

EFFET DE LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE ET DES ÉVÉNEMENTS EXTRÊMES SUR LA CROISSANCE D'*ABIES ALBA*, *PICEA ABIES* ET *PINUS SYLVESTRIS* EN CLIMAT TEMPÉRÉ FRANÇAIS

FRANÇOIS LEBOURGEOIS – CYRILLE B.K. RATHGEBER – ERWIN ULRICH

Depuis une vingtaine d'années, de nombreuses études ont montré que des conditions climatiques exceptionnelles (sécheresses, froids intenses, etc.) pouvaient entraîner des pertes notables de vitalité des peuplements forestiers (voire des mortalités), particulièrement chez les résineux comme le Sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) (Becker, 1989 ; Bert, 1993 ; Micaux, 2008 ; Thomas *et al.*, 2002), l'Épicéa commun (*Picea abies* Karst.) (Becker *et al.*, 1995) ou encore le Pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) (Bigler *et al.*, 2006 ; Le Meignen et Micas, 2008 ; Pichler et Oberhuber, 2007). En raison du réchauffement important observé en Europe et en France (Lebourgeois *et al.*, 2001 ; Moisselin *et al.*, 2002) et des prévisions quant aux extrêmes (Planton *et al.*, 2008), la question de la réponse des essences forestières au climat et à ses variations est devenue un enjeu majeur de la communauté scientifique et forestière (Bréda *et al.*, 2006). De plus, étant donné que les changements devraient affecter différemment les régions françaises (Déqué, 2007), il apparaît de plus en plus important de mieux cerner la variabilité spatiale des réponses, c'est-à-dire de considérer des gradients climatiques les plus vastes possibles. Il apparaît également crucial de bien considérer les conditions locales de croissance des peuplements. En effet, différents travaux ont montré que celles-ci pouvaient tamponner ou au contraire fortement aggraver les effets des conditions mésoclimatiques (Desplanque *et al.*, 1999 ; Leal *et al.*, 2007 ; Rolland *et al.*, 2000 ; Weber *et al.*, 2007). Pour cela, les réseaux forestiers d'observation à long terme sont des outils indispensables. En France, le réseau RENECOFOR représente le réseau le plus complet pour répondre à ces questions (Ulrich, 1995). Les données de ce réseau ont déjà été utilisées pour mieux cerner le déterminisme climatique de la croissance des trois espèces feuillues majeures françaises : Hêtre, Chênes sessile et pédonculé (Lebourgeois, 2005, 2006a ; Lebourgeois *et al.*, 2005). Plus récemment, une analyse sur les conifères a été publiée (Lebourgeois, 2006b, 2007). Cette analyse, menée sur 5 pessières et 6 sapinières, a permis d'apporter des éléments d'information quant à la sensibilité différente des deux essences en contexte montagnard mais n'a pas permis de préciser l'importance des conditions locales [altitude et réserve utile maximale en eau du sol (RUM)] sur la sensibilité de la réponse. Afin de répondre à cette question, une nouvelle analyse a donc été entreprise en élargissant l'échantillonnage à 8 nouveaux peuplements (3 pessières et 5 sapinières) de façon à couvrir une gamme plus large de conditions stationnelles. Parmi les cinq autres espèces de conifères du réseau, seules les pineraies sylvestres couvrent une gamme de situations écologiques suffisamment large et représentent un nombre suffisant de peuplements (14 sites) pour pouvoir être étudié par une approche dendroclimatologique. L'intérêt d'une telle étude réside dans le fait que les quelques travaux menés sur cette essence ont été réalisés essentiellement en contexte méditerranéen (Tessier, 1986, 1989 ; Venne-

tier *et al.*, 2005) et qu'il n'existe donc actuellement aucune référence dans d'autres contextes pédoclimatiques. De plus, à la suite de la canicule de 2003, des symptômes alarmants de dépérissement ont été observés sur cette essence pourtant réputée résistante à la sécheresse (Bigler *et al.*, 2006 ; Dobbertin *et al.*, 2005 ; Rebetz et Dobbertin, 2004). Face à ce constat, il nous est donc apparu important d'entreprendre une analyse sur le Pin sylvestre afin de dégager les modèles de réponse au climat et l'effet des conditions écologiques locales.

Cet article présente les résultats des analyses dendroclimatologiques menées sur 8 pessières (239 arbres), 11 sapinières (328) et 14 pineraies sylvestres (419) du réseau RENECOFOR. Les 33 peuplements (985 arbres au total) couvrent une vaste gamme de conditions pédoclimatiques allant des stations à faibles réserves utiles maximales en eau du sol (RUM) sous climat océanique chaud et sec des régions Centre et Pays-de-la-Loire aux stations d'altitude froides et humides des Alpes. Les trois espèces étudiées présentant des comportements écophysologiques différents vis-à-vis notamment de la sécheresse et du froid (Becker, 1970 ; Guehl, 1985), nous avons émis l'hypothèse que ces différences devaient correspondre à des sensibilités au climat contrastées avec des interactions différentes avec les conditions écologiques locales. Pour mettre en évidence les périodes et les facteurs clés expliquant la variabilité moyenne de la croissance radiale sur le long terme, nous avons utilisé la technique des fonctions de réponse largement éprouvée en dendroclimatologie (Guiot, 1991). Si ces techniques permettent de dégager les facteurs climatiques majeurs expliquant la variabilité moyenne de croissance radiale, elles ne permettent pas une analyse des variations brusques liées à des événements climatiques moins fréquents mais extrêmes. Ainsi, afin d'apporter des éléments de réponse quant aux seuils de réponse à ces aléas extrêmes (Desplanque *et al.*, 1999), nous avons également analysé les changements brusques de croissance à travers une analyse des années caractéristiques (Schwein-gruber *et al.*, 1990). Enfin, même si les différentes phases de mise en place du cerne ne peuvent être étudiées avec précision qu'à partir d'un suivi à l'échelle intra-annuelle de l'activité cambiale et de la formation du xylème (Rossi *et al.*, 2007), une analyse séparée du bois initial et du bois final donne des indications utiles pour mieux cerner les facteurs clés expliquant l'anatomie du bois (Lebourgeois, 2000 ; Miina, 2000) et donc certaines propriétés anatomiques. Des analyses séparées ont donc été menées sur ces deux compartiments du cerne.

Les objectifs de cette étude sont donc :

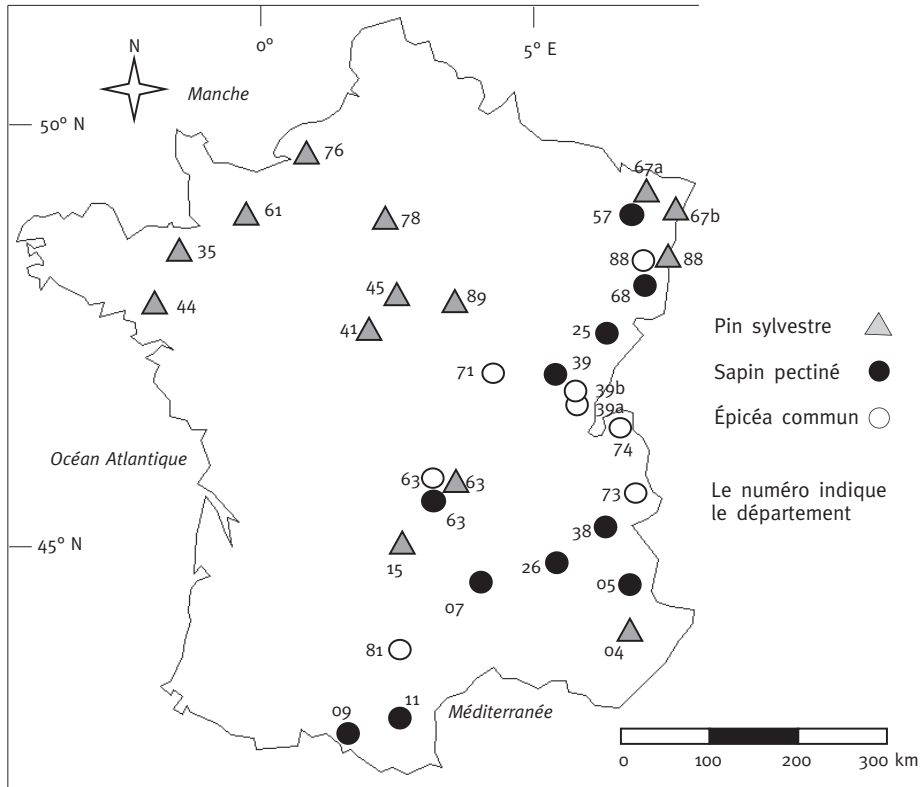
- de définir les principaux paramètres climatiques modulant la croissance radiale du Sapin pectiné, de l'Épicéa commun et du Pin sylvestre,
- de mettre en évidence les effets de l'altitude et de la RUM sur la sensibilité au climat,
- de comparer la réponse des trois essences.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Caractéristiques des peuplements

