

# DÉTERMINISME CLIMATIQUE DES ANNÉES DE CROISSANCE EXTRÊME CHEZ LE CHÊNE SESSILE DANS LA MOITIÉ NORD DE LA FRANCE

*EXTREME TREE-RINGS IN SESSILE OAK  
IN NORTHERN FRANCE: A DENDROCLIMATIC APPROACH*

PIERRE MÉRIAN<sup>1</sup>, JEAN-DANIEL BONTEMPS<sup>1</sup>, LAURENT BERGÈS<sup>2</sup>, FRANÇOIS LEBOURGEOIS<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *AgroParisTech, UMR1092, Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt Bois (LERFoB),  
ENGREF, 14 rue Girardet, F 54000 Nancy.*

<sup>2</sup> *Cemagref, Unité Écosystèmes Forestiers, Domaine des Barres, F 45290 Nogent-sur-Vernisson.*

Contact : pierre.merian@engref.agroparistech.fr

## RÉSUMÉ

*La réponse du chêne sessile aux événements climatiques extrêmes a été étudiée entre 1914 et 1993 au travers de l'analyse des croissances extrêmes, appelées années caractéristiques. Pour cela, 31 peuplements purs et adultes de chêne sessile ont été échantillonnés dans la moitié nord de la France (720 arbres) afin de couvrir une gamme de conditions climatiques variées (océanique à semi-continentale). L'analyse montre que, pour l'ensemble des sites, les années de croissance extrême dépendent fortement des conditions hydriques et thermiques estivales (mai à juillet), les années de faible croissance correspondant à des conditions chaudes et sèches (1921, 1976, 1989). La croissance est également plus faible lors des grands froids hivernaux (1956).*

*L'étude des années caractéristiques a permis de mettre en évidence une structuration spatiale de la réponse aux événements extrêmes, avec la distinction de 2 grandes régions dans la moitié nord de la France : les sites de l'ouest (de la Bretagne à la Champagne) sous climat océanique, avec une fréquence décennale d'années caractéristiques voisine de 0,2 et fortement dépendante de l'indice de De Martonne estival, et les sites de l'est (Lorraine, Alsace, Franche-Comté) avec une fréquence décennale plus élevée (environ 0,3) et un déterminisme climatique plus flou, dépendant à la fois des conditions estivales et hivernales.*

**MOTS-CLÉS :** ANNÉES CARACTÉRISTIQUES, DENDROCLIMATOLOGIE, CHÊNE SESSILE, FROIDS HIVERNAUX, SÉCHERESSE ESTIVALE.

## ABSTRACT

*The growth response of sessile oak to extreme climatic years has been investigated from 1914 to 1993 using extreme years growth, i.e. pointer years. 31 mature and pure stands were cored in northern France (720 trees), under varied climates, from oceanic to semi-continental conditions. The analysis has highlighted similarities in growth characteristics throughout the study area : abrupt growth changes depend mainly on summer temperatures and precipitations (from May to July), narrow rings generally correlate with warm and dry climate (1921, 1976, 1989). Narrow rings also occur with strong winter frosts (1956).*

*Pointer years analysis has allowed to define 2 main regions in northern France, with specific responses to extreme climatic events: plots in north-western France (from Brittany to Champagne) under oceanic climate, with a decennial pointer years frequency around 0,2 strongly correlated with summer De Martonne Index, and plots in north-east France (Lorraine, Alsace, Franche-Comté) under semi-continental climate, with higher frequency (around 0,3), depending on both summer and winter conditions.*

**KEYWORDS:** POINTER YEARS, DENDROCLIMATOLOGY, SESSILE OAK, SUMMER DROUGHT, WINTER FROSTS.

## INTRODUCTION

Les relations entre la croissance radiale et le climat peuvent être étudiées selon deux méthodes complémentaires. Le calcul des fonctions de réponse permet de mettre en évidence les facteurs climatiques expliquant la réponse moyenne au climat (Guiot 1991). L'analyse des croissances extrêmes, appelées années caractéristiques (AC), permet quant à elle de mettre en évidence la réponse des arbres aux événements climatiques particuliers et peu fréquents (Fritts, 1976 ; Schweingruber, 1990). Dans le contexte des changements globaux, l'analyse des effets de ces années particulières sur les peuplements forestiers apparaît comme un enjeu majeur. En effet, de nombreuses études (suite notamment aux sécheresses de 1976 ou 2003) ont montré que des vagues de chaleur ou des sécheresses intenses étaient à l'origine de dysfonctionnements forestiers pouvant aboutir à la mort des arbres (Leuzinger *et al.*, 2005 ; Pichler et Oberhuber, 2007 ; Bréda et Badeau, 2008). Les modèles climatiques prédisant une augmentation de la durée et de l'intensité des sécheresses estivales (Déqué, 2007 ; Planton *et al.*, 2008), nous pouvons supposer que les épisodes de forte sécheresse du XX<sup>e</sup> siècle correspondront à des années « normales » d'ici quelques décennies.

Dans la moitié Nord de la France, le chêne sessile (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) est une des principales essences forestières, aussi bien en surface qu'en valeur économique (IFN, 2007). Même si les chênes sont parmi les espèces les plus étudiées en Europe, les travaux en France sont rares et limités dans l'espace (massif forestier) et dans le temps (Becker *et al.*, 1994 ; Tessier *et al.*, 1994 ; Bréda, 1998 ; Lebourgeois *et al.*, 2004 ; Bergès *et al.*, 2005). Ces études ne permettent pas d'avoir une vision de la sensibilité aux événements climatiques extrêmes à grande échelle, i.e. sous climats contrastés et sur l'ensemble du XX<sup>e</sup> siècle. Afin de répondre à cette question, trois jeux de données ont été regroupés pour obtenir 31 sites répartis dans la moitié nord de la France (Lebourgeois, 1997 ; Bergès *et al.*, 2005 ; Bontemps, 2006). Ces sites couvrent une vaste gamme de conditions climatiques (océanique à semi-continentale), et permettent une analyse rétrospective sur une période commune de 80 ans (1914-1993). Les objectifs sont d'analyser la variabilité spatiale et temporelle des années caractéristiques, de définir les paramètres climatiques influents, et de mettre en évidence les effets des conditions locales sur la réponse aux événements extrêmes.

