

VARIABILITÉ SPATIALE DE LA RÉPONSE AU CLIMAT DU CHÊNE SESSILE DANS LA MOITIÉ NORD DE LA FRANCE

PIERRE MÉRIAN – LAURENT BERGÈS – FRANÇOIS LEBOURGEOIS

En Europe, trois feuillus dominent les forêts de plaine tempérées : le Chêne sessile (*Quercus petraea* [Matt.] Liebl.), le Chêne pédonculé (*Quercus robur* L.) et le Hêtre commun (*Fagus sylvatica* L.). La réponse au climat de ces trois essences a été largement étudiée sous diverses conditions climatiques (Tessier *et al.*, 1994 ; Kelly *et al.*, 2002 ; Piovesan *et al.*, 2005 ; Di Filippo *et al.*, 2007 ; Friedrichs *et al.*, 2009b ; Michelot *et al.*, 2012 ; Rozas et Sampedro, 2013). Cependant, ces études restent locales (massif forestier, région) notamment pour le Chêne sessile, se privant ainsi d'une vision à large échelle spatiale des variations de sensibilité au climat. L'importance d'une telle approche est d'autant plus forte en contexte tempéré que le Chêne sessile y est une essence majeure aussi bien sur le plan écologique qu'économique. Par exemple, en France, le Chêne sessile est la seconde essence en volume (environ 280 millions de m³), derrière le Chêne pédonculé (environ 300 millions de m³) (IGN, 2013).

Les travaux les plus récents sur le Chêne sessile concernent l'ouest de l'Europe (Lebourgeois *et al.*, 2004 ; Michelot *et al.*, 2012), l'Europe centrale (Friedrichs *et al.*, 2009a ; Friedrichs *et al.*, 2009b ; Dolezal *et al.*, 2010) et le sud de la France (Tessier *et al.*, 1994 ; Misson *et al.*, 2004). Tous révèlent un déterminisme climatique plus faible de la croissance radiale que d'autres essences, même si le déficit hydrique estival apparaît comme le principal facteur limitant la largeur de cerne. Seuls Kelly *et al.* (2002) fournissent une analyse européenne, mais limitée aux événements climatiques extrêmes (sécheresses estivales, froids hivernaux). La croissance semble négativement affectée par les forts stress hydriques estivaux, la baisse de croissance étant sensiblement plus marquée en contexte océanique que semi-continental. À l'inverse, les froids hivernaux ne jouent pas de rôle significatif quel que soit le type de climat. Au final, notre compréhension de la variation spatiale de la réponse au climat du Chêne sessile en Europe tempérée reste limitée, alors que le gradient climatique observé (océanique à semi-continental d'ouest en est) laisse présager des comportements tranchés. Ce gradient ouest-est dit « de continentalité » correspond à la fois à une baisse des températures et à une augmentation des précipitations, qui se traduit par des froids hivernaux plus marqués et à une diminution du déficit hydrique estival. Dans le cadre des effets à long terme du réchauffement climatique déjà constaté (Moisselin *et al.*, 2002), une meilleure connaissance de la sensibilité au climat du Chêne sessile et de ses variations selon le climat régional est indispensable pour mieux appréhender la diversité des comportements futurs (Lindner *et al.*, 2010).

Cette étude a pour objectif de comprendre le déterminisme climatique de la croissance radiale du Chêne sessile et sa variabilité spatiale dans la moitié nord de la France. Pour cela, nous avons analysé la réponse au climat sur la période 1914-1993 de 120 forêts pures, régulières et matures, échantillonnées depuis la façade atlantique jusqu'en Alsace. D'après les précédents travaux dendro-écologiques et écophysologiques, nous attendons une variation spatiale de la réponse au climat de

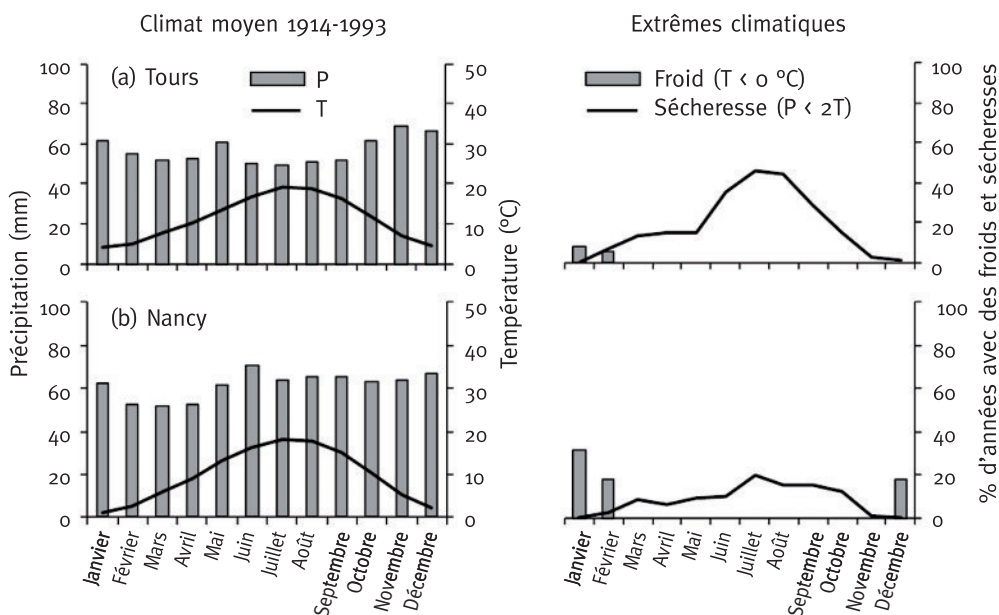
la croissance des chênaies sessiliflores le long du gradient de continentalité, avec d'une part une sensibilité plus forte au déficit hydrique estival sous climat océanique, et d'autre part une sensibilité plus forte aux froids hivernaux sous climat semi-continental.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Zone d'étude et conditions climatiques

Cent vingt peuplements purs et réguliers ont été échantillonnés en forêt domaniale en plaine (de 57 à 380 m d'altitude) dans la moitié nord de la France entre 1994 et 2001 (Lebourgeois, 1997 ; Bergès *et al.*, 2000 ; Bontemps *et al.*, 2012). Afin d'obtenir des résultats comparables (Mérian, 2013), la période d'analyse a été fixée à la période de croissance maximale commune à l'ensemble des peuplements, c'est-à-dire 1914-1993 (80 ans). Sur cette période, la fréquence des sécheresses de mai à août, définies selon l'indice d'aridité de Gaussen et Bagnoul (sécheresse quand $P < 2T$, avec P en mm et T en °C ; Gaussen et Bagnouls, 1952), a été deux fois plus forte à Tours (climat océanique) qu'à Nancy (climat semi-continental) (figure 1, ci-dessous). De même, la fréquence des froids (température mensuelle moyenne $T < 0$ °C) a été deux fois plus faible sous climat océanique.

FIGURE 1 CLIMAT MOYEN (gauche) ET POURCENTAGE DES ANNÉES PRÉSENTANT UN EXTRÊME CLIMATIQUE (droite) SUR LA PÉRIODE 1914-1993 POUR LES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES DE TOURS (a : 47° 26' 36" N, 00° 43' 36" W, 108 m) ET DE NANCY (b : 48° 41' 12" N, 06° 13' 18" W, 212 m).



Pour chaque site, le type de station a été identifié à partir d'une analyse floristique et d'une description pédologique sur une ou deux fosses. Le pH de l'horizon organo-minéral A varie de 4,1 à 5,1. La réserve utile maximale en eau du sol sur 1 m de profondeur varie de 57 mm à 171 mm. La valeur moyenne est de 134 mm (± 33 mm), ce qui correspond à de bonnes conditions d'approvisionnement en eau pour cette essence.

Construction des chronologies moyennes de croissance

Deux à trente arbres dominants ont été échantillonnés par placette (720 arbres au total) et leur croissance radiale a été estimée à la hauteur de 1,30 m soit avec une carotte à cœur prélevée à l'aide d'une tarière de Pressler (une carotte par arbre), soit par abattage et prélèvement d'une rondelle de bois (un rayon de lecture). Les procédures classiques de dendroclimatologie ont été appliquées et sont détaillées dans un article précédemment publié dans la *Revue forestière française* (Mérian, 2013). Ces procédures sont généralement appliquées par placette, mais de récentes études ont montré que la qualité de l'estimation de la réponse au climat augmente avec le nombre d'arbres considérés pour construire les chronologies moyennes de croissance (Mérian et Lebourgeois, 2011a ; Mérian, 2013). Pour le Chêne sessile de plaine en France, 10 à 15 arbres sont nécessaires pour obtenir une chronologie robuste. Les 120 peuplements échantillonnés ont ainsi été regroupés indépendamment des procédures dendroclimatologiques sur des critères de faible distance géographique, d'homogénéité de conditions écologiques (climat, pH, réserve utile maximale en eau du sol) et dendrométriques (âge, hauteur, vitesse de croissance) afin d'atteindre un minimum de 14 arbres par chronologie (moyenne de 23 arbres). Trente et une chronologies ont été définies (figure 2, p. 112 ; tableau I, p. 110), avec une distance moyenne entre deux placettes regroupées de 9,7 km (écart type : 10,6 km).

