



**HAL**  
open science

## Variabilité spatiale de la réponse au climat du Chêne sessile dans la moitié nord de la France

P. Mérian, Laurent Bergès, F. Lebourgeois

► **To cite this version:**

P. Mérian, Laurent Bergès, F. Lebourgeois. Variabilité spatiale de la réponse au climat du Chêne sessile dans la moitié nord de la France. *Revue forestière française*, 2014, 67 (2), pp.107-123. hal-01128601

**HAL Id: hal-01128601**

**<https://hal.science/hal-01128601>**

Submitted on 10 Mar 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

1 **Variabilité spatiale de la réponse au climat du chêne sessile dans la moitié nord de la France**

2

3 MÉRIAN Pierre, BERGES Laurent, LEBOURGEOIS François

4

## 5 **Résumé**

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

21

## 22 **Introduction**

23 En Europe, trois feuillus dominent les forêts de plaine tempérées : le chêne sessile (*Quercus petraea* [Matt.]  
24 Liebl.), le chêne pédonculé (*Quercus robur* L.) et le hêtre commun (*Fagus sylvatica* L.). La réponse au climat de  
25 ces trois essences a été largement étudiée sous diverses conditions climatiques (Tessier *et al.*, 1994 ; Kelly *et al.*,  
26 2002 ; Piovesan *et al.*, 2005 ; Di Filippo *et al.*, 2007 ; Friedrichs *et al.*, 2009b ; Michelot *et al.*, 2012 ; Rozas et  
27 Sampedro, 2013). Cependant, ces études restent locales (massif forestier, région) notamment pour le chêne  
28 sessile, se privant ainsi d'une vision à large échelle spatiale des variations de sensibilité au climat. L'importance  
29 d'une telle approche est d'autant plus forte en contexte tempéré que le chêne sessile y est une essence majeure  
30 aussi bien sur le plan écologique qu'économique. Par exemple, en France, le chêne sessile est la seconde essence  
31 en volume (environ 280 millions de m<sup>3</sup>), derrière le chêne pédonculé (environ 300 millions de m<sup>3</sup>) (IGN, 2013).

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

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

52 attendons une variation spatiale de la réponse au climat de la croissance des chênaies sessiliflores le long du  
53 gradient de continentalité, avec d'une part une sensibilité plus forte au déficit hydrique estival sous climat  
54 océanique, et d'autre part une sensibilité plus forte aux froids hivernaux sous climat semi-continentale.

55

## 56 **Matériel et méthodes**

### 57 *Zone d'étude et conditions climatiques*

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

66 Pour chaque site, le type de station a été identifié à partir d'une analyse floristique et d'une description  
67 pédologique sur une ou deux fosses. Le pH de l'horizon organo-minéral A varie de 4,1 à 5,1. La réserve utile  
68 maximale en eau du sol sur 1 m de profondeur varie de 57 mm à 171 mm. La valeur moyenne est de 134 mm ( $\pm$   
69 33 mm), ce qui correspond à de bonnes conditions d'approvisionnement en eau pour cette essence.

### 70 *Construction des chronologies moyennes de croissance*

71 Deux à trente arbres dominants ont été échantillonnés par placette (720 arbres au total) et leur croissance  
72 radiale a été estimée à la hauteur de 1,3 m soit avec une carotte à cœur prélevée à l'aide d'une tarière de Pressler  
73 (une carotte par arbre), soit par abattage et prélèvement d'une rondelle de bois (un rayon de lecture). Les  
74 procédures classiques de dendroclimatologie ont été appliquées et sont détaillées dans un article précédemment  
75 publié dans la *Revue forestière française* (Mérian 2013). Ces procédures sont généralement appliquées par  
76 placette, mais de récentes études ont montré que la qualité de l'estimation de la réponse au climat augmente avec  
77 le nombre d'arbres considérés pour construire les chronologies moyennes de croissance (Mérian et Lebourgeois,  
78 2011a; Mérian, 2013). Pour le chêne sessile de plaine en France, 10 à 15 arbres sont nécessaires pour obtenir une  
79 chronologie robuste. Les 120 peuplements échantillonnés ont ainsi été regroupés indépendamment des  
80 procédures dendroclimatologiques sur des critères de faible distance géographique, d'homogénéité de conditions

81 écologiques (climat, pH, réserve utile maximale en eau du sol) et dendrométriques (âge, hauteur, vitesse de  
82 croissance) afin d'atteindre un minimum de 14 arbres par chronologie (moyenne de 23 arbres). Trente et une  
83 chronologies ont été définies (**figure 2, tableau I**), avec une distance moyenne entre deux placettes regroupées  
84 de 9,7 km (écart type : 10,6 km).