## I - MATÉRIELS ET MÉTHODES

### 1 - Description des sites

Un total de 31 sites a été échantillonné dans la moitié nord de la France (Figure 1, Figure 3). Les peuplements sont des futaies régulières adultes de plaine dont l'âge moyen en 1993 était compris entre 76 et 143 ans. Le climat varie d'un climat océanique doux à l'ouest à un climat semi-continentale froid et plus arrosé à l'est. Une analyse pédologique a permis de préciser le contexte stationnel par la mesure du pH de l'horizon organo-minéral A (pHA) et le calcul de la Réserve Utile Maximale en eau (RUM). La RUM a été estimée sur une profondeur d'un mètre en prenant en compte, pour chaque horizon, la texture (Bruand *et al.*, 2003), la charge en éléments grossiers et l'épaisseur de l'horizon. Le pHA varie de 4,1 à 5,1 et la RUM de 56 à 171 mm (Figure 3).

### 2 - Mesures des largeurs de cerne et calcul des années caractéristiques

Les 720 arbres dominants ont été carottés (entre 1994 et 2004) jusqu'à la moelle à une hauteur de 1,30 m à l'aide d'une tarière de Pressler (une carotte par arbre, 14 à 30 arbres par peuplement) (Figure 2A,B). Les 77 000 cernes ont été mesurés avec une précision de 1/100 mm à l'aide d'un système vidéo-informatisé

spécifique (Becker, non publié) (Figure 2C, D). Après mesure, les séries individuelles ont été interdatées à l'aide d'années caractéristiques calculées, sur chaque site, selon la méthode proposée par Becker (Becker, 1989). Une année est considérée comme caractéristique lorsqu'au moins 75% des arbres d'un peuplement présentent le même signe de changement de croissance et une variation absolue de largeur de cerne supérieure à 10% de la largeur du cerne de l'année précédente. Le pourcentage de variation est appelé Écart Relatif Moyen (ERM). Un ERM positif correspond ainsi à une année où le cerne est au moins 10% plus large que celui de l'année précédente.

### 3 - Données climatiques

Les données météorologiques sont issues du modèle spatialisé Tyndall qui fournit des séries climatiques homogènes sur l'ensemble du XX<sup>e</sup> siècle à une résolution spatiale de 15 km (Mitchell *et al.*, 2004). Ainsi, pour chaque site et pour chaque mois entre 1914 et 1993, nous disposons des précipitations (P) et des températures moyennes (Tm). Comme indicateur du niveau de stress hydrique estival, l'indice d'aridité de De Martonne a été calculé sur la période de mai à juillet (De Martonne *et al.*) (Lebourgeois et Piedallu, 2005).

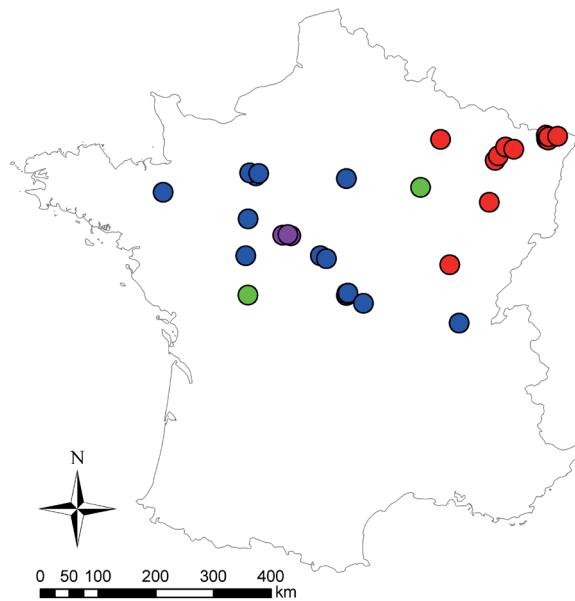


Figure 1 - Localisation géographique des 31 peuplements purs de chêne sessile. Les couleurs correspondent aux 4 groupes définis par la classification ascendante hiérarchique. Bleu : groupe 1 ; rouge : groupe 2 ; vert : groupe 3 ; violet : groupe 4.

#### 4 - Analyses statistiques sur les années caractéristiques

Afin de mettre en évidence des similitudes de réponse aux extrêmes climatiques entre les sites, une Analyse en Composantes Principales (ACP) a été réalisée sur les ERM des années caractéristiques, la valeur 0 ayant été attribuée aux années non caractéristiques. Les 31 sites ont été regroupés au moyen d'une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH - métrique : Euclidien ; algorithme de hiérarchie : Ward) réalisée sur les coordonnées