Les séries de croissance ont été interdatées par groupe de placettes grâce au calcul des années caractéristiques (Becker, 1989 ; Lebourgeois, 2006). Ces années correspondent aux dates pour lesquelles au moins 75 % des arbres présentent une variation relative de croissance (VRC) de même signe et d'au moins 10 % par rapport à l'année précédente. Une VRC positive (resp. négative) indique une hausse (resp. une baisse) de croissance. La fréquence des années caractéristiques et la valeur des VRC pour ces années sont de bons indicateurs de la réponse des arbres aux conditions climatiques extrêmes (Schweingruber et Nogler, 2003).

Par la suite, une double standardisation des séries individuelles de largeurs de cerne a été appliquée pour éliminer les signaux de croissance non liés aux variations interannuelles du climat (Cook et Peters, 1981 ; Mérian, 2013), c'est-à-dire les signaux basse fréquence (tels que l'effet de l'âge) et moyenne fréquence (tels que l'effet des interventions sylvicoles). La standardisation du signal basse fréquence a été faite par ajustement d'une exponentielle décroissante ou d'une droite à pente négative ou nulle (Fritts, 1976). Pour chaque année, l'indice de croissance a été obtenu par division de la largeur de cerne observée par la valeur théorique de l'exponentielle, produisant une première série d'indices de croissance (IC₁) dégagée du signal basse fréquence. De même, le signal moyenne fréquence a été estimé par l'ajustement d'une fonction *spline* cubique (qui peut être assimilée à un polynôme de degré 3) sur la série IC₁ (Cook et Peters, 1981). Ce signal a ensuite été retiré par division par année de la valeur d'IC₁ par la valeur théorique de la *spline*, produisant une seconde série d'indices de croissance (IC₂) dégagée du signal moyenne fréquence. Enfin, les IC₂ ont été moyennées par double pondération pour chaque groupe de placettes pour produire une chronologie moyenne de croissance (total de 31 chronologies) supposée contenir l'effet des variations interannuelles du climat. Le principe général de cette moyenne est, pour chaque année, d'attribuer aux indices de croissance un poids d'autant plus faible que leur valeur est éloignée de la valeur moyenne. Cette technique réduit l'importance des indices extrêmes, potentiellement liés à des erreurs de mesure ou à des perturbations aléatoires ponctuelles (Fritts, 1976).

TABLEAU I **Conditions climatiques et statistiques descriptives des 31 chronologies de croissance sur la période 1914-1993**

Chr.	Localisation géographique			Climat moyen 1914-1993				
	Longitude	Latitude	Alt.	Température			Précipitation	
				An	Jan.	MJJ	An	MJJ
A	1° 32' 05" W	48° 10' 37" N	80	11,75	4,83	16,5	727	154
B1	0° 36' 47" E	48° 29' 06" N	242	10,86	3,08	16,1	695	159
B2	0° 28' 10" E	48° 31' 41" N	250	10,88	3,82	15,6	689	162
B3	0° 40' 46" E	48° 31' 21" N	220	10,95	3,73	15,6	674	159
C	0° 27' 19" E	47° 48' 46" N	126	11,2	3,66	16,6	672	161
D	0° 25' 20" E	47° 14' 16" N	96	10,98	3,08	16,7	670	155
E	0° 29' 40" E	46° 37' 36" N	116	10,65	2,8	16,5	691	162
F1	1° 15' 33" E	47° 34' 07" N	127	10,81	2,73	16,7	649	158
F2	1° 26' 38" E	47° 33' 43" N	102	10,7	2,58	16,4	648	158
F3	1° 22' 34" E	47° 34' 50" N	117	11,04	2,81	16,7	646	158
G1	2° 07' 28" E	47° 15' 14" N	176	10,85	2,98	16,5	686	175
G2	2° 16' 12" E	47° 12' 27" N	179	10,9	3,00	16,5	686	175
H1	2° 43' 27" E	46° 38' 11" N	267	10,96	3,06	16,5	693	203
H2	2° 43' 35" E	46° 40' 01" N	260	11,19	3,06	16,5	695	202
H3	2° 45' 32" E	46° 40' 14" N	254	10,84	3,06	16,5	694	203
J	3° 06' 41" E	46° 30' 38" N	282	11,13	3,14	16,8	710	221
K	2° 43' 43" E	48° 27' 10" N	80	10,84	3,25	16,4	640	165
L	4° 57' 36" E	49° 01' 58" N	180	9,38	0,9	15,4	829	210
M	4° 27' 34" E	48° 17' 50" N	160	9,88	0,98	15,8	809	204
N	5° 04' 27" E	47° 04' 56" N	220	10,69	1,52	16,7	781	207
O	5° 14' 18" E	46° 10' 14" N	260	11,25	2,06	17,1	821	244
P	6° 02' 22" E	48° 01' 33" N	330	9,37	0,83	15,3	922	234
Q1	6° 13' 39" E	48° 40' 24" N	286	10,17	1,25	15,8	756	198
Q2	6° 18' 18" E	48° 44' 31" N	266	9,8	1,18	15,8	792	205
Q3	6° 29' 39" E	48° 52' 18" N	315	9,74	1,06	15,7	847	220
Q4	6° 40' 30" E	48° 49' 58" N	275	9,63	0,99	15,6	870	224
R1	7° 27' 40" E	49° 00' 56" N	320	9,7	0,91	16,0	819	221
R2	7° 27' 55" E	48° 57' 19" N	333	9,58	0,89	15,9	824	223
R3	7° 30' 67" E	48° 56' 34" N	318	9,53	0,89	15,9	818	222
R4	7° 30' 50" E	48° 59' 28" N	346	9,54	0,91	16,0	810	221
R5	7° 43' 43" E	48° 59' 22" N	350	9,87	0,94	16,0	783	217

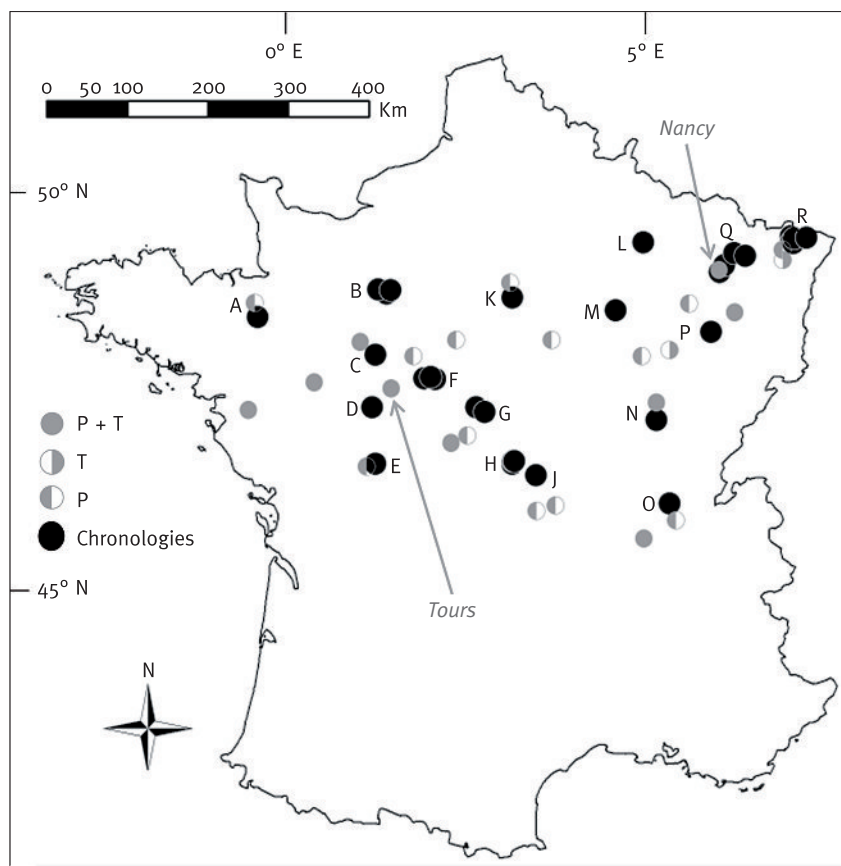
L'écart type est affiché entre parenthèses. Les noms de chronologie en gras indiquent celles issues de regroupement de placettes. Chr. : chronologie ; Alt. : altitude ; Jan. : janvier ; Fév. : février ; Juil. : juillet ; MJJ : mai-juin-juillet ; nb. plac. : nombre de placettes ; âge en 1993 ; LC : largeur de cerne (mm) ; ACN et ACP : années caractéristiques négatives et positives.