Les 33 peuplements ont été échantillonnés entre 42,5° et 49,2° N et 1,5° W et 7,4° E (figure 1, ci-contre p. 9). Ils sont issus de régénération naturelle (les sapinières et la moitié des pessières) ou de plantations (la majorité des pineraies). Six des huit pessières sont des peuplements de l'étage montagnard "supérieur" (altitude moyenne : 1 142 m) avec un climat humide et froid (tableau I, pp. 10-11). Les deux autres (EPC 71 et 63) correspondent à des conditions plus sèches et des hivers plus doux. Pour les pessières, la disponibilité locale en eau, appréhendée à travers le calcul de la réserve utile maximale en eau du sol (RUM en mm) (Brêthes *et al.*, 1997 ; Lebourgeois, 2007), sépare un groupe de sites plutôt "secs" (EPC 39a, 81 et 88 ; moyenne des RUM : 76 mm) et un groupe de stations "humides" (moyenne des RUM : 127 mm). Huit des onze sapi-

FIGURE 1 LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE DES 33 PEUPEMENTS DU RÉSEAU RENECOFOR



nières poussent également sous climat montagnard froid et humide à une altitude moyenne de 1 125 m et bénéficient d'une moyenne de RUM assez élevée (120 mm). Les trois autres sapinières (SP 39, 57 et 68) sont des peuplements du montagnard inférieur (altitude moyenne : 571 m) sur stations "sèches" (RUM : 71 mm). Les pineraies correspondent essentiellement à des peuplements de plaine sur stations mésophiles acides dans la partie nord de la France. Les 14 pineraies se répartissent le long du gradient ouest-est. Pour huit peuplements, le climat est plutôt sec (précipitations annuelles comprises entre 650 et 750 mm/an) avec des hivers doux et des étés secs. Les six autres sites bénéficient de conditions plus humides (800 à 1 600 mm/an) avec des hivers plus froids et des étés plus frais.

Mesures, standardisation et analyses de relations cerne-climat

Dans chaque peuplement, entre 28 et 30 arbres dominants ont été mesurés (985 arbres au total) et carottés à cœur à 1,30 m à l'aide d'une tarière de Pressler (1 carotte par arbre). Les 71 091 cernes correspondants ont été mesurés avec une précision de 1/100 de mm à l'aide d'un système vidéo-informatisé spécifique (Becker, non publié). Dans chaque cerne, la largeur du bois initial et du bois final a été mesurée séparément (distinction selon des critères de couleur). Pour l'interdatation, les années de croissances extrêmes (ou caractéristiques) ont été calculées selon la méthode développée par Becker (1989) et largement utilisée depuis (Bert, 1993 ; Bréda et Badeau, 2008 ; Desplanque *et al.*, 1999 ; Lebourgeois, 2000 ; Lebourgeois *et al.*, 2004 ; Lebourgeois *et al.*, 2005). Ces années correspondent aux dates pour lesquelles au moins 75 % des

Caractéristiques des 33 peuplements étudiés

TABLEAU I

Site	Latitude	Longitude	N	Âge	Alt. (m)	Pente (%)	Expo.	Type de sol (Référentiel français)	RUM (mm)	Précipitation (mm)		Température (°C)		
										année	été*	année	janvier	juillet
73	45°35'12" N	6°47'23" E	29	185 (12)/209	1 700	40	NW	Alocrisol typique	118	971	223	9	-0,2	18,2
39b	46°31'00" N	6°03'44" E	30	106 (6)/262	1 210	8	W	Organosol calcique	109	2 054	491	4,9	0,1	13,1
74	46°13'42" N	6°20'58" E	30	73 (5)/85	1 200	20	W	Luvisol-rédoxisol	130	970	239	9,8	1	19,3
39a	46°34'47" N	5°52'37" E	30	58 (3)/69	970	10	SE	Calcisol	65	2 054	491	4,9	0,1	13,1
63	45°45'20" N	2°57'58" E	30	28 (1)/31	950	0	/	Brunisol mésosaturé	130	591	189	10,9	3,1	19,3
81	43°26'31" N	2°26'05" E	30	42 (3)/49	820	24	N	Podzosol ocrique	75	1 411	214	8,9	1,8	16,9
88	48°14'02" N	7°06'14" E	30	89 (2)/92	660	20	SW	Alocrisol typique	88	1 696	369	7,8	0,7	16,3
71	47°00'33" N	4°07'06" E	30	48 (2)/50	600	20	SE	Podzosol ocrique	149	813	189	10,3	2,8	18,3
5	44°29'25" N	6°27'33" E	30	99 (14)/152	1 360	30	NE	Calcisol	190	716	167	10	1,2	19,3
7	44°42'36" N	3°57'57" E	30	80 (3)/86	1 300	20	W	Podzosol ocrique	92	1 103	228	5,8	-1,6	14,4
26	44°56'53" N	5°19'50" E	30	120 (17)/157	1 150	7	W	Calcisol	110	1 523	314	8	0,2	16,7
38	45°25'17" N	6°07'53" E	30	94 (28)/162	1 100	35	E	Alocrisol typique	100	970	226	10,8	1,8	19,7
9	42°51'52" N	1°20'43" E	29	168 (4)/183	1 100	66	NW	Podzosol ocrique	80	1 610	346	11,8	5,1	19,4
63	45°26'51" N	3°31'39" E	29	100 (14)/225	1 040	25	SW	Alocrisol typique	125	591	189	10,9	3,1	19,3
25	46°58'34" N	6°27'42" E	30	81 (32)/153	1 000	10	NW	Calcisol	120	1 469	391	7,5	-0,6	15,8
11	42°52'02" N	2°06'04" E	30	80 (3)/85	950	40	N	Calcisol	140	934	181	8,9	2,5	16,7
68	47°56'01" N	7°07'31" E	30	104 (6)/114	680	45	NW	Brunisol oligosaturé	60	1 566	336	8,1	-0,3	16,8
39	46°50'33" N	5°47'18" E	30	41 (3)/47	560	7	SE	Calcisol	50	1 222	284	10,6	2,3	19,5
57	48°56'36" N	7°08'02" E	30	54 (4)/60	400	20	NW	Alocrisol typique	103	859	231	9	1,2	17,8

Epicea commun

Sapin pectiné

Caractéristiques des 33 peuplements étudiés (suite)

Site	Latitude	Longitude	N	Âge	Alt. (m)	Pente (%)	Expo.	Type de sol (Référentiel français)	RUM (mm)	Précipitation (mm)		Température (°C)		
										année	été*	année	janvier	juillet
61	48°36'54" N	0°30'25" W	30	43 (2)/46	260	4	/	Brunisol oligosaturé	120	735	137	10,4	3,8	17,7
76	49°27'14" N	0°44'53" E	29	43 (3)/49	70	0	/	Podzsol meuble	100	778	171	9,9	3,2	17,1
35	48°12'04" N	1°33'17" W	30	41 (10)/56	80	0	/	Luvisol-rédoxisol	150	626	127	11,4	5,1	18,3
78	48°41'37" N	1°43'58" E	30	43 (2)/45	170	3	/	Podzsol ocrique	70	673	164	10,3	3	18
44	47°32'24" N	1°48'05" W	30	56 (3)/60	38	0	/	Luvisol-rédoxisol	170	787	136	11,8	5,3	19
41	47°39'14" N	2°05'41" E	30	39 (1)/40	140	0	/	Podzsol ocrique	100	637	145	10,6	3,1	18,5
45	47°49'12" N	2°26'04" E	30	53 (3)/61	145	0	/	Planosol typique	140	637	145	10,6	3,1	18,5
89	47°56'57" N	3°43'05" E	30	58 (9)/76	120	0	/	Podzsol ocrique	100	657	165	10,8	2,8	19,1
15	44°51'40" N	3°03'30" E	30	60 (2)/64	1 000	5	/	Alocrisol typique	85	1 567	287	7,3	0,5	15,1
63	45°24'21" N	3°41'44" E	30	93 (15)/143	750	25	NW	Brunisol oligosaturé	75	591	189	10,9	3,1	19,3
4	44°01'30" N	6°40'16" E	30	69 (17)/121	1 670	20	S	Brunisol mésosaturé	50	736	163	12,4	4	24,9
67a	48°51'01" N	7°42'39" E	30	65 (6)/70	175	0	/	Podzsol ocrique	80	1 243	273	8,8	1,3	17,3
67b	48°55'53" N	7°26'40" E	30	64 (2)/68	290	5	/	Podzsol ocrique	60	859	231	9	1,2	17,8
88	48°13'17" N	6°41'45" E	30	66 (4)/76	500	2	/	Podzsol ocrique	60	1 112	274	9,1	1,4	17,5

Pin sylvestre

N = nombre d'arbres.

Âge en 1994 (moyenne (écart-type)/max).