85 Les séries de croissance ont été interdatées par groupe de placettes grâce au calcul des années caractéristiques  
86 (Becker, 1989 ; Lebourgeois, 2006). Ces années de croissance extrêmes correspondent aux dates pour lesquelles  
87 au moins 75 % des arbres présentent une variation relative de croissance (VRC) de même signe et d'au moins 10  
88 % par rapport à l'année précédente. Une VRC positive (resp. négative) indique une hausse (resp. une baisse) de  
89 croissance. La fréquence des années caractéristiques et la valeur des VRC pour ces années sont de bons  
90 indicateurs de la réponse des arbres aux conditions climatiques extrêmes (Schweingruber et Nogler, 2003).

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

### 107 ***Construction des séries climatiques***

108 Les séries de températures mensuelles moyennes (T) et de cumul des précipitations mensuelles (P) ont été  
109 obtenues par chronologie à partir des stations météorologiques du réseau Météo-France les plus proches des

110 peuplements et présentant des enregistrements sur la période 1941-1993 (**figure 1**). Ces stations étant rares, leur  
111 distance moyenne aux peuplements atteignait respectivement 53 et 37 km pour T et P (écart types : 29 et 22 km).  
112 Pour tenir compte de la distance entre les peuplements et les stations et des différences climatiques pouvant  
113 exister entre les deux (en particulier sur le niveau moyen), les séries climatiques attribuées à chaque chronologie  
114 ont été corrigées de la différence entre d'une part la valeur normale de la variable (1961-1990) extraite du  
115 modèle spatialisé à 1 km<sup>2</sup> AURELHY (Bénichou et Le Breton, 1987) au niveau de la chronologie, et d'autre part  
116 la valeur normale calculée avec les enregistrements des stations.

### 117 *Analyse de l'effet du climat sur la croissance*

118 Les corrélations entre les chronologies de croissance et le climat ont été estimées par des coefficients de  
119 corrélation *bootstrapped* sur la période entière 1914-1993 (Mérian, 2012 ; Mérian *et al.*, 2012). L'approche de  
120 type *bootstrap* permet l'estimation de la corrélation et de son intervalle de confiance. Cette méthode est basée le  
121 rééchantillonnage massif (1000 répétitions au minimum) du jeu de données initial par tirage aléatoire avec  
122 remise (Mérian, 2013). Les variables climatiques mensuelles ont été considérées selon l'année biologique, c'est-  
123 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  
124 été corrélée à la série de températures moyennes puis à la série de précipitations, soit un total de 24 variables. La  
125 détection d'éventuelles variations de sensibilité au climat entre les 31 chronologies a été faite par deux analyses  
126 en composantes principales (ACP) non normées :

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

## 133 **Résultats**

### 134 *Déterminisme climatique des années caractéristiques*

135 Le nombre d'années caractéristiques sur la période 1914-1993 varie entre 10 et 33 selon la chronologie, avec  
136 une moyenne de 22 (**tableau I**). Le nombre d'années positives est proche du nombre d'années négatives, avec  
137 des variations relatives de croissance de + 45 et - 26 % respectivement. L'ACP réalisée sur les variations  
138 relatives de croissance révèle une forte structuration spatiale de la réponse des chênaies sessiliflores aux