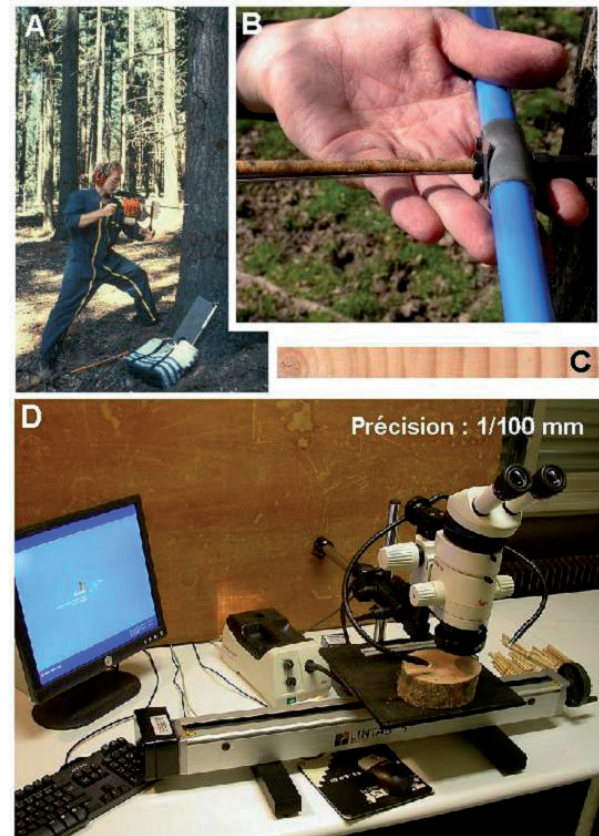


Figure 2 - Récolte des échantillons de bois et lecture des largeurs de cerne. A : Carottage manuel à la tarière de Pressler (source : <http://efdp.nancy-engref.inra.fr/perso/flb.htm>). B : Extraction d'une carotte de la tarière de Pressler (© J. Willm 2007). C : Préparation des carottes pour la lecture microscopique (planage) (© P. Mérian 2009). D : Exemple de ban dendrométrique de lecture de largeur de cerne, utilisé à DYNAFOR (© L. Burnel 2007).

données factorielles des deux premiers axes de l'ACP. L'ensemble des traitements statistiques a été fait à l'aide du logiciel Splus 2000.

## II - RÉSULTATS

### 1 - Sensibilité générale aux événements extrêmes

Sur la période 1914-1993, le nombre d'années caractéristiques (AC) par site a été en moyenne de 28 (min : 16 ; max : 40), soit environ 35 % (Figure 3). Pour l'ensemble des sites, ces AC se répartissent équitablement entre années positives et négatives (de 36% à 62% d'AC positives). Aucun paramètre stationnel ou dendrométrique ne permet d'expliquer significativement les différences du nombre total et de la répartition des AC entre les sites.

Dans une grande majorité des cas, les croissances extrêmes coïncident avec des années particulièrement sèches ou pluvieuses durant la période allant de mai à

juillet (Figure 4) ; on observe également un effet négatif des grands froids hivernaux (Figure 4). Les chênaies sessiliflores ont réagi massivement et négativement en 1921, 1976 et 1989, années connues pour leurs étés chauds et secs (températures estivales supérieures de 1 à 2,6°C à la moyenne 1914-1993, et précipitations estivales inférieures de 24% à 48%). Pour ces années, la réduction de la croissance a été en moyenne de -32%, -28% et -25%. Les peuplements ont aussi réagi négativement en 1933 et en 1956 (-27% et -24%), années connues respectivement pour une pullulation de chenilles processionnaires (Lebourgeois *et al.*, 2004) et un froid hivernal intense (température moyenne de février inférieure de 9°C par rapport à la moyenne 1914-1993). À l'inverse, les chênaies sessiliflores