RUM = réserve utile maximale en eau du sol (en mm) calculée selon la texture des horizons, leur épaisseur et leur charge en éléments grossiers (épaisseur moyenne prise en compte 110 cm).

Moyennes climatiques sur la période 1961-1990. Les peuplements ont été triés selon l'altitude (pour l'Épicéa commun et le Sapin pectiné) et la longitude pour le Pin sylvestre. * de juin à août.

arbres du peuplement ont présenté une variation relative de croissance d'au moins 10 % par rapport à l'année précédente. L'année sera positive en cas de croissance plus forte et négative sinon. La sensibilité moyenne (*mean sensitivity*, MS) et l'autocorrélation d'ordre 1 (AC) ont également été calculées pour chaque arbre et compartiment du cerne et moyennées par peuplement. Ces deux paramètres statistiques donnent une indication sur le niveau de la variabilité inter-annuelle de la croissance (pour MS) et sur la dépendance de la croissance de l'année n par rapport à celle de l'année précédente (pour AC) (Fritts, 1971) (tableau II, p. 13). Par la suite, les chronologies individuelles ont été standardisées à l'aide du programme ARSTAN v6.05P selon le processus classique de la double pondération afin d'éliminer les signaux non liés au climat (Cook, 1987) (figure 2, ci-dessous). Dans une dernière étape, les chronologies standardisées ont

FIGURE 2 **EXEMPLE DE STANDARDISATION D'UNE SÉRIE CHRONOLOGIQUE**
PAR UN PROCESSUS DE DOUBLE AJUSTEMENT
 (Programme ARSTAN)

- A : série brute (en mm) et premier ajustement (une droite dans ce cas, ronds blancs) éliminant le signal basse fréquence.
- B : série d'indices issus du premier ajustement et second ajustement (polynôme d'ordre 3, ronds blancs) permettant d'éliminer le signal moyenne fréquence.
- C : série standardisée stationnaire montrant le signal haute fréquence.

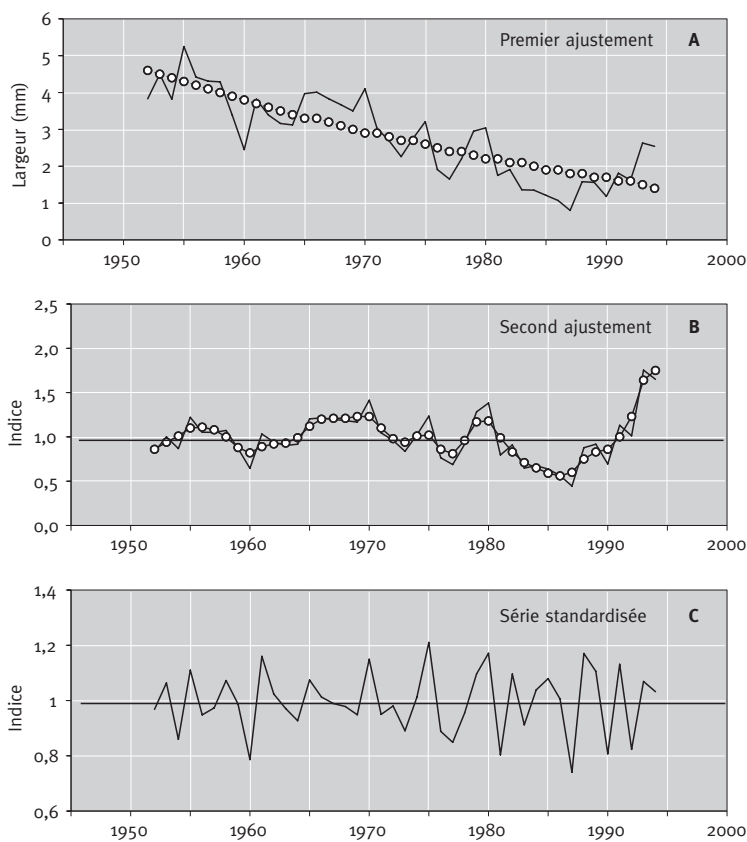


TABLEAU II Caractéristiques moyennes des cernes des 33 peuplements étudiés

		Cerne complet	Bois initial	Bois final
Épicéa (8) 239 arbres 79 ans (58-185)	LC (mm)	3,06 (1,11-5,28)	2,21 (0,81-3,53)	0,85 (0,30-1,75)
	MS	0,201 (0,173-0,264)	0,245 (0,209-0,296)	0,311 (0,238-0,418)
	AC	0,704 (0,566-0,826)	0,657 (0,518-0,808)	0,438 (0,353-0,568)
Sapin (11) 328 arbres 93 ans (41-168)	LC (mm)	2,87 (0,97-4,55)	1,71 (0,53-2,98)	1,35 (0,44-2,83)
	MS	0,202 (0,163-0,272)	0,248 (0,208-0,331)	0,302 (0,258-0,342)
	AC	0,705 (0,638-0,788)	0,632 (0,566-0,751)	0,537 (0,391-0,666)
Pin sylvestre (14) 419 arbres 57 ans (41 à 93)	LC (mm)	2,65 (1,33-3,64)	1,66 (0,86-2,28)	0,99 (0,47-1,41)
	MS	0,229 (0,173-0,327)	0,259 (0,201-0,327)	0,345 (0,266-0,505)
	AC	0,670 (0,540-0,819)	0,665 (0,537-0,797)	0,434 (0,262-0,523)

Le chiffre en gras correspond au nombre de peuplements. Les calculs correspondent aux données brutes et ont été effectués, dans la majorité des cas, sur la période 1949-1994.

LC (mm) = largeur du compartiment en mm. MS = sensibilité moyenne. AC = autocorrélation d'ordre 1.

Pour chaque espèce, les valeurs entre parenthèses correspondent aux valeurs moyennes la plus faible et la plus élevée observées entre les peuplements.

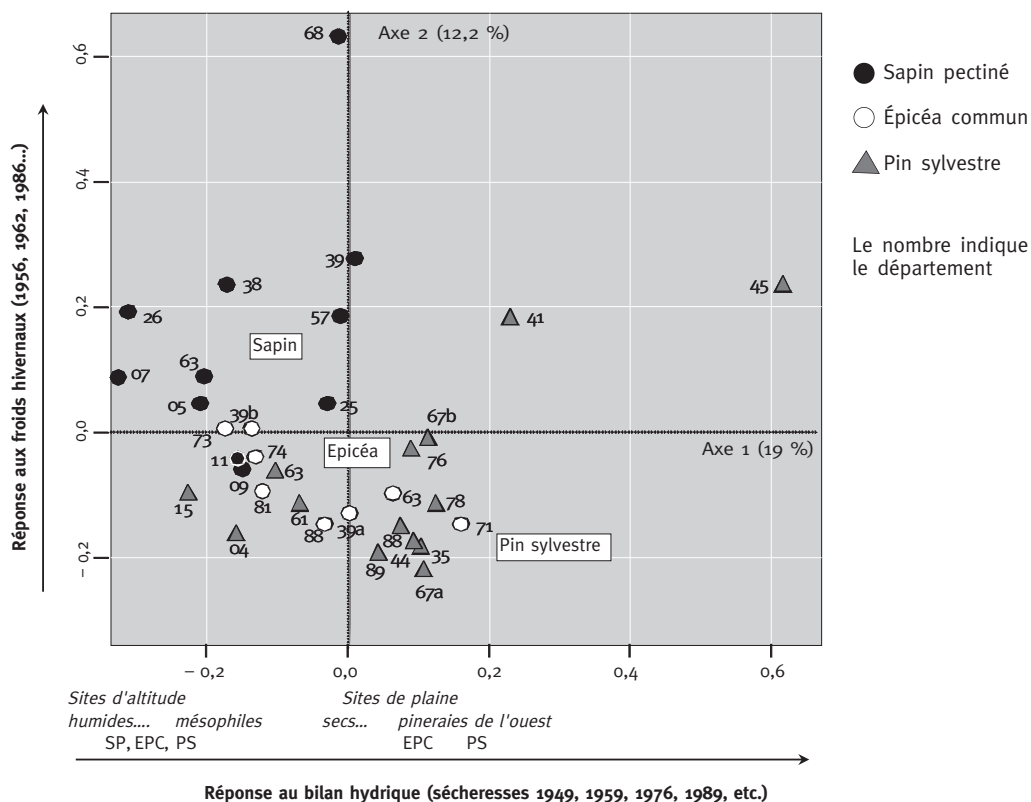
été moyennées pour chacun des 33 peuplements et les deux compartiments du cerne. Ce sont les *standard chronology* (STD) issues du programme ARSTAN (Cook et Peters, 1981) qui ont été utilisées pour analyser les relations cerne-climat (Guiot, 1991).

