicéa. Il s'ensuit un bénéfice par rapport à la situation des peuplements purs de l'espèce sensible : comme dans le cas des ravageurs, l'essence moins sensible bénéficie d'une baisse de pression de compétition et utilise mieux les ressources du milieu. Cela contribue à soutenir la production et à tamponner l'effet des perturbations.

En résumé, les peuplements hétérogènes présentent une meilleure résilience vis-à-vis des aléas. Sous l'angle des risques, on doit toutefois être attentif non pas à l'hétérogénéité des peuplements dans l'absolu, mais aux essences en présence. En effet, les sensibilités spécifiques sont en général très variables (de 1 à 10 entre chêne et épicéa pour le risque chablis) ; ces sensibilités ne sont pas forcément réduites en tant que telles par le mélange, qui est bénéfique par effet de système (prise de relais). Le mélange protège plutôt la forêt que les espèces.

Forêts mélangées et changements environnementaux

Les recherches accumulées depuis la crise des « pluies acides », dans les années 1980, ont produit des résultats très importants :

- le caractère évolutif des écosystèmes forestiers (altération de la chimie des sols, acidification, eutrophisation, changements de flore) ;

- l'influence conjointe et en interaction de la pollution atmosphérique (dépôts acidifiants, ozone, CO_2) et des pratiques de gestion (choix d'essences, densité des peuplements, diversité spécifique) sur le fonctionnement des écosystèmes et leur sensibilité aux aléas (sécheresse, pathogènes) ;
- une productivité forestière en Europe en augmentation depuis 150 ans, y compris dans les régions affectées par

des dépérissements (sapinières et pessières d'Europe tempérée). Plus récemment, l'attention s'est focalisée sur les impacts forestiers, constatés et à venir, des changements environnementaux (climat, CO_2, dépôts azotés). On s'attend à des évolutions plus ou moins prononcées pour la fertilité des sols, la composition spécifique, l'état de santé, la stabilité physique et la productivité.

Cette situation a trois conséquences pour les gestionnaires. Le milieu ne peut plus être considéré comme stationnaire, d'où le besoin d'outils évolutifs et généraux pour la caractérisation des stations. Le milieu ne peut plus être considéré comme indépendant des pratiques de gestion : le raisonnement linéaire usuel (station → essences potentielles et fertilité → critères d'exploitabilité et modes de récolte) doit faire place à des interactions plus subtiles (gestion → état des sols, disponibilité en eau → fertilité → gestion). Enfin, les décisions sont prises dans un contexte marqué par des tendances à long terme, des aléas pouvant entraîner de fortes perturbations et une incertitude concernant aussi bien les scénarios de changements environnementaux (sensibles aux hypothèses politiques et technologiques) que la réponse des écosystèmes.

Dans ce cadre, développer des capacités de résilience et d'adaptation est aujourd'hui considéré comme une motivation majeure pour des forêts plus mélangées, selon une « hypothèse d'assurance » (Naeem, 1998) : diminution des risques, sélection progressive des essences mieux adaptées aux nouvelles conditions climatiques (Pretzsch, 2005). On devrait aussi analyser le risque de favoriser, notamment par la futaie irrégulière, la progression d'essences d'ombre ou nomades (sapin, hêtre, frêne) dans des stations qui à long terme ne satisferont pas leurs besoins en eau (Schütz, 1999).

Tendances sylvicoles, conduite et conversion en forêt hétérogène

Les problèmes posés et les évolutions sylvicoles varient entre grandes régions. En Allemagne et Europe centrale, une motivation importante est d'améliorer la stabilité et la profitabilité de forêts résineuses, par des politiques de conversion en forêts mélangées et/ou irrégulières, voire de retour progressif vers des forêts feuillues « natives » (Otto, 1986 ; Sterba et Zingg, 2001). En Scandinavie, on s'intéresse surtout aux mélanges à but cultural (bouleaux-résineux). En France, le débat porte sur la meilleure valorisation des forêts feuillues mélangées de plaine (Bock et Richter, 2002). Dans les forêts de montagne, la pérennité de la fonction de protection et la rentabilisation des coûts d'exploitation sont deux questions majeures.

Il existe une forte convergence quant aux objectifs : développer des méthodes sylvicoles moins coûteuses et efficaces, favoriser la multifonctionnalité par des systèmes en bonne santé et adaptables (Schütz et Oldeman, 1996). De manière croissante, les innovations s'inspirent d'idées naturalistes : automation biologique, utilisation des pionnières comme éducatrices des essences-objectif, futaie à couvert continu, imitation des perturbations naturelles (Quine *et al.*, 1999 ; Bengtsson *et al.*, 2000 ; Turckheim et Bruciamacchie, 2005).

La diversité des situations se reflète dans l'alternative entre sylvicultures de peuplements ou d'arbres. Les premières prévalent dans les pays scandinaves, les secondes dans les régions où la filière est peu intégrée (objectif de gros bois à forte valeur ajoutée, gestion de la qualité individuelle, exploitation des niches commerciales : Bastien et Wilhelm, 2000). Vis-à-vis de l'irrégularité, la distinction formelle entre forêts mélangées et irrégulières s'affaiblit, l'argument étant que la promotion du mélange et le refus des sacrifices d'exploitabilité conduisent forcément à un recouvrement très large entre phases d'amélioration et de régénération. Néanmoins, on constate en pratique une capitalisation progressive des peuplements, liée à la productivité en hausse et aux difficultés de commercialisation des bois de faible valeur. Localement, la pérennisation de structures finement irrégulières suppose un long processus de conversion et un dosage délicat des coupes pour contrecarrer les tendances naturelles à la régularisation du couvert et à l'exclusion des essences les moins compétitives (Schütz, 2001).

Il existe encore peu de résultats sur l'économie comparée des systèmes de production. Des travaux scandinaves indiquent une rentabilité meilleure pour les mélanges épicéa-bouleaux que pour les plantations pures (Valkonen et Valsta, 2001). Lors de la conversion en futaie irrégulière, on observe une modification importante dans la structure des coûts de gestion (Bouillie, 2001) ; le facteur limitant actuel, pour l'évaluation économique, est la capacité des modèles de croissance à simuler correctement la régénération et à intégrer les risques (Hanewinkel et Pretzsch, 2000).

Quelles questions scientifiques sont posées actuellement ?

Autécologie des essences forestières

Pour le choix des essences et leur conduite en forêts hétérogènes, on a besoin de renouveler les approches de l'autécologie des essences. Les progrès attendus concernent la description des milieux, la modélisation des niches écologiques et de la productivité, et enfin, compte tenu des changements environnementaux, la diversification des traits de vie spécifiques considérés (phénologie, dispersion, appétence pour la faune, sensibilité aux stress…). La caractérisation du milieu doit expliciter les facteurs énergétiques, hydriques et trophiques (Bergès, 1998) : climat, géomorphologie, réserve utile, fertilité et toxicité des sols. Une attention particulière est apportée aux facteurs qui vont connaître des évolutions régionalisées (température, bilan hydrique, nutrition azotée).

Ces progrès sont rendus possibles par la disponibilité accrue d'outils informatiques puissants : modèles numériques de terrain, grandes bases de données climatiques (modèle *Aurelhy*, Météo France), dendrométriques et écologiques (IFN) ou phytoécologiques (*EcoPlant*, Engref). En croisant ces données sous SIG et grâce aux progrès des techniques de modélisation, on peut étudier sur de vastes territoires les variations de présence / absence ou de productivité, et identifier ainsi les facteurs écologiques clé qui déterminent la niche écologique et la

compétitivité relative des essences. En France, des résultats sont disponibles pour l'indice de fertilité de l'épicéa et du hêtre sur un tiers ou la totalité du territoire et pour la niche écologique du sapin dans les Vosges (Seynave *et al.*, 2004 ; Pinto et Gégout, 2005). Ces travaux vont permettre progressivement :

- de préciser l'influence du contexte climatique et édaphique sur la dynamique des mélanges ;
- d'identifier et interpréter, notamment par référence aux usages anciens des sols, les écarts entre végétations potentielle et actuelle ;
- de cartographier les régions naturelles où les perturbations les plus fortes seraient attendues sous changement climatique.

Rôle des différentes sources de perturbations dans la dynamique forestière

Dans les recherches sur la biodiversité ou le climat, on relève actuellement un intérêt très vif pour les différentes sources de perturbations : chablis, incendies, avalanches, sécheresse, herbivores, pathogènes épidémiques. Ces phénomènes sont étudiés soit en tant que facteurs influençant la dynamique des écosystèmes et la biodiversité (Bengtsson *et al.*, 2000 ; Jõgiste *et al.*, 2005), soit pour mettre au point des pratiques sylvicoles visant à maintenir une certaine permanence des fonctions en présence d'aléas (Cordonnier, 2004), soit enfin comme source d'inspiration possible pour des méthodes de gestion (Quine *et al.*, 1999). Cette problématique des perturbations concerne par plusieurs aspects le champ des forêts hétérogènes, en particulier à travers la sensibilité différentielle des essences.

Régénération et mortalité

La dynamique forestière repose sur des flux démographiques (régénération, mortalité) et sur la croissance. Ces phénomènes sont contrôlés par des processus de dispersion, de compétition, des perturbations naturelles et des pratiques de gestion (Houllier, 1995 ; Franc *et al.*, 2000). Or de très forts déplacements d'aires potentielles de répartition des espèces sont attendus au cours des décennies à venir, sous l'influence des changements climatiques (Kienast *et al.*, 2000 ; Badeau et Dupouey, *in* Loustau, 2004). Les modalités de ces déplacements restent très difficiles à anticiper, compte tenu de la rapidité du réchauffement attendu. L'utilisation et le pilotage de la dynamique forestière en forêts hétérogènes sont une des options de gestion permettant d'accompagner ces évolutions. Pour en étudier la faisabilité, la seule méthode accessible est l'expérimentation virtuelle sous scénarios climatiques explicites, en simulant l'effet de stratégies de coupe sur la dynamique des espèces. Cela nécessite des systèmes d'information complets, incorporant des modèles robustes pour les flux démographiques et la croissance, et capables de gérer des phénomènes de dispersion à l'échelle du massif : la plate-forme Capsis est particulièrement adaptée à la résolution de ces problèmes (Dreyfus, 2004).

Dans ce cadre, les recherches sur la régénération et la mortalité se développent dans les différentes équipes du Cemagref et de l'Inra. La régulation des deux phénomènes par la lumière et la compétition latérale est bien étudiée, de même que les processus de dispersion (Courbaud *et al.*, 2001 ; Dreyfus, 2004 ; Kunstler, 2005). Les programmes de recherche financés suite aux tempêtes Lothar et Martin ont permis de progresser sur la mortalité par chablis. Une généralisation de ces travaux permettrait de mieux prédire les flux démographiques, en prêtant attention à l'ensemble des facteurs (lumière, climat, sol) et processus écologiques de contrôle (dispersion, banque de graines des sols, faune sauvage, réaction au stress hydrique, pertes par chablis, compétition).

Climat lumineux et caractérisation écophysiologique de la tolérance à l'ombrage

Pour comprendre le fonctionnement des forêts hétérogènes, un enjeu scientifique important est de savoir expliciter les ressources en jeu, leur disponibilité, leur capture et leur usage par les différentes essences. Dans ce cadre, le rôle de la lumière donne lieu à un investissement très fort des équipes de recherche françaises (Inra, Cemagref), en partenariat avec l'ONF : c'est le cas du Projet ANR-ECOGER « Bases d'une gestion durable des forêts mélangées : écophysiologie, croissance et démo-génétique des espèces constitutives », coordonné par E. Dreyer et C. Collet (Inra Nancy).

Pour la caractérisation du climat lumineux, il existe dans le monde une dizaine d'approches de modélisation appliquées à la forêt, qui diffèrent par le degré de détail dans la description du couvert et les processus physiques pris en compte. Les travaux actuels visent à construire des modèles d'interception du rayonnement selon la structure du couvert, afin de prédire la quantité d'énergie au sol (Courbaud *et al.*, 2003 ; Porté *et al.*, 2004 ; Piboule *et al.*, 2005), dont découlent probabilité d'apparition des semis, compétition et croissance différentielle des espèces au stade juvénile. Concernant la réponse à la lumière, on cherche à préciser, d'un point de vue morphologique et écophysiologique, les notions intuitives de tolérance à l'ombrage et de plasticité. Les travaux sont consacrés aux effets induits par le climat lumineux, entre les stades semis et perchis, sur plusieurs processus : interception du rayonnement, photosynthèse, allocation entre organes, fonctionnement hydrique, croissance et architecture aérienne et souterraine, bilan de carbone (Curt *et al.*, 2005 ; Dreyer *et al.*, 2005). Sur le plan forestier, les retombées attendues concernent la régulation du couvert pour assurer la survie des essences souhaitées, le développement d'outils de diagnostic pour la valeur d'avenir et la qualité morphologique des jeunes arbres (ramification, port), ainsi que la création d'outils de simulation intégrés.

Productivité, compétitivité et croissance des essences

L'observation des relations entre diversité et productivité, *in situ* et à l'échelle de l'écosystème, apporte un éclairage précieux sur les interactions entre espèces. Les expériences disponibles

concernent des mélanges à deux espèces (Jones *et al.*, 2005) et permettent de décrire comment l'utilisation des ressources du milieu est modifiée par le mélange : neutralité, antagonisme ou bénéfice. Les résultats observés vont d'un bénéfice de +30 % quand les essences sont très complémentaires à une dégradation de -30 % quand elles sont très redondantes (Pretzsch, 2005). Quelques cas où un mélange produit plus que la meilleure des deux espèces sont mentionnés (mélèze-épicéa, aulne-douglas).

Ces comportements peuvent résulter de plusieurs mécanismes (Kelty, 1992) : réduction de la compétition du fait de niches complémentaires (stratification aérienne ou souterraine) ou de différences temporelles sur la saison ou sur le cycle de vie (phénologies complémentaires, espèces précoces ou tardives), effets de facilitation par amélioration de la nutrition (décomposition plus rapide des litières mélangées, Hättenschwiler, 2005) ou association avec des fixatrices d'azote. De ce fait, le résultat dépend aussi de la qualité de la station : par exemple, un bénéfice lié à la stratification aérienne est plus probable quand les ressources du sol (eau, azote) sont peu ou pas limitantes. Les situations de complémentarité ou redondance des niches mériteraient d'être étudiées plus systématiquement.

Pour la croissance, une lacune importante concerne la différenciation sociale dans des couverts mélangés et/ou irréguliers (régressions, promotions, viabilité des arbres après une phase d'attente en sous-étage). On aurait besoin d'expliciter :

- le rôle des structures spatiales (agrégées ou aléatoires, répulsion ou attraction entre espèces) dans la survie des espèces en mélange (Goreaud *et al.*, 2002) ;
- les stratégies de développement aérien et la plasticité de la croissance sous la pression d'une essence plus compétitive (cf. travaux de J.M. Ottorini et N. Le Goff sur les mélanges hêtre-frêne) ;
- l'impact des différences de sensibilité entre espèces vis-à-vis des aléas (sécheresse, bris de cimes…) sur leur vigueur et leur compétitivité relative.



Ch. Allégrini

Le débouché pratique de ces travaux, directement ou par l'intermédiaire de simulateurs, concerne par exemple la définition de mélanges réalisables à coût raisonnable.

Sylviculture et formation de la qualité en forêts hétérogènes

Les connaissances acquises dans le domaine de l'écophysiologie, de la croissance et de la branchaison permettent de faire un certain nombre de constats :

- la compression latérale intervient de façon importante dans le processus d'élagage naturel.
- En présence d'une compression latérale, un couvert vertical modéré permet d'obtenir des tiges aux caractéristiques de branchaison plus favorables (pour le hêtre : Vinkler *et al.*, *à paraître*).
- Chez certaines essences, des alternances de ralentissement et d'accélérations brutales peuvent s'avérer défavorables pour les propriétés technologiques du bois.

■ L'exigence en lumière augmente avec la taille, ce qui aggrave le risque de compression à mesure que les tiges se développent.

■ Les différences de tolérance à la compétition des essences forestières sont marquées (p. ex. intolérance particulière du merisier, de l'alisier torminal).

Dans le cas des systèmes irréguliers, ces éléments semblent aller dans le sens d'une gestion assez fine du couvert (interventions fréquentes et modérées, trouées de tailles intermédiaires) permettant un accroissement continu des tiges, limitant les risques de forte compression ou de mise en lumière trop brutale. Dans le cas des peuplements réguliers mélangés dominés par une essence sociale, des interventions spécifiques peuvent s'avérer nécessaires pour favoriser les tiges d'essences intolérantes (ex. détourage des feuillus précieux). L'exercice se complique cependant lorsque le nombre d'espèces augmente. En outre, le diagnostic de la vigueur, de la qualité et de la valeur d'avenir des individus reste particulièrement délicat pour les feuillus, qui plus est dans les stades juvéniles. Le projet de recherche sur la réactivité des perches feuillues dans les peuplements irréguliers, élaboré en partenariat avec l'Inra (projet ANR-ECOGER) et auquel participe l'IDF, devrait apporter des éléments d'amélioration sur ce sujet. Dans le cas de peuplements riches en essences forestières, certains auteurs prônent des méthodes de gestion pragmatiques basées sur un gradient d'ouvertures compatible avec les exigences en lumière des espèces en phase juvénile et sur une structure spatiale de ces ouvertures compatible avec leur capacité de dispersion (Coates et Burton, 1997). L'efficience de ces préconisations, très théoriques, sur la qualité des bois n'est pour l'instant nullement démontrée.

La problématique de la qualité du bois ne peut être appréhendée pleinement sans une approche économique de la gestion. Cette approche doit tenir compte des coûts de gestion, de l'incidence de cette gestion sur la qualité des bois et des débouchés potentiels des produits. L'association entre modèles de croissance, modèles de propriétés du bois (Nepveu, ce numéro page 43) et modèles microéconomiques permettrait sans doute d'apporter de l'eau au moulin.

Les approches de modélisation des forêts hétérogènes

La plupart des questions qu'on se pose aujourd'hui sur les forêts hétérogènes nécessitent le recours à des modèles, disponibles au sein de simulateurs : mise au point d'itinéraires sylvicoles (par exemple en relation avec une typologie de peuplements), étude de la diversité au niveau d'un massif compte tenu des pratiques de gestion, prévision de l'impact des changements climatiques. De manière générale, ces modèles incluent les processus de croissance, régénération et mortalité. Deux grandes familles de méthodes sont utilisées aujourd'hui :

■ les modèles d'arbres dépendants des distances, où chaque arbre est situé dans l'espace, sont très performants pour faire de l'expérimentation virtuelle sur les sylvicultures irrégulières ;

■ les *gap-models*, ou modèles de trouées (Franc *et al.*, 2000), ont une représentation plus rudimentaire des peuplements (juxtaposition de cellules à l'intérieur desquelles les arbres ne sont pas situés spatialement), mais sont bien adaptés pour des applications à l'échelle du paysage. Ils sont notamment utilisés pour étudier l'évolution des aires de répartition des espèces sous changements climatiques (Bugmann *et al.*, 2001).

En France, trois ateliers de simulation très complets sont actuellement disponibles. Le premier, *Ventoux*, a été créé à l'Inra-Avignon pour étudier la maturation sylvigénétique des boisements RTM (recolonisation des peuplements de pins par le hêtre et le sapin pectiné : Dreyfus, 2004 ; Porté *et al.*, 2004). Les deux autres, *Mountain* et *Samsara*, ont été développés par le Cemagref-Grenoble, à l'échelle du peuplement et dans un but d'aide à la décision pour l'élaboration de sylvicultures en montagne (Courbaud *et al.*, 2001 ; Courbaud *et al.*, 2003). Un quatrième atelier, *SimCAP*, est en construction pour les hêtraies mélangées du Nord-Est, avec une philosophie voisine des deux précédents (Ottorini et Le Goff, 2004).

Contributions de l'ONF à la recherche

En lien avec l'action « Forêts hétérogènes » pilotée par la direction technique (Sardin et Dunoyer, ce numéro page 18), le département recherche a établi des conventions de recherche et de développement avec le Cemagref (convention pluriannuelle 2002-2007) et l'Inra (Laboratoire d'étude des ressources forêt-bois, convention ModelFor 2005-2010) au sein desquelles des actions spécifiques sont consacrées aux forêts hétérogènes. Ces recherches traitent une grande partie des questions identifiées plus haut : autécologie des essences, rôle de la compétition, dynamique forestière. Les modèles développés (hêtraies mélangées du Nord-Est, hêtraies-sapinières-pessières des Alpes du Nord, mélanges chêne sessile-pin sylvestre dans le Centre, forêts mélangées des Vosges) devraient permettre d'avancer sur certaines questions du forestier :

■ quelle est la dynamique des forêts hétérogènes en l'absence d'interventions sylvicoles ?

■ Quels itinéraires permettent de garantir une gestion durable des peuplements mélangés et/ou inéquiens (renouvellement, production, protection) ?

■ Quels sont les outils pertinents de description de ces peuplements, de contrôle de la production ?

■ Comment tenir compte, dans les stratégies de gestion, des changements globaux, des perturbations biotiques et abiotiques ?

■ Quelles sont les conséquences de l'hétérogénéité sur la qualité des bois et leur commercialisation ?

Au sein du projet « Bases d'une gestion durable des forêts mélangées : croissance, écophysiologie et démo-génétique des espèces constitutives », l'ONF

- pilote une étude sur la réactivité des perches feuillues en système irrégulier ;
- met en place une expérience consacrée à l'influence de la vitesse, de l'intensité et de la spatialisation du relevé du couvert sur le mélange hêtre-pin noir dans la régénération des peuplements du Ventoux ;
- valorise des dispositifs ONF encore peu exploités scientifiquement (double clinal hêtre-érable sycomore de la forêt de Haye, dispositif hêtre – frêne – érable sycomore de Moyeuvre) ;
- participe aux recherches sur la relation structure du peuplement – répartition de la lumière sous couvert ;
- participe à une réflexion sur la prise de données spatiales lors des inventaires typologiques ou statistiques, la structure spatiale représentant une dimension importante des forêts hétérogènes.

Au cours des différents échanges avec les partenaires de la recherche, il est apparu qu'un effort important devait être consacré à l'expérimentation. La méthode expérimentale permet en effet de mettre en évidence les liens de cause à effet et de démêler ainsi l'écheveau complexe des relations structure-fonction dans les peuplements mélangés ou irréguliers. Pour avancer dans ce sens, l'ONF participe à une réflexion inter-organismes, dans le cadre du GIS Coopérative de données modélisation, sur l'observation et l'expérimentation en forêts hétérogènes. Le groupe aura pour tâche de définir une méthodologie commune d'acquisition de données permettant d'alimenter la communauté des chercheurs et des gestionnaires.

Encore peu présent sur les questions de biodiversité dans les forêts hétérogènes, l'ONF tente de mettre le pied à l'étrier en participant au comité de pilotage d'une thèse intitulée : « Impacts de l'essence dominante et du mélange d'essences sur la biodiversité floristique dans les forêts de plaine », thèse encadrée par le Cemagref de Nogent-sur-Vernisson (thème de Recherche ECOSYLV) et l'Inra de Nancy (équipe Ecologie forestière, Lerfob).

Jean-François DHÔTE
Inra – Directeur du Lerfob
Nancy
dhote@nancy-engref.inra.fr

Thomas CORDONNIER
ONF, direction technique
département recherche
thomas.cordonnier@onf.fr

Philippe DREYFUS
Inra – Unité de recherches forestières
méditerranéennes (URFM)
Avignon
dreyfus@avignon.inra.fr

Noël LE GOFF
Inra – Lerfob équipe Croissance
et production Nancy
le_goff@nancy.inra.fr

Bibliographie

BARTHOD C., 1996. La gestion durable des forêts tempérées : aux racines du débat international actuel. Rev. For. Fr., XLVIII (n° spéc. 1996) : 13-22.

BASTIEN Y., WILHELM G.J., 2000. Une sylviculture d'arbres pour produire des gros bois de qualité. Rev. For. Fr., LII (5) : 407-424.

BASTIEN Y. (éd.), 2001. Typologie des peuplements. Actes de la table d'hôte sur la sylviculture des peuplements irréguliers. Engref., Nancy (France), 148 p. + annexes

BENGTSSON J., NILSSON S.G., FRANC A., MENOZZI P., 2000. Biodiversity, disturbances, ecosystem function and management of European forests. For. Ecol. & Man., 132 : 39-50.

BERGÈS L., 1998. Variabilité individuelle et collective de la croissance et de la densité du bois de *Quercus petraea* en relation avec les facteurs écologiques. Thèse de Doctorat ENGREF, Nancy, 388 p

BOCK J., RICHTER C., 2002. Gestion des peuplements mélangés dans le Nord de la France : principaux types de mélange rencontrés et présentation des techniques sylvicoles utilisées pour leur conduite. Rapport du Contrat « Forêts hétérogènes » ECOFOR/ONF n°2000-03. 215 p.

BOUILLIE J., 2001. Analyse des résultats de la gestion de deux massifs forestiers privés traités en futaie irrégulière : utilisation de la main d'œuvre, prélèvement et évolution du capital sur pied. Rev. For. Fr., LIII (2) : 139-150.

BUGMANN H., REYNOLDS J.F., PITELKA L.F., 2001. How much physiology is needed in forest gap models for simulating long term vegetation response to global change. Climatic Change, 51, 249-557.

COATES K.D., BURTON P.J. 1997. A gap based approach for development of silvicultural systems to address ecosystem management objectives. For. Ecol. & Man., 99 : 337-354.

CORDONNIER T., 2004. Perturbations, diversité et permanence des structures dans les écosystèmes forestiers. Thèse de Doctorat ENGREF (Paris), 257 p.

COURBAUD B., GOREAUD F., DREYFUS P., BONNET F.R., 2001. Evaluating thinning strategies using a tree distance dependent growth model : some examples based on the CAPSIS software « Uneven-Aged Spruce Forests » module. For. Ecol. & Man., 145 : 15-28.

COURBAUD B., COLIGNY F. DE, CORDONNIER T., 2003. Simulating radiation distribution in a heterogeneous Norway spruce forest on a slope. Agric. & For. Meteorol., 116 : 1-18.

CURT T., COLL L., PRÉVOSTO B., BALANDIER P., 2005. Growth, allocational flexibility and root morphological plasticity of beech seedlings in relation

to light and herbaceous competition. Ann. For. Sci., 62 : 51-60.