139 évènements climatiques extrêmes (**figure 3**). Toutes les chronologies présentent des coordonnées positives sur le  
140 premier axe factoriel, traduisant une réponse commune aux conditions de fin de printemps et de début d'été : une  
141 croissance forte lors des années fraîches et humides telles que 1946, 1958 et 1982 (+ 30, + 47 et + 51 %) ; une  
142 croissance faible lors des années exceptionnellement chaudes et sèches telles que 1921, 1933 et 1976 (– 21, – 20  
143 et – 25 %). Le second axe factoriel discrimine les réponses selon un gradient de continentalité, la coordonnée  
144 factorielle étant d'autant plus négative que le peuplement est à l'est et d'autant plus positive que le peuplement  
145 est à l'ouest. Cet axe met en évidence des années de sécheresses printanières et estivales localisées soit dans  
146 l'ouest soit dans l'est de la France. Par exemple, en 1989, les chênaies de l'ouest (chronologies A à G) présentent  
147 une variation relative de croissance de – 22 % contre 0,3 % pour les chronologies de l'est (P à R, pour lesquelles  
148 cette année n'est donc pas caractéristique). Cette même année, l'anomalie thermique estivale (juin à août)  
149 atteignait + 1,7 °C à l'ouest et + 0,9 °C à l'est (période de référence : 1914-1993).

150 À l'inverse, en 1915, la croissance a baissé de 18 % par rapport à 1914 à l'est pour des précipitations 18 %  
151 plus faibles que les normales, alors qu'elle augmentait de 7 % dans l'ouest avec des pluies supérieures de 25 %.  
152 Certaines années de forte croissance sont également propres à l'ouest (1936, 1993) ou à l'est (1943, 1946, 1982).  
153 Par exemple, en 1936, la croissance a augmenté de 57 % dans l'ouest contre 9 % dans l'est. Cette plus forte  
154 hausse dans l'ouest est concomitante de précipitations estivales supérieures de 32 % à la normale et de  
155 températures plus fraîches de 0,5 °C (contre respectivement 17 % et – 0,2 °C à l'est). À l'exception du froid  
156 hivernal de 1956 qui a affecté négativement la croissance des chênes sessiles sur l'ensemble de la France, les  
157 froids extrêmes hivernaux ne semblent pas réduire la croissance.

#### 158 ***Réponse moyenne au climat : déterminisme commun et variations spatiales***

159 La **figure 4** présente la réponse au climat moyennée sur les 31 chronologies de croissance de la moitié nord  
160 de la France. Les intervalles de confiance à 95 % des coefficients de corrélation *bootstrapped* moyens sont  
161 grands et incluent généralement le zéro, mettant en évidence une forte diversité des réponses au climat entre les  
162 chronologies. Aucun facteur climatique n'influence significativement la croissance de l'ensemble des  
163 chronologies. La variable la plus influente est la température du mois de mars qui est corrélée négativement avec  
164 la croissance radiale (corrélation moyenne : – 0,25), significativement pour 77 % des chronologies. Le déficit  
165 hydrique de mai à juillet impacte plutôt négativement la largeur de cerne, avec des corrélations négatives pour  
166 les températures et positives pour les précipitations. Ces corrélations sont plus rarement significatives ; de 0 à 30  
167 % des chronologies pour T et de 30 à 50 % pour P. Enfin, les conditions climatiques de l'automne et de l'hiver  
168 précédents influencent sensiblement la croissance des chênes sessiles, avec des corrélations positives pour la

169 température d'octobre (significatives pour 26 %) et pour les précipitations de décembre (48 %).

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

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

187

## 188 **Discussion**

### 189 *Existe-t-il une réponse commune au climat des chênes sessile dans la moitié nord de la France ?*

190 Notre étude révèle que la croissance radiale du chêne sessile est peu sensible au climat, avec peu de  
191 corrélations significatives (**figure 4**). Ces résultats sont cohérents avec de précédents travaux conduits en plaine  
192 de l'ouest de l'Europe (Lebourgeois *et al.*, 2004 ; Lebourgeois, 2006 ; Friedrichs *et al.*, 2009b ; Dolezal *et al.*,  
193 2010 ; Michelot *et al.*, 2012) et peuvent s'expliquer par le fait que la zone d'étude est localisée au cœur de l'aire  
194 de distribution de l'espèce (EUFORGEN, 2009), où les conditions environnementales, et notamment  
195 climatiques, sont moins limitantes. De plus, en raison de sa forte valeur commerciale, le sylviculteur a souvent  
196 favorisé cette essence dans des stations sans contraintes écologiques majeures pour améliorer sa croissance et la  
197 qualité de son bois. D'ailleurs, les peuplements échantillonnés correspondent à des climats tempérés associés à

198 des sols profonds (au moins 100 cm de profondeur sauf pour la chronologie L avec 60 cm) et plutôt riches  
199 (stations mésoacidiclinales, pH le plus souvent entre 4,5 et 5,5), ces conditions étant favorables à une production  
200 élevée (Härdtle *et al.*, 2013 ; Zang et Rothe, 2013). Enfin, l'absence de réponse commune au climat peut être  
201 reliée au taux élevé de polymorphisme génétique des populations de chêne (Petit *et al.*, 2002). Ce  
202 polymorphisme peut induire une forte variation interarbre de sensibilité au climat au sein d'un même  
203 peuplement, brouillant ainsi la relation cerne-climat à l'échelle du peuplement ou du groupe de peuplements.