Les relations cerne-climat ont été calculées dans la majorité des cas sur la période 1949-1994 à partir de ces 66 séries moyennes et de données météorologiques issues de 27 stations du réseau Météo-France. Les stations ont été soigneusement sélectionnées de façon à être les plus représentatives possibles des conditions des peuplements forestiers. Ainsi, la distance entre les peuplements forestiers et ces stations a été en moyenne de 15 km. Pour l'altitude, la différence moyenne a été de 260 m. Pour chaque peuplement, les corrélations entre les cernes et les données climatiques ont été calculées à l'aide du logiciel DENDROCLIM2002 (Biondi et Waikul, 2004). Les paramètres climatiques mensuels ont été considérés de septembre de l'année $n - 1$ à août de l'année n . Les analyses ont été menées en utilisant 12 variables de précipitations et 12 variables de températures maximales ou minimales. Des analyses en composantes principales suivies de classifications ascendantes hiérarchiques ont été réalisées sur les années caractéristiques et les coefficients de corrélation *bootstrapped* en utilisant le logiciel SPlus 2000 (Data Analysis Products Division, MathSoft, Seattle, WA) de façon à mettre en évidence les similitudes de réponse au climat entre espèces et sites.

RÉSULTATS

Les deux premiers axes de l'analyse en composantes principales réalisée sur les années caractéristiques expliquent respectivement 19 % et 12,2 % de la variance totale (figure 3, p. 14). Les trois espèces sont assez bien discriminées le long de l'axe 1. Ainsi, le Sapin et l'Épicéa sont majoritairement dans le pôle négatif et le Pin sylvestre du côté positif. Pour chaque espèce, l'axe 1 discrimine les peuplements humides d'altitude des peuplements d'altitude plus faibles ou plus secs (régime pluviométrique plus faible ou plus faible RUM). Par exemple, pour le Sapin, les coordonnées les plus négatives correspondent aux sites "humides" (RUM moyenne : 130 mm) d'altitude supérieure à 1 150 m (SP05, SP07, SP26) alors que les sites "secs" (RUM moyenne : 70 mm) d'altitude plus faible (400 à 680 m) ont des valeurs plus centrales (SP39, SP57, SP68) (tableau I, pp. 10-11). Pour les pineraies, l'axe 1 sépare les pineraies de plaine sous climat océa-

FIGURE 3 PLAN FACTORIEL 1 x 2 DE L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES RÉALISÉE SUR LES ANNÉES CARACTÉRISTIQUES (cerne complet) POUR LA PÉRIODE 1949-1994



nique plutôt chaud et sec de l'Ouest de la France (valeurs les plus positives pour PS41 et PS45) des peuplements d'altitudes plus élevées (750 à 1 670 m) sous climat plus humide mais sur stations plus sèches (RUM moyenne : 70 mm) (valeurs les plus négatives pour PS15, PS04 et PS63). La répartition des peuplements le long de l'axe 1 correspond à une réponse au bilan hydrique et plus particulièrement aux épisodes de sécheresses exceptionnelles (1949, 1976, 1989, 1991...). Ainsi, plus les conditions locales de xéricité augmentent et plus la réponse à la sécheresse est importante (tableau III, p. 15). Pour les pineraies, la réponse aux sécheresses est plus fréquente en plaine (années 1959 et 1969 en plus des années déjà mentionnées). Néanmoins, les variations de croissance ont été plus prononcées pour les sites d'altitude secs pour les sécheresses des années 1976 et 1991. Généralement, ces années sèches correspondent à des déficits pluviométriques de fin de printemps et du début d'été (mai à juillet) d'au moins 40 à 50 % par rapport à la normale 1961-1990 (Lebourgeois, 2007 ; Lebourgeois *et al.*, 2005). Parmi ces années sèches, une diminution commune n'a été observée que pour l'année 1976 (tableau III, p. 15) connue au niveau européen et français comme une des sécheresses les plus intenses du XX^e siècle (Bréda *et al.*, 2004). En 1976, le déficit pluviométrique de mai à juillet a été en moyenne de 60 % par rapport aux conditions normales.

TABLEAU III

Années caractéristiques calculées pour le cerne complet

Pour chaque année, le tableau présente la variation relative de croissance radiale exprimée en % (voir texte pour détails). Pour chaque espèce, les regroupements ont été définis suite à l'analyse des résultats de l'analyse en composantes principales suivie de la classification ascendante hiérarchique effectuée sur les années caractéristiques (axes 1 et 2) (non montrée).

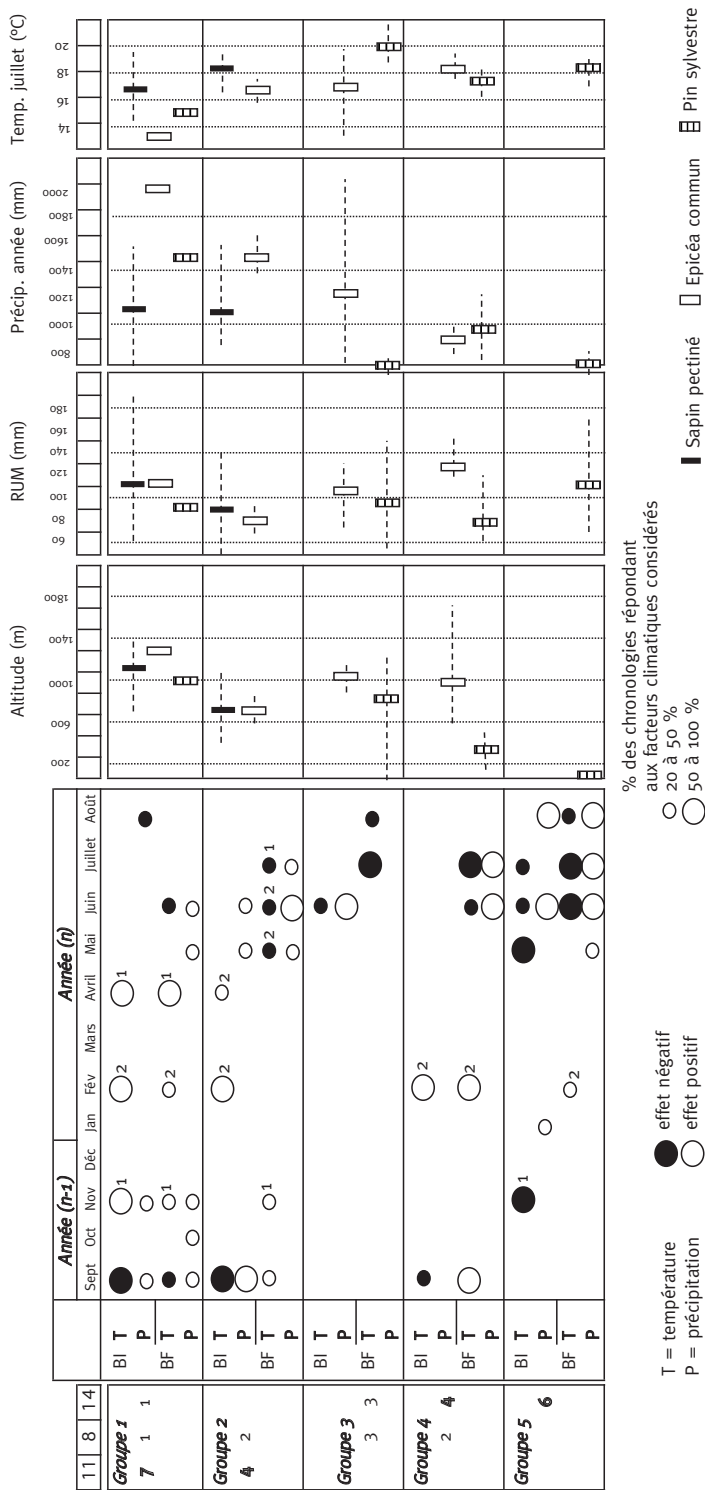
Pour chaque groupe, seules les années pour lesquelles au moins 50 % des peuplements ont présenté un comportement particulier sont présentées dans ce tableau.

Les années en gras indiquent des années sèches et les années soulignées des années à hiver froid. L'altitude, la réserve utile maximale (RUM) et les conditions climatiques moyennes (période 1961-1990) sont présentées. Pour le Sapin, l'analyse a séparé les sites selon l'altitude (plus ou moins de 1 000 m) et le niveau de la RUM (plus ou moins de 100 m). Pour le Pin sylvestre, les peuplements de plaine (*) sous climat océanique (régions Ouest et Centre) se séparent nettement des pineraies plus humides d'altitude.