Climat moyen 1914-1993					Statistiques				
Fréquence froids		Fréquence sécheresses			Nb. arbres (nb. plac.)	Âge	LC (mm)	ACN	ACP
Jan.	Fév.	Mai	Juin	Juil.					
3	3	14	33	40	28 (1)	99 (7)	2,05 (0,72)	9	11
10	5	14	30	31	20 (7)	143 (41)	1,49 (0,62)	6	9
9	5	14	23	30	18 (6)	124 (20)	1,64 (0,66)	7	15
9	5	14	28	28	30 (1)	85 (2)	1,75 (0,62)	12	14
5	4	13	30	34	27 (10)	95 (13)	2,13 (0,85)	8	7
6	4	13	30	44	15 (5)	107 (14)	1,81 (0,64)	4	6
11	6	11	31	41	28 (1)	81 (4)	1,89 (0,81)	13	15
11	5	15	26	36	30 (1)	90 (7)	2,05 (0,77)	15	14
13	6	15	28	36	18 (6)	117 (32)	2,02 (0,83)	16	16
11	5	15	28	38	17 (6)	115 (23)	1,63 (0,60)	9	8
13	5	11	21	35	23 (1)	78 (8)	2,35 (0,88)	16	12
13	5	11	21	35	15 (6)	103 (18)	2,06 (0,69)	12	7
10	6	6	11	33	18 (6)	116 (29)	1,47 (0,52)	8	6
10	6	6	11	33	30 (1)	111 (6)	1,68 (0,61)	14	13
10	6	6	11	33	14 (5)	137 (40)	1,75 (0,60)	4	6
10	6	5	10	33	15 (5)	134 (35)	1,79 (0,63)	7	7
13	9	18	20	25	29 (1)	108 (4)	1,85 (0,79)	14	9
31	18	8	9	20	26 (1)	137 (22)	1,60 (0,68)	12	13
26	15	6	10	25	24 (1)	84 (6)	2,00 (0,82)	15	18
19	8	5	11	26	30 (1)	84 (5)	2,27 (0,95)	10	12
18	9	8	10	28	30 (1)	85 (8)	1,91 (0,66)	11	13
35	20	6	8	13	30 (1)	127 (19)	1,48 (0,60)	11	15
28	16	10	13	25	18 (6)	104 (13)	2,05 (0,80)	10	12
28	18	9	10	21	19 (7)	103 (18)	2,15 (0,92)	10	15
31	18	5	8	16	30 (1)	83 (3)	2,18 (0,80)	14	15
33	18	5	6	15	15 (6)	80 (8)	2,50 (1,09)	8	8
36	19	6	5	16	29 (1)	127 (6)	1,33 (0,44)	12	13
36	19	6	5	18	24 (8)	129 (31)	1,60 (0,63)	13	12
36	19	6	5	16	29 (10)	107 (24)	2,06 (0,81)	11	8
36	19	6	5	16	17 (6)	118 (25)	1,51 (0,76)	15	14
34	19	9	6	19	24 (1)	76 (3)	1,99 (0,80)	10	13

FIGURE 2

**LOCALISATION DES 31 CHRONOLOGIES (cercles noirs)
ET 24 STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES DU RÉSEAU MÉTÉO-FRANCE
(cercles gris : séries de précipitations et de températures ;
cercles blanc et gris : séries de températures ;
cercles gris et blanc : séries de précipitations).**

T : température ; P : précipitation. Les flèches grises indiquent la localisation des deux stations météorologiques présentées dans la figure 1 (p. 108).



Construction des séries climatiques

Les séries de températures mensuelles moyennes (T) et de cumul des précipitations mensuelles (P) ont été obtenues par chronologie à partir des stations météorologiques du réseau Météo-France les plus proches des peuplements et présentant des enregistrements sur la période 1941-1993 (figure 1, p. 108). Ces stations étant rares, leur distance moyenne aux peuplements atteignait respectivement 53 et 37 km pour T et P (écarts types : 29 et 22 km). Pour tenir compte de la distance entre les peuplements et les stations et des différences climatiques pouvant exister entre les deux (en particulier sur le niveau moyen), les séries climatiques attribuées à chaque chronologie ont été corrigées de la différence entre d'une part la valeur normale de la variable (1961-1990) extraite du modèle spatialisé à 1 km² AURELHY (Bénichou et Le Breton, 1987) au niveau de la chronologie, et d'autre part la valeur normale calculée avec les enregistrements des stations.

Analyse de l'effet du climat sur la croissance

Les corrélations entre les chronologies de croissance et le climat ont été estimées par des coefficients de corrélation *bootstrapped* sur la période entière 1914-1993 (Mérian, 2012 ; Mérian *et al.*, 2012). L'approche de type *bootstrap* permet l'estimation de la corrélation et de son intervalle de confiance. Cette méthode est basée sur le rééchantillonnage massif (1 000 répétitions au minimum) du jeu de données initial par tirage aléatoire avec remise (Mérian, 2013). Les variables climatiques mensuelles ont été considérées selon l'année biologique, c'est-à-dire de septembre de l'année $n - 1$ à août de l'année n . Pour chacun de ces 12 mois, la chronologie moyenne a été corrélée à la série de températures moyennes puis à la série de précipitations, soit un total de 24 variables. La détection d'éventuelles variations de sensibilité au climat entre les 31 chronologies a été faite par deux analyses en composantes principales (ACP) non normées :

- une première ACP sur les variations relatives de croissance obtenues lors du calcul des années caractéristiques (une ligne par groupe de placettes et une colonne par année). Cette ACP met en évidence la structuration spatiale (intergroupes de placettes) de la réponse aux événements climatiques extrêmes ;
- une seconde ACP sur les coefficients de corrélations *bootstrapped* (une ligne par groupe de placettes et une colonne par variable climatique). Cette ACP révèle la structuration spatiale (intergroupes de placettes) de la réponse moyenne au climat.

RÉSULTATS

Déterminisme climatique des années caractéristiques

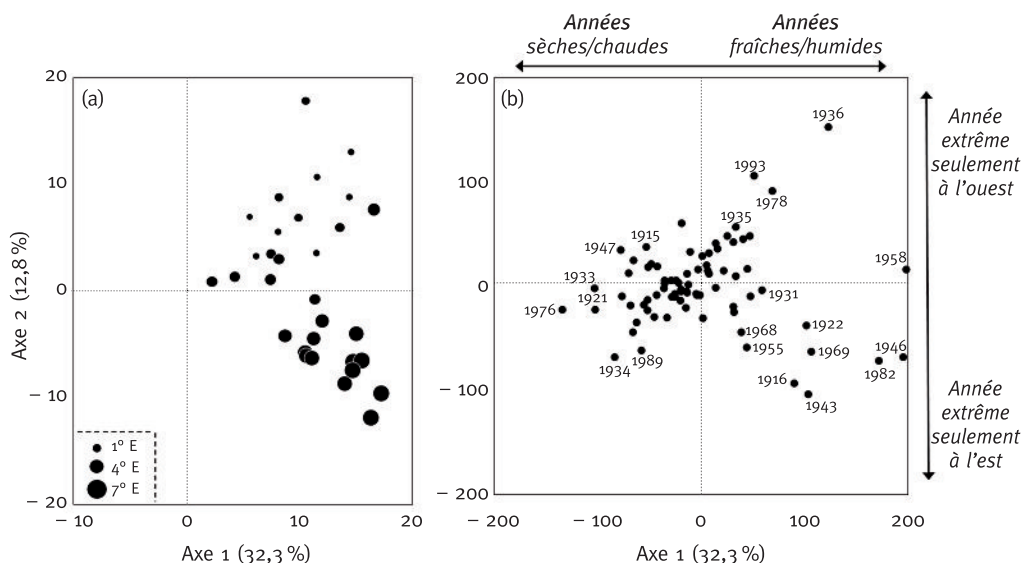
Le nombre d'années caractéristiques sur la période 1914-1993 varie entre 10 et 33 selon la chronologie, avec une moyenne de 22 (tableau I, p. 110). Le nombre d'années positives est proche du nombre d'années négatives, avec des variations relatives de croissance de + 45 et – 26 % respectivement. L'ACP réalisée sur les variations relatives de croissance révèle une forte structuration spatiale de la réponse des chênaies sessiliflores aux événements climatiques extrêmes (figure 3, p. 114). Toutes les chronologies présentent des coordonnées positives sur le premier axe factoriel, traduisant une réponse commune aux conditions de fin de printemps et de début d'été : une croissance forte lors des années fraîches et humides telles que 1946, 1958 et 1982 (+ 30, + 47 et + 51 %) ; une croissance faible lors des années exceptionnellement chaudes et sèches telles que 1921, 1933 et 1976 (– 21, – 20 et – 25 %). Le second axe factoriel discrimine les réponses selon un gradient de continentalité, la coordonnée factorielle étant d'autant plus négative que le peuplement se situe à l'est et d'autant plus positive que le peuplement se situe à l'ouest. Cet axe met en évidence des années de sécheresses printanières et estivales localisées soit dans l'ouest soit dans l'est de la France. Par exemple, en 1989, les chênaies de l'ouest (chronologies A à G) présentent une variation relative de croissance de – 22 % contre 0,3 % pour les chronologies de l'est (P à R, pour lesquelles cette année n'est donc pas caractéristique). Cette même année, l'anomalie thermique estivale (juin à août) atteignait + 1,7 °C à l'ouest et + 0,9 °C à l'est (période de référence : 1914-1993).