	Données stationnelles									Données dendrométriques				
	Longitude	Latitude	Altitude (m)	T <sub>an</sub> (°C)	T <sub>m7</sub> (°C)	P <sub>an</sub> (mm)	P <sub>7</sub> (mm)	pHA	RUM (mm)	Nb. arbres	Age	Largeur de cerne (mm)	Nb. AC positives	Nb.AC négatives
A	1°32'05" W	48°10'37" N	80	11,3	18,1	688	46	4,10	148	28	99 (7)	2.05 (0.72)	13	15
B1	0°36'47" E	48°29'06" N	242	9,9	16,9	720	55	4,09	157	20	143 (41)	1.49 (0.62)	9	10
B2	0°28'10" E	48°31'41" N	250	10,6	17,8	673	50	4,09	152	18	124 (20)	1.64 (0.66)	9	17
B3	0°40'46" E	48°31'21" N	220	10,2	17,3	689	53	4,50	76	30	85 (2)	1.75 (0.62)	10	14
C	0°27'19" E	47°48'46" N	126	10,9	18,3	673	50	4,08	120	27	95 (13)	2.13 (0.85)	10	7
D	0°25'20" E	47°14'16" N	96	11,3	18,8	673	48	4,07	77	15	107 (14)	1.81 (0.64)	6	10
G1	2°07'28" E	47°15'14" N	176	11,0	18,9	672	51	4,30	162	23	78 (8)	2.35 (0.88)	16	14
G2	2°16'12" E	47°12'27" N	179	11,1	19,0	692	52	4,41	137	15	103 (18)	2.06 (0.69)	18	11
H1	2°43'27" E	46°38'11" N	267	10,7	18,6	753	60	4,29	145	18	116 (29)	1.47 (0.52)	14	9
H2	2°43'35" E	46°40'01" N	260	10,7	18,6	753	60	4,30	111	30	111 (6)	1.68 (0.61)	13	12
H3	2°45'32" E	46°40'14" N	254	10,7	18,6	753	60	5,12	135	14	137 (40)	1.75 (0.6)	11	7
J	3°06'41" E	46°30'38" N	282	10,2	18,2	761	65	4,27	143	15	134 (35)	1.79 (0.63)	10	10
K	2°43'43" E	48°27'10" N	80	11,0	18,7	612	55	4,60	148	29	108 (4)	1.85 (0.79)	16	14
O	5°14'18" E	46°10'14" N	260	10,7	19,9	875	68	4,90	171	30	85 (8)	1.91 (0.66)	13	16
<b>Groupe 1</b>			<b>198</b>	<b>10,7</b>	<b>18,4</b>	<b>713</b>	<b>55</b>	<b>4,37</b>	<b>134</b>		<b>111 (19)</b>	<b>1.87 (0.69)</b>	<b>12 (3.3)</b>	<b>12 (3.2)</b>
L	4°57'36" E	49°01'58" N	180	10,1	18,2	818	67	4,10	57	26	137 (22)	1.6 (0.68)	13	17
N	5°04'27" E	47°04'56" N	220	10,4	19,3	794	60	4,90	169	30	84 (5)	2.27 (0.95)	12	13
P	6°02'22" E	48°01'33" N	330	9,8	18,3	890	73	4,90	156	30	127 (19)	1.48 (0.6)	14	19
Q1	6°13'39" E	48°40'24" N	286	9,5	17,9	832	70	5,02	160	18	104 (13)	2.05 (0.8)	13	18
Q2	6°18'18" E	48°44'31" N	266	9,6	18,0	798	68	4,67	145	19	103 (18)	2.15 (0.92)	15	20
Q3	6°29'39" E	48°52'18" N	315	9,6	18,0	775	68	4,60	155	30	83 (3)	2.18 (0.8)	14	15
Q4	6°40'30" E	48°49'58" N	275	9,6	18,0	761	69	4,75	151	15	80 (8)	2.5 (1.09)	16	16
R1	7°27'40" E	49°00'56" N	320	9,2	17,8	744	71	4,30	151	29	127 (6)	1.33 (0.44)	14	17
R2	7°27'55" E	48°57'19" N	333	9,3	17,8	733	71	4,17	129	24	129 (31)	1.6 (0.63)	15	14
R3	7°30'67" E	48°56'34" N	318	9,6	18,3	700	70	4,43	161	29	107 (24)	2.06 (0.81)	10	10
R4	7°30'50" E	48°59'28" N	346	9,6	18,3	700	70	4,34	56	17	118 (25)	1.51 (0.76)	21	19
R5	7°43'43" E	48°59'22" N	350	9,8	18,6	706	70	4,60	164	24	76 (3)	1.99 (0.8)	10	12
<b>Groupe 2</b>			<b>295</b>	<b>9,7</b>	<b>18,2</b>	<b>771</b>	<b>69</b>	<b>4,6</b>	<b>138</b>		<b>108 (17)</b>	<b>1.91 (0.79)</b>	<b>14 (2.9)</b>	<b>16 (3.1)</b>
E	0°29'40" E	46°37'36" N	116	11,3	19,0	753	50	4,10	97	28	81 (4)	1.89 (0.81)	13	15
M	4°27'34" E	48°17'50" N	160	10,5	18,8	699	56	4,40	161	24	84 (6)	2 (0.82)	17	22
<b>Groupe 3</b>			<b>138</b>	<b>10,9</b>	<b>18,9</b>	<b>726</b>	<b>53</b>	<b>4,25</b>	<b>129</b>		<b>83 (5)</b>	<b>1.95 (0.82)</b>	<b>15 (2.0)</b>	<b>19 (3.5)</b>
F1	1°15'33" E	47°34'07" N	127	11,0	18,7	646	49	4,30	165	30	90 (7)	2.05 (0.77)	19	16
F2	1°26'38" E	47°33'43" N	102	11,0	18,7	642	49	5,10	101	18	117 (32)	2.02 (0.83)	20	20
F3	1°22'34" E	47°34'50" N	117	11,0	18,7	642	49	4,23	145	17	115 (23)	1.63 (0.6)	14	14
<b>Groupe 4</b>			<b>115</b>	<b>11,0</b>	<b>18,7</b>	<b>643</b>	<b>49</b>	<b>4,54</b>	<b>137</b>		<b>107 (21)</b>	<b>1.90 (0.73)</b>	<b>18 (3.2)</b>	<b>17 (3.1)</b>

Figure 3 - Caractéristiques moyennes des sites. Les écarts-types sont présentés entre parenthèses. Les peuplements sont regroupés selon la CAH. Les données en gras correspondent aux caractéristiques moyennes par groupe. T<sub>an</sub> et P<sub>an</sub> : température moyenne et précipitations annuelles moyennes calculées entre 1914 et 1993 ; T<sub>m7</sub> et P<sub>7</sub> : température et précipitations de juillet moyennes calculées entre 1914 et 1993 ; pHA : pH de l'horizon organo-minéral A ; RUM : réserve utile maximale calculée sur les 100 premiers centimètres du profil pédologique.

ont répondu positivement aux années à étés frais et/ou humides, telles 1931, 1946, 1958 et 1982 au cours desquelles la croissance a été supérieure respectivement de 36%, 52%, 57% et 54% (Figure 4).

## 2 - Classification et regroupement des sites

L'ACP et la CAH ont permis de définir 4 groupes ayant des similitudes dans leur réponse aux extrêmes climatiques (Figure 3, Figure 5). On distingue 2 groupes « principaux » (groupe 1 avec 14 sites et groupe 2 avec 12 sites) et 2 groupes « secondaires » (groupe 3 avec 2 sites et groupe 4 avec 3 sites) (Figure 6). Le groupe 1 rassemble les sites de l'ouest de la zone d'étude, et le groupe 2 les sites de l'est (Figure 3, Figure 1). Le groupe 4 rassemble 3 sites d'un même massif forestier de l'ouest de la zone d'étude (sites F) ; les AC sont très proches de celles du groupe 1 sauf entre 1949 et 1953 où les placettes du groupe 4 présentent 5 AC consécutives (1949 et 1952 en négatif ; 1950, 1951 et 1953 en positif). Enfin, le groupe 3 rassemble les sites E et

M, éloignés géographiquement mais présentant des AC communes : 1917 (-), 1929 (+), 1940 (+), 1948 (+) et 1984 (+).