Espèce	Épicéa	Sapin		Pin sylvestre	
Alt. (m)	1 014	802	1 105	128*	731
RUM (mm)	108	99	113	119	68
P année (mm)	1 320	1 219	1 078	691	1 018
T Janvier (°C)	1,2	2,1	0,7	3,7	1,9
T Juillet (°C)	16,8	17,8	17,7	18,3	18,2
Nb peuplements	8	5	6	8	6
1949	- 14				- 33
1950			- 19		26
1951		43			43
1952		- 20			- 29
1954					
1955	31		35		
<u>1956</u>			- 33		
1957					30
1958					
1959				- 40	
1960				30	
1961		39			
1962	- 27	- 27	- 28		- 31
1963	40			33	
1964			42	- 35	
1965			- 21	39	
1966		29		56	
1969			34	- 18	
1970			- 22		
1971				26	
1972					
1973	- 25			- 17	
1975					
1976	- 28	- 36	- 17	- 26	- 32
1977		78	37		
1978					
1980					46
1982					10
1983					- 11
1984			- 26		17
1985			34		
<u>1986</u>	- 26	- 31	- 33		
1987		26	31		
1988		31			
1989		- 20		- 23	
1991				- 19	- 27
1992					33
1993	48		33		
1994				39	

FIGURE 4 SYNTHÈSE POUR LES RÉSINEUX DES RÉPONSES AU CLIMAT POUR LE BOIS INITIAL (BI) ET LE BOIS FINAL (BF) POUR CHAQUE GROUPE DÉFINI SUITE À L'ACP-CAH EFFECTUÉE SUR LES CORRÉLATIONS BOOTSTRAPPED CALCULÉES SUR LE BI

Pour chaque groupe et chaque espèce, la valeur moyenne (barre verticale) et la gamme de variation (ligne pointillée) pour la RUM (mm), l'altitude (m), les précipitations annuelles (mm/an) et la température moyenne de juillet (°C) sont précisées. Les chiffres sous les espèces et les groupes correspondent au nombre de peuplements. Pour les températures (T), les ronds sans numéro indiquent que ce sont les températures maximales (Tmax) qui influencent exclusivement la croissance des peuplements. Le chiffre 1 indique que les corrélations ont été significatives seulement avec les températures minimales (Tmin). Enfin, le chiffre 2 indique qu'il n'y a pas de réponse commune et donc que, selon le peuplement, c'est la température minimale ou la température maximale qui influence la croissance.



La répartition des peuplements le long de l'axe 2 discrimine nettement les sapinières des pineraies et traduit une réponse aux froids hivernaux. Pour cet axe, les années les plus discriminantes sont les années 1956, 1962 et 1986 caractérisées par des froids intenses en février. Par exemple, pour les deux années les plus froides 1986 et 1956, les températures moyennes minimales de février ont été en moyenne de $-9,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, ce qui correspond à un écart moyen de $-7,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $-13,7\text{ }^{\circ}\text{C}$) par rapport à la normale. Ce sont les sapins qui ont présenté la plus forte sensibilité. Pour les sapinières d'altitude, les réductions de croissance ont été plus fortes à 1 400 m (-36%) qu'à 1 000 m (-26%) (données non montrées).

Concernant la réponse à la variabilité climatique normale, les corrélations ont été plus fréquentes avec la température et ceci pour les trois espèces et les deux compartiments du cerne. Les effets thermiques sont plus souvent liés aux valeurs maximales pour l'Épicéa et le Pin sylvestre et aux valeurs minimales pour le Sapin. Ils correspondent généralement à des corrélations positives durant l'hiver et au début du printemps (les valeurs élevées se traduisant par un cerne large) et négatives durant l'été et l'automne. Pour les pluies, les valeurs élevées durant l'été influencent généralement positivement la croissance radiale. Le plan factoriel 1×2 de l'ACP réalisée à partir des coefficients de corrélations calculées sur le bois initial explique $52,4\%$ de la variance totale. L'ordination des 33 peuplements dans ce plan factoriel définit 5 modèles de réponse au climat (figure 4, ci-contre).

Le groupe 1 lie les sites d'altitude ($> 1\ 000\text{ m}$) sur stations à bonne capacité de stockage de l'eau du sol ($\text{RUM} > 100\text{ mm}$) avec un climat frais et humide. 65% des sapinières et deux peuplements d'altitude d'Épicéa et de Pin sylvestre constituent ce groupe. Pour ces peuplements, le bilan hydrique de septembre de l'année précédente, les températures d'hiver (novembre $n - 1$, février) et de début de printemps (avril) contrôlent la croissance des deux compartiments. Dans ce groupe, la formation du bois final dépend également des pluies du mois d'octobre précédent et de celles du début d'été mais la réponse est plus hétérogène que pour le bois initial.

Les sapinières et les pessières d'altitudes plus faibles ($< 800\text{ m}$) et sur sols à plus faible capacité de stockage de l'eau ($\text{RUM} < 100\text{ mm}$) et sous climat plus chaud forment le second groupe dans lequel la croissance du bois initial dépend aussi des pluies du début d'été. Pour ces peuplements, la formation du bois final est très dépendante du bilan hydrique de mai à juillet (effet positif des pluies et négatif des températures).

Les trois autres groupes séparent les réponses des pessières et des pineraies.

Le groupe 3 correspond aux pessières et aux pineraies mésophiles d'altitude les moins sensibles au climat. Pour ces peuplements, le bilan hydrique de juin puis les températures maximales d'été (juillet et août) sont les facteurs principaux modulant respectivement la croissance du bois initial et du bois final.

Le groupe 4 est constitué essentiellement de pineraies échantillonnées dans le Nord-Est de la France sous climat plus humide (environ $1\ 000\text{ mm/an}$) et pour lesquelles les températures hivernales jouent un rôle majeur pour la formation du bois initial et la sécheresse estivale pour la croissance du bois final. Les deux pessières les plus chaudes et sèches appartiennent à ce groupe.

Enfin, les pineraies de plaine ($< 200\text{ m}$) poussant sous climat océanique chaud et sec ($< 750\text{ mm}$) forment un groupe homogène (groupe 5) dans lequel le bilan hydrique joue un rôle central. Des températures minimales élevées de novembre de l'année précédente et des sécheresses printanières (mai à juin) réduisent la croissance du bois initial tandis que des sécheresses estivales (juin à août) réduisent celle du bois final.

DISCUSSION

Les deux approches présentées ici illustrent une fois encore l'importance des températures hivernales et du bilan hydrique pour la croissance des peuplements forestiers en contexte tempéré et ceci aussi bien pour expliquer les croissances extrêmes que la variabilité normale sur le long terme. Plus précisément, les facteurs les plus discriminants pour la croissance annuelle des trois espèces sont liés au bilan hydrique de l'automne de l'année précédente et à la température de février de l'année en cours. Ces facteurs influencent essentiellement la formation du bois initial. Par la suite, la sécheresse estivale (juin-juillet) joue un rôle central notamment sur la formation du bois final. Les approches développées ici ne permettent pas de préciser les processus physiologiques sous-jacents à ces observations. Le rôle des conditions automnales sur la dynamique saisonnière du stockage des composés carbonés (Barbaroux et Bréda, 2002), sur la croissance racinaire (Riedacker, 1976) ou la formation des bourgeons (Weber *et al.*, 2007) peut expliquer les arrière-effets. Comme la capacité photosynthétique dépend en partie du nombre et de la taille des bourgeons formés annuellement, une modification de ces processus liée à des conditions défavorables peut entraîner des réductions d'assimilation carbonée la saison suivante. De plus, comme les aiguilles restent actives pendant plusieurs années, un tel phénomène peut influencer la croissance pendant une longue période, particulièrement pour le Sapin et l'Épicéa pour lesquels le nombre de générations d'aiguilles sur les branches est très supérieur à celui observé pour le Pin sylvestre (6 à 8 ans contre 2 à 3 ans). Concernant l'effet des températures hivernales, les processus liés à l'augmentation de la photosynthèse hivernale (Guehl, 1985), à l'activité cambiale (Rossi *et al.*, 2007) et au débourrement (Chuine, 2000) ou encore à l'embolie (Cruziat *et al.*, 2002) peuvent être invoqués pour expliquer leurs effets.

Comme cela avait été supposé, l'espèce et les conditions locales modulent fortement les modèles de réponse au climat. Le Pin sylvestre apparaît comme l'essence la moins sensible au froid tandis que, à conditions stationnelles équivalentes, le Sapin apparaît plus thermophile que l'Épicéa pour lequel les froids hivernaux intenses n'ont que très peu d'effet. Les pertes de croissance liées aux froids intenses concernent principalement les sites d'altitude et augmentent quand l'altitude augmente. Concernant la sécheresse, les réductions d'accroissement liées aux déficits hydriques augmentent quand les conditions locales de xéricité augmentent : altitude inférieure à 800 m ou RUM < 100 mm pour le Sapin et l'Épicéa, climat océanique de plaine peu arrosé (environ 700 mm/an) pour le Pin sylvestre.