À l'inverse, en 1915, la croissance a baissé de 18 % par rapport à 1914 à l'est pour des précipitations 18 % plus faibles que les normales, alors qu'elle augmentait de 7 % dans l'ouest avec des pluies supérieures de 25 %. Certaines années de forte croissance sont également propres à l'ouest (1936, 1993) ou à l'est (1943, 1946, 1982). Par exemple, en 1936, la croissance a augmenté de 57 % dans l'ouest contre 9 % dans l'est. Cette plus forte hausse dans l'ouest est concomitante de précipitations estivales supérieures de 32 % à la normale et de températures plus fraîches de 0,5 °C (contre respectivement 17 % et – 0,2 °C à l'est). À l'exception du froid hivernal de 1956 qui a affecté

négativement la croissance des chênes sessiles sur l'ensemble de la France, les froids extrêmes hivernaux ne semblent pas réduire la croissance.

FIGURE 3 RÉPARTITION DES 31 CHRONOLOGIES (a) ET DES 80 ANNÉES (de 1914 à 1993, b) SUR LE PLAN FACTORIEL 1-2 DE L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES EFFECTUÉE SUR LES VARIATIONS RELATIVES DE CROISSANCE (voir texte pour plus de détails).

La taille des points des chronologies augmente avec la longitude Est. Les années les plus discriminantes sont notées dans le graphique de droite (b). L'axe 1 traduit une homogénéité de la réponse aux extrêmes climatiques des 31 chronologies (coordonnées factorielles toujours positives), avec une croissance forte les années fraîches et humides, contre une croissance faible les années chaudes et sèches. L'axe 2 discrimine les chronologies selon leur longitude, révélant des années extrêmes localisées soit dans l'ouest (climat océanique), soit dans l'est (climat semi-continental) de la moitié nord de la France.



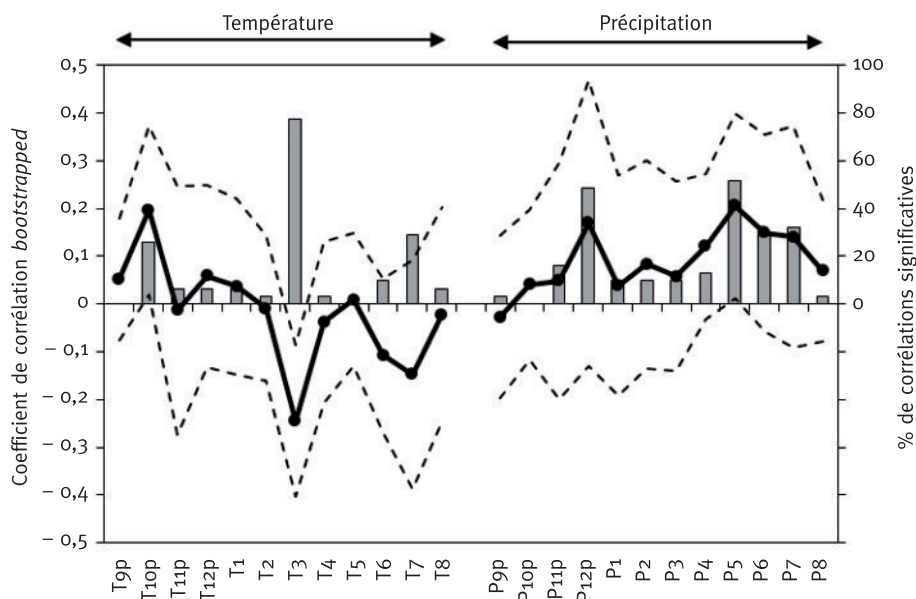
Réponse moyenne au climat : déterminisme commun et variations spatiales

La figure 4 (p. 115) présente la réponse au climat moyennée sur les 31 chronologies de croissance de la moitié nord de la France. Les intervalles de confiance à 95 % des coefficients de corrélation *bootstrapped* moyens sont grands et incluent généralement le zéro, mettant en évidence une forte diversité des réponses au climat entre les chronologies. Aucun facteur climatique n'influence significativement la croissance de l'ensemble des chronologies. La variable la plus influente est la température du mois de mars qui est corrélée négativement avec la croissance radiale (corrélation moyenne : -0,25), significativement pour 77 % des chronologies. Le déficit hydrique de mai à juillet impacte plutôt négativement la largeur de cerne, avec des corrélations négatives pour les températures et positives pour les précipitations. Ces corrélations sont plus rarement significatives ; de 0 à 30 % des chronologies pour T et de 30 à 50 % pour P. Enfin, les conditions climatiques de l'automne

et de l'hiver précédents influencent sensiblement la croissance des chênes sessiles, avec des corrélations positives pour la température d'octobre (significatives pour 26 %) et pour les précipitations de décembre (48 %).

FIGURE 4 RÉPONSE MOYENNE AU CLIMAT DES CHÊNAIES SESSILIFLORES DANS LA MOITIÉ NORD DE LA FRANCE

Ligne épaisse noire avec points : valeur moyenne des coefficients de corrélation *bootstrapped* sur les 31 chronologies. Lignes fines pointillées : intervalle de confiance *bootstrap* à 95 % de la moyenne. Bâtons gris : pourcentage des chronologies présentant un coefficient de corrélation *bootstrapped* significatif au seuil de 5 %. T : température moyenne mensuelle. P : cumul mensuel des précipitations. Le mois est noté en chiffres (1 : janvier, 2 : février, etc.). p : mois de l'année précédente.