DHÔTE J.F., 2005. Implications of forest diversity for the resistance to strong winds. In « Forest Diversity and Function : Temperate and Boreal Systems », M. Scherer-Lorenzen, Ch. Körner, E.D. Schulze (éds), Springer Vlg (Berlin), Ecological Studies, 176 : 291-307.

DREYER E., COLLET C., MONTPIED P., SINOQUET H., 2005. Caractérisation de la tolérance à l'ombrage des jeunes semis de hêtre et comparaison avec les essences associées. Revue Forestière Française, LVII (2) : 175-188.

DREYFUS PH., 2004. Gestion d'une Évolution Forestière Majeure de l'Arrière Pays Méditerranéen : la maturation sylvigénétique des pinèdes pionnières. Conséquences pour la Biodiversité sur le Site Pilote du Mont Ventoux. In : « Biodiversité et gestion forestière. Résultats scientifiques et actions de transfert », C. Millier, V. Barre et S. Landeau (éd.), GIP-ECOFOR, MAPAR, MEDD, Paris. 142-152.

FADY B., 2004. Is there really more biodiversity in Mediterranean forest ecosystems ? 9ème congrès de l'International Organization of Plant Biosystematics « Plant Evolution in Mediterranean Climate Zones », 16-19 Mai 2004, Valencia, Espagne. Communication orale.

FALINSKI J.B., 1986. Vegetation dynamics in temperate lowland primeval forests. Ecological studies in Bialowieza forest. Junk Publishers, Dordrecht, 537 p.

FRANC A., GOURLET-FLEURY S., PICARD N., 2000. Une introduction à la modélisation des forêts hétérogènes. ENGREF Paris, 312 p.

GOREAUD F., LOREAU M., MILLIER C., 2002. Spatial structure and the survival of an inferior compétitor : a theoretical model of neighbourhood competition in plants. Ecol. Modelling, 158 : 1-19.

GOSSELIN M. ET LAROUSSINIE O. (Coord.), 2004. Biodiversité et gestion forestière. Connaître pour préserver. Synthèse bibliographique. Cemagref Ed., GIP ECOFOR, 320 p.

HANEWINKEL M., Pretzsch H., 2000. Modelling the conversion from even-aged to uneven-aged stands of Norway spruce (Picea abies L. Karst.) with a distance-dependent growth simulator. For. Ecol. & Man., 134 : 55-70.

HÄTTENSCHWILER S., 2005. Effects of species diversity on litter quality and decomposition. In « Forest Diversity and Function : Temperate and Boreal Systems », M. Scherer-Lorenzen, Ch. Körner, E.D. Schulze (éds), Springer Vlg (Berlin), Ecological Studies, 176 : 149-164.

HOULLIER F., 1995. À propos des modèles de la dynamique des peuplements hétérogènes : structures, processus démographiques et mécanismes de régulation. Rev. Écol. (Terre Vie), 50 : 273-282.

JACTEL H., BROCKERHOFF E., DUELLI P., 2005. A test of the biodiversity – stability theory : meta-analysis of tree species diversity effects on insect pest infestations, and re-examination of responsible factors. In « Forest Diversity and Function : Temperate and Boreal Systems », M. Scherer-Lorenzen, Ch. Körner, E.D. Schulze (éds), Springer Vlg (Berlin), Ecological Studies, 176 : 235-262.

JÕGISTE K., MOSER W.K., MANDRE M. (éd.), 2005. Disturbance dynamics and ecosystem-based forest management. Scand. J. For. Res., 20 (suppl. n°6), 160 p.

JONES H.E., MCNAMARA N., MASON W.L., 2005. Functioning of mixed-species stands : evidence from a long-term forest experiment. In « Forest Diversity and Function : Temperate and Boreal Systems », M. Scherer-Lorenzen, Ch. Körner, E.D. Schulze (éds), Springer Vlg (Berlin), Ecological Studies, 176 : 111-130.

KELTY M.J., 1992. Comparative productivity of monocultures and mixed-stands. In « The ecology and silviculture of mixed-species forests », Kelty M.J., Larson B.C., Oliver C.D. (éd.). Kluwer, Dordrecht, 125-141.

KIENAST F., ZIMMERMANN N., WILDI O., 2000. Évolutions possibles des aires de répartition des principales essences forestières en fonction des scénarios de changement climatique. Rev. For. Fr., LII (n° spécial 2000) : 119-126.

KORPEL S., 1995. Die Urwälder der Westkarpaten. Fischer Vlg, Stuttgart, 310 p.

KUNSTLER G., 2005. Dynamique du paysage et dynamique des espèces arborées dominantes. La régénération de Fagus sylvatica L. et de Quercus pubescens Willd. sur les Grands Causses. Thèse de Doctorat ENSAM, Montpellier, 108 p. + annexes

LAKIÈRE V., NORMANT P., BALLON P., 2001. Disponibilités alimentaires pour le chevreuil (*Capreolus capreolus*) dans deux sapinières régulière et jardinée du Second Plateau du Jura. Rev. For. Fr., LIII (5) : 511-526.

LANDMANN G., MULLER S., 1998. Biodiversité et gestion forestière. L'exemple des Vosges du Nord. Rapport de synthèse, Min. Aménagement du Territoire et Environnement, Paris.

LATHAM R.E., RICKLEFS R.E., 1993. Continental comparisons of temperate-zone tree species diversity. In « Species diversity in ecological communities : historical and geographical perspectives », ed. R.E. Ricklefs, D. Schluter, Univ. Chicago Press, Chicago, p. 294-314.

LE TACON F., SELOSSE M.A., GOSSELIN F., 2001. Biodiversité, fonctionnement des écosystèmes et gestion forestière. Deuxième partie : interventions sylvicoles et biodiversité. Rev. For. Fr., LIII (1) : 55-80.

LEIBUNDGUT H., 1982. Europäische Urwälder der Bergstufe. Paul Haupt Vlg, Bern, 308 p.

LOUSTAU D. (éd.), 2004. Séquestration de Carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles. Rapport Final Projet GICC 2001 « Gestion des impacts du changement climatique » et Convention Gip ECOFOR n° 3/2001, Juin 2004, Inra, Bordeaux-Pierroton (France). 137 p.

MAP, 2000. Les indicateurs de gestion durable des forêts françaises. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Paris, France, 129 p.

MCELHINNY C., GIBBONS P., BRACK C., BAUHUS J., 2005. Forest and woodland stand structural complexity : its definition and measurement. For. Ecol. & Man, 218 : 1-24.

MILLIER C., BARRE V., LANDEAU S. (éd.), 2004. Biodiversité et gestion forestière - Résultats scientifiques et actions de transfert. Rapport de synthèse, GIP-ECOFOR (Paris).

NAEEM S., 1998. Species redundancy and ecosystem reliability. Conserv. Biology, 12 : 39-45.

OTTO H.J., 1986. Standörtliche Voraussetzungen, Ziele und Waldbautechnik in Fichten-Buchen-Mischbeständen des Harzes. Teil I : Standorte, Leistungsstruktur und Geschichte der Mischbestände von Fichte und Buche im Harz ; Teil II : Ziele, Möglichkeiten und Waldbautechnik von Mischbestände der Fichte und Buche im Harz. Allg. F. und J. Ztg, 157, 188-196 et 214-222.

OTTORINI J.M., LE GOFF N., 2004. Etude de la dynamique des peuplements mélangés de hêtre et de frêne par modélisation et simulation. Séminaire « Forêts Hétérogènes GIP EcoFor », ENGREF, Nancy, 22 – 24 juin 2004.

PIBOULE A., COLLET C., FROCHOT H., DHÔTE J.F., 2005. Reconstructing crown shape from stem diameter and tree position to supply light models. I. Algorithms and comparison of light simulations. Ann. For. Sci., 62 : 645-657

PINTO P., GÉGOUT J.C., 2005. Assessing the nutritional and climatic response of temperate forest tree species in the Vosges Mountains. Annals of Forest Science, sous presse.

POMMERENING A., 2002. Approaches to quantifying forest structures. Forestry 75 (3) : 305-324

PORTÉ A., HUARD F., DREYFUS P., 2004. Microclimate beneath pine plantation, semi-mature pine plantation and mixed broadleaved-pine forest. Agric. & For. Meteorol. 126 : 167-174.

PRETZSCH H., 2005. Diversity and productivity in forests : evidence from long-term experimental plots. In « Forest Diversity and Function : Temperate and Boreal Systems », M. Scherer-Lorenzen, Ch. Körner, E.D. Schulze (éds), Springer Vlg (Berlin), Ecological Studies, 176 : 41-64.

QUINE C.P., HUMPHREY J.W., FERRIS R., 1999. Should the wind disturbance patterns observed in natural forests be mimicked in planted forests in the British uplands ? Forestry, 72 (4) : 337-358.

RAMEAU J.C. (éd.), 2001. Gestion de la biodiversité. Réalisations concrètes. Rev. For. Fr., LIII, n° spéc. 2001, 375 p.

RAMEAU J.C., MANSION D., DUMÉ G., TIMBAL J., LECOINTE A., DUPONT P., KELLER R., 1989. Flore forestière française. Guide écologique illustré. Tome 1 : plaines et collines. Institut pour le Développement Forestier, Paris.

SAUCIER J.P., 1997. Modélisation de l'accroissement radial des quatre principales essences des peuplements mélangés de bouleau jaune et de résineux soumis à des perturbations naturelles (Québec). Thèse de Doctorat ENGREF, Nancy, 201 p.

SCHERER-LORENZEN M., KÖRNER C., SCHULZE E.D. (éds), 2005. Forest diversity and function. Temperate and boreal systems. Springer Vlg (Berlin), Ecological Studies, 176 : 399 p.

SCHÜTZ J.P., 1990. Sylviculture, 1 — Principes d'éducation des forêts. Pr. Polytechn. et Univ. Romandes, Lausanne (Switzerland), 243 p.

SCHÜTZ J.P., 1999. Close-to-nature silviculture : is this concept compatible with species diversity ? Forestry, 72, 4, 359-366.

SCHÜTZ J.P., 2001. Opportunities and strategies of transforming regular forest to irregular forests. For. Ecol. & Man., 151 : 87-94.

SCHÜTZ J.P., OLDEMAN R.A.A., 1996. Gestion durable par automation biologique des forêts. Rev. For. Fr., XLVIII (n° spéc. 1996) : 65-74.

SEYNAVE I., GÉGOUT J.C., HERVÉ J.C., DHÔTE J.F., DRAPIER J., BRUNO E., DUMÉ G., 2004. Étude des potentialités forestières pour l'Epicéa commun dans l'est de la France à partir des données de l'IFN. Rev. For. Fr., LVI (6) : 537-550.

STERBA H., ZINGG A., 2001. Target diameter harvesting – a strategy to convert even-aged forests. For. Ecol. & Man., 151 : 95-105.

TILMAN D., 1988. Plant strategies and the dynamics and structure of plant communities. Princeton Univ. Press, Princeton (New Jersey), 360 p.

TURCKHEIM B. DE, BRUCIAMACCHIE M., 2005. La futaie irrégulière. Théorie et pratique de la sylviculture irrégulière, continue et proche de la nature. Edisud, Paris, 286 p.

VALKONEN S., VALSTA L., 2001. Productivity and economics of mixed two-storied spruce and birch stands in Southern Finland simulated with empirical models. For. Ecol. & Man., 140 : 133-149.

VINKLER I., NINGRE F., COLLET C., 2005. Comportement du hêtre sous abri : les intérêts d'une bonne gestion du couvert. À paraître dans les Rendez-Vous Techniques.

Historique des traitements irréguliers en Europe

Les prémices de sylvicultures adaptées à des peuplements irréguliers, s'inspirant des dynamiques végétales naturelles, sont bien antérieures à notre époque contemporaine. Au gré des évolutions techniques, des ralentissements d'ordre politique, c'est à travers toute l'Europe qu'ont progressivement émergé des approches diverses… dont l'évolution n'est sans doute pas encore achevée !

L'intérêt pour l'irrégularité en forêt va de pair avec les tendances d'homogénéisation et de surcapitalisation qui se manifestent de plus en plus clairement depuis plusieurs décennies dans les forêts médio-européennes. Les inventaires nationaux des pays d'Europe occidentale tempérée en témoignent très clairement. Plusieurs facteurs se conjuguent pour expliquer cette tendance, qui engendre aujourd'hui une forte demande sociale pour plus de diversité en forêt, et en particulier pour plus de structuration. Il n'en a pas toujours été ainsi, loin s'en faut, et ces aspirations ne relèvent pas seulement des seuls aspects éthico-esthétiques, avec l'émergence de la société de loisirs et les soucis de sauvegarde écologique. Elles traduisent tout simplement un effet de balancier de l'évolution forestière.

En effet, au sortir d'une période d'extrêmes pressions sur la forêt jusqu'au milieu du 19e siècle, l'objectif principal de la politique forestière fut, assez naturellement, la restauration des forêts délabrées et menacées dans leur existence. Cette politique ambitieuse et délibérément volontariste choisit la voie de la forêt régulière de haute futaie pour y parvenir, qui permettait un aménagement strict par surface (la méthode des affectations), et ainsi de mieux contrôler la mise en place de cette restauration. Les anciennes formes d'exploitation par pied d'arbre (le furetage, ou l'exploitation en jardinant d'antan) furent condamnées car elles prêtaient le flanc, pensait-on, aux exploitations trop laxistes et à certaines dérives de surexploitation. Au régime du taillis-sous-futaie d'antan, une des formes de forêts claire, structurée donc hautement hétérogène et diversifiée, en terme de mélange d'essences et de grosseur, succédèrent peu à peu des régimes plus monotones aussi bien sur le plan de la composition des essences et de la structure des peuplements que des modes de renouvellement, à l'échelle des peuplements tout au moins. De cette vision très mécanistique de la gestion forestière date un ostracisme viscéral envers le jardinage (au sens aménagiste du terme) qui va fortement retarder l'avènement de méthodes de gestion plus fines, et novatrices.

Les premières critiques au système de régénération en grandes surfaces

Les premiers à s'insurger très tôt contre les méfaits du renouvellement forestier trop concentré et brutal de la coupe rase, sont des gestionnaires de régions montagneuses de forêts de conifères, tels Dralet (1820), inspecteur principal des forêts du Midi pour les Pyrénées et von Schütz (1757) pour les forêts des monts métallifères en Saxe, arguant à juste titre, des effets hautement néfastes de la coupe rase sur le bon renouvellement forestier et sur l'érosion. Ils proposent, déjà, un renouvellement continu, sans larges interruptions de couvert, en somme le jardinage, explicitement formulé par Dralet. Le terme s'entend alors dans le sens d'un système de renouvellement. Ils ne seront guère suivis, parfois vertement critiqués par l'establishment d'alors. En Allemagne, le terme de jardinage (*Plänterung* puis *Plenterung*) est proposé par Smalian éminent forestier prussien, en 1830, pour une application sous le nom de forêt d'arbre (*Baumwald*) pour éviter le terme même de jardinage réprouvé voire interdit.

La futaie jardinée classique, un véritable régime

Le jardinage des conifères sociaux (sapin, épicéa) représente sans doute l'exemple le plus probant de succès ininterrompu d'une sylviculture d'irrégularité. Il a été pratiqué plus ou moins empiriquement, mais dans un véritable esprit de durabilité avant la lettre, autant sociale qu'économique (caisse d'épargne), dans diverses sapinières de l'arc Alpin (Préalpes suisses notamment en Emmental, vallée de la Savinja) ainsi qu'en Forêt Noire, Vosges, Jura, sur les Hauts Plateaux karstiques de Carniole (aujourd'hui Slovénie) et en Croatie, souvent en propriété paysanne. On ne peut déterminer exactement la date de l'émergence de ce jardinage empirique parce qu'il était transmis par tradition orale. Il sera véritablement formalisé en système de gestion sylvicole par Biolley en 1901 (Le jardinage cultural). Le baron de Tschudi, un des connaisseurs forestiers français, cité par Dralet (1820), fait déjà mention de cette intéressante forme de gestion durable en Emmental. Dralet se réfère par ailleurs aux expériences de structuration par régénération différée sous couvert de hêtraies de de Bosc

(Gérard de Bosc de la Calmette, grand propriétaire à Möen, Danemark). D'autres sources témoignent de l'attachement au jardinage par pied d'arbres des propriétaires et des forestiers du pays de Bade en Forêt-Noire au moment où sa pratique fut interdite par la loi forestière badoise de 1833 (Schütz, 1997). Ils se prévalent des avantages économiques de ce mode de traitement qui permet la production de gros bois de sapin blanc destiné à la construction navale (les coupes de bois hollandais).

Au moment de la large reconnaissance des idées de retour à la nature et de leur application à la foresterie, vers 1880, la futaie jardinée et la forêt mélangée seront prises comme exemples de bonne gestion des forêts, une vision développée par Gayer, professeur à la faculté de Munich (1880, 1886), qui est sans conteste le maître à penser d'un courant d'idées naissant de sylviculture proche de la nature. Il s'agit de s'inspirer des processus naturels tout en favorisant les mélanges.

La méthode du contrôle révolutionne l'aménagement

Au même moment, émerge la proposition de Gurnaud (1878, 1882) de révolutionner l'aménagement forestier en le fondant sur l'observation du développement propre de chaque peuplement, voire même des individus le constituant. C'est l'idée remarquable du contrôle et, concrètement, de suppléer aux affectations par surface, l'observation de l'accroissement comme indicateur de la gestion, ce qui permet de se libérer de la coupe définitive par grandes surfaces et de la notion de révolution. L'âge du peuplement ne représente pas le facteur déterminant du renouvellement mais c'est la notion de diminution du potentiel de croissance de l'arbre qui devient déterminante. Gurnaud dérive son idée, combien avant-gardiste, de l'équilibre démographique des taillis-sous-futaie, et vise à déterminer les différences de productivité au sein des peuplements. La méthode convient bien à une gestion pied par pied. La méthode du contrôle et, partant, la pratique du jardinage comme méthode de traitement (véritable régime) va faire école autour d'un noyau dur, les Controlistes franco-suisses qui l'appliquent à la forêt de Hautecour propriété de la Société du contrôle qu'ils ont constituée pour ce faire (voir encadré ci-dessous). La méthode du contrôle est formalisée et explicitée par Biolley (1920) puis Borel (1929) et les Controlistes de Franche-Comté : Schaeffer, Gazin et d'Alverny (1930) et, au même moment, à l'est des Alpes par Hufnagl (1893) en Carniole.

L'euphorie du pied par pied en Suisse

Malheureusement, la querelle sur les méthodes d'aménagement heurte les habitudes et les principes et s'envenime, notamment dans les administrations forestières étatiques. Elles réprouvent voire interdisent le jardinage. En revanche, en Suisse, l'idée tombe sur un terrain propice. La méthode du contrôle est reconnue d'abord dans le canton de Neuchâtel pour ensuite devenir la méthode d'aménagement privilégiée pour l'ensemble du pays. Sous l'impulsion de l'enseignement de la haute école forestière de l'ETH (École polytechnique fédérale de Zürich) et de personnalités telles que Schädelin, Knuchel, Leibundgut, la foresterie suisse s'oriente résolument, dès les années 1920, vers une large application des principes de Gayer. Parce que le jardinage classique par pied d'arbres ne s'applique pas facilement aux forêts de feuillus, les sylviculteurs (Schädelin, Leibundgut) élaborent des techniques appropriées de structuration des peuplements pour les essences peu enclines à l'individualisation. C'est ainsi que se développe la régénération en groupes décentralisés progressivement (Schweizerischer Femelschlag). Ce régime favorise la structuration par petits collectifs, régénérés de façon décentralisée dans l'espace et différée dans le temps (voir photo page suivante). Il part du principe qu'à côté de la structuration verticale, propre à la futaie jardinée, on peut favoriser aussi la structuration dite horizontale, la mosaïque de petits collectifs,

La Société du contrôle

Un groupe de forestiers franco-suisses convaincus de la méthode du contrôle de Gurnaud acquiert en 1906 une forêt de 64 ha à Hautecourt (Jura) et crée la Société civile du contrôle. La propriété s'élargit en 1914 par acquisition du bois de Foix (93 ha) Commune d'Aresches (Jura) puis de quatre parcelles (147 ha) sur les communes de Fontenotte-Orgecombe et Bretigney Notre-Dame (Doubs) en 1957. Il devient dès lors groupement forestier du Contrôle.

L'objectif est d'appliquer la nouvelle méthode et d'en démontrer la validité. Les propriétaires de parts de la société sont MM H. Jobez et P. Grea, A. Gazin, F. de Liocourt, A. Schaeffer et quelques d'autres du côté français ainsi que H. Biolley, W. Borel et Auguste Barbey du côté suisse. Dans sa version puriste, la méthode du contrôle prévoit l'inventaire par pied d'arbres chaque année dans la division qui arrive en tour de coupe, juste avant la coupe. Les informations sur les différences de potentiels de croissance sont utilisées pour l'aide à la décision. Le diamètre des arbres de plus de 50 cm est annoté par un système ingénieux de marques sur le trait d'inventaire, de sorte à déterminer facilement lors de l'inventaire suivant de combien de cm l'arbre s'est accru. Les arbres dont le potentiel de croissance n'est plus suffisant seront alors prélevés en priorité.



Pascal Junod

Dans sa forêt privée des Erses (commune de Mutrux, canton de Vaud, Suisse), W. Borel utilise un système identique. Les pastilles indiquent à chaque inventaire les unités en cm du diamètre ce qui permet au moment du nouvel inventaire de déterminer immédiatement l'accroissement

mieux à même de garantir la structuration des essences de lumière. C'est ainsi que le jardinage d'une part et la coupe progressive en groupes décentralisés de l'autre représentent dans la sylviculture suisse les deux piliers aboutissant aux mêmes objectifs de structuration et de diversification des forêts.

Extension du jardinage à la futaie claire

Un autre haut lieu favorable aux idées d'irrégularité se cristallise autour de la Société forestière de Franche-Comté. Ici aussi on considère que le jardinage classique ne s'applique pas facilement aux feuillus, encore que les expériences de jardinage par pied d'arbre des hêtraies pures du bassin de Thuringe semblent connues, notamment au travers des publications de Matthes (1910). Pour le chêne, les opinions sont controversées. Certains proposent la futaie claire, un concept inspiré du taillis-sous-futaie (mais sans taillis) dû à Gurnaud, encore, et expérimenté dès 1885 en forêt de Brin (Amance) jusqu'à la première guerre mondiale. Schaeffer (1927) considère que pour jardiner le chêne il faut ne pas dépasser des densités de 13,5 m^2 de surface terrière, soit 180-200 m^3/ha de volume sur pied.

La forêt pérenne

En Allemagne du Nord, les idées de gestion proche de la nature sont relancées par Möller (la forêt pérenne, 1922) suivant l'expérience de Krutzsch de traitement en groupes et bouquets en régénération différée dans les forêts de Bärenthoren et Bärenfels (Saxe). La vision de Möller relance de vives querelles à l'époque. Möller reprend en fait l'idée de Gayer, avec ceci de nouveau, de considérer la forêt comme un organisme (le terme d'écosystème ne s'était pas encore imposé). Cela va conduire au développement du large mouvement de la forêt pérenne (*Dauerwald, Continuous Cover Forestry*) appelé plus tard foresterie conforme à la nature (*naturgemässe Waldwirtschaft*) qui recherche la diversité par des interventions en groupes et bouquets décalés dans l'espace et différés dans le temps, et s'oppose à la coupe rase (Thomasius, 1992). Après divers aléas d'ordre politique, le mouvement s'amplifie progressivement dès les années 1970. Il est aujourd'hui très suivi en Allemagne et va conduire en 1989 à celui très proche de *Pro Silva*, association des forestiers inspirés des processus naturels.



ETH

Régénération en groupes décentralisés progressivement ou coupe progressive dans la forêt d'enseignement de l'école forestière de l'ETH près de Zurich.

Les futaies jardinées de Thuringe

Le jardinage par pied d'arbres du hêtre a longtemps été considéré comme difficile sinon impossible. Et pourtant, dès le début du 20e siècle, ce type de traitement est décrit à plusieurs reprises comme appliqué largement dans les hêtraies pures du bassin de Thuringe (Saxe). Landbeck (1952) en estime alors l'importance à 10 000 ha. Les forêts jardinées de hêtre de Thuringe sont issues du passage progressif du taillis-sous-futaie à une haute futaie claire. Cette forme de jardinage s'est maintenue dans les forêts corporatives, où les ayants droit exploitaient en commun leur forêt (voir encadré ci-dessous). Elles se sont maintenues, au temps de la République populaire démocratique d'Allemagne d'après-guerre, malgré les velléités centralisatrices des services étatiques, là où par tradition et conviction sylvicole et où par des interventions fréquemment répétées on a maintenu le volume sur pied suffisamment bas (250 m^3/ha) pour que la continuité du renouvellement puisse fonctionner.

La morale de l'histoire : la volonté est là mais *quid* de l'art de faire

Depuis la montée en force des aspirations pour des forêts plus diversifiées, l'objectif de structuration s'impose toujours plus. Encore faut-il savoir comment y arriver de façon efficiente et durable. Par ailleurs, il faut convenir que l'enthousiasme et la conviction, aujourd'hui incontestablement acquis et largement établis – le nombre d'adhérents des associations du genre *Pro Silva* en témoigne – ne suffisent pas. L'art de faire représente le facteur limitant de succès.

Les effets de balanciers doivent être pris en compte dans la mesure où la continuité est essentielle en foresterie. Comme souvent en sylviculture, aux périodes d'euphorie succèdent généralement celles de désillusion et parfois de rejet, parce qu'on n'a pas estimé correctement les risques et les dérives. Ainsi, des traitements jardinatoires appliqués très largement en Suisse de 1900 à 1950 n'a résulté finalement qu'une réussite très moyen-

Les futaies jardinées du bassin de Thuringe

Les forêts bordant le bassin de Thuringe sur calcaires coquilliers recouverts de Löss, sont, pour des raisons climatiques, des hêtraies pratiquement pures, des hêtraies-sapinières sans sapin d'après Ozenda. À la suite du processus de fermeture progressif de ces forêts traitées anciennement en taillis-sous-futaies, après interdiction du pâturage, elles ont constitué des futaies claires fortement irrégulières. L'exploitation par pied d'arbre s'est maintenue dans les forêts coopératives des anciennes familles des lieux (*Laubgenossenschaften*). Les ayants droit exploitaient en commun les parcelles arrivant en tour de coupe, en lots qui leur étaient attribués par tirage au sort.

ne, hormis dans la hêtraie-sapinière. Aujourd'hui, seuls 10 % de la surface forestière sont considérés comme bien structurés verticalement, et ce, surtout dans les régions de moyenne altitude de hêtraies à sapins traditionnellement acquises au jardinage classique, et par ailleurs en haute altitude dans les pessières subalpines où la structure irrégulière s'installe et se maintient naturellement. Le constat, identique en Franche-Comté, a entraîné une réflexion des forestiers comtois dans les années 1980-90 sur les différents types de peuplements issus du traitement jardiné et sur leurs évolutions. Il en résulte outre une typologie des peuplements, une recherche de peuplements « objectifs » non normative, fondée sur les potentialités stationnelles locales.