204 Malgré cela, la croissance des chênes sessiles est le plus souvent négativement corrélée à la température de  
205 mars (**figure 4**). Bien que la plupart des travaux sur le chêne sessile ne montrent pas cette relation significative  
206 (Lebourgeois *et al.*, 2004 ; Cedro, 2007 ; Friedrichs *et al.*, 2009a ; Friedrichs *et al.*, 2009b ; Dolezal *et al.*, 2010 ;  
207 Michelot *et al.*, 2012), Bergès (2000) met en évidence une relation négative entre la température de mars et la  
208 largeur du bois initial. Des résultats proches ont été obtenus sur le châtaignier dans le sud-ouest de la France  
209 (Lebourgeois *et al.*, 2012) et dans l'arc alpin (Fonti et Garcia-Gonzalez, 2004 ; Fonti *et al.*, 2007). Les auteurs  
210 expliquent que des fins d'hiver chaudes augmentent la sensibilité des cellules à l'auxine avant même le  
211 débourrement, l'auxine étant une hormone favorisant notamment le processus de différenciation et l'élongation  
212 des cellules. Par conséquent, des vaisseaux plus gros sont mis en place plus tôt dans la saison de végétation,  
213 nécessitant une mobilisation plus forte de réserves carbonées et impliquant la formation de plus petits vaisseaux  
214 plus tard dans la saison ainsi que, globalement, la mise en place d'un cerne plus fin. La réponse négative des  
215 chênes aux températures chaudes de mars peut aussi être liée à une levée de dormance et un débourrement plus  
216 précoces, augmentant un risque de dommages liés aux gelées tardives (Ducousso *et al.*, 1996 ; Lebourgeois *et*  
217 *al.*, 2008).

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

227 Le faible nombre de corrélations croissance-climat significatives et la difficulté à mettre en évidence une

228 réponse commune des chênes sessiles de la moitié nord de la France confirme que cette espèce est peu sensible  
229 aux variations interannuelles du climat. Ces résultats peuvent être aussi la conséquence de l'utilisation de  
230 variables climatiques simples peu représentatives des contraintes subies par l'arbre. Des variables plus  
231 complexes telles que les bilans ou déficit hydriques climatiques et édaphiques permettent de mieux décrire l'effet  
232 du climat sur la croissance ou la distribution des essences forestières (Lebourgeois *et al.*, 2005 ; Piedallu *et al.*,  
233 2013) mais nécessitent des données indisponibles sur la période 1914-1993 sur l'ensemble de la moitié nord de  
234 la France. En revanche, la forte variation des corrélations entre les chronologies (intervalles de confiance larges  
235 en **figure 4**) révèle une variabilité des réponses le long du gradient de continentalité.

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

238 La sensibilité du chêne sessile est fortement structurée le long du gradient ouest-est de continentalité (**figure**  
239 **5**). La réponse au déficit hydrique estival est plus marquée sous les conditions les plus sèches et les plus chaudes,  
240 c'est-à-dire sous climat océanique, avec des corrélations plus négatives avec T en juillet et août, et plus positives  
241 avec P (en juillet uniquement) (**figure 6c-d**). Parallèlement, la force des corrélations positives avec les  
242 précipitations de la fin de l'automne et de l'hiver précédents diminue d'ouest en est, pour atteindre une valeur  
243 moyenne nulle sous climat semi-continental (**figure 6a**). Ces résultats mettent clairement en évidence une  
244 sensibilité au déficit hydrique dépendante du climat moyen, avec une réponse plus marquée aux conditions  
245 hydriques hors saison de végétation lorsque le climat est limitant durant la saison de végétation (Lebourgeois *et*  
246 *al.*, 2004 ; Zweifel *et al.*, 2006 ; Cedro, 2007).