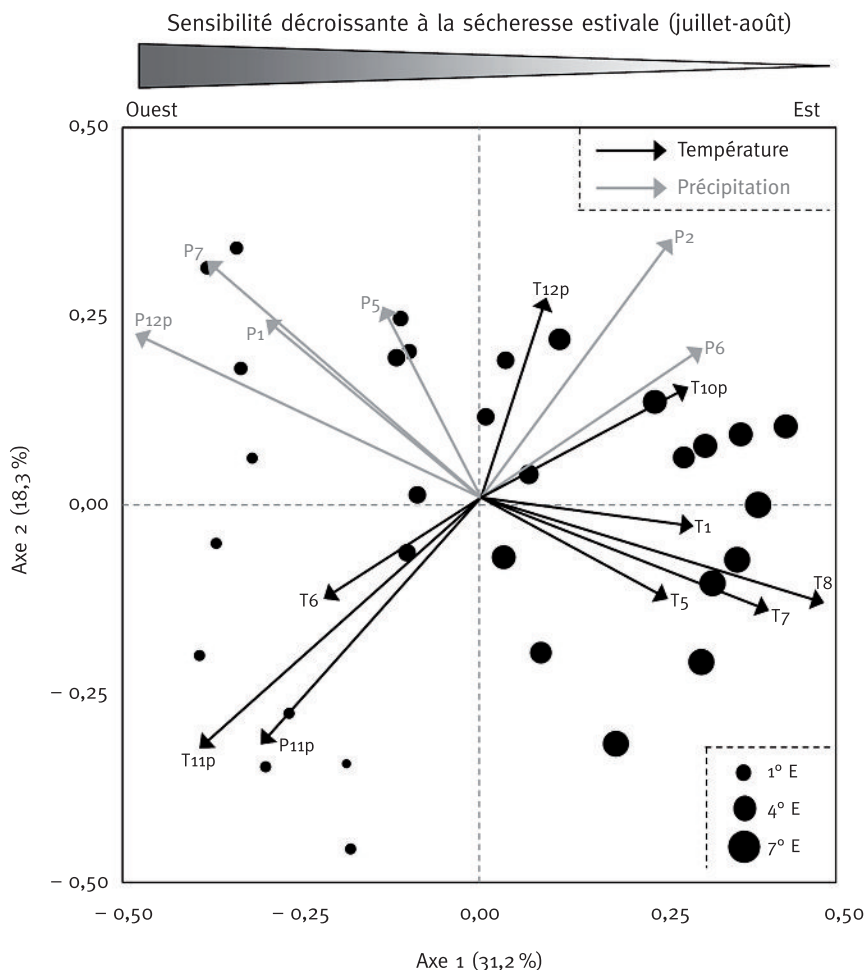


L'ACP sur les coefficients de corrélation *bootstrapped* révèle une structuration ouest-est de la sensibilité des chênes au climat (figure 5, p. 116). Sur l'axe 1, la coordonnée factorielle des chronologies est corrélée avec la longitude ($R^2 = 0,85$; p -value $< 0,001$), les chronologies de l'est de la France présentant une coordonnée positive. Ce gradient de sensibilité au climat se traduit par une baisse ouest-est de l'effet positif des précipitations hivernales (entre novembre de l'année précédente et mars de l'année en cours) sur la croissance radiale du Chêne : les peuplements sous climat océanique répondent significativement, alors que les corrélations sont proches de zéro voire sensiblement négatives sous climat semi-continental (figure 6a, p. 117). À l'est, la croissance est aussi stimulée par des automnes et hivers doux (corrélations positives avec les températures d'octobre et de janvier ; données non présentées). La réponse au déficit hydrique de fin de printemps et d'été varie fortement dans l'espace bien que le sens des variations diffère entre mois. En juin, la sensibilité au déficit hydrique augmente avec la longitude (corrélations de plus en plus négatives avec T et positives avec P ; figure 6b, p. 117). À l'inverse, en juillet et dans une moindre mesure en août, ce sont les peuplements sous climat océanique qui montrent une plus forte sensibilité au déficit hydrique (figure 6c et figure 6d, p. 117).

Enfin, bien que les tendances observées soient de magnitude plus faible, les chênes sessiles semblent plus sensibles aux froids hivernaux dans l'est de la France, avec des corrélations de plus en plus positives d'ouest en est avec les températures d'octobre à mars (à l'exception de novembre). Ces corrélations ne sont pas significatives dans leur grande majorité.

FIGURE 5
RÉPARTITION DES 31 CHRONOLOGIES (points noirs)
ET DES PRINCIPALES VARIABLES CLIMATIQUES (flèches)
SUR LE PLAN FACTORIEL 1-2 DE L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES
EFFECTUÉE SUR LES COEFFICIENTS DE CORRÉLATION *BOOTSTRAPPED*
 (voir texte pour plus de détails).

La taille des points des chronologies augmente avec la longitude. T : température moyenne mensuelle. P : cumul mensuel des précipitations. Le mois est noté en chiffres (1 : janvier, 2 : février, etc.). p : mois de l'année précédente. L'axe 1 discrimine fortement les chronologies selon leur longitude, révélant notamment une sensibilité à la sécheresse estivale (réponse négative aux températures et positive aux précipitations) plus forte pour les chronologies de l'ouest (climat océanique).



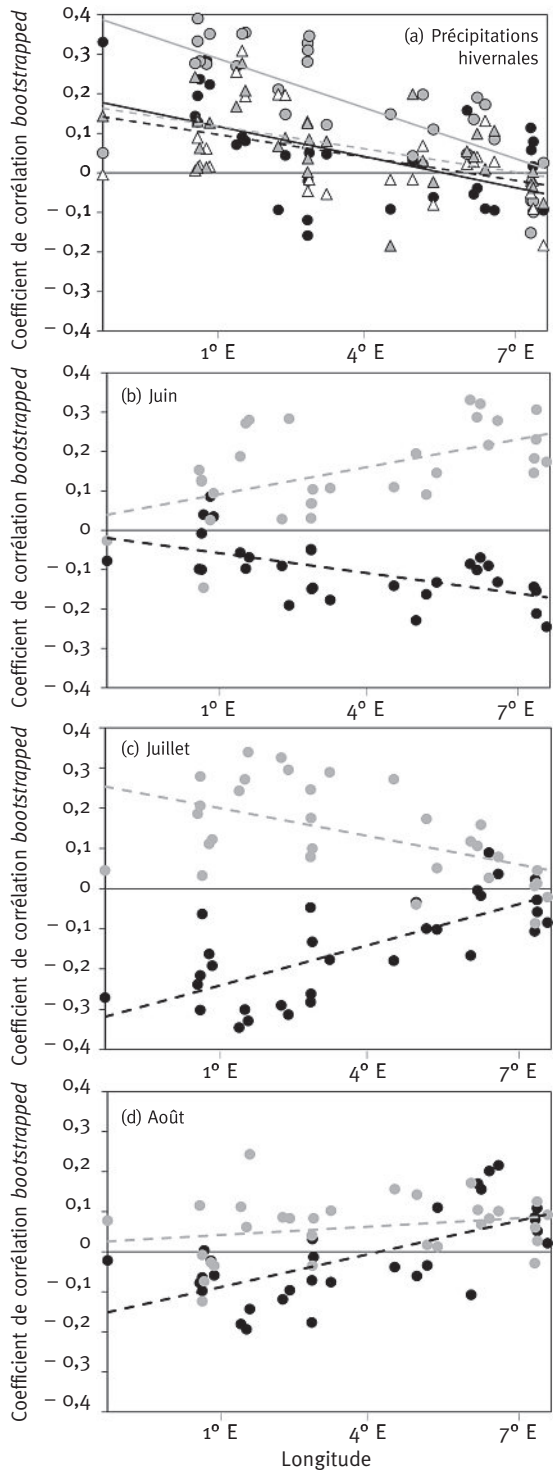
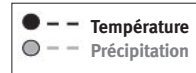


FIGURE 6
SYNTHÈSE DES COEFFICIENTS
DE CORRÉLATION *BOOTSTRAPPED*
DES PRINCIPAUX FACTEURS CLIMATIQUES
DONT L'INFLUENCE VARIE LE LONG
DU GRADIENT OUEST-EST
DE CONTINENTALITÉ

(a) Effets des précipitations hivernales (novembre de l'année précédente à mars de l'année en cours)



(b), (c), (d) Effets des précipitations et températures de juin, juillet et août



DISCUSSION

Existe-t-il une réponse commune au climat des chênes sessiles dans la moitié nord de la France ?

Notre étude révèle que la croissance radiale du Chêne sessile est peu sensible au climat, avec peu de corrélations significatives (figure 4, p. 115). Ces résultats sont cohérents avec de précédents travaux conduits en plaine de l'ouest de l'Europe (Lebourgeois *et al.*, 2004 ; Lebourgeois, 2006 ; Friedrichs *et al.*, 2009b ; Dolezal *et al.*, 2010 ; Michelot *et al.*, 2012) et peuvent s'expliquer par le fait que la zone d'étude est localisée au cœur de l'aire de distribution de l'espèce (EUFORGEN, 2009), où les conditions environnementales, et notamment climatiques, sont moins limitantes. De plus, en raison de sa forte valeur commerciale, le sylviculteur a souvent favorisé cette essence dans des stations sans contraintes écologiques majeures pour améliorer sa croissance et la qualité de son bois. D'ailleurs, les peuplements échantillonnés correspondent à des climats tempérés associés à des sols profonds (au moins 100 cm de profondeur sauf pour la chronologie L avec 60 cm) et plutôt riches (stations mésoacidoclines, pH le plus souvent entre 4,5 et 5,5), ces conditions étant favorables à une production élevée (Härdtle *et al.*, 2013 ; Zang et Rothe, 2013). Enfin, l'absence de réponse commune au climat peut être reliée au taux élevé de polymorphisme génétique des populations de Chêne (Petit *et al.*, 2002). Ce polymorphisme peut induire une forte variation interarbre de sensibilité au climat au sein d'un même peuplement, brouillant ainsi la relation cerne-climat à l'échelle du peuplement ou du groupe de peuplements.