L'évolution naturelle fait donc son œuvre. L'assombrissement des forêts neutralise inéluctablement les velléités de structuration. Il était sans doute plus facile d'obtenir des forêts structurées à la sortie du taillis-sous-futaie, qu'aujourd'hui en période d'accumulation de la biomasse et d'extensification des interventions sylvicoles consécutive aux difficultés économiques. Les tendances d'assombrissement augmentent, pour atteindre des seuils inquiétants avec des volumes sur pied moyens dépassant 400 m³/ha en Bade Wurtemberg et pour le Plateau Suisse. Cela n'est pas propice à améliorer la situation. Dans ce contexte il convient donc de réfléchir aux techniques sylvicoles les plus appropriées et les plus efficientes pour maintenir la diversité et la structure, et l'on retombe inéluctablement sur le travail en petits collectifs décentralisés combinés avec un couvert diffus.

Depuis une vingtaine d'années, différentes expériences de bonne gestion de l'irrégularité voient le jour, souvent promues par les enthousiastes de la cause. Elles servent de démonstration et de référence pour décrire dans quelles conditions l'irrégularité est possible. À mettre en évidence à ce propos le programme « Développement d'une gestion durable des futaies irrégulières feuillues » issu du groupe de travail forêt irrégulière de la Société forestière de Franche-Comté, qui valorise les expériences en sylviculture d'irrégularité en un guide sylvicole (CD-Rom, 2004) sur la base d'un réseau de forêts représentatives, et supporté par un programme européen (Life), ainsi que le réseau de l'association forêt irrégulière.

Jean-Philippe SCHÜTZ
Professeur de sylviculture émérite à l'ETH - Zürich
jph.s@bluewin.ch

Bibliographie

BIOLLEY H., 1901. Le jardinage cultural. Journal Forestier Suisse, vol. 52, pp. 97-104 et 113-132

BOREL, W., 1929. Guide pour l'application du contrôle aux futaies jardinées. Besançon : Jacques & Demontrand. 104 p.

DRALET M., 1820. Traité des forêts d'arbres résineux et des terrains adjacents, sur les montagnes de la France. Toulouse : Vieusseux. 271 p.

GURNAUD A., 1878. Cahier d'aménagement pour l'application de la méthode par contenance : exposé sur la forêt des Éperons. Paris & Besançon :Tremblay & Jacquin. 160 p.

GURNAUD A., 1882. Le contrôle et le régime forestier. Revue des Eaux et Forêts, n° 21, pp. 1-23

HUFNAGL L., 1893. Der Plenterwald, sein Normalbild, Holzvorrat, Zuwachs und Ertrag. Österreischische Viertelsjahresschrift für Forstwesen, vol.11, pp. 117-139

LANDBECK H., 1952. Über die Buchenplenterwälder in Nordthüringen. Der Wald (Berlin), vol. 2, n° 8, pp. 244-247; n° 9, pp. 279-282

MATTHES H., 1910. Der gemischte Buchenplenterwald auf Muschelkalk in Thüringen. Allgemeine Forst und Jagdzeitung, vol. 86, pp. 149-164

SCHAEFFER A., GAZIN A., D'ALVERNY A., 1930. Sapinières : le jardinage par contenance (Méthode du contrôle par les courbes). Paris : Presses universitaires de France, 100 p.

SCHAEFFER, A., 1927. Futaie jardinée et futaie claire. Bulletin de la Société Forestière de Franche-Comté et des provinces de l'Est, vol. 17, pp. 304-306

SCHÜTZ J.E., von, 1757. Ökonomisches Bedenken von dem Nachteil deren Gehaue in den sogennanten Schwartzen Hölzern. In : « Ökonomische Bedenken über allerhand in die Hauswirtschaft einschlagende Sachen » Vol. 1, Chemnitz: Stössel, pp. 1-18

SCHÜTZ J.P., 1997. Sylviculture 2: La gestion des forêts irrégulières et mélangées. Lausanne : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 173 p.

SMALIAN H.L., 1840. Anleitung zur Untersuchung und Feststellung des Waldzustandes, der Forsteinrichtung des Ertrages und Geldwerthes der Forste so wie zur Forstverwaltung und deren Kontrolle auf den Grund der Fortschätzung. Berlin : Stange et Brandus, 266 p.

Société forestière de Franche-Comté (SFFC), Office national des forêts (ONF), Centre régional de la propriété forestière (CRPF), 2004. Résultats finaux du programme « Développement d'une gestion durable des futaies irrégulières feuillues en Franche-Comté » : instruments d'analyse, de gestion et de suivi du traitement des forêts feuillues en futaie irrégulière. CD-Rom

THOMASIUS H., 1992. Naturgemässe Waldwirtschaft in Sachsen – gestern, heute und in Zukunft. Der Dauerwald, 6. Juni 1992, pp. 4-29

Panorama : les forêts mélangées dans le Nord de la France

C'est par une double approche – l'analyse des données de l'Inventaire forestier national et celle d'une enquête auprès des gestionaires – que les auteurs nous montrent combien le mélange des peuplements, selon les essences et les strates, constitue une caractéristique majeure des forêts du Nord de la France.

La fin du 20e siècle a vu apparaître un regain d'intérêt pour les peuplements forestiers mélangés, mais déjà au siècle dernier de nombreux débats ont eu lieu pour promouvoir la sylviculture de ce type de peuplement (Broilliard, 1881).

De nombreux arguments sont avancés en sa faveur (Becquey, 1997 ; Schütz, 1997) :

- amélioration de la stabilité des peuplements vis-à-vis d'aléas biotiques (pathogènes, ravageurs) ou abiotiques (météores, feux),
- plus grande faculté d'adaptation et de résilience vis-à-vis des perturbations anthropiques (pollutions) ou climatiques,
- amélioration de la diversité des niches écologiques,
- meilleure adaptation aux demandes économiques et sociales (attractivité des paysages créés par le mélange).

Un système biologique diversifié conserverait et posséderait ainsi un maximum de potentialités vis-à-vis des besoins futurs des hommes (ONF, 1993).

Depuis plusieurs années dans les forêts publiques, de nombreux forestiers mettent en œuvre des techniques pour favoriser le mélange des essences en forêt :

- de façon opportuniste : en respectant les essences minoritaires existantes,
- de façon volontariste : en favorisant l'installation du mélange ou en introduisant des essences d'accompagnement adaptées à la station.

Mais ces techniques ont au mieux une portée régionale et restent généralement connues au niveau local. Un premier travail de recensement s'est donc avéré nécessaire.

C'est pourquoi le Gip-Écofor (Groupement d'intérêt public écosystèmes forestiers) a commandé une étude (Bock et Richter, 2001), dans le cadre du programme « forêts hétérogènes », dont l'objectif était :

- d'identifier les principaux types de mélanges existants dans la moitié Nord de la France selon les différents contextes bioclimatiques et stationnels ;
- de rendre compte de pratiques sylvicoles employées à l'ONF, par les gestionnaires, en matière de conduite des peuplements forestiers mélangés.

Dans un premier temps, la notion de mélange a été précisée, puis une synthèse des données fournies par l'IFN (Inventaire forestier national) a été réalisée afin d'évaluer l'importance des mélanges dans la moitié Nord de la France. Enfin, un état des lieux des types de mélanges dans les forêts gérées par l'ONF a été dressé : ces trois éléments seront présentés dans cet article. Le recensement des pratiques sylvicoles employées à l'ONF pour conduire ces peuplements mélangés sera présenté dans un numéro ultérieur des *Rendez-vous techniques*.

Différents points de vue du mélange

Il existe différentes façons d'analyser les peuplements mélangés. Pour l'écologue, la notion de mélange est abordée principalement d'un point de vue fonctionnel. Un mélange est le reflet, à un instant donné, de la dynamique de la végétation, résultat des interactions entre des relations de compétition, le comportement des essences et les conditions du milieu.

Le forestier, quant à lui, a besoin de paramètres descriptifs lui permettant de caractériser le peuplement, afin de prévoir la croissance des arbres et l'évolution du peuplement en fonction des caractéristiques du milieu. L'objectif du forestier est d'établir les orientations de gestion et de préciser les modalités de chaque opération sylvicole en fonction du contexte stationnel, de la structure, de la composition du peuplement et des objectifs poursuivis.

Pour le chercheur, les peuplements réguliers monospécifiques peuvent se décrire assez simplement à l'aide de paramètres déterminés sur une surface d'un hectare : le nombre de tiges, la

surface terrière, la hauteur dominante, le volume et les accroissements correspondants. Les lois de Eichhorn et d'auto-éclaircie ont servi de fondement aux tables de production, puis aux modèles de croissance, qui ont permis de tester et de bâtir différents scénarii de gestion sylvicole. En revanche, dans les peuplements non-réguliers, se pose le problème de décrire correctement le peuplement puisque les lois ne sont plus valides et que les valeurs moyennes ne rendent pas bien compte de cette hétérogénéité.

Comment caractériser un mélange ?

La définition du mélange pour le forestier fait appel à des notions relatives à la composition en espèces et à leur stratification verticale et horizontale. En général, deux strates sont différenciées :

- la strate principale constituée des arbres dominants, co-dominants et dominés,

- la strate subordonnée constituée des arbres du sous-étage (y compris régénération).

Un peuplement mélangé est généralement composé d'au moins deux essences réparties dans une ou plusieurs strates :

- **soit la strate principale est mélangée :** l'importance de l'essence prépondérante doit être inférieure à un certain seuil : moins de 75 % du couvert libre relatif pour l'IFN et, en général, moins de 80 % de la surface terrière totale à l'hectare pour l'ONF ;

- **soit la strate principale est pure et** la strate subordonnée doit alors être majoritairement composée d'une ou plusieurs essences autres que l'essence pure de l'étage principal (exemple : futaie de chêne avec un taillis de charme, futaie irrégulière de sapin avec un sous-étage de hêtre).

La structure spatiale du mélange est caractérisée selon le type de répartition et la surface occupée par les arbres d'une même essence. On distingue généralement :

- les **mélanges intimes** : avec une répartition pied à pied des différentes essences ;

- les **mélanges par bouquets** (= cohortes) : où les différents bouquets sensiblement équiennes, peuvent être purs ou mélangés pied à pied, et occupent chacun une surface de quelques ares à 50 ares (exceptionnellement 1 ha) ;

- les **mélanges par parquets** : où les différents parquets sensiblement équiennes, peuvent être purs ou mélangés, et occupent chacun une surface comprise entre 1 ha et la surface minimale d'une unité de gestion, parcelle ou sous-parcelle.

La répartition spatiale du mélange est une notion susceptible de varier selon le stade de développement du peuplement : ainsi un mélange par bouquets de quelques ares à un stade juvénile peut devenir un mélange intime au stade adulte. **Une définition « statique » du mélange présente donc certaines limites**. Il convient alors d'intégrer un axe dynamique.

Dynamique naturelle et interventions sylvicoles

Selon les interventions du forestier, qui s'appuie plus ou moins sur la dynamique naturelle, les peuplements peuvent être orientés vers des mélanges transitoires ou permanents.

- Les **mélanges « transitoires »** sont, par exemple, des peuplements où on récoltera en premier les essences à croissance rapide (comme le bouleau, en accompagnement dans un peuplement de chênes), ou qui présentent des risques plus élevés d'altération du bois avec l'âge (c'est le cas du merisier, du frêne, qui sont souvent des essences-objectif associées dans les hêtraies).

- Les **mélanges « permanents »** sont des peuplements où les différentes essences participent conjointement à la structure, à la dynamique et à la production du peuplement. C'est le cas, par exemple, des peuplements mélangés de hêtre et sapin, dont la composition est assez stable de la régénération à la récolte. C'est également le cas des peuplements mélangés de chênes et d'alisier torminal, où l'on cherchera à recruter au maximum l'essence minoritaire (ici l'alisier) tout au long de l'évolution du peuplement.

Il existe également des essences dites **« temporaires facultatives »** qui peuvent faire partie aussi bien du mélange transitoire que permanent. Il s'agit d'essences valorisables à un âge assez jeune ou qui peuvent être récoltées plus tardivement sans se déprécier : érable sycomore, épicéa, sapin…

Les termes de gestion forestière pour caractériser les essences en mélange

Les forestiers hiérarchisent souvent les essences en mélange selon différents critères économiques/écologiques, d'où un certain vocabulaire utilisé pour différencier les espèces :

- les **essences-objectif principales** sont les essences majoritairement présentes, bien adaptées à la station, et qui prennent une part importante dans la valorisation économique du peuplement lors de la récolte finale. Ces essences sont appelées à constituer l'essentiel du couvert dominant final. Ce sont elles qui vont permettre aux forestiers de définir les orientations sylvicoles du peuplement.

- Les **essences-objectif associées** sont également des essences bien adaptées à la station et présentes dans l'étage principal, mais qui sont minoritaires au moment où elles sont récoltées. Elles peuvent constituer un relais de production intéressant (cas des récoltes intermédiaires d'essences à croissance rapide) ou apporter une plus value conséquente (cas des feuillus précieux).

- Les **essences d'accompagnement** sont généralement des essences présentes dans le sous-étage, ou qui ne sont pas dans des situations stationnelles optimales, ou qui ne présentent qu'une faible valeur économique. Leur

présence est recherchée en particulier pour un rôle cultural (fonctions d'éducation ou de protection, voir encadré ci-contre).
Les définitions du mélange qui ont été présentées montrent bien les limites d'une description « statique » du mélange. L'appréciation de la richesse d'un mélange est en fait relative au stade d'évolution du peuplement, et les proportions de chaque essence sont souvent amenées à évoluer au cours du temps. Un mélange de chênes-alisier, par exemple, est considéré comme peu diversifié dans les jeunes stades (le nombre de tiges d'alisier est faible par rapport aux chênes). Les interventions du forestier, ciblées sur l'essence minoritaire, peuvent permettre d'augmenter progressivement la proportion d'alisier dans le peuplement final. En revanche, dans le cas du mélange hêtre-frêne-merisier, la diversité est très élevée dans les jeunes stades, mais devient de plus en plus faible au fur et à mesure des récoltes intermédiaires de merisier et de frêne, pouvant même aboutir à une récolte finale composée uniquement de hêtre.

Finalement, la question-clé pour le forestier est de savoir quelles sont la composition et la structure « idéales » du mélange (=mélange-objectif) à viser aux différents stades du peuplement pour satisfaire aux objectifs écologiques et économiques qui évoluent plus vite que les peuplements.

Évaluation de l'importance des forêts mélangées à partir des données de l'IFN

Critères retenus et zone d'étude

Afin d'estimer l'importance des surfaces de forêts mélangées dans la moitié Nord de la France, une analyse des données de la base de l'IFN a été réalisée en prenant en compte les critères suivants :

- pour l'IFN, un peuplement mélangé est un peuplement où l'essence prépondérante représente moins de 75 % du couvert libre relatif (1).

Rôle d'éducation des tiges

À différents stades de développement d'un peuplement, les forestiers utilisent, bien souvent, la présence d'essences d'accompagnement dites « qualifiantes » afin d'éduquer les tiges-objectif, et d'assurer une production de bois de qualité.

Lors de la phase d'installation du peuplement, un accompagnement ligneux, à base de bouleaux ou de frênes par exemple, peut jouer, jusqu'à un certain seuil, le rôle d'abri vertical ou latéral. Ces essences filtrent ainsi la lumière directe du soleil et permettent d'améliorer la forme (branchaison et fourchaison) de certaines espèces comme le hêtre notamment.
Lors de la phase de qualification ou d'élaboration de la grume, la présence, dans l'étage dominé à co-dominant, d'espèces tolérantes à l'ombre facilite l'élagage naturel des branches basses des arbres de l'étage dominant plus exigeantes en lumière. Les billes de pied peuvent alors atteindre des hauteurs sans nœud plus rapidement.

Au cours de la phase de grossissement de la grume, le maintien ou la restauration d'un sous-étage jouant un rôle de gainage des fûts, permet également de limiter le développement de gourmands et de « coups de soleil » sur les troncs des arbres de l'étage principal, en particulier lors de l'ouverture de la canopée consécutive à une coupe.

- Pour les peuplements à deux strates (peuplement de type mélange futaie-taillis) : soit la strate futaie ou taillis est mélangée, soit l'essence prépondérante des deux strates est distincte.

L'étude porte sur les peuplements mélangés de plaine et de montagne situés dans la moitié Nord/Nord-Est de la France : Picardie, Normandie, Centre, Pays-de-Loire (limités au Nord de la Loire), Bourgogne, Lorraine, Franche-Comté, Alsace, Champagne-Ardenne, Nord – Pas-de-Calais, Île-de-France (voir figure 4 page 40.

Des peuplements très diversifiés

L'analyse des données IFN montre globalement que 68 % de la surface boisée de production de la zone Nord sont constitués de peuplements mélangés. Dans les forêts communales, 74 % de la surface boisée de production sont constitués de peuplements mélangés et 66 % de cette surface boisée mélangée correspondent à des peuplements dont la structure forestière est de type « mélange futaie feuillue-taillis » (voir tableau 1 et figure 1).

Propriété	Surface mélangée*	Surface boisée*	% mélangé
domaniale	411 830	770 755	53,4 %
communale	907 763	1 224 920	74,1 %
privée	1 522 623	2 192 157	69,5 %
Total	2 842 216	4 187 832	67,9 %

** Surface boisée de production hors coupes rases (en ha)*

Tab. 1 : surface totale boisée et surface mélangée par propriété

1 On appelle couvert relatif d'une essence, dans une partie du peuplement, le rapport entre la surface occupée par les cimes de cette essence dans cette partie du peuplement, et la surface occupée par les cimes de toutes les essences dans cette même partie du peuplement. On appel couvert libre le couvert ayant accès à la lumière.

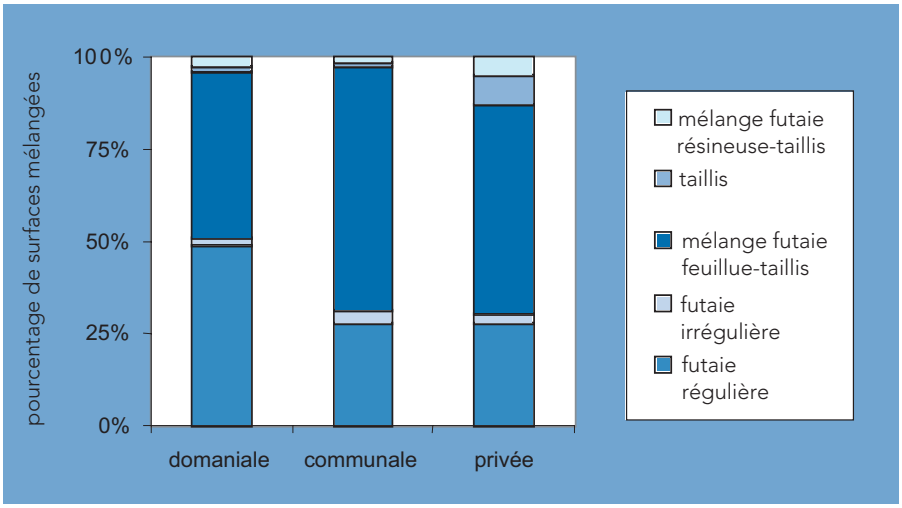


Fig. 1 : répartition des mélanges selon la structure forestière IFN et la propriété forestière

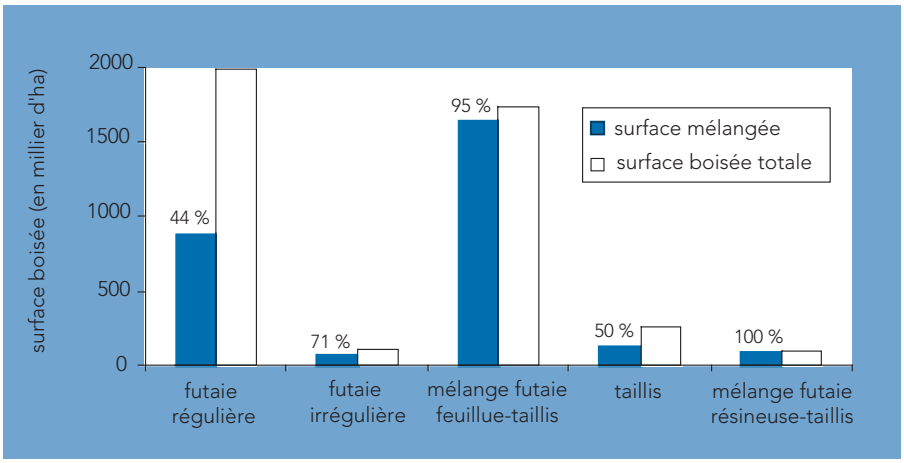


Fig. 2 : répartition des surfaces totales boisées et surfaces mélangées par structure forestière IFN (toutes propriétés confondues)

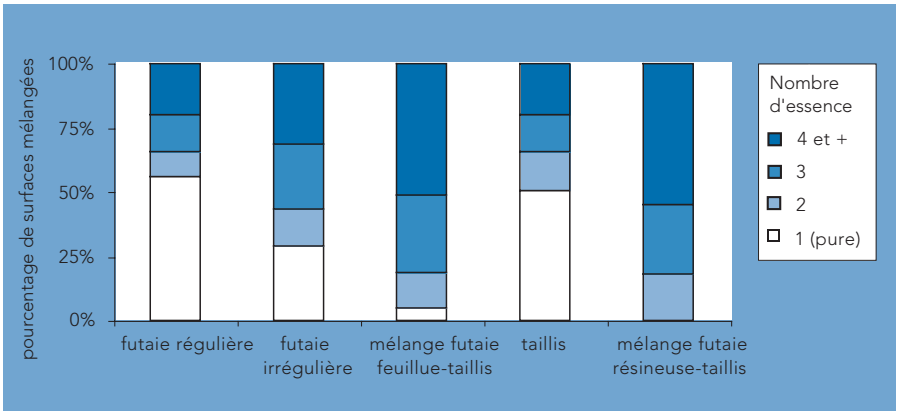


Fig. 3 : répartition des surfaces boisées selon le nombre d'essences sur la placette, en fonction de la structure forestière

Dans les forêts domaniales, malgré un passé sylvicole souvent orienté au profit d'une seule essence-objectif, ce sont 53 % de la surface boisée de production qui sont mélangés et c'est la futaie régulière qui représente la majorité (49 %) des surfaces mélangées.
Au total, **en forêt publique** (domaniale et communale), **66 % de la surface boisée de production sont mélangés.**
Le « **mélange futaie feuillue-taillis** » est la structure forestière présentant **la plus forte proportion de surfaces mélangées** avec 95 % de la surface boisée totale (figure 2). Cette structure est en outre celle dont le **niveau de diversité est le plus élevé** avec 51 % de la surface boisée composés de mélanges d'au moins quatre essences (figure 3).

En futaie irrégulière, les mélanges représentent 71 % de la surface boisée (figure 2) et 31,5 % de cette surface boisée sont composés de mélanges constitués d'au moins quatre essences (figure 3).
Bien que cette structure forestière présente le plus faible taux de surfaces mélangées (44 % - figure 2), **la futaie régulière n'est pas incompatible avec l'obtention de peuplements mélangés, ni avec un niveau de diversité élevé** puisque 20 % de la surface boisée sont composés de mélanges constitués d'au moins 4 essences (figure 3).

À l'échelle départementale, les peuplements forestiers de la moitié Nord de la France sont globalement bien mélangés (figure 4). Le taux de surface boisée mélangée varie de 47 %, dans le Bas-Rhin, à plus de 80 % :

- 89 %, dans le Nord – Pas-de-Calais (département forestier où la surface boisée de production est faible, avec moins de 40 000 ha) ;
- 81 %, dans l'Aube et la Haute-Marne (département forestier où la surface boisée de production est comparable à celle du Bas-Rhin, plus de 100 000 ha).

Les peuplements forestiers du Centre-Ouest et du Nord-Est de la zone étudiée sont globalement les moins mélangés. Cela peut s'expliquer en partie par :

■ l'importance des plantations résineuses réalisées, dans les Vosges et le Jura, à partir de la fin du 19e siècle ;

■ le taux de conversion élevé des peuplements de TSF (plus favorables au mélange d'essence) en futaies régulières plutôt monospécifiques (chênes ou hêtre).

En revanche, le Centre-Est de la zone étudiée correspond à la zone des plateaux calcaires qui apparaît comme une région biogéographique favorable au mélange : plus de 70 % de la surface boisée de production sont constitués de peuplements mélangés. Bien que certaines de ces régions présentent, en forêt domaniale, un taux de conversion élevé (Degron, 1998), elles présentent également une forte proportion de forêts communales ou privées encore gérées en TSF, dans la seconde moitié du 20e siècle (source IFN).