L'ACP montre que le premier facteur de structuration de la variabilité de la réponse aux extrêmes climatiques est le gradient de continentalité, avec un coefficient de corrélation (r) de 0,601 entre les coordonnées factorielles de l'axe 1 et la longitude (p<0,00001). Ce gradient se traduit par des différences mésoclimatiques entre l'ouest (océanique) et l'est (semi-continentale) qui engendrent des AC spécifiques à chaque groupe et pour des années à contrainte commune, des différences d'ERM entre les groupes. Ce gradient s'exprime principalement au travers de l'indice de De Martonne estival (mai à juillet), i.e. de l'intensité moyenne de la sécheresse sur la période 1914-1993, supérieure de 20 à 25% dans la moitié ouest de la France. Le second axe de l'ACP traduit un effet de la fertilité minérale du sol, au travers du pHA, avec une corrélation de 0,269 entre les coordonnées factorielles de l'axe 2 et pHA (p<0,001). L'analyse des ERM n'a cependant pas révélé de différences significatives entre les sites à pHA faibles (<4,5) et à pHA élevés (>4,5).

Année	Années caractéristiques				Anomalies climatiques estivales (mai à juillet)			
	Groupe 1		Groupe 2		Groupe 1		Groupe 2	
	ERM	%	ERM	%	Tm (°C)	P (mm)	Tm (°C)	P (mm)
1915			-25	67			1,23	-40,7
1916			51	75			-0,78	12,6
1919			-20	50			-0,71	-52,1
<b>1921</b>	<b>-32</b>	<b>43</b>	<b>-31</b>	<b>42</b>	<b>1,11</b>	<b>-47,1</b>	<b>1,82</b>	<b>-75,1</b>
1922			55	50			0,70	-21,8
1926	-32	36			-1,56	7,1		
1928			-24	58			-0,10	-75,3
<b>1931</b>	<b>45</b>	<b>43</b>	<b>30</b>	<b>33</b>	<b>-0,08</b>	<b>25,5</b>	<b>0,72</b>	<b>49,7</b>
<b>1933</b>	<b>-30</b>	<b>64</b>	<b>-22</b>	<b>75</b>	<b>-0,04</b>	<b>-50,9</b>	<b>-0,44</b>	<b>31,0</b>
1934	-26	43			0,99	-55,7		
1936	75	50			-0,50	93,0		
1941	-25	43			A1 = -3.16	/		
1943			48	83			A2 = 1.94	/
<b>1946</b>	<b>41</b>	<b>57</b>	<b>61</b>	<b>100</b>	<b>-0,21</b>	<b>-4,1</b>	<b>0,71</b>	<b>33,8</b>
1947			-28	67			<b>2,66</b>	<b>-60,1</b>
1951			27	33			-0,53	53,5
1952			-25	33			1,37	-91,1
1954	-27	57			-0,59	-50,5		
1955			46	58			-0,52	49,0
<b>1956</b>	<b>-24</b>	<b>50</b>	<b>-24</b>	<b>42</b>	<b>A2 = -8.35</b>	<b>/</b>	<b>A2 = -10.37</b>	<b>/</b>
<b>1958</b>	<b>55</b>	<b>57</b>	<b>58</b>	<b>83</b>	<b>0,22</b>	<b>95,6</b>	<b>0,07</b>	<b>32,8</b>
1961			35	42			-1,22	-1,0
1962			-23	58			-1,51	-64,6
1964			-22	58			1,33	-111,6
1965			39	42			-1,21	40,0
1966			-27	33			-0,41	2,0
1968			48	42			-1,15	17,5
1969			47	75			-0,07	0,1
1972	-23	43			-1,31	-14,6		
<b>1976</b>	<b>-26</b>	<b>71</b>	<b>-28</b>	<b>83</b>	<b>2,63</b>	<b>-93,7</b>	<b>2,27</b>	<b>-89,1</b>
1977			45	33			-0,79	43,8
1978	46	43			-0,95	9,1		
<b>1982</b>	<b>60</b>	<b>43</b>	<b>51</b>	<b>83</b>	<b>1,33</b>	<b>13,8</b>	<b>0,86</b>	<b>58,4</b>
1983			-25	33			1,03	-38
1989	-25	57			2,07	-72,8		
1993	35	36			0,41	23,6		
<b>Nb AC+</b>	<b>7</b>		<b>14</b>					
<b>ERM+</b>	<b>51</b>		<b>46</b>					
<b>%</b>	<b>47</b>		<b>60</b>					
<b>Nb AC-</b>	<b>10</b>		<b>13</b>					
<b>ERM-</b>	<b>-27</b>		<b>-25</b>					
<b>%</b>	<b>51</b>		<b>46</b>					

Figure 4 - Années caractéristiques et anomalies climatiques observées sur la période 1914-1993 pour les groupes 1 et 2. Une année est considérée comme caractéristique à l'échelle du groupe quand au moins 33% des peuplements présentent cette année caractéristique. Les anomalies climatiques sont définies comme la différence entre la valeur de l'année et la moyenne calculée sur la période 1914 - 1993. Ces anomalies sont calculées pour la période estivale (mai à juillet) sauf pour les années à hiver froid (A1 : anomalie thermique de janvier ; A2 : anomalie thermique de février). Les données en gras indiquent les années où les 2 groupes ont réagi ; les données en italique indiquent les années à hiver froid. ERM : écart relatif moyen (%) ; AC : année caractéristique ; «+» : année à croissance plus forte ; «-» : année à croissance plus faible.

continental. Par exemple, l'écart-type de l'indice de De Martonne estival entre 1914 et 1993 est de 2,39 pour le groupe 1 contre 2,86 pour le groupe 2. Cela traduit des contraintes climatiques plus homogènes à l'ouest et limite les changements abrupts de largeur de cerne.