Malgré cela, la croissance des chênes sessiles est le plus souvent négativement corrélée à la température de mars (figure 4, p. 115). Bien que la plupart des travaux sur le Chêne sessile ne montrent pas cette relation significative (Lebourgeois *et al.*, 2004 ; Cedro, 2007 ; Friedrichs *et al.*, 2009a ; Friedrichs *et al.*, 2009b ; Dolezal *et al.*, 2010 ; Michelot *et al.*, 2012), Bergès (1998) met en évidence une relation négative entre la température de mars et la largeur du bois initial. Des résultats proches ont été obtenus sur le Châtaignier dans le sud-ouest de la France (Lebourgeois *et al.*, 2012) et dans l'arc alpin (Fonti et Garcia-Gonzalez, 2004 ; Fonti *et al.*, 2007). Les auteurs expliquent que des fins d'hiver chaudes augmentent la sensibilité des cellules à l'auxine avant même le débourrement, l'auxine étant une hormone favorisant notamment le processus de différenciation et l'élongation des cellules. Par conséquent, des vaisseaux plus gros sont mis en place plus tôt dans la saison de végétation, nécessitant une mobilisation plus forte de réserves carbonées et impliquant la formation de plus petits vaisseaux plus tard dans la saison ainsi que, globalement, la mise en place d'un cerne plus fin. La réponse négative des chênes aux températures chaudes de mars peut aussi être liée à une levée de dormance et un débourrement plus précoces, augmentant un risque de dommages liés aux gelées tardives (Ducouso *et al.*, 1996 ; Lebourgeois *et al.*, 2008).

En second lieu, la croissance des chênes semble limitée par le déficit hydrique de mai à juillet, avec des corrélations négatives avec T et positives avec P (figure 4, p. 115). Bien que cette relation ne soit significative que pour au maximum 50 % des chronologies selon le mois considéré, elle est cohérente avec la réponse généralement observée sous climat tempéré (Lebourgeois *et al.*, 2004 ; Friedrichs *et al.*, 2009b ; Dolezal *et al.*, 2010 ; Michelot *et al.*, 2012). L'analyse des années caractéristiques confirme que l'intensité de la sécheresse de fin de printemps et d'été est un facteur prépondérant dans la variation interannuelle de la croissance radiale du Chêne sessile (figure 3, p. 114). D'un point de vue écophysologique, des stress hydriques marqués réduisent significativement la turgescence cellulaire dans les feuilles (Thomas et Gausling, 2000) et augmentent l'embolisme dans le xylème (Cochard *et al.*, 1992), ce qui conduit à une baisse générale de l'activité photosynthétique et de la croissance.

Le faible nombre de corrélations croissance-climat significatives et la difficulté à mettre en évidence une réponse commune des chênes sessiles de la moitié nord de la France confirment que cette espèce est peu sensible aux variations interannuelles du climat. Ces résultats peuvent être aussi la

conséquence de l'utilisation de variables climatiques simples peu représentatives des contraintes subies par l'arbre. Des variables plus complexes telles que les bilans ou déficit hydriques climatiques et édaphiques permettent de mieux décrire l'effet du climat sur la croissance ou la distribution des essences forestières (Lebourgeois *et al.*, 2005 ; Piedallu *et al.*, 2013) mais nécessitent des données indisponibles sur la période 1914-1993 sur l'ensemble de la moitié nord de la France. En revanche, la forte variation des corrélations entre les chronologies (intervalles de confiance larges en figure 4, p. 115) révèle une variabilité des réponses le long du gradient de continentalité.

Le Chêne sessile est davantage sensible au déficit hydrique sous climat océanique et plus sensible aux froids hivernaux en climat semi-continental

La sensibilité du Chêne sessile est fortement structurée le long du gradient ouest-est de continentalité (figure 5, p. 116). La réponse au déficit hydrique estival est plus marquée sous les conditions les plus sèches et les plus chaudes, c'est-à-dire sous climat océanique, avec des corrélations plus négatives avec T en juillet et août, et plus positives avec P (en juillet uniquement) (figure 6c, figure 6d, p. 117). Parallèlement, la force des corrélations positives avec les précipitations de la fin de l'automne et de l'hiver précédents diminue d'ouest en est, pour atteindre une valeur moyenne nulle sous climat semi-continental (figure 6a, p. 117). Ces résultats mettent clairement en évidence une sensibilité au déficit hydrique dépendante du climat moyen, avec une réponse plus marquée aux conditions hydriques hors saison de végétation lorsque le climat est limitant durant la saison de végétation (Lebourgeois *et al.*, 2004 ; Zweifel *et al.*, 2006 ; Cedro, 2007).

En juin, cette tendance est inversée, avec une sensibilité au déficit hydrique plus forte dans le nord-est de la France (figure 6b, p. 117). Dans cette région, 60 à 70 % du cerne sont mis en place avant la fin du mois de juin, ce qui pourrait expliquer la forte réponse au climat de ce mois. Sous climat océanique, la plus faible sensibilité aux conditions de juin par rapport à celles de mai a déjà été observée par Lebourgeois *et al.* (2004), en lien avec une croissance plus précoce qu'à l'est. En effet, les chênes sessiles débourent 10 à 20 jours plus tôt à l'ouest qu'à l'est (Lebourgeois *et al.*, 2010a), ce qui peut différer la période de croissance maximale de mai à juin le long du gradient de continentalité. Par la suite, les plus faibles précipitations estivales sous climat océanique (figure 1, p. 108, tableau I, p. 110) induisent un déficit hydrique marqué dès juillet, stress qui n'apparaît pas ou qui apparaît peu sous climat semi-continental.

Notons enfin que le Chêne sessile semble plus sensible au froid hivernal dans l'est de la France, bien que les tendances observées soient de magnitude plus faible que celles sur les stress hydriques. Ce résultat est en accord avec notre hypothèse selon laquelle la limitation de la croissance par le froid augmente sous climat semi-continental.

Conséquences pour la gestion

Notre étude confirme que la croissance radiale du Chêne sessile dans la moitié nord de la France est moins dépendante du climat que celle d'autres essences majeures de la forêt française telles que le Hêtre commun (Lebourgeois *et al.*, 2005 ; Michelot *et al.*, 2012), le Sapin ou l'Épicéa (Lebourgeois *et al.*, 2010b ; Mérian et Lebourgeois, 2013). Cependant, de fortes variations de sensibilité au climat ont été mises en évidence sur le gradient ouest-est de continentalité avec, sous climat océanique, une réponse négative au déficit hydrique durant la saison de végétation et une réponse positive aux précipitations hors saison de végétation et, sous climat semi-continental, une sensibilité généralement faible. Bien que notre période d'analyse de 1914 à 1993 ne couvre pas les années les plus récentes et plus chaudes, les différences de réponse au climat selon la longitude suggèrent des sensibilités différentes des chênes sessiles aux changements climatiques. De récentes observations mettent d'ailleurs déjà en évidence de plus forts dépérissements dans la moitié ouest de la France (Lemaire, 2011).

Des travaux en cours sur les peuplements mélangés ou sur les statuts sociaux des arbres dans la canopée fournissent des pistes aux gestionnaires pour atténuer les effets des changements climatiques, notamment la hausse prédite de la fréquence et de l'intensité des sécheresses. Par exemple, dans les contextes les plus chauds et secs du massif vosgien, la sensibilité du Sapin pectiné au déficit hydrique estival est réduite lorsque celui-ci est en mélange avec le Hêtre commun (Lebourgeois *et al.*, 2013). De même, l'irrégularisation de la canopée pourrait être un moyen efficace pour atténuer, ou du moins étaler dans le temps, les impacts des changements climatiques sur la croissance et la vitalité des arbres (Mérian et Lebourgeois, 2013).