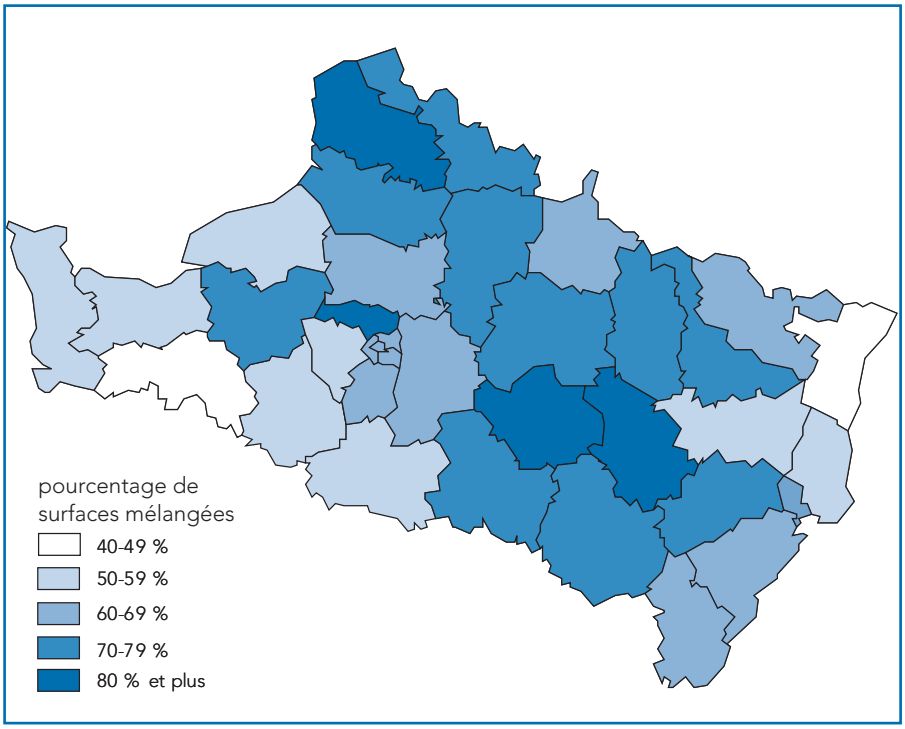


Fig. 4 : répartition par département, des pourcentages de surface mélangée par rapport à la surface totale boisée

Méthodologie : une enquête adressée aux différents services de l'ONF

Un questionnaire simplifié a été envoyé début 2001 aux 99 divisions, 24 services départementaux et 11 directions régionales concernés par la zone d'étude. Il s'agissait de recenser les mélanges typiques de la région concernée et d'identifier les personnes-ressource à contacter, capables de fournir des renseignements sur la conduite de ces mélanges.
Une description sommaire des mélanges a également été demandée selon trois paramètres : composition, structure et stade de développement.
Enfin, pour clarifier la notion de structure et disposer d'un vocabulaire commun, des grands types de structure ont été définis pour les besoins de l'enquête. On a distingué :

■ les **mélanges culturaux** qui sont composés soit :
- d'essences-objectif + d'essences d'accompagnement « qualifiantes » (voir encadré page 38) ;
- d'essences-objectif + d'essences d'accompagnement « améliorantes » (amélioration du fonctionnement biologique du sol, diversification des ressources alimentaires (cas du sorbier ou des fruitiers notamment), amélioration de l'aspect paysager…) ;

■ les mélanges à **une strate** d'essences-objectif :
- d'âge d'exploitabilité identique (ex hêtre/érable sycomore…) ;
- d'âges d'exploitabilité différents (ex chêne/hêtre…) ;

■ les mélanges à **deux strates** (hors futaies jardinées résineuses) :
- TSF ;
- à décalage de générations (ex pin sylvestre/sapin…).

État des lieux des peuplements mélangés gérés par l'ONF

Sur les 99 divisions contactées, début 2001, 75 ont proposé des peuplements mélangés à visiter et des personnes susceptibles de nous renseigner sur la conduite de ces mélanges. Dans les 24 autres divisions, soit les peuplements étaient considérés comme purs (3 divisions), soit le personnel de la division n'était pas disponible principalement en raison de l'organisation de l'exploitation des chablis liés à la tempête de 1999 (6 divisions concernées), soit elles n'ont pas répondu (15 divisions).

En tout, 316 peuplements ont été proposés dont 82 % à base de feuillus. La description de ces peuplements n'a pas été réalisée avec la même précision d'une division à l'autre, aussi l'exploitation de ces réponses repose sur un niveau minimal d'informations.
Les informations sur la composition du mélange proposé peuvent varier d'une description sommaire des deux essences principales en mélange (par exemple chêne-hêtre) à une description plus fine,

issue d'inventaires statistiques ou en plein, du peuplement (par exemple : 45 % de hêtre, 30 % d'érable sycomore, 25 % de frêne). Les résultats de l'enquête sont restitués selon le niveau de précision commun à toutes les réponses, c'est à dire, en synthétisant les informations sous forme de combinaison de deux ou trois essences (ou groupe d'essences) dont les noms sont abrégés (voir figures 5 et 6).

D'après les figures 5 et 6, les peuplements à base de chênes (sessile ou pédonculé), sont les mélanges les plus fréquemment cités : 55 % des propositions. Ce sont les chênaies-charmaies et les hêtraies-chênaies-(charmaies) qui sont les mélanges les plus nombreux dans notre échantillon. Viennent ensuite, les hêtraies mélangées avec des feuillus précieux (tels que les érables, les frênes etc.), les hêtraies-sapinières, les pessières-sapinières et les pinèdes à feuillus divers. Il faut noter également la présence de peuplements alluviaux de type chênaies pédonculées-frênaies ou aulnaies-frênaies-(chênaies pédonculées).

On peut remarquer que ces différents types de mélanges identifiés correspondent à peu près aux grands types d'habitats (codes Corine biotopes indiqués dans les figures 5 et 6).

Les informations sur les types de mélange sont plus difficiles à interpréter car les définitions ont été perçues différemment selon les personnes. Néanmoins, il est possible de faire quelques distinctions :

- les mélanges strictement à une strate représentent 53 % des 316 peuplements proposés ;
- les mélanges correspondant strictement aux TSF représentent 28 % des propositions ;
- le but cultural est recherché dans 42 % des peuplements, et les mélanges strictement à but cultural représentent 14 % des propositions (le plus souvent dans les chênaies-charmaies – rôle d'éducation et de protection – ou dans les pinèdes – rôle d'amélioration du fonctionnement des écosystèmes).

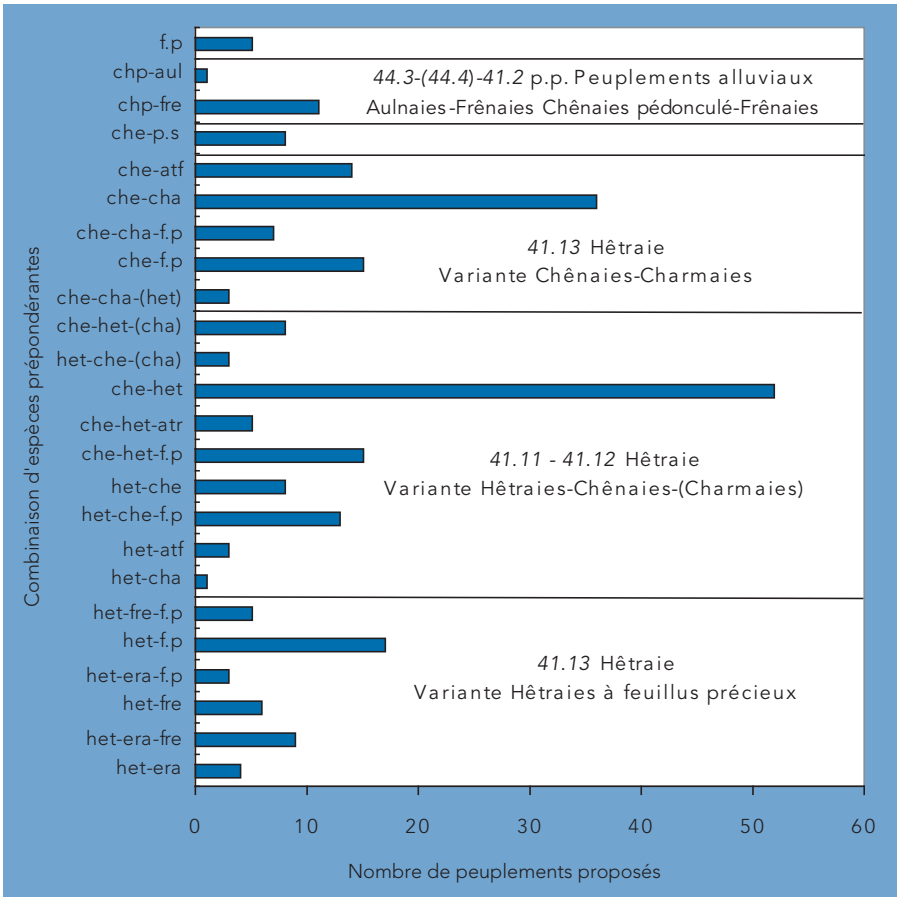


Fig. 5 : présentation des mélanges à base de feuillus (soit 82 % des 316 peuplements proposés)

Signification des abréviations : atf = autres feuillus ; atr = autres résineux aul = aulne ; cha = charme ; che = chênes ; chp = chêne pédonculé ; div = divers = atf + atr ; dou = douglas ; epc = épicés ; era = érables ; f.p = feuillus précieux ; fre = frêne ; het = hêtre ; mel = mélèze ; mer = merisier ; p.s = pin sylvestre ; s.n = sapin normann ; s.p = sapin pectiné.
Les grands types d'habitats auxquels correspondent les mélanges et le code Corine biotopes (en italique) sont précisés dans le tableau.

Conclusion

Ce panorama montre que les surfaces forestières de la moitié Nord de la France sont globalement très mélangées en essences, et que la problématique du mélange est un sujet de préoccupation majeur à l'ONF.
L'analyse des données de l'IFN montre qu'il existe des variations entre les régions qui s'expliquent notamment par des contextes biogéographiques plus favorables (Plateaux calcaires) et, historiquement, par des évolutions sylvicoles contrastées (conversion des taillis-sous-futaie en futaies régulières plutôt monospécifiques). Il faut préciser que la structure régulière n'est pas incompatible avec le mélange des essences, ni avec un niveau de diversité élevé, et que la diversité, présente notamment dans le sous-étage, n'est pas prise en compte actuellement dans la base de données de l'IFN. La nouvelle méthode IFN de notification d'abondance des espèces par strates permettra certainement à l'avenir de mieux appréhender le niveau de diversité des peuplements forestiers français.

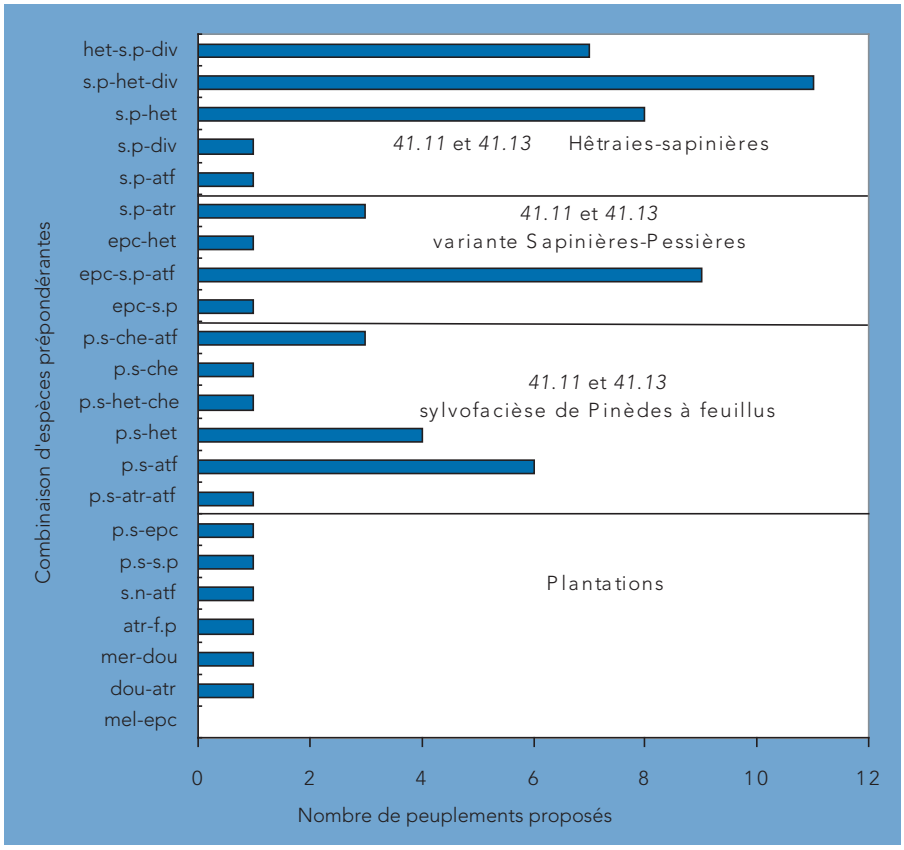


Fig. 6 : présentation des mélanges à base de résineux qui représentent 18 % des 316 peuplements proposés. Les grands types d'habitats auxquels correspondent les mélanges et le code Corine biotopes (en italique) sont précisés dans le tableau

Par ailleurs, l'analyse des questionnaires a montré que plus des trois-quarts des divisions de la zone d'étude sont concernés par la gestion des mélanges. Ce sont les mélanges à base de chênes (pédonculé et sessile) qui représentent la majorité des peuplements mélangés. Malgré la coexistence d'essences ayant des âges d'exploitabilité dits « incompatibles », le mélange chêne-hêtre-(charme) est celui qui est le plus souvent cité par les gestionnaires. Parmi les autres peuplements feuillus, les mélanges à base de hêtre et de feuillus précieux sont également bien représentés. Bien qu'étant moins fréquemment cités, les mélanges correspondants aux « forêts humides » (de type aulnaie-frênaie ou chênaie pédonculée) ont aussi retenu notre attention car le niveau de diversité y est généralement très élevé. Dans les mélanges résineux-feuillus, les peuplements à base de pin sylvestre, de sapin ou d'épicéa sont assez bien représentés.

Le bilan des principes communs de gestion de ces différents mélanges, ainsi que l'état des lieux des connaissances et des questions qui se posent par rapport à l'utilisation de ces techniques feront l'objet d'un prochain article dans cette revue.

Jérôme BOCK
Claudine RICHTER
ONF, direction territoriale Lorraine
service patrimonial
jerome.bock@onf.fr
claudine.richter@onf.fr

Alain FRANC
Inra, département Écologie des forêts,
prairies et milieux aquatiques
Pierroton (33)
alain.franc@pierroton.inra.fr

Remerciements

à la Derf et au Gip-Écofor qui ont financé ce projet, à l'IFN pour les données relatives aux mélanges, ainsi qu'aux relecteurs pour leurs critiques constructives.

Bibliographie

BECQUEY J., 1997. Mélanges et accompagnement. Forêt-entreprises n°118 : p. 28

BOCK J. , RICHTER C., 2002. Gestion des peuplements mélangés dans le Nord de la France : principaux types de mélange rencontrés et présentation des techniques sylvicoles utilisées pour leur conduite. Convention Gip-Écofor n° 2000-03. 316 p.

BROILLIARD C., 1881. Le traitement des bois en France à l'usage des particuliers. Berger & Levrault, Nancy, 470 p.

DEGRON R., 1998. La conversion des forêts domaniales feuillues françaises (1860-1888) : une grande vague brisée. RFF vol. L, n°1 : pp 71-84

ONF, 1993. Prise en compte de la diversité biologique dans l'aménagement et la gestion forestière. Instruction. Direction Générale - Paris.

SCHÜTZ J-P., 1997. Sylviculture 2. La gestion des forêts irrégulières et mélangées. Presses polytechniques et universitaire romandes, Lausanne. 178 p.

Est-on en mesure aujourd'hui de prévoir la qualité du bois dans les peuplements hétérogènes ?

Depuis quelques années, et en rupture avec un fonds culturel antérieur largement défendu par les forestiers, nous avons le sentiment que les peuplements hétérogènes se voient parés, par rapport aux peuplements réguliers, de bien des mérites, pour ne pas écrire d'une supériorité absolue sur tous les critères envisagés (production, aspects paysagers, biodiversité, résistance aux tempêtes, durabilité par rapport au changement climatique…). Le critère « qualité des bois produits » n'échappe pas à cette liste.

Nous ne sommes pas suffisamment familiers des critères autres que celui de la qualité du bois pour formuler, quant aux avantages respectifs des systèmes régulier et hétérogène, un avis qui puisse être définitif faute de disposer de comparaisons réalisées à l'aide d'échantillonnages mesurés ou simulés *ad hoc*. Nous nous limiterons ici à aborder le cas du critère « qualité du bois ».

En une première partie, nous dresserons la liste des caractéristiques des arbres d'un peuplement donné (ce que nous appellerons « les prérequis ») dont il est nécessaire de disposer afin d'évaluer de façon objective la qualité des bois de ce peuplement. C'est dans cette première partie que ce que nous entendons par « qualité du bois » sera défini, en soulignant d'ores et déjà que l'acception de ce terme varie quelque peu suivant les utilisations auxquelles ce matériau est destiné. Une seconde partie sera consacrée à passer en revue ce que l'on sait à ce jour de ces caractéristiques en peuplements hétérogènes. En une troisième et dernière partie, nous suggérerons des pistes de recherche qu'il nous semble utile d'explorer pour avancer dans l'évaluation de la qualité du bois en peuplements hétérogènes, en particulier mais pas nécessairement, en comparaison avec un système sylvicole régulier.

Les prérequis nécessaires à la prévision de la qualité du bois produit dans un peuplement

Quels paramètres ?

Afin d'être en mesure de caractériser la qualité des grumes et, ultérieurement, des pièces débitées (sciages, placages) obtenues à partir d'un peuplement donné, il convient de connaître, au moment de l'abattage et pour chacun des arbres le constituant, un certain nombre d'attributs. Parmi les plus importants d'entre eux, mentionnons :

- les profils de largeur de cerne, de la moelle à l'écorce, à tous les niveaux de hauteur de la tige (ce qui donnera en particulier le défilement de celle-ci) ;
- l'épaisseur de l'écorce de bas en haut de la tige ;
- la largeur, de bas en haut de la tige, du duramen « normal », ou de cœurs colorés « anormaux » (cœur gris du peuplier, cœur noir du frêne, cœur rouge du hêtre…) ;
- la largeur, de bas en haut de la tige, de la zone avec nœud (cœur « branchu ») ; à l'intérieur de cette zone, il conviendra d'être en mesure de distinguer la zone présentant des branches mortes (nœuds non adhérents), et celle présentant des branches vivantes (nœuds adhérents), voire les caractéristiques des branches incluses dans la tige (angle, diamètre, état sanitaire), ces branches pouvant être des branches « normales » et, dans le cas de certaines espèces, des branches gourmandes ;
- les « cartes », de la moelle à l'écorce et de bas en haut de la tige, de propriétés de base du bois telles que sa densité (aux niveaux « moyenne de cerne » ou « intracerne »), ses coefficients de retrait, ses propriétés mécaniques, son angle du fil, son taux d'humidité, ses déformations résiduelles longitudinales de maturation (DRLM), la longueur de ses fibres, son taux d'extractibles, ses caractéristiques colorimétriques (luminance et teinte), sa durabilité naturelle ;
- les « cartes », de la moelle à l'écorce et de bas en haut de la tige, de singularités anatomiques du bois comme les bois de réaction et de fentes internes (roulures, cadranures, gélivures).

L'ensemble de ces attributs étant connu, il est ou il sera possible à moyen terme de prévoir, avec une assez bonne précision, la distribution, dans des classes de qualité définies par des normes existantes ou à venir, des bois ronds ou des bois débités résultant de la transformation des arbres du peuplement et, ceci, en étant aussi capable de simuler les conséquences de stratégies contrastées de transformation de ces arbres.

Il n'est évidemment pas possible de mesurer, sur chaque arbre de tous les types de peuplements envisageables, l'ensemble des attributs mentionnés ci-dessus (et encore nous sommes-nous limité, parmi ceux qui sont déjà identifiés, aux plus importants). Ceci ne serait d'ailleurs pas utile car plusieurs de ces attributs ne sont pas déterminants pour certains usages finaux du bois.

L'étape incontournable des modèles de prévision

Pour rendre réaliste une telle démarche d'évaluation de la qualité en liaison avec le régime sylvicole, quelques chercheurs forestiers travaillent depuis une quinzaine d'années à la mise en place de modèles (Revue forestière française, 1995). Pour simplifier et pour nous limiter au cas qui nous occupe ici, ces modèles sont établis à partir d'indispensables et nombreuses mesures de terrain et de laboratoire et permettent, connaissant le scénario sylvicole et la fertilité du site sur lequel ce scénario est appliqué, de simuler l'intérieur des arbres du peuplement pour un certain nombre des attributs mentionnés ci-dessus et, partant, d'estimer la qualité des produits que l'on peut en espérer.

Par référence à ce qui précède, les modèles nécessaires à la simulation de l'intérieur de chaque arbre peuvent être classés en deux grands groupes :

- groupe I : des modèles de croissance qui vont permettre d'accéder aux empilements de cerne, aux caractéristiques des branches incluses, à l'épaisseur d'écorce et à la largeur d'aubier ;
- groupe II : des modèles de propriétés de base du bois.

Ces modèles du groupe II sont des ajustements statistiques obtenus à partir de mesures de la ou des propriété(s) considérée(s) réalisées sur un grand nombre d'éprouvettes (en général et pour fixer les idées, un total de plusieurs milliers) prélevées sur plusieurs dizaines d'individus (de l'ordre de la centaine). Lors de ces prélèvements, on relève soigneusement pour chaque éprouvette son arbre d'appartenance et, dans celui-ci, des descripteurs permettant de situer l'éprouvette dans l'empilement des cernes de l'arbre, empilement obtenu grâce aux modèles du Groupe I. Il s'agit en général de la hauteur de l'éprouvette dans l'arbre (il est souvent plus pertinent de noter le n° de son unité de croissance (UC)), du n° du cerne compté depuis la moelle au niveau de hauteur considéré (âge/moelle) et de la largeur moyenne de cerne dans l'éprouvette (LC). Connaissant, pour chaque éprouvette, ces trois descripteurs et la (ou les) propriétés du bois P considérée(s), il est possible de rechercher un ajustement statistique donnant P en fonction de UC, de âge/moelle et de LC. Un effet « arbre » est également déclaré dans ce modèle sous forme d'une variable aléatoire. Cet effet rend compte du fait que, à UC, Age/Moelle et LC fixés, deux arbres peuvent présenter des valeurs de P extrêmement différentes, quand bien même ils appartiennent au même peuplement. Nous appelons « effet intrinsèque de l'arbre », cet effet « arbre » qui se manifeste donc à vitesses de croissance en hauteur et en grosseur fixées. Il est très probablement sous contrôle génétique intraprovenance (pour plus de détails à ce propos, voir Guilley (2000) ainsi que Le Moguédec et Nepveu (2004)).

Dès lors que sont identifiés les modèles du groupe I et les modèles du groupe II, P = f (UC, âge/moelle, LC) correspondant aux propriétés de base du matériau qui sont reconnues importantes pour la « qualité » perçue par le transformateur et/ou l'utilisateur final du bois, on comprend sans trop de peine qu'il est possible, connaissant le scénario sylvicole envisagé sur une

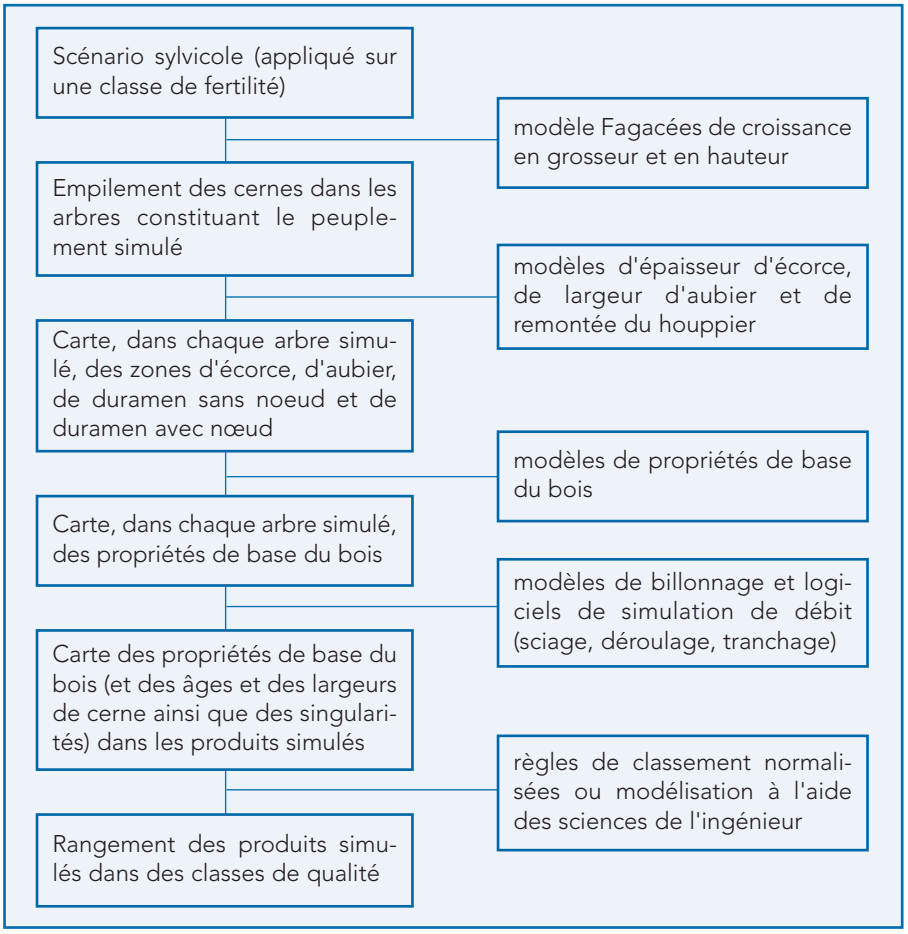


Schéma de prévision moderne de la qualité du bois à partir du scénario sylvicole. Cas du simulateur de croissance Fagacées (modèle de croissance d'arbre indépendant des distances) et des modèles de propriétés de base du bois établis au Lerfob pour le Chêne sessile.

Si nous avons des espoirs raisonnés que les modèles de propriétés de base du bois ne soient pas affectés par le type de scénario (régulier versus hétérogène ; voir encadré, mais la vérification doit être faite !), tout ou presque reste à faire pour être en mesure de simuler la croissance des arbres en peuplement hétérogène… car la connaissance de cette croissance est indispensable, en sus des modèles de propriétés de base du bois, pour prévoir la « qualité du bois »

classe de fertilité donnée, de prévoir la carte de la ou des propriétés P dans tous les arbres du peuplement dont la croissance et la branchaison auront été simulées (pour une illustration « grand public » de cette démarche, consulter l'article Nepveu (2001) ; pour une illustration détaillée, consulter Le Moguédec et Nepveu (2004)).