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

256 Notons enfin que le chêne sessile semble plus sensible au froid hivernal dans l'est de la France, bien que les

257 tendances observées soient de magnitude plus faible que celles sur les stress hydriques. Ce résultat est en accord  
258 avec notre hypothèse selon laquelle la limitation de la croissance par le froid augmente sous climat semi-  
259 continental.

### 260 *Conséquences pour la gestion*

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

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

278

279 **Remerciements**

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

283

284 **Pavé de signature**

285

286 **MERIAN Pierre**

287 AgroParisTech, Centre de Nancy, UMR1092, Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois (LERFoB), 14, rue

288 Girardet, 54000 Nancy, France

289 INRA, Centre de Nancy-Lorraine, UMR1092, Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois (LERFoB), 54280

290 Champenoux, France

291

292 **LEBOURGEOIS François**

293 AgroParisTech, Centre de Nancy, UMR1092, Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois (LERFoB), 14, rue

294 Girardet, 54000 Nancy, France

295 INRA, Centre de Nancy-Lorraine, UMR1092, Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois (LERFoB), 54280

296 Champenoux, France

297

298 **BERGES Laurent**

299 Irstea, UR EMAX, 3275 Route de Cézanne, CS 40061, 13182 Aix-en-Provence Cedex 5, France

300

301 Correspondant courriel : [merianpierre@gmail.com](mailto:merianpierre@gmail.com)

302

303 **Références**

- 304 BECKER (M.). – The role of climate on present and past vitality of silver fir forests in the Vosges mountains of  
305 northeastern France. – *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 19, n° 9, 1989, pp. 1110–1117.
- 306 BENICHO (P.), LE BRETON (O.). – Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs  
307 pluviométriques statistiques. – *La Météorologie*, vol. 7, n° 19, 1987, pp. 23–34.
- 308 BERGÈS (L.). – Variabilités individuelle et collective de la croissance et de la densité du bois de *Quercus*  
309 *petraea* (Matt.) Liebl. en relation avec les facteurs écologiques. – ENGREF, ENGREF-Nancy, 1998. – 348 p.  
310 (Thèse).
- 311 BERGÈS (L.), DUPOUEY (J.L.), FRANC (A.). – Long-term changes in wood density and radial growth of  
312 *Quercus petraea* Liebl. in northern France since the middle of the nineteenth century. – *Trees-Structure*  
313 *and Function*, vol. 14, n° 7, 2000, pp. 398–408.
- 314 BONTEMPS (J. D.), HERVÉ (J. C.), DUPLAT (P.), DHÔTE (J. F.). – Shifts in the height-related  
315 competitiveness of tree species following recent climate warming and implications for tree community  
316 composition: the case of common beech and sessile oak as predominant broadleaved species in Europe. –  
317 *Oikos*, n° 8, 2012, pp. 1287-1299.
- 318 CEDRO (A.). – Tree-ring chronologies of downy oak (*Quercus pubescens*), pedunculate oak (*Q-robur*) and  
319 sessile oak (*Q-petraea*) in the Bielinek Nature Reserve: Comparison of the climatic determinants of tree-  
320 ring width. – *Geochronometria*, vol. 26, 2007, pp. 39–45.
- 321 COCHARD (H.), BRÉDA (N.), GRANIER (A.), AUSSENAC (G.). – Vulnerability to air embolism of three  
322 European oak species (*Quercus petraea* (Matt) Liebl, *Q. pubescens* Willd, *Q. robur* L). – *Annals of*  
323 *Forest Science*, vol. 49, n° 3, 1992, pp. 225–233.
- 324 COOK (E.R.), PETERS (K.). – The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring  