L'évolution temporelle de la fréquence des AC diffère entre les 2 groupes. La fréquence du groupe 1 a été plus stable au cours des 80 années, variant de 0,15 à 0,25, excepté pour la décennie 1964-1973, avec une valeur de 0,1 (Figure 4). La fréquence est fortement corrélée avec la variabilité inter-annuelle de l'indice de De Martonne estival (Figure 6 :  $r = 0,603$ ,  $p < 0,0001$ ). Cela montre que la croissance de chêne sessile dans l'ouest de la France

est fortement liée à la variabilité inter-annuelle de la contrainte hydrique estivale. Pour le groupe 2, la fréquence des AC varie de 0,15 à 0,35, avec une baisse à partir de 1984 (fréquence divisée par 3 ; Figure 6). Le déterminisme climatique de cette évolution est moins net que pour le groupe 1. On observe une corrélation entre la fréquence des AC et l'écart-type de la température moyenne annuelle ( $r = 0,294$ ,  $p < 0,001$ ) et celui de l'indice de De Martonne estival ( $r = 0,12$ ,  $p = 0,045$ ).

### CONCLUSION

Deux grandes régions se distinguent dans la moitié nord de la France, avec une limite longitudinale à hauteur de Troyes. Cette limite dendroclimatique a déjà été mise en évidence en dendroarchéologie. Lambert (1996) distingue clairement deux ensembles de chronologies régionales de référence dans la moitié nord de la France.

Les principaux facteurs climatiques explicatifs des AC chez le chêne sessile sont le niveau de stress hydrique estival et les froids hivernaux. Ces observations sont en accord avec les travaux menés sur les chênes sessile et pédonculé en Europe (Lévy *et al.*, 1992 ; Becker *et al.*, 1994 ; Lebourgeois *et al.*, 2004, Friedrichs *et al.*,

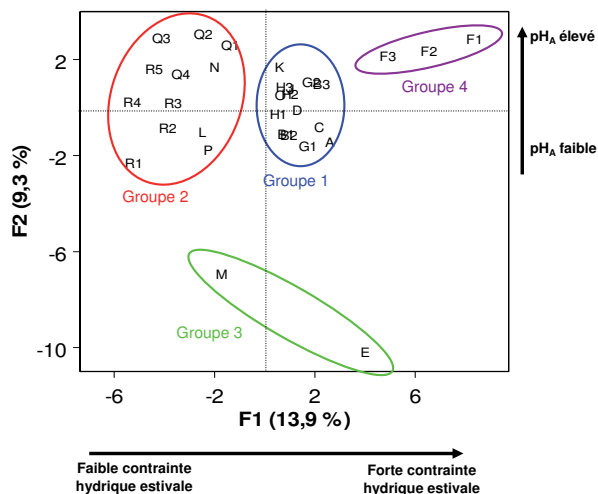


Figure 5 - Projection des 31 sites sur le plan défini par les deux premiers axes de l'ACP. Les sites ont été regroupés selon les résultats de la CAH réalisée sur les coordonnées factorielles des axes 1 et 2.

2009 ; Helama *et al.*, 2009), et se retrouvent également pour d'autres essences forestières (Dittmar *et al.*, 2003 ; Macias *et al.*, 2006 ; Lebourgeois, 2007 ; Bouriaud et Popa, 2009). Notons que la contrainte hydrique estivale joue un rôle plus fort dans l'ouest (sous climat océanique) que dans l'est (sous climat semi-continentale) où l'intensité moyenne de la sécheresse estivale est 20 à 25% inférieure. En revanche, nous n'observons aucun effet significatif des conditions locales de xéricité (appréhendée au travers de la RUM) sur l'intensité de la réduction de la croissance lors des sécheresses estivales, contrairement à ce qui a déjà été montré (Lévy *et al.*, 1992 ; Becker *et al.*, 1994 ; Bréda et Pieffer, 1999). Cela peut s'expliquer par le fait que 80% des sites se situent en conditions de croissance peu limitantes, avec le plus souvent une RUM supérieure à 120 mm, seuil au-dessus duquel la sensibilité de la croissance radiale à la sécheresse estivale diminue fortement (Mérian, 2008). Enfin, dans une moindre mesure, le chêne sessile apparaît sensible aux températures de janvier et février, ce qui est cohérent avec les études sur la sensibilité des espèces à l'embolie hivernale (Cochard *et al.*, 1992 ; Cochard *et al.*, 2001).

La structuration des sites des groupes 1 et 2 selon le pH est à nuancer. La difficulté à comprendre l'effet du pH sur la sensibilité aux événements extrêmes peut venir de la corrélation entre pH<sub>A</sub> et longitude ( $R^2 = 0,179$  ;  $p < 0,001$ ). Ainsi, l'effet pH<sub>A</sub> pourrait contenir un effet « gradient de continentalité ». Aucune étude dendrochronologique sur le chêne sessile en Europe n'a mis en évidence un effet du pH sur la sensibilité au climat.