Où en sommes-nous de la connaissance de ces deux prérequis (modèles de croissance/branchaison et modèles de propriétés de base du bois) indispensables pour parler « qualité » en peuplements hétérogènes ? C'est ce que nous allons voir dans ce qui suit.

De très rares prérequis disponibles en peuplements hétérogènes pour prévoir la qualité des bois produits

Pour diverses raisons, la principale étant l'existence de peuplements suivis parfois depuis longtemps et qui ont rendu possible la mise en place de modèles *ad hoc* (ce qui n'est pas le cas des peuplements hétérogènes), la modélisation de la croissance et de la branchaison ainsi que la modélisation des propriétés de base du bois est relativement avancée pour quelques essences significatives traitées en peuplements réguliers. Le travail de Bucket *et al.* (2005) relatif au chêne sessile est un bon exemple de ce que l'on peut réaliser en assemblant ces deux groupes de modèles pour simuler la qualité des bois produits (et ses conséquences environnementales et économiques) dans des cas sylvicoles assez tranchés.

En peuplements hétérogènes, ces deux ensembles de modèles, dont nous venons de voir que leur enchaînement était indispensable à une évaluation sérieuse de la qualité des bois produits, sont pratiquement inexistants. En outre, quand ils existent, les modèles du « Groupe I » sont très loin de fournir des sorties utiles à un

Possibilité d'utiliser en peuplement hétérogène (ici TSF vieilli) le modèle de densité du bois mis au point pour le chêne sessile en futaie régulière

Dans le cadre de sa thèse soutenue au Lerfob en 2000, Édith Guilley a montré que, pour le chêne sessile, il était possible d'utiliser en peuplement hétérogène le modèle de densité moyenne de cerne élaboré en peuplement régulier.

L'échantillonnage venant en appui de ce résultat portait sur un total de 82 arbres abattus dans un total de 56 parcelles réparties dans cinq régions de France (Alsace, Lorraine, Allier, Loir-et-Cher, Orne-Sarthe). Dans chaque région, on s'était efforcé de trouver trois types de station (bonne, moyenne, mauvaise) et deux régimes sylvicoles (futaie régulière et TSF vieilli).

Nous disposions de 47 arbres de futaie et de 35 arbres de TSF dont les caractéristiques moyennes sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Moyennes établies par échantillon de	47 arbres de futaie	35 arbres de TSF vielli
hauteur totale	32 m	23 m
hauteur de base du houppier	17 m	9 m
âge	162 ans	141 ans
circonférence sur écorce à 1,30 m	180 cm	216 cm
largeur de cerne	1,65 mm	2,34 mm

La densité moyenne de cerne à 1,30 m hors aubier avait été mesurée par microdensitométrie sur un total de 10 427 cernes.

La forme du modèle donnant la densité moyenne de cerne D (partie fixe du modèle) était la suivante :

$$D = a + b \times \text{âge/moelle} + c/LC$$

où âge/moelle est le n° du cerne compté depuis la moelle et LC est la largeur de cerne.

79 % de la variation de la densité du bois étaient expliqués par les effets contrôlés dont 48 % pour les effets « âge/moelle » et « LC », et 29 % pour les effets « arbre intraparcelle ». Pris tous ensemble, les autres effets, c'est-à-dire les effets « sylviculture », « région », « type de station » et leurs interactions entre eux et avec les effets « âge/moelle » et « LC », ne comptaient que pour 2 % dans l'explication de la variation de la densité du bois.

Pour en savoir plus, consulter Guilley (2000) et Guilley *et al.* (2004).



S. Autissier, ONF



S. Autissier, ONF

Chêne sessile typique de futaie régulière (à gauche) et chêne sessile typique de taillis-sous-futaie (à droite)

Les travaux menés par le Lerfob avec le soutien de l'ONF ont montré que les modèles donnant certaines propriétés de base du bois importantes pour son utilisation n'étaient pas affectés par les dynamiques de croissance en grosseur et en hauteur pourtant très différentes entre ces deux systèmes sylvicoles

enchaînement pourtant indispensable – dans le cas qui nous occupe – avec ceux du « Groupe II ».

Quant au cas des modèles de propriétés de base du bois, nous n'avons connaissance que d'un seul cas (étudié dans notre Lerfob) où l'on se soit intéressé à la question de la stabilité/instabilité des modèles de propriétés du bois en cas de passage d'un système sylvicole régulier à un système irrégulier.
Pour le moment, nous n'avons pu traiter vraiment « proprement » (c'est-à-dire avec des méthodes statistiques éprouvées) que le cas du modèle de densité du bois chez le chêne sessile. Dans ce cas, nous avons conclu que l'effet sylvicole (dans le cas précis, comparaison entre le modèle de densité du bois à 1,30 m en futaie régulière et en taillis-sous-futaie vieilli) n'était pas significatif, en d'autres termes que l'on pouvait utiliser en système hétérogène le modèle de densité du bois établi en futaie régulière. À noter que les résultats que nous avons obtenus sur le même échantillonnage d'arbres, avec toutefois une méthode d'analyse moins « propre », nous inclinent à penser que cette stabilité du modèle quand on change de sylviculture (futaie régulière ➔TSF vieilli) est aussi vérifiée chez cette essence pour l'angle du fil, la distribution intracerne de la densité du bois, les caractéristiques des gros rayons ligneux, les coefficients de retrait et la luminance du bois (Nepveu et Dhôte, 1998) (voir encadré page 45 pour plus de détails).

On se reportera avec intérêt à Pérot (2004) pour avoir un panorama complet des modèles de croissance / branchaison et de propriétés du bois (et des simulateurs les assemblant) actuellement disponibles en France pour les futaies régulières et les systèmes hétérogènes, ainsi qu'au site du groupe CAQ des modélisateurs francophones « Croissance-Qualité » pour se tenir informé de l'avancée en Frrance du « front de la Science » (sic) sur ce point. (www.inra.fr/efpa/internet/caq.htm).

Des pistes de recherche pour avancer dans la prévision de la qualité des bois produits en peuplement hétérogène.
Nous venons de voir que, afin d'être en mesure de prévoir la qualité du bois issu de n'importe quel scénario sylvicole, il faut disposer :

- de modèles de croissance/branchaison (+ épaisseur d'écorce et, s'il y a lieu, de largeur d'aubier) relevant de ce contexte forestier et

- de modèles de variation intra-arbre pour les propriétés du bois significatives du point de vue de la qualité du bois considérée.

Sans ces deux composantes, il est absolument impossible de réaliser des comparaisons objectives et réalistes de systèmes sylvicoles portant sur la qualité du bois non plus que sur d'autres aspects plus ou moins liés à celle-ci (production, stockage de carbone en forêt et dans les produits, consommation d'énergie fossile lors des process, emploi en forêt et dans l'industrie… ; cf. Bucket *et al.* (2005)).
Pour la composante « modèles de croissance/branchaison », pratiquement tout reste à faire pour les peuplements hétérogènes. On peut considérer qu'il s'agit d'un travail immense et qui peut rebuter à moins que l'on ne soit suffisamment astucieux (et chanceux !) pour qu'il s'avère possible, en tirant parti de l'expérience relativement solide acquise en France sur quelques essences en système régulier, de ne pas être obligé de repartir de zéro pour aborder le cas de la croissance et de la branchaison en système hétérogène.

Pour ce qui est de la composante « modèles de propriétés de base du bois », les recherches que nous préconisons concernent l'évaluation de l'effet du système sylvicole (peuplements réguliers *versus* peuplements hétérogènes) sur les modèles de variation intra-arbre (et interarbre) de ces propriétés. Ceci, afin de savoir si nous sommes en droit ou non d'utiliser en peuplement hétérogène le modèle établi (ou restant encore à établir) en peuplement régulier. Il s'agit d'un travail non négligeable qui mériterait d'être engagé en priorité sur des essences à forte signification économique et pour lesquelles la question du passage à un système hétérogène ou du maintien d'un tel système hétérogène est vraiment prégnante et pour des propriétés de base très significatives pour la transformation et/ou l'utilisation des bois (telles que la densité et l'angle du fil du bois) tout en étant point trop difficiles à mesurer sur les très larges échantillonnages toujours nécessaires en pareil cas.
Les résultats que nous avons déjà obtenus à ce sujet sur le chêne sessile (voir encadré) grâce au concours de l'ONF constituent un encouragement dans cette voie.

Gérard NEPVEU
Équipe Qualité des bois du Lerfob
Inra, Champenoux (54)
nepveu@nancy.inra.fr

Remerciements

Les recherches mentionnées en appui de ce texte, en particulier celles conduites par Édith Guilley au cours de sa thèse (voir encadré p. 45), ont été soutenues financièrement par la convention ONF-Inra 1992-1996 « Sylviculture et qualité du bois de chêne (Chêne rouvre) » et par le projet de l'Union européenne 1996-1999 « Oakkey » coordonné par Francis Colin (Lerfob).

Bibliographie

BUCKET E., LE MOGUÉDEC G., MOTHE F., NEPVEU G., 2005. Une modélisation des bilans « environnement » et « produits » de sylvicultures contrastées. Partie 1 : cas du Chêne sessile. À paraître dans le n° 3 de la Revue forestière française

GUILLEY E., 2000. La densité du bois de Chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.) : élaboration d'un modèle pour l'analyse des variabilités intra- et inter-arbre. Origine et évaluation non destructive de l'effet « arbre ». Interprétation anatomique du modèle proposé. Thèse de Docteur de l'Engref, Spécialité : Sciences forestières et sciences du bois, soutenue le 14 avril 2000. Document Lerfob, 214 p.

GUILLEY E., HERVÉ J.C., NEPVEU G., 2004. The influence of site quality, silviculture and region on wood density mixed model in *Quercus petraea* Liebl. Forest Ecology and Management 189, 111-121

LE MOGUÉDEC G., NEPVEU G., 2004. Using a chain of models to simulate the distribution between quality clusters of a set of boards coming from a sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) resource. Validation of the simulations. Wood Science and Technology, 38 (6), 451-463

NEPVEU G., 2001. « Du plant à la planche » ou Comment prévoir pour l'industrie la qualité du bois de la ressource forestière. Forêt-Entreprise, 138 (2), 60-63

NEPVEU G., DHÔTE J.F., 1998. Rapport final de la Convention ONF-Inra 1992-1996 « Sylviculture et qualité du bois de chêne (Chêne rouvre) ». Document LERFoB, 71 p.

PÉROT T., 2004. Bilan et perspectives sur les modèles de croissance, de dynamique forestière et de qualité des bois. Rapport final de la Convention DGFAR/Cemagref n°61-45-80-38/02. Document Cemagref, 190 p.

REVUE FORESTIÈRE FRANÇAISE, 1995. Modélisation de la croissance des arbres forestiers et de la qualité de leur bois. Revue forestière française, XLVII, n° spécial, 1-203

Principes majeurs de gestion des peuplements irréguliers. L'expérience de la Franche-Comté

Grands principes de la gestion de peuplements irréguliers

Préambule
L'opportunité du choix de tel ou tel traitement n'est pas discutée ici, l'exemple de la Franche-Comté est simplement détaillé dans l'encadré ci-contre. Concernant les traitements irréguliers, le parti pris en Franche-Comté depuis le début des années 1980 a été, tant en résineux qu'en feuillus, de donner la priorité aux traitements pied à pied jardinés ou irréguliers sans suivi en surface. Les traitements irréguliers avec suivi en surface (bouquets, parquets, bouquets et parquets) sont à rattacher au monde de la futaie régulière, de fait non traité ici tout comme les mélanges équiennes d'essences compatibles[1]. Les acquis sur ces expériences de traitement régulier par petite surface montrent en effet toute la difficulté et la lourdeur de tels suivis ne permettant ni de tirer partie des économies d'échelle et de la rationalisation de la futaie régulière (mécanisation, calibrage des produits, simplicité de programmation, de suivi et de contrôle), ni de tirer avantage des structures irrégularisées (utilisation des dynamiques naturelles ou automation biologiques dans le jeune âge, dosage de la lumière et limitation des effets de bordure, simplicité de présentation des aménagements).

L'objectif des sylvicultures irrégulières est de produire des arbres de récolte de qualité dans un système de renouvellement continu des peuplements. L'optimisation de la valeur de chaque arbre est recherchée. On vise, en régime continu, à prélever le seul intérêt d'un capital sur pied réduit. Enfin, le niveau d'intrants en travaux, s'il est nécessaire, doit cependant être régulier et minimisé.

La parcelle comme unité de gestion tant pour les coupes que les travaux
La parcelle est toujours l'unité de gestion pour les coupes et les travaux, qu'elle contienne un ou plusieurs types de peuplement. En revanche (voir page 52 Suivi et contrôle en futaie irrégulière feuillue), l'unité de contrôle peut être soit la parcelle (cas général en traitement en futaie jardinée pied à pied), soit la forêt, série ou groupe (cas général en traitement en futaie irrégulière pied à pied).

L'acte central de gestion : la coupe jardinatoire
La coupe jardinatoire allie toutes les opérations sylvicoles sur l'unité de gestion en tant que de besoin : récolte (et par conséquent renouvellement), amélioration, éducation et aspects sanitaires. On préconise en résineux comme en feuillus des rotations plutôt courtes (8 à 12 ans). Cependant, dans des conditions d'exploitation très difficiles ou de fertilité très faible, il est souvent réaliste de passer tous les 15 ans ou plus, et de s'orienter vers une gestion plus extensive offrant des volumes récoltables compatibles avec le coût de gestion et d'exploitation, et ce d'autant plus que la qualité des produits est médiocre.

Le martelage en futaie irrégulière, en feuillus comme en résineux, obéit à un double déterminisme :

■ **l'atteinte d'un capital recherché et l'édiction de consignes générales.**
Le plus souvent par référence à une typologie de peuplement ou plus simplement à un niveau de capital sur pied, il est prudent de procéder à un diagnostic du peuplement de l'unité de gestion :

- soit à l'occasion de la révision de l'aménagement ou plan de gestion ;
- soit préalablement au martelage par diagnostic sylvicole statistique ou inventaire en plein.

Ce diagnostic n'oubliera pas les aspects qualitatifs, en particulier des petits bois et des perches dans le feuillu.
Les praticiens s'accordent pour souligner que **ni la structure, ni la recherche de la régénération** ne sont des buts en soi lors des martelages. On vise plutôt à mettre le peuplement dans un état de capital tel qu'une croissance optimum des futaies de qualité et qu'un renouvellement continu soient possibles sans investissement en argent lourd. On fixe habituellement les fourchettes suivantes de surface terrière de la futaie (Ø≥17,5 cm)(après coupe, toutes essences) :
- 18 à 20 m^2 en hêtre dominant,
- 13 à 15 m^2 en chêne dominant,
- 20 à 28 m^2 en résineux des contextes les moins fertiles aux plus fertiles.

Cet objectif en soi nécessite souvent 1) une phase de décapitalisation en phase de conversion (en un ou plusieurs passages) et 2) un prélèvement de la production en régime continu. Une stratégie de décapitalisation, quand elle est nécessaire, intègre la contrainte de ne pas prélever en un passage plus de 25 % du capital sur pied ou 8 à 10 m^2 /ha de surface terrière.

Le prélèvement présumé peut soit être estimé en se fixant un taux de prélèvement de la production, taux ajusté au type de peuplement, soit en utilisant la méthode des surfaces terrières objectif

1 distinction validée par la NS 05 D 274 sur les suivis surfaciques

Principaux cas de recours au traitement irrégulier : exemple de l'agence Nord Franche-Comté

Aux confins du Jura et des Vosges, en présence d'agglomérations importantes, les contextes sylvicoles rencontrés dans l'agence Nord Franche-Comté illustrent la plupart des cas de figure observés dans la région Franche-Comté, à l'exception du jardinage traditionnel sur le deuxième plateau du Jura et Haut-Jura.

Le programme Life futaie irrégulière a par ailleurs fourni un guide d'aide au choix des traitements irréguliers feuillus.

Chaque fois que le relief ou la configuration des unités de gestion interdisent une mécanisation des interventions sylvicoles au stade régénération, on s'interdit de recourir au traitement régulier, ces opérations coûteuses ne pouvant être optimisées.

Le recours à un traitement irrégulier se fait à l'échelle de la forêt, mais beaucoup plus souvent à l'échelle d'une partie de forêt, plusieurs traitements cohabitant sur la même forêt en fonction des besoins et contraintes.

Cinq grands enjeux dominants recouvrent les principaux cas de recours aux traitements irréguliers :

■ **Enjeux environnementaux**
Forêts ou parties de forêts à rôle de protection dominant :
- risques d'éboulement (FC de St Suzanne)
- ressource en eau (Forêt des sources Communauté agglomération de Belfort)

Forêts ou parties de forêts avec espèces aux enjeux écologiques spécifiques
- espèce aux besoins spécifiques (FD St Antoine)

■ **Enjeux stationnels**
Forêts ou parties de forêts sur mosaïques stationnelles (voir Haut-Jura)

Forêts ou parties de forêts sur sols ne permettant qu'une faible prospection racinaire
- sols squelettiques sur calcaires (FC de Noroy-le-Bourg)
- sols à très forte contrainte d'hydromorphie (FC d'Ailloncourt)

■ **Enjeux sociaux et humains**
Forêts ou parties de forêts au rôle d'accueil du public prépondérant (périurbain)
- nombreux cas autour de Belfort et Montbéliard : FC de Grand Charmont, Vétrigne…

Forêts ou parties de forêts à forte sensibilité paysagère externe et interne
- cas très identifié sur les buttes calcaires ou massifs cristallins dominant Belfort et Montbéliard (FC de Bavans, FC de Belfort)

Forêts ou parties de forêts à vocation de protection de sites
- sites classés ou inscrits (FD du Ballon d'Alsace, FC de Rechésy)

■ **Enjeux sylvicoles**
Forêts uniformément vieillies, ne permettant pas de choisir a priori des secteurs à régénérer sans sacrifier d'autres secteurs présentant la même configuration
- Gros et très gros bois partout dominants (FC St Sulppice)

Forêts aux peuplements issus de TSF encore très fortement irrégularisés présentant de la qualité dans toutes les catégories de diamètre
- ex FC de Grandvillars

■ **Enjeux économiques**
Forêts ou parties de forêts de pentes
- pentes du Doubs (FC Montjoie le Château, SIGF de Pont-de-Roide)
- massif vosgien (FC de Lepuix-Gy)

Forêts de très petite taille (moins de 50 ha)
- FC de Grosne

(à l'échelle de la coupe ou de l'aménagement) :

$$GPR = Sx(gi-gf) + axSxR$$

Avec :
GPR : prélèvement présumé réalisable en surface terrière (m^2)
S : surface de la parcelle (ha)
gi : surface terrière initiale (m^2/ha)
gf : surface terrière finale (m^2/ha)
a : production (m^2/ha/an)
R : rotation (années)

Cela nécessite donc une bonne connaissance et une actualisation permanente de la production, en fonction des types de peuplement.

La coupe jardinatoire est donc par principe de forte intensité, notamment en conversion en futaie irrégulière, fondamentalement différente d'une amélioration généralisée qui tolère une certaine augmentation de capital avant la phase de récolte/régénération.

La structure (en diamètre) est peu influencée par l'effet immédiat du martelage mais constitue une conséquence d'une stratégie de gestion sur le long terme et de la dynamique naturelle des peuplements (Bedel 2003, Stir-Est 2000).

■ **l'optimisation de la valeur ou fonction de chaque arbre au travers du « coup de marteau ».**
Si les consignes générales de prélèvement définissent un cadre au martelage, le « coup de marteau » est déterminé d'une part à l'échelle du type de peuplement rencontré au sein d'une même unité de gestion, et d'autre part à l'échelle de chaque arbre dans son environnement immédiat, et toujours guidé par des critères qualitatifs.


Ch. Allégrini

Ainsi les critères d'exploitabilité s'appliquent à chaque arbre selon sa qualité et non pas à une moyenne : un chêne de qualité A peut par exemple être conservé au-delà de 70 cm de diamètre si son état sanitaire le permet.

L'enlèvement d'un arbre peut répondre aux quatre motifs suivants :

- sanitaire : en début de conversion, il est souvent nécessaire de faire un véritable toilettage de la parcelle, afin d'éliminer tous les sujets tarés, sénescents, ou de qualité médiocre. Par la suite, l'intervention en sanitaire relève de l'intervention normale.

- Récolte : l'objectif étant de produire du bois d'œuvre, la récolte des bois mûrs au maximum de leur valeur économique est l'objectif premier.

- Amélioration : l'objectif étant de produire du bois d'œuvre de qualité, et des peuplements diversifiés, l'amélioration consiste à repérer les plus beaux arbres et à travailler à leur profit**,** d'autant plus vigoureusement qu'ils sont minoritaires. On travaille préférentiellement par le haut.

- Régénération : elle n'est pas prioritaire, mais souvent la conséquence d'une récolte. La mise en lumière des semis et perches doit être progressive et peut se pratiquer à la double condition de s'interdire formellement de sacrifier un petit ou moyen bois de qualité et d'utiliser non seulement l'effet d'éclairement vertical mais aussi diffus (en particulier côté sud).

Le capital recherché étant atteint, les arbres conservés vont remplir voire cumuler des fonctions de production, d'éducation, de protection, de reproduction et de diversité. S'il ne remplit aucune de ces fonctions et si le capital recherché n'est pas atteint, un arbre n'a pas de raison d'être maintenu.
Il y a souvent avantage à désigner les perches et petits bois d'avenir, d'une part pour tracer le travail réalisé pour les gestionnaires et ouvriers forestiers et d'autre part pour attirer l'attention des bûcherons et débardeurs lors de l'exploitation.

Comme en futaie régulière, mais de façon plus sensible, l'approche commerciale doit être très fine pour une valorisation optimale des produits
Par définition, les coupes jardinatoires fournissent des produits peu calibrés, ce qui implique pour le gestionnaire :

- de constituer des lots dans les coupes par séparation des essences et/ou des produits (distinction par exemple du bois d'industrie et des grumes second choix, des grumes de premier choix). Ce même lotissement se fait parfois par passage à mi-rotation (bois d'industrie) ;

- de prélever des volumes/ha d'autant plus conséquents que la qualité est faible et les conditions d'exploitation difficiles ;

- de veiller à une maîtrise de la qualité des exploitations, seule garante de la qualité des semis et bois d'avenir par définition en petit nombre ;

- et dans certains cas, de transférer en travaux l'exploitation de petits bois ou taillis si la masse critique pour la vente n'est pas atteinte.

Ces considérations, ainsi que la nécessité de travaux accompagnant martelage et dynamique naturelle, rendent fondamentale la structuration interne des parcelles sous forme de cloisonnements d'exploitation ou de réseaux de pistes. La disposition de parcelles de taille suffisante (au moins 5 ha) ou le recours à des regroupements de parcelles sont aussi déterminants pour une bonne valorisation des produits de la sylviculture.

En traitement irrégulier, le forestier doit utiliser au maximum les dynamiques naturelles pour limiter les interventions coûteuses
Le souci de la diversité des essences, la limitation des coûts, l'adaptation au contexte économique et climatique et la recherche de la qualité des jeunes sujets poussent à laisser s'exprimer une certaine sélection naturelle dans les taches de régénération, mais également à toujours privilégier les essences minoritaires en station. À cet égard, le renouvellement des peuplements reposant sur un petit nombre d'individus, le contrôle de la pression du gibier est elle tout à fait fondamentale, en particulier pour les essences les plus appétentes pour cerfs et chevreuils : chêne, merisier, érables et sapin.

Cas particulier des conversions en futaie irrégulière feuillue : maîtriser le couvert du taillis
Voir encadré ci-après

Les travaux en gestion irrégulière

Bien que le traitement irrégulier recherche la minimisation des travaux en utilisant au mieux les dynamiques naturelles, il est possible de réaliser au sein d'une même unité de gestion, et simultanément, tous les types de travaux pratiqués en système régulier (nettoiement après coupe, plantation, dégagement, dépressage, taille et élagage... bûcheronnage de petits bois).

Les travaux viennent compléter les actions du martelage et non le contraire.

L'intensité et la fréquence des passages varieront selon la dynamique naturelle, et le type de peuplement (surtout en conversion, il est inutile de réaliser des travaux autres que des travaux de nettoiement après coupe sous des peuplements à fort capital).

Les travaux se pratiquent le plus souvent après la coupe, ou à mi-rotation

Le taillis : un allié précieux qui reste à maîtriser

Le taillis (7,5 cm ≤ ∅ < 17,5 cm) ou le sous étage (∅ < 7,5 cm) participe à l'éducation des semis, perches et petit bois, au gainage des billes de pied et à la production de bois de chauffage. Sa gestion est un acte essentiel à la bonne marche du traitement irrégulier. Elle permet un dosage diffus de la lumière incidente par une structuration latérale et verticale du sous-étage. L'éclairement recherché doit rester favorable à la croissance des semis, perches et petit bois tout en contraignant la concurrence.
Pour cela le taillis doit être contenu dans une faible proportion : en Franche Comté l'objectif optimal retenu est de 2 – 3 m^2/ha. L'atteinte d'un tel niveau de capital de taillis est un prérequis pour engager une quelconque conversion en futaie irrégulière feuillue.

La coupe de taillis est du type furetage dans les cépées (jamais rase), et marquée de préférence après la futaie, en abandon **par le haut** au sein de la strate taillis et petits bois (meilleure valorisation des produits), en prenant également soin de desserrer les houppiers des plus belles perches et petits bois d'avenir (d'essences nobles si possible). Enfin cette opération est également l'occasion de contrôler les brins frotteurs ou montant dans les houppiers des futaies conduisant à une mortalité excessive de branches basses (avec les risques sanitaires attachés : nœuds mal recouverts, coeur rouge descendant…). On veille cependant à ne pas déstructurer les cépées, en ne conservant que les brins trop frêles.

En conversion :la première coupe de taillis est décisive et doit être très forte (jusqu'à 100 m^3/ha pour des coupes à fort taillis) . Il peut être envisagé une coupe sous forme de travaux dans le cas d'absence de débouchés locaux.

Si la régénération est recherchée et notamment dans le chêne, une option consiste à être très réactifs au moment de la glandée, et à travailler sur glandée acquise, en ôtant les gros brins de taillis sous les semenciers, et en veillant cependant à en conserver pour gainer les futaies et les semis, et contraindre la concurrence.