325 width series for dendroclimatic studies. – *Tree-Ring Research*, vol. 41, 1981, pp. 45–53.
- 326 DI FILIPPO (A.), BIONDI (F.), CUFAR (K.), DE LUIS (M.), GRABNER (M.), MAUGERI (M.), SABA (E.P.),  
327 SCHIRONE (B.), PIOVESAN (G.). – Bioclimatology of beech (*Fagus sylvatica* L.) in the Eastern Alps:  
328 spatial and altitudinal climatic signals identified through a tree-ring network. – *Journal of Biogeography*,  
329 vol. 34, 2007, n° 11, pp. 1873–1892.
- 330 DOLEZAL (J.), MAZUREK (P.), KLIMESOVA (J.). – Oak decline in southern Moravia: the association  
331 between climate change and early and late wood formation in oaks. – *Preslia*, vol. 82, 2010, n° 3, pp.  
332 289-306.
- 333 DUCOUSSO (A.), GUYON (J.P.), KREMER (A.). – Latitudinal and altitudinal variation of bud burst in western  
334 populations of sessile oak (*Quercus petraea* (Matt) Liebl). – *Annals of Forest Science*, vol. 53, n° 2-3,  
335 1996, pp. 775–782.
- 336 EUFORGEN. – [http://www.euforgen.org/fileadmin/templates/euforgen.org/upload/Documents/Maps/JPG/  
337 Quercus\\_petraea.jpg](http://www.euforgen.org/fileadmin/templates/euforgen.org/upload/Documents/Maps/JPG/Quercus_petraea.jpg). – 2009, Date de la dernière consultation : 03 septembre 2014.
- 338 FONTI (P.), GARCIA-GONZALEZ (I.). – Suitability of chestnut earlywood vessel chronologies for ecological  
339 studies. – *New Phytologist*, vol. 163, n° 1, 2004, pp. 77–86.
- 340 FONTI (P.), SOLOMONOFF (N.), GARCIA-GONZALEZ (I.). – Earlywood vessels of *Castanea sativa* record  
341 temperature before their formation. – *New Phytologist*, vol. 173, n° 3, 2007, pp. 562–570.
- 342 FRIEDRICH (D.A.), BÜNTGEN (U.), FRANK (D.C.), ESPER (J.), NEUWIRTH (B.), LOFFLER (J.). –  
343 Complex climate controls on 20th century oak growth in Central-West Germany. – *Tree Physiology*, vol.  
344 29, n° 1, 2009a, pp. 39–51.
- 345 FRIEDRICH (D.A.), TROUET (V.), BÜNTGEN (U.), FRANK (D.C.), ESPER (J.), NEUWIRTH (B.),  
346 LOFFLER (J.). – Species-specific climate sensitivity of tree growth in Central-West Germany. – *Trees-*  
347 *Structure and Function*, vol. 23, n° 4, 2009b, pp. 729–739.
- 348 GAUSSEN (H.), BAGNOULS (F.). – L'indice xérothermique. – *Bulletin de l'Association des géographes*  
349 *français*, vol. 222-223, 1952, pp. 10-16.
- 350 HARDTLE (W.), NIEMEYER (T.), ASSMANN (T.), AULINGER (A.), FICHTNER (A.), LANG (A.),  
351 LEUSCHNER (C.), NEUWIRTH (B.), PFISTER (L.), QUANTE (M.), RIES (C.), SCHULDT (A.), VON  
352 OHEIMB (G.). – Climatic responses of tree-ring width and delta C-13 signatures of sessile oak (*Quercus*  
353 *petraea* Liebl.) on soils with contrasting water supply. – *Plant Ecology*, vol. 214, 2013, pp. 1147–1156.
- 354 IGN. – Inventaire forestier - Le mémento : la forêt en chiffres et en cartes. – Saint-Mandé : IGN. 2013, 29 p. [En  
355 ligne] <[http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/IMG/pdf/Int\\_memento\\_2013\\_BD.pdf](http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/IMG/pdf/Int_memento_2013_BD.pdf)> (consulté le  
356 28/04/2014).
- 357 KELLY (P.M.), LEUSCHNER (H.H.), BRIFFA (K.R.), HARRIS (I.C.). – The climatic interpretation of pan-  
358 European signature years in oak ring-width series. – *Holocene*, vol. 12; n° 6, 2002, pp. 689–694.
- 359 LEBOURGEOIS (F.), AUSSENAC (R.), LEMAIRE (J.), NEQUIER (T.) RIGHI (J.-M.). – Croissance de la  
360 châtaigneraie limousine et climat. Réflexion sur la place du Châtaignier dans les prochaines décennies. –