Pour le Sapin pectiné, le modèle général observé dans notre étude est cohérent avec les observations faites dans les Vosges (Becker, 1989), le Jura (Bert, 1993), les Pyrénées espagnoles (Macias *et al.*, 2006) et les Alpes internes (Desplanque *et al.*, 1998). Pour l'Épicéa commun, l'importance des conditions climatiques durant l'année précédant la mise en place du cerne et l'effet des sécheresses estivales a également été observée pour des sites d'altitudes plus élevées (> 1 400 m) dans le Massif central (Rolland et Lempérière, 2004) et dans les Alpes (Desplanque *et al.*, 1998). Enfin, pour le Pin sylvestre, le rôle essentiel du bilan hydrique estival sur la formation du cerne est en accord avec le modèle de réponse observé dans de nombreuses forêts méditerranéennes (Andreu *et al.*, 2007 ; Gutiérrez, 1989 ; Tessier, 1989) et dans des vallées alpines de Suisse ou d'Autriche (Bigler *et al.*, 2006 ; Oberhuber et Kofler, 2002 ; Rebetez et Dobbertin, 2004 ; Weber *et al.*, 2007).

Dans le contexte du changement climatique, il est important de savoir si les conditions vont devenir plus ou moins favorables à la croissance. L'approche développée ici permet d'identifier les facteurs et les périodes clés qui ont été ou sont actuellement les plus influents sur la croissance. Cependant, les changements moyens ou de fréquence des années extrêmes prédits dans le futur (Planton *et al.*, 2008) pourraient modifier la dynamique de croissance des essences plus

ou moins brutalement en faveur des espèces les moins sensibles (Bréda et Badeau, 2008). Ainsi, le problème de la “stabilité temporelle” de la réponse des essences au climat est apparu récemment dans la littérature scientifique (Büntgen *et al.*, 2008 ; D’Arrigo *et al.*, 2008). Quelques études ont montré que la sensibilité des essences a varié fortement au cours des dernières décennies (Andreu *et al.*, 2007 ; Wilson et Elling, 2004) et d’autres que les relations n’ont pas varié (Büntgen *et al.*, 2007 ; Helama *et al.*, 2004 ; Miina, 2000). Par exemple, dans la péninsule espagnole, Andreu *et al.* (2007) ont mis en évidence une homogénéisation de la réponse de trois Pins (noir, sylvestre, à crochets) en relation avec l’augmentation des conditions d’aridité observées en fin d’été. Le manque de données climatiques sur des très longues périodes (depuis le début du XX^e siècle) et l’arrêt de nos chronologies en 1994 ne nous ont pas permis de tester cette divergence dans les peuplements étudiés.

Dans le futur, une augmentation des pluies automnales et hivernales et un radoucissement hivernal (Déqué, 2007) pourrait donc influencer positivement la mise en place du bois initial, ceci particulièrement pour les sapinières et pour celles poussant aux altitudes plus élevées. Cependant, une augmentation de la sécheresse en été pourrait compenser ces effets et aboutir à des pertes de croissance (en affectant plus fortement la largeur du bois final). À plus ou moins long terme, ceci pourrait donc influencer les propriétés mécaniques du bois (Bergès *et al.*, 2000 ; Lebourgeois et Becker, 1996) et ceci pour les trois essences étudiées. Concernant les stations “à risque”, notre étude suggère donc un seuil autour de 100 mm pour la RUM et 800 m pour l’altitude pour le Sapin et l’Épicéa. Ces seuils sont par ailleurs très cohérents avec les conditions écologiques pour lesquelles des dépérissements, notamment de Sapin, ont été observés suite aux années sèches 2003 et 2004 (Le Meignen et Micas, 2008 ; Micaux, 2008). Pour le Pin sylvestre, ce sont les pineraies de l’Ouest de la France qui apparaissent les plus “à risque” si le climat devient plus chaud.

En conclusion, même s’il est impossible de prédire avec certitude la dynamique future des écosystèmes forestiers dans le cadre de l’augmentation envisagée de la fréquence et de l’intensité des sécheresses, cette approche dendroécologique a permis d’apporter des éléments de réponse quant au choix des stations à privilégier pour minimiser les risques de dysfonctionnement futur.

François LEBOURGEOIS
UMR1092
Laboratoire d’Étude des Ressources Forêt Bois
(LERFoB)
AgroParisTech ENGREF
14 rue Girardet - CS 14216
F-54042 NANCY CEDEX
(francois.lebourgeois@agroparistech.fr)

Cyrille B. K. RATHGEBER
UMR1092
Laboratoire d’Étude des Ressources Forêt Bois
(LERFoB)
Centre INRA de Nancy
F-54280 CHAMPENOUX
(rathgeber@nancy.inra.fr)

Erwin ULRICH
Département Recherche et Développement
OFFICE NATIONAL DES FORÊTS
Boulevard de Constance
F-77300 FONTAINEBLEAU
(erwin.ulrich@onf.fr)

BIBLIOGRAPHIE

- ANDREU (L.), GUTIERREZ (E.), MACIAS (M.), RIBAS (M.), BOSCH (O.), CAMARERO (J.J.). — Climate increases regional tree-growth variability in Iberian pine forests. — *Global Change Biology*, vol. 13, n° 4, 2007, pp. 804-815.
- BARBAROUX (C.), BRÉDA (N.). — Contrasting distribution and seasonal dynamics of carbohydrate reserves in stem wood of adult ring-porous sessile oak and diffuse-porous beech trees. — *Tree Physiology*, vol. 22, 2002, pp. 1201-1210.
- BECKER (M.). — Transpiration et comportement vis-à-vis de la sécheresse de jeunes plants forestiers (*Abies alba* Mill., *Picea abies* L. Karsten, *Pinus nigra* Arn ssp *laricio* Poirlet, *Pinus strobus* L.). — *Annales des Sciences forestières*, vol. 27, n° 4, 1970, pp. 401-420.
- BECKER (M.). — The role of climate on present and past vitality of silver fir forests in the Vosges mountains of northeastern France. — *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 19, n° 9, 1989, pp. 1110-1117.
- BECKER (M.), BERT (D.), LANDMANN (G.), LÉVY (G.), RAMEAU (J.-C.), ULRICH (E.). — Growth and decline symptoms of silver fir and norway spruce in northeastern France : relation to climate nutrition and silviculture. In: Forest decline and air pollution effects in the French mountains / G. Landmann & M. Bonneau (eds.). — Springer Verlag, 1995. — pp. 120-142.
- BERGÈS (L.), DUPOUEY (J.-L.), FRANÇ (A.). — Long-term changes in wood density and radial growth of *Quercus petraea* Liebl. in northern France since the middle of the nineteenth century. — *Trees*, vol. 14, n° 7, 2000, pp. 398-408.
- BERT (D.). — Impact of ecological factors climatic stresses and pollution on growth and health of silver fir (*Abies alba* Mill.) in the Jura mountains : an ecological and dendrochronological study. — *Acta Oecologica*, vol. 14, n° 2, 1993, pp. 229-246.
- BIGLER (C.), BRAKER (O.U.), BUGMANN (H.), DOBBERTIN (M.), RIGLING (A.). — Drought as an inciting mortality factor in Scots pine stands of the Valais, Switzerland. — *Ecosystems*, vol. 9, n° 3, 2006, pp. 330-343.
- BIONDI (F.), WAIKUL (K.). — Dendroclim2002: a C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. — *Computers and Geosciences*, vol. 30, n° 3, 2004, pp. 303-311.
- BRÉDA (N.), BADEAU (V.). — Forest tree responses to extreme drought and some biotic events: Towards a selection according to hazard tolerance ? — *Comptes rendus Geoscience*, vol. 340, n° 9-10, 2008, pp. 651-662.
- BRÉDA (N.), GRANIER (A.), AUSSENAC (G.). — La Sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysologique et influence sur les arbres forestiers. — *Revue forestière française*, vol. LIII, n° 2, 2004, pp. 109-131.
- BRÉDA (N.), HUC (R.), GRANIER (A.), DREYER (E.). — Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. — *Annals of Forest Science*, vol. 63, n° 6, 2006, pp. 625-644.
- BRÊTHES (A.), ULRICH (E.), LANIER (M.), CLAUSSE (M.), COLOMBET (M.), CURT (T.), DELAHAYE-PANCHOUT (M.), BERMAUX (B.), DOUZON (G.), DUTHY (X.), GUITTON (J.), NOUALS (D.), SAVOIE (J.-M.), SINET (J.-F.), POULIN (F.), MUSCH (J.). — Caractéristiques pédologiques des 102 peuplements du réseau. — Fontainebleau : Office national des forêts - Département des recherches techniques, 1997. — 573 p.
- BÜNTGEN (U.), FRANK (D.C.), KACZKA (R.J.), VERSTEGE (A.), ZWIJACZ-KOZICA (T.), ESPER (J.). — Growth responses to climate in a multi-species tree-ring network in the Western Carpathian Tatra Mountains, Poland and Slovakia. — *Tree Physiology*, vol. 27, n° 5, 2007, pp. 689-702.
- BÜNTGEN (U.), FRANK (D.), WILSON (R.), CARRER (M.), URBINATI (C.). — Testing for tree-ring divergence in the European Alps. — *Global Change Biology*, vol. 14, n° 10, 2008, pp. 2443-2453.
- CHUINE (I.). — A unified model for budburst of trees. — *Journal of Theoretical Biology*, vol. 207, n° 3, 2000, pp. 337-347.
- COOK (E.R.). — The decomposition of tree ring series for environmental studies. — *Tree-ring Bulletin*, vol. 47, n° 1, 1987, pp. 37-59.
- COOK (E.R.), PETERS (K.). — The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. — *Tree-ring Bulletin*, vol. 41, n° 1, 1981, pp. 45-53.
- CRUIZIAT (P.), COCHARD (H.), AMÉGLIO (T.). — Hydraulic architecture of trees: main concepts and results. — *Annals of Forest Science*, vol. 59, n° 7, 2002, pp. 723-752.
- D'ARRIGO (R.), WILSON (R.), LIEPERT (B.), CHERUBINI (P.). — On the 'Divergence Problem' in Northern Forests: A review of the tree-ring evidence and possible causes. — *Global and Planetary Change*, vol. 60, n° 3-4, 2008, pp. 289-305.
- DÉQUÉ (M.). — Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. — *Global and Planetary Change*, vol. 57, n° 1-2, 2007, pp. 16-26.