(donc tous les 3-6 ans), de manière diffuse et au profit de semis viables ou « utiles » c'est-à-dire bien venants et affranchis de la dominance d'un bois moyen ou gros bois de qualité non encore récoltable.
Lors des dégagements et/ou des dépressages, un soin particulier est à porter aux essences minoritaires et de lumière (ex. chêne, feuillus divers ou épicéa sous une régénération pléthorique de hêtre), de manière à conserver ou améliorer les mélanges d'essences originels. C'est un défi qu'il faut pouvoir relever, car chacun s'accorde à dire que le traitement irrégulier favorise naturellement les essences d'ombre.
Le dépressage, l'élagage et la taille se feront au seul profit des sujets vigoureux, d'avenir et de qualité, en complément des mécanismes naturels (ex. dépressage dans des brosses de régénération de chêne en milieu acide , élagage ou taille de sujets isolés et remarquables).

Bien entendu, ces travaux doivent rester exceptionnels et n'être envisagés que si les mécanismes de sélection, d'ombrage diffus et d'élagage naturel n'ont pas donné entière satisfaction.

Pour ce faire, il est nécessaire de disposer d'une équipe d'ouvrier autonome et formée, qui, pour des raisons de commodité, travaillera en virée (comme en martelage), en s'appuyant sur le réseau de cloisonnement d'exploitation installé pour la pratique des coupes. L'unité de gestion est alors entièrement parcourue.

On constate aujourd'hui une part croissante du temps de bûcheronnage de petits bois dans les travaux compte tenu du faible engouement dans le marché du bois d'industrie.

À titre d'exemple, dans le Haut-Jura, en forêt jardinée mixte feuillus – résineux équilibrée, avec une concurrence normale du hêtre, on compte entre 1 et 1,4 h/ha/an de travaux utiles, ce qui est peu différent du feuillu : en moyenne 1h/ha/an (Estimation programme Life de Franche-Comté).



J.-M. Mourey, ONF

Suivi et contrôle en futaie irrégulière feuillue

Rappel des objectifs du traitement en futaie irrégulière

- Produire de bois d'œuvre de qualité.
- Privilégier les mécanismes naturels.
- Constituer des peuplements diversifiés, stables se renouvelant en continu.
- Minimiser les intrants.

Pour ce faire, le gestionnaire a recours aux coupes jardinatoires qui rappelons-le, allient toutes les opérations sylvicoles sur l'unité de gestion.

Le suivi consiste donc à piloter la gestion quotidienne, à savoir la préparation des martelages et des travaux, leur mise en œuvre, et leur maîtrise, alors que le contrôle doit permettre de s'assurer que les objectifs fixés par l'aménagement sont bien atteints.

La difficulté consiste à suivre simultanément tous les stades de développement (du semis à l'arbre adulte) pour s'assurer que le processus fonctionne bien. De plus selon les stades observés, ce n'est pas toujours le résultat de la sylviculture mise en œuvre que l'on contrôle mais celle du passé.

Des pièges à éviter

■ Travailler au profit de la régénération peut conduire irréversiblement à la coupe de régénération généralisée (cas de peuplements de hêtre avec régénération pléthorique).
■ Un prélèvement trop faible, homogène à une coupe d'amélioration classique, conduit à capitaliser de façon importante et à s'orienter vers le pôle gros bois.
■ Sacrifier des petits et moyens bois d'avenir au profit de semis (sacrifice d'exploitabilité).
■ Miser sur des petits bois inaptes à produire du bois de qualité.
■ Rechercher une structure jardinée très vite et partout, poussant à des sacrifices d'exploitabilité.
■ Recourir à un traitement irrégulier en lieu et place d'un traitement régulier pour régler un problème d'intensité de prélèvement : en phase de conversion, des prélèvements trop faibles ne permettent pas d'atteindre un niveau de capital susceptible d'une part d'assurer un développement harmonieux des futaies de qualité et d'autre part d'obtenir en continu un renouvellement diffus.
■ Être trop interventionniste en travaux (stade semis, dépressage et travaux dans les perches et petits bois), et augmenter ainsi les coûts sans bénéficier des dynamiques naturelles.

Enfin, les stations dans lesquelles la vigueur de la végétation concurrente excède celle des semis d'essences objectif représentent des cas où le recours à un traitement irrégulier est plus délicat, l'utilisation de la mécanisation des soins aux semis étant difficile voire impossible (cas fréquents sur les stations à chêne pédonculé).



Ch. Allégrini

Le contrôle et le suivi peuvent s'entendre à deux échelles, à des pas de temps différenciés :

■ **au niveau de la forêt (ou série ou groupe)** à l'échelle de laquelle l'équilibre (des structures) est recherché, associé à un objectif de composition et de renouvellement continu. Le pas de temps sera celui de la durée d'un aménagement. Un bilan peut être fait à mi-période sur les stations les plus fertiles, mais ceci est à régler en fonction des moyens mis à disposition du gestionnaire.

■ **Au niveau de la parcelle (ou unité de gestion)** à l'échelle de laquelle on vise prioritairement un suivi ou contrôle du capital voire de composition, éventuellement de régénération, et enfin de structure. Le pas de temps est alors la rotation des coupes.

Les domaines à contrôler sont donc :

■ le capital,
■ la composition,
■ la structure,
■ le renouvellement,
■ plus rarement la qualité des bois, surtout sur les perches et petits bois.

Les variables de contrôle et suivi les plus pertinentes sont :

■ la surface terrière permettant d'appréhender le niveau de capital, la production, le niveau de prélèvement. C'est aussi un des catalyseurs du dynamisme naturel, du fait de sa corrélation, en première approximation, avec le couvert des houppiers et la lumière incidente.

■ Les flux de passage entre différentes catégories de diamètres (exemple passage à la futaie).

■ Le taux de régénération.

Les mesures des variables de contrôle : méthodes d'inventaire

Plusieurs méthodes existent ; elles sont à choisir en fonction des objectifs assignés à la forêt, en fonction de sa surface et surtout en fonction des moyens que le gestionnaire est prêt à investir. Il s'agit des inventaires pied à pied, statistiques par placettes temporaires, permanentes ou typologiques. Tous n'offrent pas les mêmes résultats et précisions, certains peuvent se compléter.

Si la sylviculture mise en œuvre recherche à minimiser les intrants, il ne faut pas nier l'investissement en matière grise indispensable à la bonne marche du processus (au moins durant le temps nécessaire à l'acquisition d'un certain savoir-faire, et donc en phase de conversion).

L'inventaire statistique par placette permanente offre l'avantage de coupler une bonne précision dans les suivis dendrométriques et biologiques.

	Inventaires pied par pied	Inventaire statistique		
		par placette temporaire	par placette permanente	Typologique
Définition	dénombrement exhaustif des tiges par essences et catégories de diamètres (Ø ≥ 17,5 cm)	dénombrement par échantillonnage. Placette à usage unique	dénombrement par échantillonnage. Placette pérenne matérialisée sur le terrain	
Surface conseillée pour un coût modéré	≤ 50 ha	> 100 ha	> 100 ha	> 100 ha
Échelle de suivi	série et parcelle	série	série	série et parcelle
Informations recueillies et pertinences				
Capital	++	+++	+++	+
Composition	+++	+++	+++	++
Structure	+++	++	+++	+++
Régénération	-	+	+++	+
Autres critères de biodiversité (qualité, bois morts, etc.)	-	++	+++	+
Précision cartographique	-	++	++	+++
Dynamique de la série	+ estimation biaisée du passage à la futaie	+	+++	+++
Technicité de mise en œuvre	+	++	+++	+++
Coût	12 à 30 ha/j (plaine) 4 à 15 j/ha (montagne)	12 à 18 plac/j 150 plac/série minimum	8 à 12 plac/j. 150 plac/série minimum	30 à 50 ha/j pour 1 pt/ha 10 à 15 ha/j pour 4 pt/ha

Recommandations et avantages des quatre méthodes d'inventaire proposées

En forêt publique, le choix de tel ou tel outil de suivi et contrôle et leur échelle d'utilisation doivent être décidés au moment même de la mise en œuvre de l'aménagement, en fonction des objectifs recherchés et surtout en fonction des moyens dont dispose le gestionnaire. **Un contrôle du capital sur pied** au travers de la surface terrière est un minimum requis au moindre coût avant même le suivi de variables certes plus pertinentes mais d'évaluation plus coûteuse (structure, passage à la futaie, densité de semis…). Plus concrètement, il est sans doute suffisant de pratiquer un contrôle à l'échelle de la forêt (ou partie de forêt) assorti d'un simple suivi au niveau de la parcelle.

Conclusions

Bien au-delà des pratiques de jardinage du Haut-Jura, et après une vingtaine d'années de tests dans le feuillu, le recours à des traitements irréguliers s'impose de plus en plus comme un outil parmi d'autres dans la palette à disposition de l'aménagiste et du gestionnaire forestier. Ce traitement et la sylviculture en découlant nécessitent bien sûr pour son application le respect de quelques principes forts (avant toute chose **une bonne maîtrise de l'intensité des prélèvements et des choix qualitatifs individuels** en martelage). Un contrôle adapté doit prévenir de toute dérive telle qu'une capitalisation excessive.

Mais ce traitement nécessite surtout d'un bon sens de l'observation et d'une formation des personnels aptes à démystifier les pratiques.

On ne doit plus opposer les modes de traitement réguliers et irréguliers mais les utiliser de façon complémentaire, y compris sur la même forêt. Pour ce faire, et dans un objectif de transparence de la gestion pratiquée, une distinction claire doit être opérée entre les traitements réguliers et assimilés à suivi surfacique et les traitements irréguliers pied à pied ou jardiné sans suivi surfacique.

Marie-Claire MARÉCHAL
ONF, direction territoriale de Franche-Comté (SART)
Actuellement Agence de Besançon, responsable US aménagement
marie-claire.marechal@onf.fr

Pierre-Jean MOREL
ONF, directeur de l'agence Nord Franche-Comté
pierre-jean.morel@onf.fr

Bibliographie

BARY-LENGER A., NEBOUT J.-P., 2004. Culture des chênaies irrégulières dans les forêts et parcs : contribution à une sylviculture durable et rentable. Alleur, Belgique : éditions du Perron. 356 p.

BRUCIAMACCHIE M., GRANDJEAN G., MARÉCHAL J.-P., 2000. Gestion des peuplements irréguliers. Réseau AFI-ENGREF 1992-2000. Besançon : réseau Futaie irrégulière, Nancy : Engref. 130 p.

BRUCIAMACCHIE M., de TURCKHEIM B., 2005. La futaie irrégulière : théorie et pratique de la sylviculture irrégulière, continue et proche de la nature. Aix-en-Provence : Édisud. 206 p.

ONF Direction régionale Franche-Comté, 1994. Les futaies irrégulières résineuses du Massif jurassien : aménagement et gestion. Besançon : ONF. 49 p.

ONF Direction régionale Franche-Comté, 1996. Le traitement des peuplements irréguliers feuillus en Franche-Comté : rapport du groupe de travail régional. Besançon : ONF. 42 p.

ONF Direction régionale Franche-Comté, Société forestière de Franche-Comté, Centre régional de la propriété forestière de Franche-Comté, Life, 2003. Développement d'une gestion durable des peuplements irréguliers feuillus.
- Principes généraux de gestion en futaie irrégulière feuillue, 8 p.
- Synthèse des connaissances acquises et des expériences existantes, BEDEL F., 73 p.
- Dynamique des peuplements feuillus irréguliers, BEDEL F., TOMASINI J., 50 p.
- Indicateurs dendrométriques, 8 p.
- Indicateurs sylvicoles, 13 p.

ONF STIR Est, 2000. Sylviculture des peuplements feuillus irréguliers. Bulletin d'information STIR Est, n°6, pp. 50-69

Retour du hêtre et du sapin dans les pineraies pionnières de l'arrière pays méditerranéen. Conséquences pour la gestion et pour la biodiversité

Les formations forestières de l'arrière pays méditerranéen, particulièrement à l'est du Rhône, sont constituées en grande partie de pineraies artificielles (pin noir, sylvestre ou à crochets) issues des boisements de restauration des terrains en montagne (fin du 19e siècle et début du 20e) ainsi que d'accrus de pin sylvestre souvent déjà anciens ; elles évoluent depuis plusieurs décennies vers des formations plus naturelles, souvent mélangées, avec le retour du hêtre et du sapin pectiné principalement, ce qui pose de nouvelles questions de gestion, que ce soit au niveau local (peuplement – sylviculture) ou au niveau du territoire (aménagement forestier). De nombreuses questions se posent en outre sur les conséquences de la réapparition et/ou de l'expansion du hêtre, du sapin pectiné et de feuillus divers sur la biodiversité associée à ces formations.

Une dynamique de grande ampleur qui suscite des interrogations sur la gestion des nouvelles formations et de la biodiversité

Cette dynamique de maturation sylvigénétique est à l'œuvre dans une grande partie de l'arrière-pays méditerranéen ; dans les Préalpes sèches, par exemple, on peut s'attendre, sur une période de l'ordre d'un siècle, à un triplement des surfaces actuelles (30 000 ha) des peuplements à hêtre majoritaire (Ladier *et al.*, 2005) ; pour le sapin, dans l'ensemble des Alpes du Sud, l'augmentation pourrait être plus forte encore.

Cette évolution est souvent considérée comme porteuse d'un enrichissement de la biodiversité et comme favorable à la pérennité de la forêt, mais sans aucune certitude. Les gestionnaires souhaitent, en tout état de cause, connaître l'ampleur et la vitesse de ces modifications, et l'impact possible de la gestion pratiquée, notamment sur la composition en essences et la structure des peuplements, à moyen et long terme : est-il possible de guider cette évolution, de l'orienter ou de la contrôler par la gestion, soit à l'échelle de la parcelle (mode d'enlèvement du couvert lors des coupes de régénération, sylviculture de régénérations plus ou moins mélangées), soit à l'échelle de la forêt ou du petit massif ?



Photo ONF



Photo ONF

Le versant Nord du Mont-Ventoux vers 1880 (à gauche) et 2000 (à droite)

Depuis 1998, principalement dans le cadre du programme « Biodiversité et gestion forestière » du Gip Écosystèmes forestiers et du ministère de l'Environnement et du développement durable, la direction territoriale Méditerranée de l'ONF[1], l'Inra Avignon[2], et l'Institut méditerranéen d'écologie et de paléoécologie (Imep, Marseille) étudient la composition, la structure et l'évolution de ces peuplements hétérogènes en s'appuyant sur le site pilote du Mont-Ventoux, à l'étage montagnard méditerranéen, entre 1000 et 1600 m d'altitude (environ 5 000 ha).
Deux composantes de la biodiversité ont été prises en compte dans cette étude :

■ la diversité des essences du peuplement forestier ; c'est en elle-même une composante de la diversité globale ; en outre, il est couramment admis qu'elle influence la diversité de la faune et de la flore associées (Gosselin et Laroussinie, 2004) ;

■ la diversité floristique : végétaux supérieurs (phanérogames et ptéridophytes).

Une dynamique multiforme, une biodiversité variable selon les stades, les conditions écologiques et les usages passés

Des variantes liées à l'exposition et à l'altitude
Dès l'origine de l'étude, il est apparu deux variantes principales de la dynamique de maturation sylvigénétique (figure 1) :

■ **variante 1**, en versant Sud (adret), qui tend vers des **mélanges de hêtre et de pin** ;

■ **variante 2**, en versant Nord (ubac), qui tend vers des **mélanges de sapin pectiné, hêtre et pin**.
Une **variante 1bis**, en versant Sud, à des altitudes supérieures à la variante

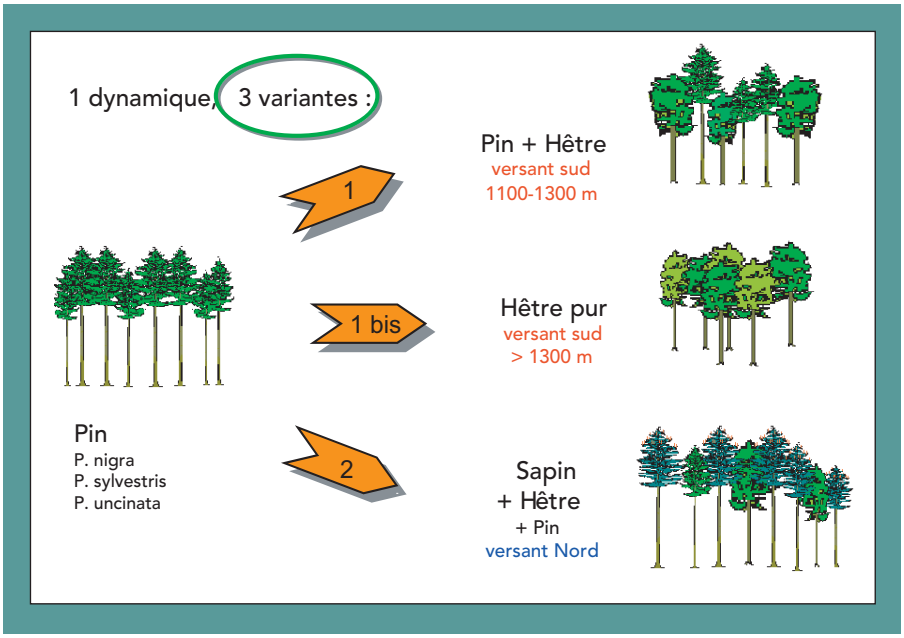


Fig. 1 : dynamique et variantes de l'évolution sylvigénétique au Mont-Ventoux, à l'étage montagnard

protocole

Lors d'une première phase (mi-1998, mi-2001), l'état des lieux, la description et l'analyse des variantes et des stades de la dynamique ont été réalisés grâce à une étude dite « synchronique » : différents sites ont été décrits, à une même date, représentant les stades d'une même variante d'évolution. Dans une seconde phase (2003 - 2005), plusieurs sites ont fait l'objet de certaines remesures.
Le travail s'est appuyé sur la description de :
■ 9 sites semi-permanents assez vastes (installés et suivis par l'Inra) couvrant chacun 0,5 à 1 ha (6 ha au total), qui correspondent aux différents stades et variantes de la dynamique ;
■ 214 petites placettes temporaires (de 4 ou 5 ares chacune, décrites par l'ONF) couvrant la zone d'étude de manière plus globale et extensive (figure 2).
Tous les sites et placettes ont été subdivisés en cellules carrées de 10 m sur 10 m afin de bien prendre en compte la variabilité spatiale.

Les mesures et observations réalisées (par l'Inra-URFM pour les grands sites, et l'ONF pour les placettes) sont les suivantes :
sur toutes les cellules, description dendrométrique et démographique par espèce (inventaire des semis, adultes, souches, échantillons pour les mesures de hauteur, d'âge et le suivi de croissance / mortalité), caractérisation de la couverture au sol et de la strate arbustive ; cette description a nécessité la mise au point de protocoles successifs adaptés afin de décrire au mieux les variables analysées avec le meilleur rapport efficacité / coût.
Sur un sous-ensemble de cellules, inventaire floristique (Imep), description d'humus et de sol (ONF), mesures bioclimatologiques (Inra-Stefce/AgroClim).

1 UT du Ventoux, agence des Bouches-du-Rhône - Vaucluse, CRAT Manosque, STIR Avignon
2 Unité de recherches forestières méditerranéennes et Service d'étude technique des facteurs climatiques et de l'environnement/AgroClim

1, où les pins (sauf le pin à crochets) ne se régénèrent pas ou peu, et qui tend vers une **hêtraie pure**, a également été décrite.

À l'intérieur de ces variantes, des **stades successifs** théoriques de maturation ont été définis :

- pineraie où la régénération est encore absente ou à peine débutante ;
- pineraie à régénération abondante, mais basse ;
- la régénération atteint quelques mètres de hauteur ;
- la régénération dépasse une dizaine de mètres de hauteur et l'enlèvement du couvert de pin est en cours de réalisation ;
- la régénération s'est transformée en peuplement adulte, « mature ».

Le hêtre, le sapin et les feuillus divers opèrent un retour en force

La dynamique de recolonisation par le hêtre et le sapin est massive dans tout l'espace d'étude ; par exemple, dans 90 % des placettes de 4 ou 5 ares, on a noté la présence de semis de hêtre, beaucoup plus abondants que les semis de pins (figure 3). La régénération de feuillus disséminés (alisier blanc (*Sorbus aria* (L.) Crantz), érable à feuille d'obier (*Acer opalus* Miller), voire, au montagnard inférieur, le chêne pubescent (*Quercus pubescens* Willd.)) est aussi abondante que celle du hêtre (figure 4) ; leurs dimensions moyennes sont cependant inférieures.

Cet état des lieux a également permis de mettre en évidence des corrélations entre la régénération de hêtre et de sapin et les différentes variables mesurées : par exemple, augmentation du nombre de semis de hêtre en fonction de l'âge du peuplement de pin ou forte corrélation positive entre l'abondance de cette régénération de hêtre et la proximité des hêtraies constituées préexistantes.

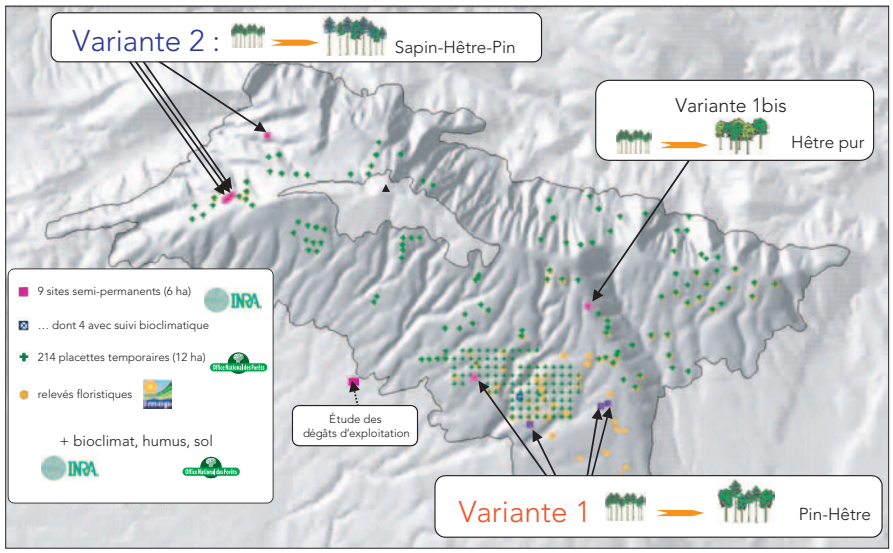


Fig. 2 : localisation des dispositifs pour les divers types d'observations

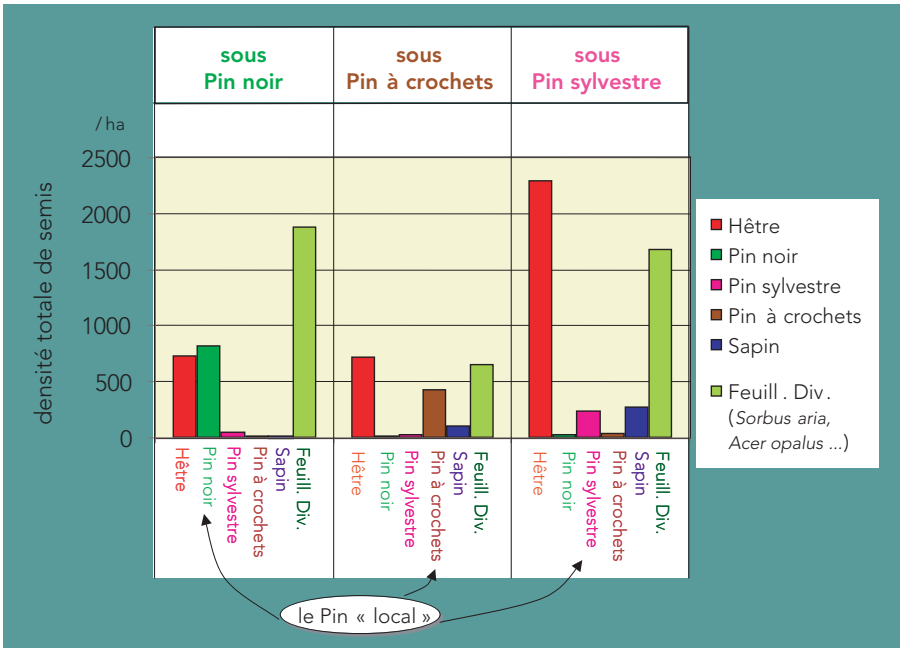


Fig. 3 : composition de la régénération selon le type de pineraie

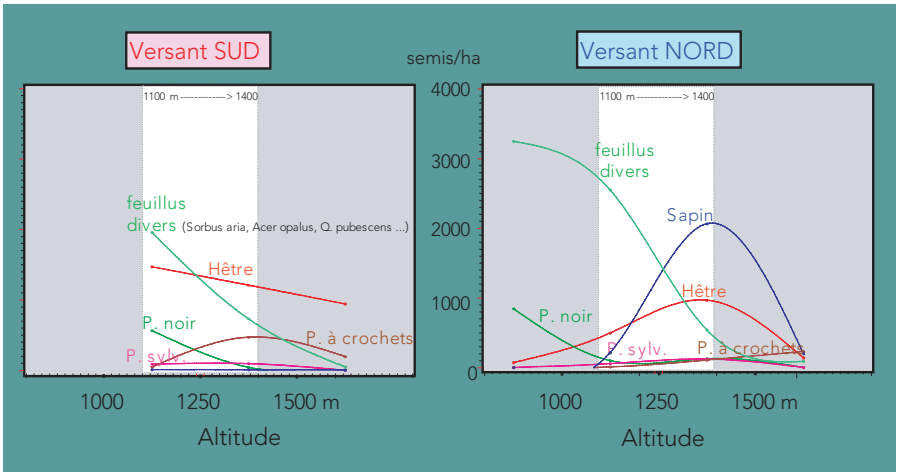


Fig. 4 : abondance des semis selon l'exposition et l'altitude

On note cependant une grande variabilité autour de ces tendances, sans doute liée au passé sylvicole (notamment, la date de la coupe la plus récente), aux conditions pédologiques ou de couverture du sol (plus ou moins favorables à la germination et à la survie initiale), à la variabilité inter-annuelle des productions de graines, à la pression du gibier, etc.