- 361 *Revue Forestière Française*, vol. 64, 2012, pp. 107–126.
- 362 LEBOURGEOIS (F.), COUSSEAU (G.), DUCOS (Y.). – Climate-tree-growth relationships of *Quercus petraea*
- 363 Mill. stand in the Forest of Berce ("Futaie des Clos", Sarthe, France). – *Annals of Forest Science*, vol. 61,
- 364 n° 4, 2004, pp. 361–372.
- 365 LEBOURGEOIS (F.), GOMEZ (N.), PINTO (P.E.), MÉRIAN (P.). – Mixed stands reduce *Abies alba* tree-ring
- 366 sensitivity to summer drought in the Vosges mountains, western Europe. – *Forest Ecology and*
- 367 *Management*, vol. 303, 2013, pp. 61–71.
- 368 LEBOURGEOIS (F.), PIEDALLU (C.). – Appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études
- 369 stationnelles et de la gestion forestière à partir d'indices bioclimatiques. – *Revue forestière française*, vol.
- 370 57, n° 4, 2005, pp. 331–356.
- 371 LEBOURGEOIS (F.), PIERRAT (J.C.), PEREZ (V.), PIEDALLU (C.), CECCHINI (S.), ULRICH (E.). –
- 372 Simulating phenological shifts in French temperate forests under two climatic change scenarios and four
- 373 driving global circulation models. – *International Journal of Biometeorology*, vol. 54, n° 5, 2010a, pp.
- 374 563–581.
- 375 LEBOURGEOIS (F.), RATHGEBER (C.), ULRICH (E.). – Effet de la variabilité climatique et des événements
- 376 extrêmes sur la croissance d'*Abies alba*, *Picea abies* et *Pinus sylvestris* en climat tempéré français. –
- 377 *Revue Forestière Française*, vol. 52, 2008, pp. 7–23.
- 378 LEBOURGEOIS (F.). – (2006) Sensibilité au climat des Chênes sessile et pédonculé dans le réseau
- 379 RENECOFOR. Comparaison avec les hêtraies. – *Revue Forestière Française*, vol. 53, n° 1, 2006, pp.
- 380 29–44.
- 381 LEBOURGEOIS (F.). – Approche dendroécologique de la sensibilité du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) au climat en
- 382 France et en Europe. – *Revue Forestière Française*, vol. 57, 2005, pp. 33– 50.
- 383 LEBOURGEOIS (F.). – RENECOFOR - Etude dendrochronologique des 102 peuplements du réseau. –
- 384 Fontainebleau, FRA : ONF Office National des Forêts, Département des Recherches Techniques. 1997. –
- 385 307 p.
- 386 LEMAIRE (J.). – L'autécologie du chêne est mieux cernée. – *Forêt Entreprise*, vol. 201, 2011, pp. 5–21.
- 387 LINDNER (M.), MAROSCHEK (M.), NETHERER (S.), KREMER (A.), BARBATI (A.), GARCIA-
- 388 GONZALO (J.), SEIDL (R.), DELZOND (S.), CORONAE (P.), KOLSTRÖMA (M.), LEXERB (M.J.),
- 389 MARCHETTIE (M.). – Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest
- 390 ecosystems. – *Forest Ecology and Management*, vol. 259, n° 4, 2010, pp. 698-709.
- 391 MÉRIAN (P.), LEBOURGEOIS (F.). – Consequences of decreasing the number of cored trees per plot on
- 392 chronology statistics and climate-growth relationships: a multispecies analysis in a temperate climate. –
- 393 *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 41, n° 12, 2011a, pp. 2413–2422.
- 394 MERIAN (P.), LEBOURGEOIS (F.). – Le statut social d'un arbre influence-t-il sa réponse au climat? Etude
- 395 dendroécologique sur le Sapin, l'Épicéa, le Pin sylvestre, le Hêtre et le Chêne sessile. – *Revue Forestière*
- 396 *Française*, vol. 65, 2013, pp. 7–19.
- 397 MÉRIAN (P.), LEBOURGEOIS (F.). – Size-mediated climate-growth relationships in temperate forests: a multi-
- 398 species analysis. – *Forest Ecology and Management*, vol. 261, n° 8, 2011b, pp. 1382-1391.
- 399 MÉRIAN (P.), BERT (D.), LEBOURGEOIS (F.). – An approach for quantifying and correcting sample size-
- 400 related bias in population estimates of climate-tree growth relationships. – *Forest Science*, vol. 59, 2012,
- 401 pp. 444–452.
- 402 MERIAN (P.). – Conseils pour l'échantillonnage des arbres en peuplements purs et réguliers en vue de
- 403 l'estimation de leur sensibilité au climat par analyse dendroécologique. – *Revue forestière française*, vol.
- 404 65, 2013, pp.21–36.
- 405 MERIAN (P.). – POINTER et DENDRO: deux applications sous R pour l'analyse de la réponse des arbres au
- 406 climat par approche dendroécologique. – *Revue forestière française*, vol. 64, 2012, pp.789–798.
- 407 MICHELOT (A.), BREDAS (N.), DAMESIN (C.), DUFRENE (E.). – Differing growth responses to climatic
- 408 variations and soil water deficits of *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* in a temperate
- 409 forest. – *Forest Ecology and Management*, vol. 265, 2012, pp. 161–171.
- 410 MISSION (L.), RATHGEBER (C.), GUIOT (J.). – Dendroecological analysis of climatic effects on *Quercus*
- 411 *petraea* and *Pinus halepensis* radial growth using the process-based MAIDEN model. – *Canadian*
- 412 *Journal of Forest Research*, vol. 34, n° 4, 2004, pp. 888–898.
- 413 MOISSELIN (J.M.), SCHNEIDER (M.), CANELLAS (C.), MESTRE (O.). – Les changements climatiques en
- 414 France au XX<sup>ème</sup> siècle. Etude des longues séries homogénéisées de données de température et de
- 415 précipitations. – *La Météorologie*, vol. 38, 2002, pp. 45–56.
- 416 PETIT (R.J.), CSAIKL (U.M.), BORDACS (S.), BURG (K.), COART (E.), COTTRELL (J.), VAN DAM (B.),
- 417 DEANS (J.D.), DUMOLIN-LAPEGUE (S.), FINESCHI (S.), FINKELDEY (R.), GILLIES (A.), GLAZ
- 418 (I.), GOICOECHEA (P.G.), JENSEN (J.S.), KONIG (A.O.), LOWE (A.J.), MADSEN (S.F.), MATYAS
- 419 (G.), MUNRO (R.C.), OLALDE (M.), PEMONGE (M.H.), POPESCU (F.), SLADE (D.), TABBENER
- 420 (H.), TAURCHINI (D.), DE VRIES (S.G.M.), ZIEGENHAGEN (B.), KREMER (A.). – Chloroplast