- DESPLANQUE (C.), ROLLAND (C.), MICHALET (R.). — Dendroécologie comparée du Sapin blanc (*Abies alba*) et de l'Épicéa commun (*Picea abies*) dans une vallée alpine de France. — *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 28, n° 5, 1998, pp. 737-748.
- DESPLANQUE (C.), ROLLAND (C.), SCHWEINGRUBER (F.H.). — Influence of species and abiotic factors on extreme tree ring modulation: *Picea abies* and *Abies alba* in Tarentaise and Maurienne (French Alps). — *Trees*, vol. 13, n° 4, 1999, pp. 218-227.
- DOBBERTIN (M.), MAYER (P.), WOHLGEMÜTH (T.), FELDMEYER-CHRISTE (E.), GRAF (U.), ZIMMERMANN (N.E.), RIGLING (A.). — The decline of *Pinus sylvestris* L. forests in the swiss Rhone Valley - a result of drought stress? — *Phyton-Annales Rei Botanicae*, vol. 45, n° 4, 2005, pp. 153-156.
- FRITTS (H.C.). — Dendroclimatology and Dendroecology. — *Quaternary Research*, vol. 1, n° 4, 1971, pp. 419-449.
- GUEHL (J.-M.). — Étude comparée des potentialités hivernales d'assimilation carbonée de trois conifères de la zone tempérée (*Pseudotsuga menziesii* Mirb., *Abies alba* Mill. et *Picea excelsa* Link). — *Annales des Sciences forestières*, vol. 42, n° 1, 1985, pp. 23-38.
- GUIOT (J.). — The bootstrapped response function. — *Tree-ring Bulletin*, vol. 51, n° 1, 1991, pp. 39-41.
- GUTIÉRREZ (E.). — Dendroclimatological study of *Pinus sylvestris* L. in Southern Catalonia (Spain). — *Tree-ring Bulletin*, vol. 49, n° 1, 1989, pp. 1-9.
- HELAMA (S.), HOLOPAINEN (J.), TIMONEN (M.), OGURTSOV (M.G.), LINDHOLM (M.), MERILAINEN (J.), ERONEN (M.). — Comparison of living-tree and subfossil ring-widths with summer temperatures from 18th, 19th and 20th centuries in Northern Finland. — *Dendrochronologia*, vol. 21, n° 3, 2004, pp. 147-154.
- LE MEIGNEN (P.), MICAS (L.). — Bilan des dépérissements forestiers dans les Alpes-de-Haute-Provence. — *Forêt méditerranéenne*, vol. 29, n° 2, 2008, pp. 177-182.
- LEAL (S.), MELVIN (T.M.), GRABNER (M.), WIMMER (R.), BRIFFA (K.R.). — Tree-ring growth variability in the Austrian Alps: the influence of site, altitude, tree species and climate. — *Boreas*, vol. 36, n° 4, 2007, pp. 426-440.
- LEBOURGEOIS (F.). — Approche dendroécologique de la sensibilité du Hêtre (*Fagus sylvatica* L.) au climat en France et en Europe. — *Revue forestière française*, vol. LVII, n° 1, 2005, pp. 33-50.
- LEBOURGEOIS (F.). — Climatic signal in annual growth variation of Silver Fir (*Abies alba* Mill.) and Spruce (*Picea abies* Karst.) from the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). — *Annals of Forest Science*, vol. 64, n° 3, 2007, pp. 333-343.
- LEBOURGEOIS (F.). — Climatic signals in earlywood, latewood and total ring width of Corsican pine from western France. — *Annals of Forest Science*, vol. 57, n° 2, 2000, pp. 155-164.
- LEBOURGEOIS (F.). — Sensibilité au climat des Chênes sessile et pédonculé dans le réseau RENECOFOR. Comparaison avec les hêtraies. — *Revue forestière française*, vol. LVIII, n° 1, 2006a, pp. 29-44.
- LEBOURGEOIS (F.). — Réponse au climat du Sapin (*Abies alba* Mill.) et de l'Épicéa commun (*Picea abies* Karst.) dans le réseau RENECOFOR. — *Revue forestière française*, vol. LVIII, n° 5, 2006b, pp. 419-432.
- LEBOURGEOIS (F.), BECKER (M.). — Dendroécologie du Pin laricio de Corse dans l'Ouest de la France. Évolution du potentiel de croissance au cours des dernières décennies. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 53, n° 5, 1996, pp. 931-946.
- LEBOURGEOIS (F.), BRÉDA (N.), ULRICH (E.), GRANIER (A.). — Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). — *Trees*, vol. 19, n° 4, 2005, pp. 385-401.
- LEBOURGEOIS (F.), COUSSEAU (G.), DUCOS (Y.). — Climate-tree-growth relationships of *Quercus petraea* Mill. stand in the Forest of Bercé ("Futaie des Clos", Sarthe, France). — *Annals of Forest Science*, vol. 61, n° 4, 2004, pp. 361-372.
- LEBOURGEOIS (F.), GRANIER (A.), BRÉDA (N.). — Une analyse des changements climatiques en France entre 1956 et 1997. Réflexions en termes de conséquences pour les écosystèmes forestiers. — *Annals of Forest Science*, vol. 58, n° 7, 2001, pp. 733-754.
- MACIAS (M.), ANDREU (L.), BOSCH (O.), CAMARERO (J.J.), GUTIERREZ (E.). — Increasing aridity is enhancing silver fir (*Abies alba* Mill.) water stress in its south-western distribution limit. — *Climatic Change*, vol. 79, n° 3-4, 2006, pp. 289-313.
- MICAUX (D.). — Le Dépérissement du Sapin sur le plateau de Sault (Aude). — *Forêt méditerranéenne*, vol. 29, n° 2, 2008, pp. 189-194.
- MIINA (J.). — Dependence of tree-ring, earlywood and latewood indices of Scots pine and Norway spruce on climatic factors in eastern Finland. — *Ecological Modelling*, vol. 132, n° 3, 2000, pp. 259-273.
- MOISSELIN (J.-M.), SCHNEIDER (M.), CANELLAS (C.), MESTRE (O.). — Les changements climatiques en France au XX^e siècle. Étude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations. — *La Météorologie*, n° 38, 2002, pp. 45-56.
- OBERHUBER (W.), KOFLER (W.). — Dendroclimatological spring rainfall reconstruction for an inner Alpine dry valley. — *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 71, n° 1-2, 2002, pp. 97-106.