Pierre MÉRIAN

AgroParisTech, Centre de Nancy
UMR1092, Laboratoire d'Étude
des Ressources Forêt-Bois (LERFoB)
14 rue Girardet - CS 14216
F-54042 NANCY CEDEX

et

INRA, Centre de Nancy-Lorraine
UMR1092, Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-
Bois (LERFoB)

F-54280 CHAMPENOUX

actuellement

IGN

11 rue de l'Île-de-Corse

F-54000 NANCY

(merianpierre@gmail.com)

Laurent BERGÈS

Irstea
UR EMAX
3275 route de Cézanne - CS 40061
F-13182 AIX-EN-PROVENCE CEDEX 5
(laurent.berges@irstea.fr)

François LEBOURGEOIS

AgroParisTech, Centre de Nancy
UMR1092, Laboratoire d'Étude
des Ressources Forêt-Bois (LERFoB)
14 rue Girardet - CS 14216
F-54042 NANCY CEDEX

et

INRA, Centre de Nancy-Lorraine
UMR1092, Laboratoire d'Étude des Ressources
Forêt-Bois (LERFoB)

F-54280 CHAMPENOUX

(francois.lebourgeois@agroparistech.fr)

Remerciements

Les auteurs remercient le ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt (MAAF), l'Institut national de la recherche agronomique (INRA) et l'Office national des forêts (ONF) pour leur avoir fourni les données.

BIBLIOGRAPHIE

- 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.
- BÉNICHOU (P.), LE BRETON (O.). — Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. — *La Météorologie*, vol. 7, n° 19, 1987, pp. 23-34.
- BERGÈS (L.). — Variabilités individuelle et collective de la croissance et de la densité du bois de *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. en relation avec les facteurs écologiques. — Nancy : ENGREF, 1998. — 348 p. (Thèse).
- BERGÈS (L.), DUPOUEY (J.-L.), FRANCOIS (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-Structure and Function*, vol. 14, n° 7, 2000, pp. 398-408.

- BONTEMPS (J.-D.), HERVÉ (J.-C.), DUPLAT (P.), DHÔTE (J.-F.). — Shifts in the height-related competitiveness of tree species following recent climate warming and implications for tree community composition : the case of common beech and sessile oak as predominant broadleaved species in Europe. — *Oikos*, n° 8, 2012, pp. 1287-1299.
- CEDRO (A.). — Tree-ring chronologies of downy oak (*Quercus pubescens*), pedunculate oak (*Q. robur*) and sessile oak (*Q. petraea*) in the Bielinek Nature Reserve : Comparison of the climatic determinants of tree-ring width. — *Geochronometria*, vol. 26, 2007, pp. 39-45.
- COCHARD (H.), BRÉDA (N.), GRANIER (A.), AUSSENAC (G.). — Vulnerability to air embolism of three European oak species (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl., *Q. pubescens* Willd., *Q. robur* L.). — *Annals of Forest Science*, vol. 49, n° 3, 1992, pp. 225-233.
- COOK (E.R.), PETERS (K.). — The smoothing spline : a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. — *Tree-Ring Research*, vol. 41, 1981, pp. 45-53.
- DI FILIPPO (A.), BIONDI (F.), CUFAR (K.), DE LUIS (M.), GRABNER (M.), MAUGERI (M.), SABA (E.P.), SCHIRONE (B.), PIOVESAN (G.). — Bioclimatology of beech (*Fagus sylvatica* L.) in the Eastern Alps : spatial and altitudinal climatic signals identified through a tree-ring network. — *Journal of Biogeography*, vol. 34, n° 11, 2007, pp. 1873-1892.
- DOLEZAL (J.), MAZUREK (P.), KLIMESOVA (J.). — Oak decline in southern Moravia : the association between climate change and early and late wood formation in oaks. — *Preslia*, vol. 82, n° 3, 2010, pp. 289-306.
- DUCOUSSO (A.), GUYON (J.-P.), KREMER (A.). — Latitudinal and altitudinal variation of bud burst in western populations of sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). — *Annals of Forest Science*, vol. 53, n° 2-3, 1996, pp. 775-782.
- EUFORGEN. — European Forest Genetic Resources Programme. Distribution maps. — 2009. — [En ligne] : http://www.euforgen.org/fileadmin/templates/euforgen.org/upload/Documents/Maps/JPG/Quercus_petraea.jpg (Date de la dernière consultation : 26 septembre 2014).
- FONTI (P.), GARCIA-GONZALEZ (I.). — Suitability of chestnut earlywood vessel chronologies for ecological studies. — *New Phytologist*, vol. 163, n° 1, 2004, pp. 77-86.
- FONTI (P.), SOLOMONOFF (N.), GARCIA-GONZALEZ (I.). — Earlywood vessels of *Castanea sativa* record temperature before their formation. — *New Phytologist*, vol. 173, n° 3, 2007, pp. 562-570.
- FRIEDRICH (D.A.), BÜNTGEN (U.), FRANK (D.C.), ESPER (J.), NEUWIRTH (B.), LOFFLER (J.). — Complex climate controls on 20th century oak growth in Central-West Germany. — *Tree Physiology*, vol. 29, n° 1, 2009a, pp. 39-51.
- FRIEDRICH (D.A.), TROUET (V.), BÜNTGEN (U.), FRANK (D.C.), ESPER (J.), NEUWIRTH (B.), LOFFLER (J.). — Species-specific climate sensitivity of tree growth in Central-West Germany. — *Trees-Structure and Function*, vol. 23, n° 4, 2009b, pp. 729-739.
- FRITTS (H.C.). — Tree rings and climate. — New York : Academic Press, 1976. — 567 p.
- GAUSSEN (H.), BAGNOULS (F.). — L'indice xéothermique. — *Bulletin de l'Association des géographes français*, vol. 222-223, 1952, pp. 10-16.
- HÄRDITZ (W.), NIEMEYER (T.), ASSMANN (T.), AULINGER (A.), FICHTNER (A.), LANG (A.), LEUSCHNER (C.), NEUWIRTH (B.), PFISTER (L.), QUANTE (M.), RIES (C.), SCHULDT (A.), VON OHEIMB (G.). — Climatic responses of tree-ring width and delta C-13 signatures of sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) on soils with contrasting water supply. — *Plant Ecology*, vol. 214, 2013, pp. 1147-1156.
- IGN. — Inventaire forestier - Le memento : la forêt en chiffres et en cartes. — Saint-Mandé : IGN, 2013. — 29 p. [En ligne] : http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/IMG/pdf/Int_memento_2013_BD.pdf (consulté le 26/09/2014).
- KELLY (P.M.), LEUSCHNER (H.H.), BRIFFA (K.R.), HARRIS (I.C.). — The climatic interpretation of pan-European signature years in oak ring-width series. — *Holocene*, vol. 12, n° 6, 2002, pp. 689-694.
- 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.). — RENECOFOR - Étude dendrochronologique des 102 peuplements du réseau. — Fontainebleau : Office national des forêts - Département des recherches techniques, 1997. — 307 p.
- 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, 2006, pp. 29-44.
- LEBOURGEOIS (F.), AUSSENAC (R.), LEMAIRE (J.), NÉQUIER (T.), RIGHI (J.-M.). — Croissance de la châtaigneraie limousine et climat. Réflexion sur la place du Châtaignier dans les prochaines décennies. — *Revue forestière française*, vol. LXIV, n° 6, 2012, pp. 107-126.