Dans notre étude, les conditions climatiques de l'automne précédent ne semblent pas jouer de rôle sur

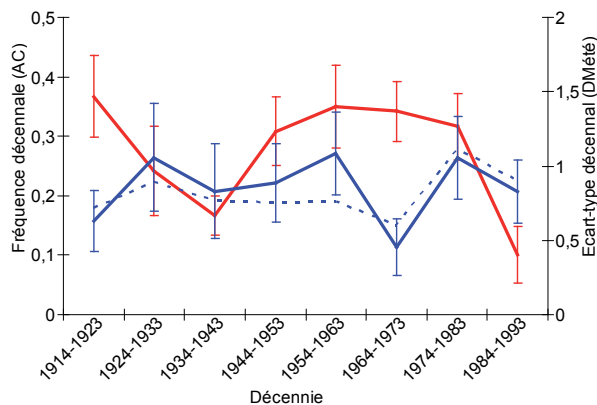


Figure 6 - Evolution de la fréquence décennale moyenne des années caractéristiques pour les groupes 1 (trait bleu) et 2 (trait rouge) entre 1914 et 1993 et de l'écart-type décennal de l'indice de De Martonne estival pour le groupe 1 (pointillés bleus). L'écart-type de l'indice de De Martonne estival (DMété) traduit la variabilité inter-annuelle des contraintes hydriques et thermiques estivales sur une décennie.

l'occurrence des années caractéristiques. Les travaux sur la réponse des chênes au climat moyen mettent pourtant en avant l'importance des conditions de septembre et d'octobre sur la mise en réserve d'hydrates de carbone, remobilisés au printemps de l'année suivante (Bréda et Granier, 1996 ; Barbaroux et Bréda, 2002). Cela laisse penser que les réserves carbonées ne participent qu'à la mise en place d'un faible pourcentage du cerne total (Santini *et al.*, 1994 ; Nola, 1996), la majeure partie étant liée aux conditions climatiques de la saison de végétation.

Dans notre zone d'étude, la fréquence des AC dépend plus de la variabilité inter-annuelle de la contrainte que du niveau moyen de la contrainte. A nouveau, cela peut s'expliquer par l'échantillonnage de contextes stationnels favorables, qui n'imposent pas de contrainte permanente de croissance. Cependant, les sites du groupe 4, situés au cœur de la zone couverte par les sites du groupe 1, présentent une fréquence d'AC plus forte que celle du groupe 1 (Figure 3). L'écart-type de l'indice de De Martonne estival n'étant pas significativement différent entre les 2 groupes (test de comparaison de moyenne :  $t = 0,651$ ), la plus forte sensibilité au climat du groupe 4 pourrait être due à un niveau moyen de contrainte hydrique estivale plus élevé, l'indice de De Martonne estival étant inférieur en moyenne de 15% pour le groupe 4 sur la période 1914-1993.

Au final, le bilan hydrique estival apparaît comme la principale contrainte de croissance du chêne sessile, les années de très faible croissance correspondant aux années les plus sèches et les plus chaudes. Sur la gamme de conditions écologiques couvertes par l'échantillon, la fréquence des AC dépend principalement de la variabilité inter-annuelle du climat, sauf dans les conditions les plus contraignantes (groupe 4).

Pour les 70 prochaines années, les modèles climatiques prévoient, en France et en période estivale, une hausse des températures de 2 à 4 °C couplée à une diminution de 35 à 45% des précipitations (Déqué, 2007 ; Giorgi *et al.*, 2004). Cela pourrait se traduire, en plus d'une diminution plus forte de la croissance pour une AC donnée, par une hausse du nombre d'AC. La comparaison des groupes 1 et 4 montre qu'une diminution d'un point de l'indice de De Martonne estival conduit à une augmentation de la fréquence

décennale des AC de 0,1 point. Selon les modèles climatiques, la fréquence décennale des AC dans l'ouest de la France pourrait ainsi passer de 0,25 à 0,4 d'ici à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle. Cette analyse des années caractéristiques sur le chêne sessile dans la moitié nord de la France gagnerait à être complétée par une analyse des relations « cerne - climat moyen », qui permettrait de mettre en évidence d'éventuelles évolutions de la réponse de la croissance au climat au cours du XX<sup>e</sup> siècle.