Une diversité floristique qui reste marquée par l'antécédent cultural

Les mesures de diversité floristique ont permis de fournir les informations suivantes :

- la diversité est plus forte aux stades correspondant aux phases de régénération avancée ;
- il existe une influence forte probable de l'antécédent cultural (rémanence de la flore de milieux non forestiers : lande, prairie, cultures de lavande ou autre, pelouses et autres milieux ouverts) ;
- la dynamique « variante 1bis » évolue vers une flore forestière de hêtraie ; la « variante 1 » vers une flore mixte « milieux ouverts + forêt » et la « variante 2 » vers une flore de hêtraie-sapinière. La composante forestière s'affirme plus lentement si les interventions sylvicoles (ouverture du couvert) restent fréquentes.

Richesse et diversité selon les stades : attention aux idées reçues et aux échelles spatiales de perception

En ce qui concerne la composante « arbres » de la biodiversité, la dynamique de maturation s'accompagne globalement d'une augmentation de la richesse spécifique (nombre d'essences représentées) et dimensionnelle, ce qui correspond bien à l'idée qu'on pouvait se faire *a priori*.

En revanche, en termes de **diversité** (appréciée par la variabilité de la richesse entre cellules de 10 x 10 m sur chaque site), le résultat est plus nuancé : elle est maximale aux stades intermédiaires ; aux stades les plus avancés, la structure dimensionnelle et la composition sont plus uniformes. En d'autres termes, la maturation fait passer d'un état uniformément pauvre (la plantation de pin, monospécifique) à un état uniformément riche (stades matures, avec le hêtre et / ou le sapin, ainsi que des feuillus divers, et des pins « résiduels »), en passant par des stades en mosaïque (à l'échelle de la parcelle) d'éléments à divers degrés de richesse.

Notons enfin que richesse et diversité de la biodiversité globale ne s'apprécient pas uniquement sur un site ou une parcelle. En versant Sud, par exemple, la hêtraie pure, mature, qui tend à devenir prédominante dans la partie supérieure de la tranche altitudinale considérée (variante 1bis), est relativement pauvre sur le plan floristique ; mais elle apporte quand même à la biodiversité floristique globale une composante complémentaire de celle des structures plus claires et plus mélangées qui subsistent dans la partie inférieure, plus riches sur le plan des essences et de la flore. De plus, pour d'autres composantes non étudiées ici (insectes saproxylophages, par exemple), la hêtraie mature est sans doute plus riche. La biodiversité doit donc être appréciée à la fois par compartiment (spatial ou systématique) et de manière globale.

Un modèle de dynamique forestière pour aider au choix des orientations de gestion

Structure et positionnement

Le diagnostic précédent montre également la complexité des facteurs explicatifs (conditions stationnelles, gestion actuelle et passée…). Au-delà de la description et des premières analyses, le recours à la modélisation des processus de régénération et de développement des différentes espèces s'est vite montré nécessaire. Un modèle de dynamique intégrant les processus de régénération/recrutement, de croissance et mortalité, en fonction des espèces, conditions stationnelles et de compétition, a été construit.

Le modèle global combine les relations traduisant les processus de régénération (dispersion, recrutement) et de croissance des arbres et semis (croissance en hauteur, en grosseur, mortalité). À partir d'informations sur l'état du peuplement une année donnée et des modifications occasionnées selon différents scéna-

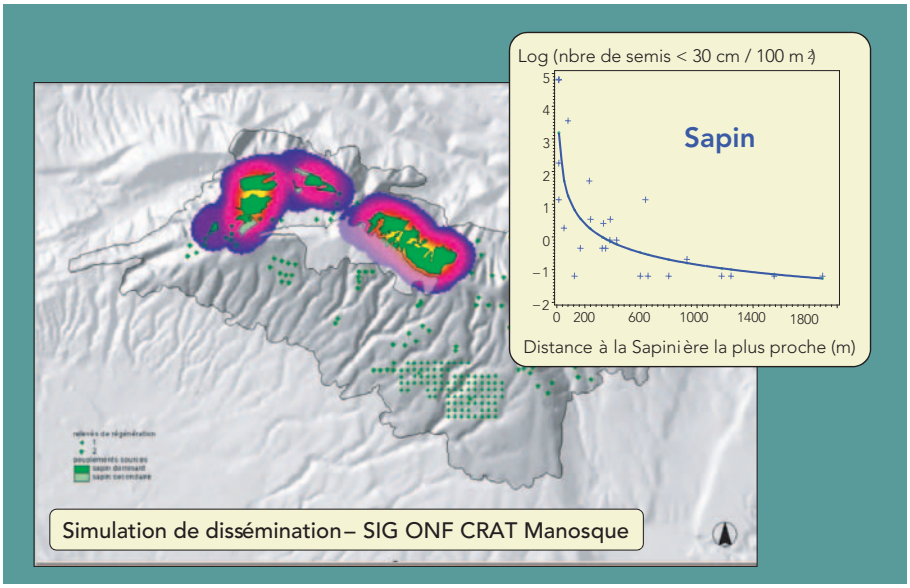


Fig. 5 : première modélisation de la dispersion efficace (semis) du sapin pectiné à partir des inventaires de régénération sur les 214 placettes temporaires et du SIG de l'ONF : abondance des semis en fonction de la distance aux peuplements-sources

rios de gestion, le modèle vise à prédire l'état futur du peuplement. Dans le contexte d'une colonisation (où l'on constate l'apparition de semis à plusieurs centaines de mètres des hêtraies ou sapinières identifiées dans les aménagements), l'évolution d'un peuplement ne peut être prédite (ni expliquée) sans tenir compte de la présence de sources à l'échelle de la forêt.
Après une première modélisation de la dispersion (figure 5) faisant intervenir les parcelles forestières (ou « unités d'analyse ») où le sapin est présent en tant qu'essence principale ou secondaire, la modélisation de ce processus clé se poursuit (Inra-URFM) en tenant compte de la fréquence des semenciers intercalés.

Une aide pour l'aménagement et la sylviculture
Le forestier s'interrogeant sur les conséquences de la sylviculture pratiquée à moyen et long termes sur ces espaces en dynamique forte peut utiliser le modèle, intégré dans un simulateur (plate-forme Capsis, http://capsis.free.fr/) fonctionnant sur un ordinateur de bureau, à deux échelles (figure 6) :

■ Au niveau du peuplement
À partir des caractéristiques dendrométriques et stationnelles de chaque parcelle, le simulateur permet de prédire les évolutions du peuplement (composition, structure, densité...) selon différents scénarios de gestion (y compris l'absence d'intervention).

■ Au niveau de l'aménagement
Le modèle permet de bien rendre compte de l'expansion des espèces. Dans le cadre de l'aménagement, à partir de simulations à l'échéance correspondante (15 - 20 ans) et de perspectives à plus long terme, il peut aider à définir les essences objectif en fonction des stations et des caractéristiques actuelles du peuplement et des peuplements sources environnants.
Selon la sylviculture simulée, la dynamique de recolonisation est plus ou moins rapide. Par exemple, dans

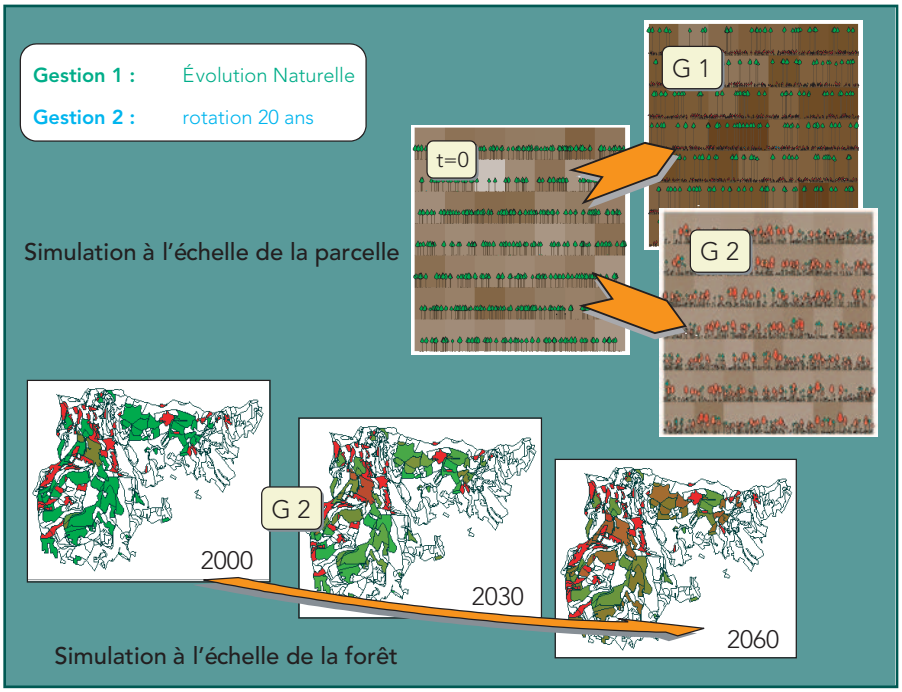


Fig. 6 : exemples de simulations prospectives à l'échelle de la parcelle (moyennant une hypothèse sur le flux externe de semis), et à l'échelle de la forêt (FD du Ventouret, versant Sud du Ventoux)

(en vert : pins ; en rouge : hêtre ; les teintes intermédiaires sont fonction de la proportion des espèces)

l'étage montagnard du Mont-Ventoux, en versant Nord, le modèle prédit une colonisation très active et on s'achemine vers des peuplements de hêtraie-sapinière. Ceci s'explique notamment par le contexte stationnel et la proximité des peuplements sources de hêtre et de sapin.
En versant Sud, à l'étage montagnard inférieur, la colonisation par le hêtre paraît moins rapide ; les interventions sylvicoles menées dans les peuplements de pin, si elles sont dynamiques (éclaircies fortes à rotation courte et coupes d'ensemencement fortes), pourront conduire à des peuplements mélangés.

En revanche, le modèle prédit plutôt le développement du hêtre dans le cas où les interventions sylvicoles sont réduites (coupe d'éclaircie à rotation longue favorable au développement du hêtre, coupe d'ensemencement de faible intensité) même dans un contexte stationnel plutôt adapté aux pins.

Des conditions d'utilisation et des performances qui restent à améliorer
Un tel outil offre des perspectives intéressantes pour le gestionnaire. À deux conditions : d'une part, de l'utiliser en conformité avec la nature des informations manipulées, et d'autre part, que les performances du modèle soient bonnes par rapport aux questions posées. L'utilisateur doit être bien conscient de ces deux points.

■ Simulation, mode d'emploi
Une simulation débute à partir d'une information sur l'état actuel du peuplement considéré ou de la forêt (ensuite, l'utilisateur choisit un scénario de gestion, spécifie le terme de la simulation, examine ou exporte les résultats). Or, l'information dont on dispose habituellement dans le cadre de la gestion, assez couramment rassemblée dans un système d'information géographique, consiste en un parcellaire et en cartes des types de peuplements (essences principales et secondaires, âge dominant approximatif, régime sylvicole) et

des types de station. Avant simulation, une information aussi synthétique doit être « développée », dans une phase de pré-simulation, pour produire un fichier de départ donnant pour chaque parcelle une information dendrométrique : nombre de tiges et surface terrière par essence, et leur distribution par classes de diamètre ; les hauteurs, dominante puis par classe de diamètre, étant déduites de l'âge et de la station *via* des relations du type « classes de fertilité ». Ce nombre de tiges et cette surface terrière sont calculés à partir de relations statistiques établies, en l'occurrence, à partir du réseau de petites placettes temporaires.

Comme la régénération est un point-clé dans le contexte forestier considéré, et comme il existe souvent déjà une régénération en place susceptible d'influencer l'arrivée de nouveaux semis, cet état de départ pré-simulé doit comporter également une composante « semis » : celle-ci est calculée aussi à partir de relations statistiques établies sur les mêmes placettes temporaires.
Compte tenu de cette phase préparatoire de complément d'une information réelle très synthétique par une information virtuelle à valeur statistique, les simulations fondées sur cette information mixte fournissent des résultats dont la valeur en terme de prédiction est correcte à l'échelle de la zone considérée mais dont la valeur ponctuelle (pour une parcelle donnée) est très incertaine. Dans ces conditions, les simulations ont un intérêt principalement tactique qui permet de comparer différentes options de gestion afin d'aboutir à des recommandations, sous forme d'un guide sylvicole.

L'évolution vers des simulations de nature plus stratégique, pour telle ou telle parcelle ou série d'aménagement qui pose question, peut cependant être envisagée. Ainsi, sur le Mont-Ventoux, l'étude de la dynamique de maturation a incité les aménagistes à affiner les descriptions de parcelle réalisées à l'occasion des révisions d'aménagement : lorsque l'enjeu paraît le justifier, le sous-étage et la régénération, ainsi que le peuplement adulte, sont décrits de manière plus fine en distinguant des parquets et en notant des fourchettes de densité et de hauteur, etc., tout en en restant à un protocole compatible avec les contraintes de disponibilité en temps et en personnel affectés à cette activité d'aménagement. Le surcoût induit doit être évalué en tenant compte du fait qu'il intervient uniquement une fois par aménagement, et de la pertinence qu'il apporte aux résultats de simulations fondées sur cette information, plus réelle que lorsqu'on doit réaliser une phase importante de présimulation.

■ **Le champ d'application et les performances du modèle de dynamique**
Dans leur structure actuelle, le modèle de dynamique et les relations qui le composent font actuellement l'objet d'une consolidation de leur calibration à partir de remesures réalisées de fin 2003 à mi 2005.

Par ailleurs, certaines relations constitutives du modèle vont, à moyen terme, faire l'objet de perfectionnements sur plusieurs points :
- l'évaluation du potentiel stationnel de croissance et de survie pour chaque essence et la modélisation de l'expression de ce potentiel en fonction des conditions de compétition (arbres dominants, régénération, individus maintenus sous couvert pendant une partie plus ou moins longue de leur vie, effets des éclaircies / dépressages sur la croissance en hauteur) ;
- précision du lien entre croissance et survie des semis et couvert du peuplement, et entre éclairement sous couvert (estimée par photographies hémisphériques) et composition et structure du peuplement, y compris *via* des expérimentations de modalités de coupes de régénération (ONF) ;
- amélioration des relations de dispersion efficace, en tenant compte non seulement de la distance et de la puissance des peuplements-sources ou de semenciers isolés intercalés, mais aussi de leur position sur les gradients (pente, vents dominants) induisant une anisotropie de la dispersion ;
- meilleure prise en compte de l'effet destructeur des dégâts d'exploitation sur la régénération en place ;
- prise en compte de l'impact des grands herbivores sur la régénération du sapin et du hêtre.

Toutefois, par choix, le champ d'application du modèle n'intègre pas certains types de situations particulières qui peuvent se trouver dans le paysage (stations atypiques, fonds de vallons, crêtes rocheuses, peuplements très lâches ou milieux ouverts ...), ni d'autres essences que celles qui sont principalement concernées par la dynamique de maturation des pineraies.

En conclusion : des acquis, des perspectives à court et moyen terme

L'état des lieux réalisé a permis de mesurer l'ampleur de la dynamique de maturation sylvigénétique des pineraies pionnières du Mont-Ventoux. Le hêtre, les feuillus divers et le sapin reprennent leur place respective à des vitesses variables en fonction de divers facteurs.

Ce constat a d'ores et déjà conduit à une meilleure prise en compte de la régénération et des strates basses dans les descriptions de parcelle lors des nouveaux aménagements, et donc à une meilleure planification et adéquation des travaux.
De plus, le modèle de dynamique forestière (régénération, croissance, survie) qui a été élaboré – et dont la calibration va être consolidée à très court terme – va permettre deux types de simulations, tenant compte des sylvicultures préconisées ou de modes de gestion innovants :

■ à l'échelle de la parcelle, sur des situations-types, ou des cas réels, pour comparer l'impact de différentes options sylvicoles (coupes de régénération, dépressage de régénérations mélangées) ;

■ à une échelle plus vaste – de la forêt ou d'un petit massif –, pour la mise en évidence des tendances selon les modes de gestion.

Les résultats des simulations devraient permettre de conforter ou d'infléchir certains choix de gestion sylvicole, et de construire des indicateurs de richesse et de diversité de structure (et composition) des peuplements, à l'échelle de la parcelle et de la forêt. L'intérêt de telles simulations dépend de la richesse de l'information décrivant le point de départ de chaque simulation : notamment quant à la description quantifiée de l'état actuel des peuplements.
L'un des défis – sans doute à relever en commun, chercheurs et gestionnaires – consiste à mettre au point une méthode de description ou de typologie des peuplements dont le coût de mise en œuvre soit inférieur au bénéfice que l'on peut tirer des éléments obtenus (soit directement, soit par simulation).

À moyen terme, différentes perspectives s'ouvrent, sur la base des avancées déjà réalisées :

- le couplage avec des connaissances en matière d'habitat de certaines espèces de la faune (y compris le grand gibier et les insectes ravageurs) ou de la flore et la mise au point d'indicateurs et de modes de gestion permettant d'atteindre certains objectifs, notamment dans le cadre de zones Natura 2000. Même si l'on peut espérer disposer, à long terme, de modèles capables de représenter et de prédire de manière dynamique l'évolution conjointe du peuplement et de certaines espèces végétales ou animales, le lien avec ces autres composantes de la biodiversité passe encore par des relations statiques, qui restent d'ailleurs presque toutes à établir, avec l'appui des spécialistes concernés ;

- dans un contexte de changement climatique, la détermination des situations stationnelles – actuelles et, surtout, futures – convenant aux différentes essences ;
- des recherches réalisées récemment à l'Inra-URFM permettent de simuler l'impact des évolutions démographiques induites par la dynamique de maturation, en interaction avec les coupes sylvicoles, sur la structure génétique des nouvelles populations issues de la colonisation (Dreyfus *et al.*, 2004) ; à moyen terme, il est envisagé de pouvoir simuler en retour l'influence de la structure et de la diversité génétiques sur l'évolution démographique et la capacité d'adaptation aux conditions écologiques rencontrées par ces nouvelles populations de hêtre et de sapin, soit au cours de leur expansion par colonisation, soit sous l'effet des variations climatiques (extrêmes inter-annuels et tendance au réchauffement).

Jean-Marc COURDIER
ONF, DT Méditerranée
Pôle recherche et développement en sylviculture et environnement
Avignon
jean-marc.courdier@onf.fr

Philippe DREYFUS
Inra – Unité de recherches forestières méditerranéennes (URFM)
Avignon
dreyfus@avignon.inra.fr

Remerciements

L'étude a bénéficié du soutien financier du programme « Biodiversité et Gestion Forestière » (Gip-Écofor/MEDD, conventions simultanées avec l'Inra, l'ONF et l'Imep). Les auteurs remercient l'ensemble des personnels de l'Inra (URFM et Stefce/AgroClim), de l'Office national des forêts, de l'Imep qui ont contribué à recueillir et analyser les informations nécessaires, en particulier les équipes techniques qui ont installé et suivi les dispositifs.

Bibliographie

DREYFUS Ph., BOURDENET Ph., LADIER J., GACHET S., COURDIER J.-M., PORTÉ A. 2001. Gestion d'une évolution forestière majeure de l'arrière pays méditerranéen : la maturation sylvigénétique des pinèdes pionnières. Conséquences pour la biodiversité sur le site pilote du Mont Ventoux. Rapport final des conventions 1998 2001 entre le Gip-Écofor(programme « Biodiversité et gestion forestière »), l'Inra, l'ONF, l'Imep. 150 p + annexes

DREYFUS Ph., 2004. Gestion d'une évolution forestière majeure de l'arrière pays méditerranéen : la maturation sylvigénétique des pinèdes pionnières. Conséquences pour la biodiversité sur le site pilote du Mont Ventoux. *In* : « Biodiversité et gestion forestière. Résultats scientifiques et actions de transfert », C. Millier, V. Barre et S. Landeau, Gip-Écofor, MAP, MEDD, Paris. 142-152

DREYFUS Ph., ODDOU-MURATORIO S., 2004. Prévoir l'évolution de la diversité pour différents itinéraires sylvicoles. Rendez-vous techniques de l'ONF. Hors-série n° 1 « Diversité génétique des arbres forestiers », 97-104

GOSSELIN M., LAROUSSINIE O., Coord., 2004. Biodiversité et gestion forestière : connaître pour préserver. Revue bibliographique. Écofor, Cemagref, ISBN 2-85362-620-2, 320 pp.

LADIER J., DREYFUS Ph., REBOUL D. 2005 (*à paraître*). La place du hêtre en région méditerranéenne. Hors-série n° 2 des Rendez-vous techniques de l'ONF.

Intérêt des *arboreta* pour la gestion forestière

Dans la suite de la présentation des réseaux de compétences naturalistes de l'ONF, l'auteur nous expose les orientations prises dans le suivi et la gestion des arboreta : enjeux scientifiques, pédagogiques et patrimoniaux sont désormais abordés dans le cadre d'un partenariat avec des organismes scientifiques, destiné à développer une approche concertée et complémentaire des projets.

Un *arboretum* est un ensemble d'arbres et d'arbustes plantés à des fins scientifiques, pédagogiques, ornementales ou patrimoniales.

L'ONF gère actuellement environ 130 *arboreta* répartis sur l'ensemble de la métropole ainsi que dans les départements d'Outre-Mer.

Les plus anciens d'entre eux ont été installés à la fin du 19e siècle (les *arboreta* du massif de l'Aigoual, installés entre 1889 et 1904, sont parmi les plus anciens), et il s'est créé depuis cette période d'autres sites, de superficie et de conception variables.

C'est ainsi que certains d'entre eux, sous forme d'*arboreta* d'élimination, ont été installés avec le concours scientifique de l'Inra d'Orléans (Institut national de la recherche agronomique).

Des *arboreta* plus récents ont vu le jour,

Un *arboretum*, de par la diversité dendrologique qui le caractérise, est un moyen d'observer les tendances invasives de végétaux qui peuvent être initialement pressentis pour une utilisation forestière ou ornementale.

Les forestiers ont en mémoire le cerisier tardif (*Prunus serotina*) qui est un arbre dont les facultés de régénération sont particulièrement dynamiques et aujourd'hui difficiles à contrôler.

À titre d'exemple récent, le développement vigoureux et la régénération naturelle d'une protéacée originaire d'Australie (*Hakea saligna*) dans un arboretum du Var a attiré l'attention de ses gestionnaires. Cet arbuste n'était pourtant pas dénué d'intérêts pour les professionnels de la pépinière en région méditerranéenne.



T. Lamant, CGAF



T. Lamant, CGAF

Hakea saligna (port de l'arbuste et fruits)

notamment à l'initiative de l'opération « à l'école de la forêt » dont les objectifs sont clairement pédagogiques. D'autres enfin, les plus nombreux, associent à la fois les plantations forestières par placeaux (sous forme d'unités appelées *sylvetum* comme celui des grands Murçins près de Roanne) mais aussi paysagères par la présence d'un nombre limité de sujets par taxons, classés fréquemment de manière géographique ou systématique.

Jusque dans les décennies qui ont suivi la fin du second conflit mondial, le but des *arboreta* gérés par l'ONF ou en coopération scientifique avec l'Inra était de tester le comportement d'éventuelles nouvelles essences de reboisement. Du fait du déficit en sciages résineux, la politique nationale forestière de l'époque montrait une préférence pour les essences résineuses dans une majorité de sites. Cependant, les feuillus étaient aussi présents et en particulier dans la banlieue rouennaise, afin, dans ce cas, d'observer leur comportement vis-à-vis des pollutions atmosphériques liées à l'intense activité industrielle de cette partie de la Normandie.

Une convention pour un premier réseau en partenariat avec l'Engref

La première idée de mettre des *arboreta* en réseau a vu le jour en 1997. Une convention avait été signée entre l'ONF et l'École nationale du génie rural des eaux et des forêts (Engref), organisme gérant l'arboretum national des Barres de Nogent-sur-Vernisson.
Outre cette prestigieuse collection, ce réseau comportait trois sites gérés par l'ONF : l'arboretum de la Jonchère en Haute-Vienne, celui de

L'un des rôles des *arboreta* est de constituer des lieux de conservation *ex situ* de certaines espèces rares et menacées. De plus, certains d'entre eux ont servi de tests (arboretum dit d'élimination) pour l'acclimatation éventuelle de certaines essences dans des contextes particuliers (plateaux d'altitude abandonnés par l'agriculture, secteurs soumis à de fortes pollutions atmosphériques, substituts partiels à des essences forestières utilisées à très grande échelle, restauration de forêts dégradées).
Le sapin d'Algérie (*Abies numidica*) et le cyprès du Tassili (*Cupressus dupreziana*), tous deux en grand danger d'extinction, entrent dans ces catégories.



T. Lamant, CGAF

Abies numidica en peuplement à l'arboretum de Royat (Puy de Dôme)



T. Lamant, CGAF

Cupressus dupreziana à l'arboretum Gratteloup (Var)

Pézanin en Saône-et-Loire et celui de Cardeilhac en Haute-Garonne.
Le choix de ces trois sites a été motivé par leur situation géographique, leur ancienneté, la qualité dendrologique de leurs spécimens, leurs potentialités d'extension ou la réserve foncière encore disponible, et la volonté locale de mener à bien leur renouvellement.
Cette convention prévoyait d'intensifier l'enrichissement et l'extension des *arboreta* par l'installation de collections par genres, les plus riches possible, avec un nombre suffisant de provenances (et d'individus par provenance) d'origine sauvage clairement identifiée, reflétant au maximum la variabilité génétique des espèces appartenant au genre représenté.
Ainsi, dans ce cadre scientifique, des arbres et arbustes appartenant au genre *Alnus* ont été installés dans les trois *arboreta* de ce premier réseau (le genre *Acer* est pour le moment seulement à la Jonchère), permettant notamment d'étudier le comportement d'une même espèce dans un système à sites multiples.

Cette collaboration entre les deux entités administratives entendait aussi des échanges d'informations scientifiques, une mise en valeur touristique et pédagogique ainsi qu'un appui technique en retour pour la gestion des nombreux autres *arboreta* gérés par l'ONF. C'est ce qui fut fait.

Cependant dans différentes collections dispersées sur notre territoire, des actions ponctuelles ont été demandées puis réalisées. Il devenait important de réaliser ces actions de façon concertée : l'idée d'une mise en réseau mais sur une plus grande échelle, semblait alors évidente.