- 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.), GOMEZ (N.), PINTO (P.E.), MÉRIAN (P.). – Mixed stands reduce *Abies alba* tree-ring sensitivity to summer drought in the Vosges mountains, western Europe. – *Forest Ecology and Management*, vol. 303, 2013, pp. 61-71.
- LEBOURGEOIS (F.), PIEDALLU (C.). – Appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière à partir d’indices bioclimatiques. – *Revue forestière française*, vol. LVII, n° 4, 2005, pp. 331-356.
- LEBOURGEOIS (F.), PIERRAT (J.-C.), PEREZ (V.), PIEDALLU (C.), CECCHINI (S.), ULRICH (E.). – Simulating phenological shifts in French temperate forests under two climatic change scenarios and four driving global circulation models. – *International Journal of Biometeorology*, vol. 54, n° 5, 2010a, pp. 563-581.
- LEBOURGEOIS (F.), RATHGEBER (C.), ULRICH (E.). – Effet de la variabilité climatique et des événements extrêmes sur la croissance d’*Abies alba*, *Picea abies* et *Pinus sylvestris* en climat tempéré français. – *Revue forestière française*, vol. LII, n° 1, 2008, pp. 7-23.
- LEBOURGEOIS (F.), RATHGEBER (C.), ULRICH (E.). – Sensitivity of French temperate coniferous forests to climate variability and extreme events (*Abies alba*, *Picea abies* and *Pinus sylvestris*). – *Journal of Vegetation Science*, vol. 21, n° 2, 2010b, pp. 364-376.
- LEMAIRE (J.). – L’Autécologie du Chêne est mieux cernée. – *Forêt Entreprise*, n° 201, 2011, pp. 5-21.
- LINDNER (M.), MAROSCHEK (M.), NETHERER (S.), KREMER (A.), BARBATI (A.), GARCIA-GONZALO (J.), SEIDL (R.), DELZOND (S.), CORONAE (P.), KOLSTRÖMA (M.), LEXERB (M.J.), MARCHETTIE (M.). – Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. – *Forest Ecology and Management*, vol. 259, n° 4, 2010, pp. 698-709.
- MÉRIAN (P.). – Conseils pour l’échantillonnage des arbres en peuplements purs et réguliers en vue de l’estimation de leur sensibilité au climat par analyse dendroécologique. – *Revue forestière française*, vol. LXV, n° 1, 2013, pp. 21-36.
- MÉRIAN (P.). – POINTER et DENDRO : deux applications sous R pour l’analyse de la réponse des arbres au climat par approche dendroécologique. – *Revue forestière française*, vol. LXIV, n° 6, 2012, pp. 789-798.
- MÉRIAN (P.), BERT (D.), LEBOURGEOIS (F.). – An approach for quantifying and correcting sample size-related bias in population estimates of climate-tree growth relationships. – *Forest Science*, vol. 59, 2012, pp. 444-452.
- MÉRIAN (P.), LEBOURGEOIS (F.). – Consequences of decreasing the number of cored trees per plot on chronology statistics and climate-growth relationships : a multispecies analysis in a temperate climate. – *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 41, n° 12, 2011a, pp. 2413-2422.
- MÉRIAN (P.), LEBOURGEOIS (F.). – Le Statut social d’un arbre influence-t-il sa réponse au climat ? Étude dendroécologique sur le Sapin, l’Épicéa, le Pin sylvestre, le Hêtre et le Chêne sessile. – *Revue forestière française*, vol. LXV, n° 1, 2013, pp. 7-19.
- MÉRIAN (P.), LEBOURGEOIS (F.). – Size-mediated climate-growth relationships in temperate forests : a multispecies analysis. – *Forest Ecology and Management*, vol. 261, n° 8, 2011b, pp. 1382-1391.
- MICHELOT (A.), BREDI (N.), DAMESIN (C.), DUFRENE (E.). – Differing growth responses to climatic variations and soil water deficits of *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* in a temperate forest. – *Forest Ecology and Management*, vol. 265, 2012, pp. 161-171.
- MISSON (L.), RATHGEBER (C.), GUIOT (J.). – Dendroecological analysis of climatic effects on *Quercus petraea* and *Pinus halepensis* radial growth using the process-based MAIDEN model. – *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 34, n° 4, 2004, pp. 888-898.
- 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*, vol. 38, 2002, pp. 45-56.
- PETIT (R.J.), CSAIKL (U.M.), BORDACS (S.), BURG (K.), COART (E.), COTTRELL (J.), VAN DAM (B.), DEANS (J.D.), DUMOLIN-LAPEGUE (S.), FINESCHI (S.), FINKELDEY (R.), GILLIES (A.), GLAZ (I.), GOICOECHEA (P.G.), JENSEN (J.S.), KONIG (A.O.), LOWE (A.J.), MADSEN (S.F.), MATYAS (G.), MUNRO (R.C.), OLALDE (M.), PEMONGE (M.H.), POPESCU (F.), SLADE (D.), TABBENER (H.), TAURCHINI (D.), DE VRIES (S.G.M.), ZIEGENHAGEN (B.), KREMER (A.). – Chloroplast DNA variation in European white oaks - Phylogeography and patterns of diversity based on data from over 2600 populations. – *Forest Ecology and Management*, vol. 156, n° 1-3, 2002, pp. 5-26.
- PIEDALLU (C.), GÉGOUT (J.-C.), PEREZ (V.), LEBOURGEOIS (F.). – Soil water balance performs better than climatic water variables in tree species distribution modelling. – *Global Ecology and Biogeography*, vol. 22, 2013, pp. 470-482.

- PIOVESAN (G.), BIONDI (F.), BERNABEI (M.), DI FILIPPO (A.), SCHIRONE (B.). — Spatial and altitudinal bioclimatic zones of the Italian peninsula identified from a beech (*Fagus sylvatica* L.) tree-ring network. — *International Journal of Ecology*, vol. 27, n° 3, 2005, pp. 197-210.
- ROZAS (V.), SAMPEDRO (L.). — Soil chemical properties and dieback of *Quercus robur* in Atlantic wet forests after a weather extreme. — *Plant and Soil*, vol. 373, 2013, pp. 673-685.
- SCHWEINGRUBER (F.H.), NOGLER (P.). — Synopsis and climatological interpretation of Central European tree-ring sequences. — *Botanica Helvetica*, vol. 113, n° 2, 2003, pp. 125-143.
- TESSIER (L.), NOLA (P.), SERRE-BACHET (F.). — Deciduous *Quercus* in the Mediterranean region : tree-ring/climate relationships. — *New Phytologist*, vol. 126, n° 2, 1994, pp. 355-367.
- THOMAS (F.M.), GAUSLING (T.). — Morphological and physiological responses of oak seedlings (*Quercus petraea* and *Q. robur*) to moderate drought. — *Annals of Forest Science*, vol. 57, n° 4, 2000, pp. 325-333.
- ZANG (C.), ROTHE (A.). — Effect of nutrient removal on radial growth of *Pinus sylvestris* and *Quercus petraea* in Southern Germany. — *Annals of Forest Science*, vol. 70, 2013, pp. 143-149.
- ZWEIFEL (R.), ZIMMERMANN (L.), ZEUGIN (F.), NEWBERY (D.M.). — Intra-annual radial growth and water relations of trees : implications towards a growth mechanism. — *Journal of Experimental Botany*, vol. 57, n° 6, 2006, pp. 1445-1459.

VARIABILITÉ SPATIALE DE LA RÉPONSE AU CLIMAT DU CHÊNE SESSILE DANS LA MOITIÉ NORD DE LA FRANCE (Résumé)

Le Chêne sessile est une des principales essences des forêts tempérées européennes, aussi bien en termes de répartition spatiale qu'économique. Pourtant, les travaux sur la sensibilité de sa croissance au climat se limitent à des études locales (massif, région), ne permettant pas d'appréhender la variation spatiale de cette sensibilité en lien avec la variabilité des climats régionaux. Nous proposons ici une analyse de la réponse au climat des chênaies sessiliflores sur la moitié nord de la France, cette zone représentant un gradient climatique ouest-est de continentalité, depuis le climat océanique jusqu'au climat semi-continental. Au total, 120 peuplements ont été sélectionnés (720 arbres) pour construire 31 chronologies de croissance radiale. La réponse au climat a été étudiée au travers des années caractéristiques et des fonctions de corrélation *bootstrapped*. La croissance du Chêne sessile est généralement moins sensible au climat que d'autres essences, même si les croissances extrêmes sont liées au déficit hydrique estival (faible croissance les années chaudes et sèches, forte croissance les années fraîches et humides). En revanche, la sensibilité au climat varie fortement le long du gradient de continentalité. La croissance dépend d'autant plus du déficit hydrique estival que les arbres poussent sous climat océanique ; dans ce contexte, la largeur de cerne dépend aussi positivement des précipitations de l'automne et de l'hiver précédant la saison de végétation. À l'inverse, la sensibilité au froid hivernal tend à augmenter sous climat semi-continental. Ces résultats suggèrent une sensibilité régionale du Chêne sessile aux changements climatiques.

SPATIAL VARIABILITY OF SESSILE OAK RESPONSE TO CLIMATE IN THE NORTHERN HALF OF FRANCE (Abstract)

Sessile oak is among the major species in European temperate forests, both in terms of spatial distribution and economic value. In spite of this, research on sensitivity of sessile oak growth to climate is confined to a number of local studies (on the scale of a forest or region). Its scope does not enable the spatial variation of this sensitivity in connection with variability in regional climates to be assessed. In this article, we propose an analysis of climate response in sessile oak groves in the northern half of France. This area has a west-east climate gradient of continentality, ranging from an oceanic climate to a semi-continental one. A total of 120 stands were selected (720 trees) to build 31 radial growth chronologies. Climate response was investigated using characteristic years and bootstrapped correlation functions. Sessile oak growth is generally less sensitive to climate than other species, although extremes of growth are connected with water deficit (little growth in hot, dry years, high growth in cool, moist years). In contrast, climate sensitivity varies enormously along the continentality gradient. Growth depends even more on summer water deficit for trees growing in an oceanic climate; in this context, ring width is also positively dependent on rainfall in the autumn and winter preceding the vegetation season. Conversely, sensitivity to cold winter temperatures tends to increase in the semi-continental climate. These findings suggest that the sensitivity of sessile oak to climate change is regional.