## BIBLIOGRAPHIE

- BARBAROUX C., BRÉDA N., 2002. Contrasting distribution and seasonal dynamics of carbohydrate reserves in stem wood of adult ring-porous sessile oak and diffuse-porous beech trees. *Tree Physiology*, 22/17, 1201-1210.
- BECKER M., 1989. 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*, 19, 1110-1117.
- BECKER M., NIEMINEN T.M., GEREMIA F., 1994. Short-Term Variations and Long-Term Changes in Oak Productivity in Northeastern France - the Role of Climate and Atmospheric CO<sub>2</sub>. *Annals of Forest Science*, 51/5, 477-492.
- BERGÈS L., CHEVALIER R., DUMAS Y., FRANC A., GILBERT J.-M., 2005. Sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) site index variations in relation to climate, topography and soil in even-aged high-forest stands in northern France. *Annals of Forest Science*, 62/5, 391-402.
- BONTEMPS J.-D., 2006. Évolution de la productivité des peuplements réguliers et monospécifiques de Hêtre (*Fagus sylvatica* L.) et de Chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.) dans la moitié Nord de la France au cours du XX<sup>e</sup> siècle. Thèse de doctorat, École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Nancy (France), 357 p.
- BOURIAUD O., POPA I., 2009. Comparative dendroclimatic study of Scots pine, Norway spruce, and silver fir in the Vrancea Range, Eastern Carpathian Mountains. *Trees-Structure and Function*, 23/1, 95-106.
- BRÉDA N., BADEAU V., 2008. Forest tree responses to extreme drought and some biotic events: Towards a selection according to hazard tolerance? *Comptes Rendus Geoscience*, 340/9-10, 651-662.
- BRÉDA N., GRANIER A., 1996. Intra- and interannual variations of transpiration, leaf area index and radial growth of a sessile oak stand (*Quercus petraea*). *Annals of Forest Science*, 53/2-3, 521-536.
- BRÉDA N., PIEFFER M., 1999. Bilan hydrique et impact des épisodes de sécheresse sur la croissance radiale des chênes. Rapport Scientifique Final, Inter-Région, Dépérissement forestier en vallée du Rhin, 60 p.
- BRÉDA N., 1998. Dépérissement forestier en vallée du Rhin. Analyse rétrospective de la croissance radiale des chênes de la forêt domaniale de La Harth. INRA Centre de Recherches Forestières Unité d'Ecophysiologie Champenoux (France), Nancy, 50 p.
- BRUAND A., PEREZ FERNANDEZ P., DUVAL O., 2003. Use of class pedotransfer functions based on texture and bulk density of clods to generate water retention curves. *Soil Use and Management*, 19/3, 232-242.
- COCHARD H., BRÉDA N., GRANIER A., AUSSENAC G., 1992. Vulnerability to air embolism of three European oak species (*Quercus petraea* (Matt) Liebl, *Q. pubescens* Willd, *Q. robur* L). *Annals of Forest Science*, 49/3, 225-233.
- COCHARD H., LEMOINE D., AMÉGLIO T., GRANIER A., 2001. Mechanisms of xylem recovery from winter embolism in *Fagus sylvatica*. *Tree Physiology*, 21/1, 27-33.
- DÉQUÉ M., 2007. 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*, 57/1-2, 16-26.
- DITTMAR C., ZECH W., ELLING W., 2003. Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe - a dendroecological study. *Forest Ecology and Management*, 173/1-3, 63-78.
- FRIEDRICH D.A., NEUWIRTH B., WINIGER M., LOFFLER J., 2009. Methodologically induced differences in oak site classifications in a homogeneous tree-ring network. *Dendrochronologia*, 27/1, 21-30.
- FRITTS H.C., 1976. Tree rings and climate. Academic Press, London, New York, San Francisco, 567 p.
- GIORGI F., BI X.Q., PAL J., 2004. Mean, interannual variability and trends in a regional climate change experiment over Europe. II: climate change scenarios (2071-2100). *Climate Dynamics*, 23/7-8, 839-858.
- GUIOT J., 1991. The bootstrapped response function. *Tree-Ring Bulletin*, 51, 39-41.
- HELAMA S., LAANELAID A., RAISIO J., TUOMENVIRTA H., 2009. Oak decline in Helsinki portrayed by tree-rings, climate and soil data. *Plant and Soil*, 319/1-2, 163-174.
- IFN (INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL), 2007. La forêt française - Les résultats issus des campagnes d'inventaire 2005 et 2006. Inventaire Forestier National, Nogent-sur-Vernisson, 143 p.
- LAMBERT G., 1996. Recherche de signaux anthropiques dans les séries dendrochronologiques du Moyen Âge. Exemple de séquences de Charavines-Colletière. Actes du V<sup>e</sup> Congrès International d'Archéologie Médiévale Grenoble, 6-9 Octobre 1993, 143-152.
- LEBOURGEOIS F., PIEDALLU C., 2005. Appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière à partir d'indices bioclimatiques. *Revue Forestière Française* (Nancy), 57/4, 331-356.
- LEBOURGEOIS F., 1997. RENECOFOR - Etude dendrochronologique des 102 peuplements du réseau. 307 p.

- LEBOURGEOIS F., 2007. 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*, 64/3, 333-343.
- LEBOURGEOIS F., COUSSEAU G. DUCOS Y., 2004. Climate-tree-growth relationships of *Quercus petraea* Mill. stand in the Forest of Berce ("Futaie des Clos", Sarthe, France). *Annals of Forest Science*, 61/4, 361-372.
- LEUZINGER S., ZOTZ G., ASSHOFF R. KORNER C., 2005. Responses of deciduous forest trees to severe drought in Central Europe. *Tree Physiology*, 25/6, 641-650.
- LÉVY G., BECKER M. DUHAMEL D., 1992. A Comparison of the Ecology of Pedunculate and Sessile Oaks - Radial Growth in the Center and Northwest of France. *Forest Ecology and Management*, 55/1-4, 51-63.
- MACIAS M., ANDREU L., BOSCH O., CAMARERO J.J., GUTIERREZ E., 2006. Increasing aridity is enhancing silver fir (*Abies alba* mill.) water stress in its south-western distribution limit. *Climatic Change*, 79/3-4, 289-313.
- MÉRIAN P., 2008. Dendroécologie du chêne sessile (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) dans la moitié nord de la France, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Nancy (France), 39 p.
- MITCHELL T.D., CARTER T.R., JONES P.D., HULME M. NEW M., 2004. A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe : the observed record (1901-2000) and 13 scenarios (2001-2100). *Tyndall Centre Working Paper*, 55, 1-25.
- NOLA P., 1996. Climatic signal in earlywood and latewood of deciduous oaks from northern Italy. In : J.S. Dean, D.M. Meko and T.W. Swetman (Editors), *Tree Rings, Environment, and Humanity. Radiocarbon*. The University of Arizona, Department of Geosciences, Tucson, 249-258.
- PICHLER P. OBERHUBER W., 2007. Radial growth response of coniferous forest trees in an inner Alpine environment to heat-wave in 2003. *Forest Ecology and Management*, 242/2-3, 688-699.
- PLANTON S., DÉQUÉ M., CHAUVIN F. TERRAY L., 2008. Expected impacts of climate change on extreme climate events. *Comptes Rendus Geoscience*, 340/9-10, 564-574.
- SANTINI A., BOTTACCI A. GELLINI R., 1994. Preliminary dendroecological survey on pedunculate oak (*Quercus robur* L) stands in Tuscany (Italy). *Annals of Forest Science*, 51/1, 1-10.
- SCHWEINGRUBER F.H., 1990. Tree rings and environment. Dendroecology. Haupt, Berne, Stuttgart, Vienna, 609 p.
- TESSIER L., NOLA P., SERRE-BACHET F., 1994. Deciduous *Quercus* in the Mediterranean region: tree-ring/climate relationships. *New Phytologist*, 126/2, 355-367.