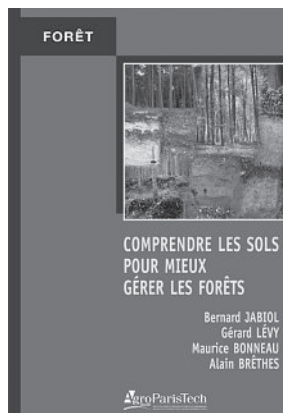
- PICHLER (P.), OBERHUBER (W.). — Radial growth response of coniferous forest trees in an inner Alpine environment to heat-wave in 2003. — *Forest Ecology and Management*, vol. 242, n° 2-3, 2007, pp. 688-699.
- PLANTON (S.), DEQUE (M.), CHAUVIN (F.), TERRAY (L.). — Expected impacts of climate change on extreme climate events. — *Comptes Rendus Geoscience*, vol. 340, n° 9-10, 2008, pp. 564-574.
- REBETEZ (M.), DOBBERTIN (M.). — Climate change may already threaten Scots pine stands in the Swiss Alps. — *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 79, n° 1-2, 2004, pp. 1-9.
- RIEDACKER (A.). — Rythmes de croissance et de régénération des racines des végétaux ligneux. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 33, n° 3, 1976, pp. 109-138.
- ROLLAND (C.), DESPLANQUE (C.), MICHALET (R.), SCHWEINGRUBER (F.H.). — Extreme tree rings in spruce (*Picea abies* L. Karst.) and fir (*Abies alba* Mill.) stands in relation to climate, site, and space in the southern French and Italian Alps. — *Arctic Antarctic and Alpine Research*, vol. 32, n° 1, 2000, pp. 1-13.
- ROLLAND (C.), LEMPÉRIÈRE (G.). — Effects of climate on radial growth of Norway spruce and interactions with attacks by the bark beetle *Dendroctonus micans* (Kug., Coleoptera: Scolytidae): a dendroecological study in the French Massif central. — *Forest Ecology and Management*, vol. 201, n° 1, 2004, pp. 89-104.
- ROSSI (S.), DESLAURIERS (A.), ANFODILLO (T.), CARRARO (V.). — Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes. — *Oecologia*, vol. 152, n° 1, 2007, pp. 1-12.
- SCHWEINGRUBER (F.H.), ECKSTEIN (D.), SERRE-BACHET (F.), BRÄKER (O.U.). — Identification, presentation and interpretation of even years and pointer years in dendrochronology. — *Dendrochronologia*, vol. 8, n° 1, 1990, pp. 9-38.
- TESSIER (L.). — Approche dendroclimatologique de l'écologie de *Pinus sylvestris* L. et *Quercus pubescens* Willd dans le Sud-Est de la France. — *Acta Oecologica*, vol. 7(21), n° 4, 1986, pp. 339-355.
- TESSIER (L.). — Spatio-temporal analysis of climate-tree ring relationships. — *New Phytology*, vol. 111, n° 3, 1989, pp. 517-529.
- THOMAS (A.L.), GÉGOUT (J.-C.), LANDMANN (G.), DAMBRINE (E.), KING (D.). — Relation between ecological conditions and fir decline in a sandstone region of the Vosges mountains (northeastern France). — *Annals of Forest Science*, vol. 59, n° 3, 2002, pp. 265-273.
- ULRICH (E.). — Le Réseau RENECOFOR : objectifs et réalisation. — *Revue forestière française*, vol. XLVII, n° 2, 1995, pp. 107-124.
- VENNETIER (M.), VILA (B.), LIANG (E.Y.), GUIBAL (F.), RIPERT (C.), CHANDIOUX (O.). — Impacts du changement climatique sur la productivité forestière et le déplacement d'une limite bioclimatique en région méditerranéenne française. — *Ingénieries*, vol. 44, 2005, pp. 49-61.
- WEBER (P.), BUGMANN (H.), RIGLING (A.). — Radial growth responses to drought of *Pinus sylvestris* and *Quercus pubescens* in an inner-Alpine dry valley. — *Journal of Vegetation Science*, vol. 18, n° 6, 2007, pp. 777-792.
- WILSON (R.), ELLING (W.). — Temporal instability in tree-growth/climate response in the Lower Bavarian Forest region: implications for dendroclimatic reconstruction. — *Trees-Structure & Function*, vol. 18, n° 1, 2004, pp. 19-28.

EFFET DE LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE ET DES ÉVÉNEMENTS EXTRÊMES SUR LA CROISSANCE D'*ABIES ALBA*, *PICEA ABIES* ET *PINUS SYLVESTRIS* EN CLIMAT TEMPÉRÉ FRANÇAIS (Résumé)

Les objectifs de cet article sont de mettre en évidence les effets du climat moyen et des événements extrêmes sur la croissance radiale de trois espèces de conifères (Sapin pectiné, Épicéa commun et Pin sylvestre) et d'analyser les effets des gradients écologiques sur ces réponses (altitude et réserve utile maximale en eau du sol, RUM). Les 33 peuplements du réseau RENEFOFOR étudiés correspondent à 8 pessières (239 arbres), 11 sapinières (328) et 14 pineraies sylvestres (419). Les conditions climatiques varient du climat océanique de plaine chaud et sec au contexte montagnard froid et humide des Alpes. L'altitude varie de 400 à 1 700 m et la RUM de 50 à 190 mm. Pour les 33 sites, la réponse au climat a été analysée séparément pour le bois initial et pour le bois final. La réponse aux événements extrêmes a été appréhendée à l'aide des "années caractéristiques" et celle au climat moyen à travers l'établissement des fonctions de réponse au climat. Les froids hivernaux extrêmes ont causé des réductions plus fortes de croissance chez le Sapin par rapport à l'Épicéa et particulièrement pour les sites d'altitude ; le Pin sylvestre étant l'espèce la moins sensible au froid. Des sécheresses exceptionnelles causent des réductions importantes de croissance pour toutes les espèces et ceci d'autant plus que les conditions locales de xéricité augmentent : altitude inférieure à 800 m et RUM < 100 mm pour le Sapin et l'Épicéa ; Pin sylvestre sous climat océanique dans l'Ouest de la France. La largeur du bois initial pour le Sapin dépend des températures des mois de septembre et novembre de l'année $n - 1$ puis de celles de février. Par la suite, le bilan hydrique de juin et juillet module la largeur du bois final. Pour l'Épicéa, la largeur du bois initial dépend également des températures du mois de septembre de l'année $n - 1$, après quoi les bilans hydriques de printemps et d'été modulent la mise en place des deux compartiments. Enfin, la croissance annuelle du Pin sylvestre dépend essentiellement du bilan hydrique estival. Globalement, l'augmentation des conditions locales d'aridité module plus fortement le bois final que le bois initial. Les résultats sont discutés vis-à-vis des changements climatiques.

EFFECT OF CLIMATE VARIABILITY AND EXTREME EVENTS ON THE GROWTH OF *ABIES ALBA*, *PICEA ABIES* AND *PINUS SYLVESTRIS* IN FRANCE UNDER A TEMPERATE CLIMATE [Abstract]

The objectives of this article are to highlight how extreme climatic events and climate variability influence radial growth of conifers (silver fir, Norway spruce, Scots pine) and how elevation and soil water capacity (SWC) modulate the sensitivity to climate. We sampled 33 stands in France in western lowlands and in mountain forests (400-1700 m). Soil water capacity ranged from 50 to 190 mm. We established stand chronologies for total ring width, earlywood and latewood width from 985 trees. Response to climate was analysed by using pointer years and bootstrapped response functions. Principal component analysis was applied on pointer years and response function coefficients to exhibit the ecological structure of the forests studied. Extreme winter frosts caused greater growth reductions for silver fir than for Norway spruce, especially with increasing altitude. Scots pine was the least frost sensitive species. Exceptional spring droughts caused notable growth decrease especially when local conditions were dry (altitude < 800 m and SWC < 100 mm for silver fir, western lowlands for Scots pine). Earlywood of silver fir depended on previous September, November and current February temperature after which current June and July water supply influenced latewood. Earlywood of Norway spruce was influenced by previous September temperature after which current spring and summer droughts influenced both ring components. In Scots pine, earlywood and latewood depended on the current summer water balance. Local conditions mainly modulated latewood formation. If climate becomes drier, low-elevation dry stands or trees growing in western lowlands may face problems as their growth highly depends on soil moisture availability.



COMPRENDRE LES SOLS POUR MIEUX GÉRER LES FORÊTS

Bernard JABIOL, Gérard LÉVY, Maurice BONNEAU, Alain BRÊTHES

Résumé de l'ouvrage

Bien comprendre les relations entre le sol et les peuplements forestiers constitue un des préalables essentiels à une **gestion durable** des forêts. Cet ouvrage, grâce en particulier à la conception novatrice de chacune de ses deux parties, devrait permettre d'y parvenir.

La première partie du livre rassemble et synthétise les **connaissances scientifiques** actuelles relatives à l'influence du sol sur l'enracinement des arbres, leur alimentation en eau, leur nutrition minérale. La seconde partie présente les différents "types de sols" en fonction des **contraintes** qu'ils opposent à la croissance des arbres et à la gestion durable des forêts, et propose des orientations de mise en valeur.

Le gestionnaire forestier pourra ainsi s'appuyer sur cet ouvrage pour prendre, dans chaque contexte particulier, les décisions appropriées en matière d'objectifs, d'essences et de sylviculture. Ce livre devrait également constituer une référence pour les enseignants, chercheurs et étudiants en foresterie, écologie ou pédologie.

624 pages, tableaux, figures, 73 photographies en couleur. ISBN 978-2-85710-081-2

L'ouvrage est disponible au prix de 60 euros + frais de port.

Tarifs réduits pour commande groupée selon le nombre d'exemplaires commandé.

Ouvrage édité et diffusé par :

AgroParisTech ENGRF – Service des Publications

14, rue Girardet – CS 14216 – F-54042 NANCY CEDEX

Téléphone : 03 83 39 68 24. Télécopie : 03 83 39 68 25

Mél. : martine.geremia@engref.agroparistech.fr