Vers un réseau d'*arboreta* publics

Aussi et à l'instar de ce qui se passe ailleurs en Europe, la création d'un réseau d'*arboreta* publics avec d'autres partenaires que l'Engref a vu le jour.
En février 2005, une nouvelle convention multipartenariale associant l'ONF et l'Engref à l'université Paris-Sud (gestionnaire de l'arboretum du campus d'Orsay), au Muséum national d'histoire naturelle (jardin des plantes de Paris et arboretum national de Chèvreloup) et à l'Inra (arboretum d'Amance près de Nancy et de la Villa Thuret d'Antibes), a été rédigée afin de mettre sur pied un autre réseau réunissant cette fois différents *arboreta* publics.

Dès le début des entretiens entre les futurs partenaires une série d'états des lieux patrimoniaux portant sur

Un *arboretum* est un excellent site pour servir d'indicateur des modifications du climat. On y trouve de nombreux arbres ou arbustes installés dans des conditions pédoclimatiques bien souvent très éloignées de leur environnement habituel.
À l'heure où les premiers effets du changement climatique apparaissent, la présence de mêmes espèces en différents sites constitue un outil de choix. Elles pourront ainsi être observées simultanément dans des milieux et des climats variés.
Un projet d'observation phénologique (durée de la saison de végétation, floraisons, régénération naturelle, etc.) est sur le point d'être mis en œuvre en 2006 au sein du réseau multipartenarial.



T. Lamant, CGAF

Aesculus californica (Paris, Jardin des Plantes)



T. Lamant, CGAF

Rameaux de Quercus myrsinifolia (45)

les aspects dendrologique et historique a débuté. L'objectif de ces actions sur le terrain est d'évaluer les potentialités futures du site parcouru et de déterminer son avenir scientifique ainsi que son intérêt sociétal (ornemental et pédagogique).

Naturellement, les trois collections botaniques liées à la première convention ont été intégrées à ce nouveau réseau et de fait, certains *arboreta* installés par l'Inra sur terrains relevant du régime forestier les ont rejointes.
C'est le cas, à ce jour, des *arboreta* situés en Normandie (*arboreta* de Roumare et de Forêt Verte), et dans le Massif central (*arboreta* de Born et du Col des trois sœurs en Lozère, arboretum de Sainte Anastasie et dispositif d'*Abies procera* de Vèze dans le Cantal, arboretum de Royat dans le Puy de Dôme). En novembre 2004, un bilan a été réalisé dans les massifs forestiers des Maures (*arboreta* de Gratteloup et du Treps) et de l'Esterel (le Canereit, le Plan Esterel, le Tassili). Ces sites méditerranéens installés dans les années soixante sont d'une grande richesse botanique et justifient pleinement d'être incorporés à leur tour dans cette convention associant des *arboreta* publics.

Dans cette nouvelle convention, les objectifs scientifiques de valorisation des collections de ce réseau sont :

- identifier ces ressources par la réalisation d'un inventaire (avec une base de données commune) ;
- faire mieux connaître ces ressources auprès de la communauté scientifique ;
- évaluer la diversité des ressources génétiques de ces collections, pour les espèces menacées dans leur aire d'origine, et la comparer à celle des peuplements naturels relictuels ;
- mettre au point des méthodes de sauvegarde pour la conservation des espèces menacées ;
- coordonner les programmes de sauvegarde ;
- échanger des expériences en matière de gestion, de développement économique (arbre hors forêt), pédagogique et touristique.

Les objectifs de gestion des arboreta de l'ONF

À l'ONF, outre les missions d'éducation à l'environnement, l'établissement vise à développer les axes suivants dans le cadre de ses programmes de recherche :

- supports pour l'étude de la systématique et la variabilité intra-spécifique ;
- conservation *ex situ* d'espèces menacées ;
- observatoire pour le comportement des végétaux ligneux vis-à-vis des changements climatiques ;
- observation du comportement éventuellement invasif de plantes installées, observation des cortèges mycologiques et de l'entomofaune induits par la diversité botanique

Ainsi définis, les *arboreta* peuvent notamment servir d'outils pour des études génétiques. En outre, les *arboreta* constituent d'excellents supports pour développer des activités d'information et de sensibilisation du public.

Le réseau *arboreta* de l'ONF appartient aux réseaux de compétences naturalistes comprenant aujourd'hui la mycologie, l'avifaune, l'entomologie et les mammifères non ongulés. Il est basé au sein du Conservatoire génétique des arbres forestiers (CGAF) de la direction technique (département recherche), qui est un laboratoire de l'établissement associé à l'Inra d'Orléans et situé dans ses locaux. En effet, ces lieux constituent un conservatoire génétique *ex situ* et s'inscrivent dans une politique de réseaux de conservation génétique mis en place sur notre territoire.

Concernant les *arboreta*, l'activité du CGAF comprend le soutien technique, tant pour la création que pour la gestion du patrimoine existant, et notamment son renouvellement, ainsi que des déterminations d'échantillons et des sessions de formation continue dans le cadre de la gestion de ces espaces arborés ou de la conduite des végétaux hors forêts.

Depuis 2001, les *arboreta* de la Jonchère, Pézanin et Ripaille (autre arboretum du réseau situé près de Thonon-les-Bains) ont même fait l'objet de reconstructions post-tempêtes avec l'aide de mécénat extérieur (Ushuaïa). Un nouveau projet dans le Finistère est actuellement en cours d'étude.

Thierry LAMANT
Animateur du réseau *arboreta*
ONF, Conservatoire génétique des arbres forestiers
Olivet (45)
thierry.lamant@onf.fr

Tentative de discrimination des principales espèces de pins « à cinq feuilles » du sous-genre *Strobus* (*Haploxylon* ou « soft pines ») par l'appareil végétatif seul

L'identification des espèces du genre Pinus n'est pas forcément une tâche aisée. Pour y remédier, la présence des cônes est dans la plupart des cas le moyen quasi infaillible d'arriver à un diagnostic correct. Cependant, l'identifcation des individus non fructifères demeure impossible : c'est la raison qui a présidé à l'élaboration de cette clé simplifiée, mise au point par l'auteur.

En l'absence de cônes, le recours à l'appareil végétatif seul est peu efficace, sauf à de rares exceptions près qui ne figurent pas parmi les pins à cinq feuilles du sous-genre *Strobus*. En effet, la plupart des pins et particulièrement ceux du sous-genre *Strobus* qui nous intéresse , ne sont pas aptes à fructifier avant d'avoir atteint 10 ou 20 ans, parfois davantage. C'est ce qui a motivé la rédaction de cette note.

Il existe de nombreux pins dits « à cinq feuilles » dans les espaces urbains publics et privés, les plantations forestières et les *arboreta* gérés par l'ONF (*arboreta* d'élimination ou de collection). Les principales espèces appartenant au sous-genre *Strobus* sont connues des forestiers essentiellement au travers d'un pin autochtone, le pin cembro (*Pinus cembra*) et de deux exotiques, le pin Weymouth (*P. strobus*) et celui de l'Himalaya (*P. wallichiana*).

Ce document va tenter de proposer, notamment à l'aide d'une clé et en l'absence de fructifications, les moyens d'identifier les 14 principaux taxons présents dans les espaces gérés par l'ONF. Les clés de détermination connues dans ce domaine s'appuient toujours ou presque entièrement sur l'appareil reproducteur ou ce qui en découle. Par conséquent, un petit rappel sera effectué sur les cônes et les graines de ces pins.

Quelques notions de systématique chez les pins

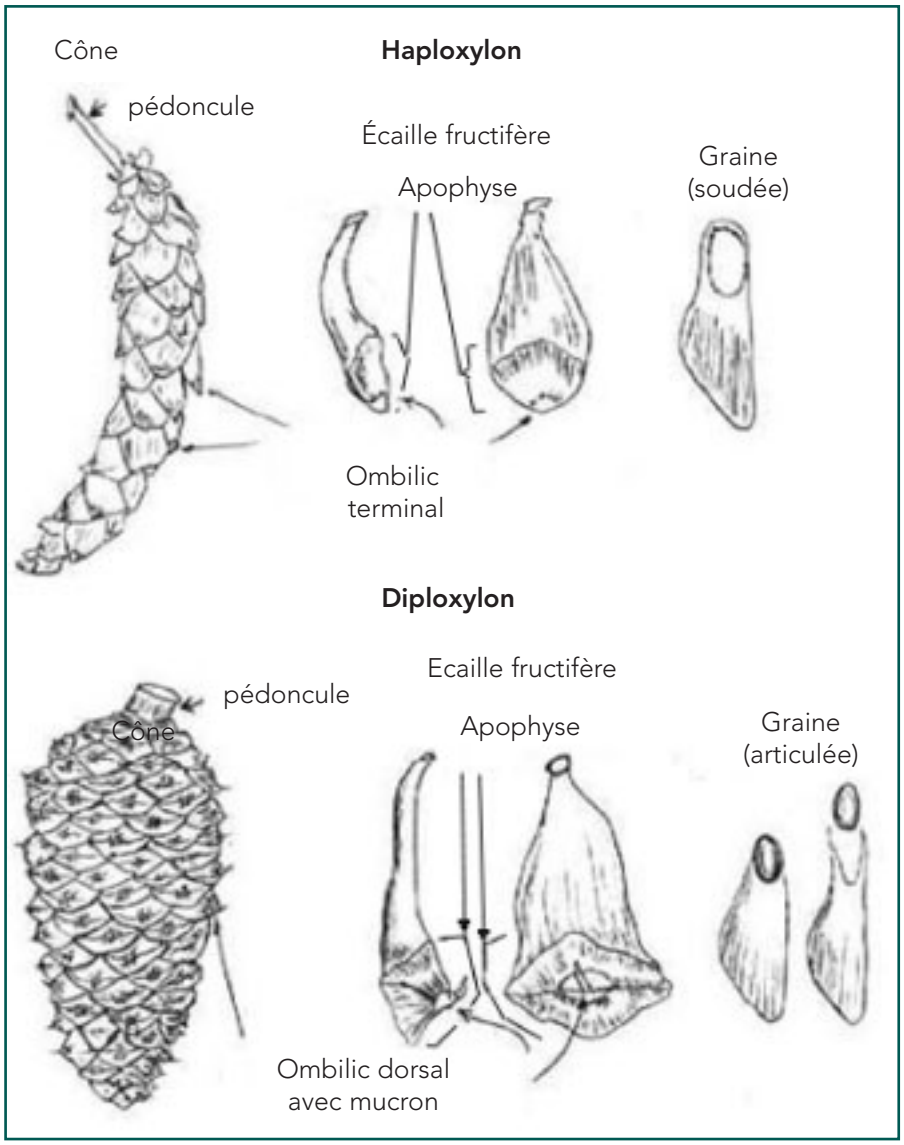
Pour simplifier la systématique du genre *Pinus*, sachons qu'il existe trois sous-genres : *Strobus*, *Pinus* et un autre (*Ducampopinus*), très atypique, ne comprenant qu'une seule espèce vietnamienne et dont les feuilles sont plates (*P. krempfii*). Ces sous-genres sont à leur tour divisés en sections et même en sous-sections, mais nous nous contenterons de présenter ce qui différencie les deux premiers sous-genres.

Le sous-genre *Strobus* (pins *Haploxylon*) et le sous-genre *Pinus* (pins *Diploxylon*) se différencient par les quatre points suivants (voir tableau ci-dessous) :

- les gaines (sortes de petites feuilles qui se situent à la base du faisceau d'aiguilles) sont caduques (une exception : *Pinus nelsonii*, rare pin mexicain) alors qu'elles sont persistantes dans l'autre sous-genre.
- Il n'y a qu'un faisceau vasculaire, présent dans les feuilles et visible à l'aide d'une loupe alors qu'il y en a deux chez les « *Diploxylon* ».
- La position de l'ombilic (voir schéma page suivante) sur l'apophyse (partie

Sous-genres	Nombre de faisceaux vasculaires	Nature des gaines	Position de l'ombilic	Nature du mucron sur l'ombilic	Type de graine
Pinus (Diploxylon) ou « hard pines »	deux	habituellement persistante	dorsale	habituellement persistant	présence d'aile articulée (sauf *P.pinea, P.torreyana)*
Strobus (haploxylon) ou « soft pines »	un	caduque (sauf *P. nelsonii*)	terminale (sauf sous-section *Cembroides*)	caduc	aptère ou avec aile non articulée

Tableau comparatif des sous-genres Strobus et Pinus



d'après M. Frankis

visible de l'écaille du cône fermé) est terminale et sans mucron persistant, au lieu de dorsale et souvent mucronée chez les « *Diploxylon* ». Il existe des exceptions (sous-section *Cembroides*), regroupant des pins présents en milieux semi-arides américains dont fait partie *P. nelsonii* cité précédemment.

■ Les graines sont aptères (c'est-à-dire non ailées ou avec un vestige d'aile) ou possèdent une aile non articulée (l'aile se brise lorsqu'on veut la séparer de la graine) alors qu'elles sont ailées et articulées chez les « *Diploxylon* » (sauf deux espèces : le pin parasol – *P. pinea* – et le californien *P. torreyana*) : la graine est en partie englobée par deux prolongements de l'aile qui ne se brise pas lorsqu'on la sépare de celle-ci.

Le nombre de feuilles par faisceau ne constitue pas un critère pour différencier ces deux sous-genres puisqu'il existe au Mexique et en Californie des pins « *Diploxylon* » dont les aiguilles sont groupées par cinq.
Parmi certaines espèces mexicaines, l'illusion est d'autant plus grande, puisque chez *P. montezumae*, par exemple, les feuilles sont fines et souples (comme souvent chez les pins « *Haploxylon* ») et que les cônes sont assez longs et pendants comme chez le pin de l'Himalaya (P. *wallichiana*) qui est un pin « *Haploxylon* ».
Cependant, parmi les 32 taxons qui appartiennent au sous-genre *Strobus*, tous ne possèdent pas des faisceaux d'aiguilles groupées par cinq ! Mais les exceptions se rencontrent parmi les espèces de milieux semi-arides mexicaines ou du Sud-Ouest des États-Unis qui sont extrêmement rares en collections, même dans les *arboreta* les plus riches.

En résumé, et pour savoir à quel sous-genre nous avons affaire, il suffit d'observer les gaines des feuilles. Si elles sont caduques (ou s'enlèvent facilement), il s'agit bien du sous-genre *Strobus*. De plus, les feuilles des pins présentés dans l'article sont fines ou assez fines et souples et bicolores (de par la présence de lignes de stomates visibles), ce qui n'est jamais le cas avec les espèces du sous-genre *Pinus* comme le pin sylvestre ou le pin maritime.

Rapide présentation des 14 principales espèces retenues

Ce choix peut paraître subjectif mais s'appuie sur les taxons les plus répandus en collection ou espaces urbains ou susceptibles d'y être installés. En effet, les introductions des pins non décrits dans cet article sont bien connues. Ceux-ci ne figurent pas dans les espaces urbains, *arboreta* et forêts gérées par l'ONF (une exception en forêt de la Gardiole). En France, les taxons les plus rares du sous-genre *Strobus* se trouvent dans des collections privées peu ou pas visitables et quelques grands *arboreta* historiques publics (une espèce à Angers et une mourante à Chèvreloup).

Taxons européens

Pinus cembra L. (pin cembro, Arolle) : ses rameaux sont épais et fortement couverts d'une pubescence brun jaunâtre ou brun rouille la première année. Les feuilles sont droites ou légèrement courbes. Le cône est dressé, violacé et indéhiscent à maturité comme chez *P. koraiensis*. Les graines sont aptères.

Pinus peuce Griseb. (pin de Macédoine) : ses rameaux sont verts et toujours glabres, même jeunes. Les feuilles sont droites, souples, souvent vert sombre et concolores (de même couleur). Les cônes ont des écailles bombées rappelant en plus petit, ceux du pin de l'Himalaya.

Clé de discrimination simplifiée (basée sur l'appareil végétatif) des 14 principales espèces de pins « à cinq feuilles » du sous-genre Strobus (Haploxylon ou « soft pines ») présentes dans les arboreta français

1 Rameaux année n pubescents ou velus (et le restant fortement* ou non en fin de saison)	2
+ Rameaux année n glabres ou le devenant rapidement	3
2 Rameaux n+2 pubescents	*P.pumila*
+ Rameaux n+2 non pubescents	4
4 Feuilles glauques (lignes de stomates larges et/ou nombreuses)	5
+ Feuilles vertes (lignes de stomates peu visibles)	8
5 Feuilles torses et courtes	6
+ Feuilles non torses, ni ondulées	7
+ Feuilles ondulées, longues et rigides	*P.koraiensis*
6 Feuilles maculées de résine	*P.aristata*
+ Feuilles non maculées de résine	*P.parviflora*
7 Feuilles comprises entre 5 et 13 cm de long	*P.strobiformis*
+ Feuilles comprises entre 8 et 18 cm de long	*P.ayacahuite*
8 Feuilles fines et pubescence modérée des rameaux en fin de saison	9
+ Feuilles épaisses et forte pubescence des rameaux en fin de saison	*P.cembra*
9 Teinte d'ensemble du feuillage glauque	*P.monticola*
+ Teinte d'ensemble du feuillage vert	*P.lambertiana*
3 Feuilles non pleureuses & non courbées à la base	10
+ Feuilles pleureuses & à base majoritairement courbées	12
10 Rameaux vert ou gris verdâtre (feuilles souvent sombre)	*P.peuce*
+ Rameaux vert olive puis brun clair (feuilles souvent claires)	11
11 Feuilles disposées en pinceaux vers l'avant	*P.flexilis*
+ Feuilles non disposées en pinceaux	*P.strobus*
12 Jeunes pousses avec une légère pruine glauque	*P.wallichiana*
+ Jeunes pousses non pruineuse	*P.armandii*

Taxons présents en Amérique du Nord (Mexique compris)

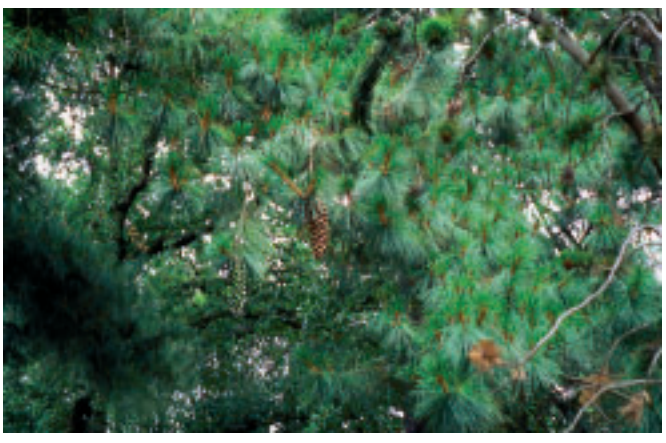
Pinus aristata Engelm. (pin aristé) : il possède des feuilles courbes, courtes, distribuées en écouvillon et persistant de nombreuses années, formant ainsi une succession de touffes d'aiguilles qui cachent le rameau. Elles sont ponctuées de gouttelettes de résine. Les gaines se recourbent la seconde année puis finissent par tomber. Les cônes, rares à observer en culture possèdent de très fins mucrons recourbés qui lui ont donné son nom.

Pinus ayacahuite Schlecht. (pin blanc du Mexique) : ses rameaux de l'année sont finement pubescents. Les feuilles sont droites ou légèrement courbes et à odeur citronnée au froissement (odeur de résine chez *P. monticola*). Très grands cônes à apophyses souvent ondulées et fortement recourbées vers l'intérieur.

Pinus flexilis E.James (pin flexible) : ses pousses de l'année perdent rapidement leur pubescence brun jaunâtre et sont souples au point de pouvoir les nouer, d'où son nom. Les feuilles sont concolores et disposées en pinceau, c'est-à-dire dirigées vers l'avant et plus épaisses que celles de *P. strobus*. Les



T. Lamant, ONF-CGAF



T. Lamant, ONF-CGAF

Pinus ayacahuite et Pinus ayacahuite var. veitchii (Royaume-Uni)

cônes ont des écailles épaisses, bombées et renferment des graines aptères ou dotées d'un vestige d'aile.

Pinus lambertiana D.Dougl. (pin à sucre) : le plus grand pin du monde (70 m) possède aussi les cônes parmi les plus longs (50 cm), mais légers, dont les écailles sont assez souples. Le rameau de l'année porte une pubescence orangée. Les feuilles sont droites ou parfois légèrement vrillées, concolores et vertes. Ce pin porte à l'extrémité de ses branches ses longs cônes groupés, les faisant ainsi se courber sous l'action de leur poids.

Pinus monticola D.Dougl. (pin blanc des montagnes) : ses jeunes rameaux portent une courte pubescence grisâtre qui persistera un an, ce qui le différencie de *P. strobus* qui est glabre au moins au même stade. Les feuilles sont droites ou légèrement tordues, concolores (mais les stomates sont peu visibles). Le cône est courbe, à écailles assez fines et ressemble fortement à celui de *P. strobus* mais en deux fois plus long.

Pinus strobiformis Engelm. : les jeunes rameaux portent une pubescence orangée ou jaunâtre et ses branches sont fréquemment ondulées. Ses feuilles sont droites ou légèrement courbes, disposées en pinceau et bicolores (aspect glauque très net). Ses cônes possèdent des écailles épaisses et fortement recourbées nettement vers l'intérieur. Les graines sont aptères ou portent comme chez *P. flexilis*, une aile vestigiale.

Pinus strobus L. (pin de Lord Weymouth) : arbre conservant longtemps son écorce lisse et luisante comme chez *P. monticola*. Ses rameaux, parfois à peine pubescents, sont très rapidement glabres. Les feuilles sont vertes ou un peu glauques. Les cônes sont extrêmement étroits avant maturité (3 cm de large au mieux) et sont souples et courbes. Ils atteignent 15 cm de long.

Taxons originaires de l'Est asiatique

Pinus armandii Franch. (pin d'Armand) : ses jeunes pousses dépourvues de pruine glauque (ou très peu) permettent de le distinguer de *P. walli-*



T. Lamant, ONF-CGAF

Cônes de Pinus strobiformis (Les Barres, 45)



T. Lamant, ONF-CGAF

Cône de Pinus armandii (Les Barres, 45)

chiana. Les feuilles sont courbées à la base. Le cône est droit, à écailles plutôt bombées et il rappelle en plus volumineux celui de *P. flexilis*. Les graines sont aptères.

Pinus koraiensis S. & Z. (pin de Corée) : les rameaux de l'année sont épais et fortement couverts d'une pubescence rousse. Les feuilles sont assez longues, un peu fermes et vrillées. Les cônes dressés ou penchés, sont indéhiscents à maturité et disposés sur les parties sommitales de l'arbre. Leurs écailles sont triangulaires, coriaces et à bord recourbé. Les cônes renferment des graines aptères.

Pinus parviflora S. & Z. : ses jeunes rameaux portent une fine pubescence dorée qui persiste la première année. Les feuilles sont courtes et très courbées (aspect frisé). Les gaines se délitent en lanières et ne sont caduques qu'en fin de première année. Les cônes sont petits, parfaitement ovoïdes avant ouverture et persistent de nombreuses années. Les graines sont très courtes et l'aile ne dépasse jamais la longueur de la graine.

Pinus pumila Reg. : il s'agit du seul pin arbustif de cette note. Les rameaux portent une pubescence roussâtre encore visible deux ans plus tard. Les feuilles sont courtes, ondulées, parfois courbées. Les gaines sont identiques au pin précédent mais chutent rapidement. Les cônes, indéhiscents, sont identiques à ceux de *P. cembra* mais plus petits et orangés. Les graines sont aptères.

Pinus wallichiana A.B.Jacks. (pin de l'Himalaya) : l'écorce reste lisse assez longtemps mais moins que chez *P. armandii*. Les jeunes pousses portent une pruine glauque caractéristique. Les feuilles sont longues et courbées à la base. Les cônes sont longs et courbés avec des écailles bombées.

Thierry LAMANT
Animateur du réseau arboreta
ONF, Conservatoire génétique des arbres forestiers
Olivet (45)
thierry.lamant@onf.fr



T. Lamant, ONF-CGAF

Rameaux et fleurs mâles de Pinus koraiensis (Les Barres, 45)



T. Lamant, ONF-CGAF

Cônes de Pinus parviflora (Les Barres, 45)



T. Lamant, ONF-CGAF

Rameaux de Pinus wallichiana (Les Barres, 45)



T. Lamant, ONF-CGAF

Rameau de Pinus peuce (Forêt Verte, 76)

Remerciements

à Frédéric Bauny, Georges Callen, Raymond Durand, et au personnel des arboreta nationaux des Barres et de Chèvreloup.

Bibliographie

CALLEN, G., 1977. Les conifères cultivés en Europe. Vol. 1 & 2, Baillère, Paris : 903 pp

FARJON, A., 1998. World checklist and bibliography of conifers. Royal Botanic gardens, Kew : 298 pp

FARJON A., PEREZ de la ROSA J., STYLES B.T., 1997. A field guide to the pines of Mexico and Central America. Royal Botanic gardens, Kew & University of Oxford : 147 pp

LIGO F., NAN L., ELIAS T.S., MILL R.R., 1999. In Flora of China, Vol.4. Harvard University : www.efloras.org

RUSHFORTH K., 2000. Photo-guide des arbres d'Europe. Delachaux et Niestlé, Paris : 1328 pp



T. Lamant, ONF-CGAF

Rameau de Pinus cembra (Le Montenvers, 74)

à suivre
n° 11 - hiver 2006

Prochain dossier : expertise sécheresse et canicule 2003

parution : février 2006

Ce prochain dossier restituera l'essentiel d'une importante expertise scientifique franco-allemande menée après la sécheresse et la canicule 2003, pour mieux comprendre ces phénomènes climatiques, et répondre aux questions des gestionnaires.

Retrouvez *RenDez-Vous techniques* sur intraforêt

Tous les textes de ce numéro sont accessibles au format PDF dans la rubrique qui lui est désormais consacrée dans le portail de la direction technique (Recherche et développement/Documentation technique). Accès direct à partir du sommaire.

Pour rechercher un article particulier, utilisez le moteur de recherche de la base documentaire



Si vous désirez* nous soumettre des articles, *prenez contact avec nous :

ONF - Département recherche
Christine Micheneau
Tél. : 01 60 74 92 25
Courriel : rdvt@onf.fr

Pour* se procurer *RDV techniques :

ONF - Documentation technique
Boulevard de Constance
77300 Fontainebleau
Tél. : 01 60 74 92 24 - Fax 01 64 22 49 73
Courriel : dtech-documentation@onf.fr



Office National des Forêts

ISSN : 1763-6442
Prix : 10 €