- 421 DNA variation in European white oaks - Phylogeography and patterns of diversity based on data from  
422 over 2600 populations. – *Forest Ecology Management*, vol. 156, n° 1–3, 2002, pp. 5–26.
- 423 PIEDALLU (C.), GEGOUT (J.C.), PEREZ (V.), LEBOURGEOIS (F.). – Soil water balance performs better  
424 than climatic water variables in tree species distribution modelling. – *Global Ecology and Biogeography*,  
425 vol. 22, 2013, pp. 470–482.
- 426 PIOVESAN (G.), BIONDI (F.), BERNABEI (M.), DI FILIPPO (A.), SCHIRONE (B.). – Spatial and altitudinal  
427 bioclimatic zones of the Italian peninsula identified from a beech (*Fagus sylvatica* L.) tree-ring network.  
428 – *International Journal of Ecology*, vol. 27, n° 3, 2005, pp. 197–210.
- 429 ROZAS (V.), SAMPEDRO (L.). – Soil chemical properties and dieback of *Quercus robur* in Atlantic wet forests  
430 after a weather extreme. – *Plant and Soil*, vol. 373, 2013, pp. 673–685.
- 431 SCHWEINGRUBER (F.H.), NOGLER (P.). – Synopsis and climatological interpretation of Central European  
432 tree-ring sequences. – *Botanica Helvetica*, vol. 113, n° 2, 2003, pp. 125–143.
- 433 TESSIER (L.), NOLA (P.), SERRE-BACHET (F.). – Deciduous *Quercus* in the Mediterranean region: tree-  
434 ring/climate relationships. – *New Phytologist*, vol. 126, n° 2, 1994, pp. 355–367.
- 435 THOMAS (F.M.), GAUSLING (T.) – Morphological and physiological responses of oak seedlings (*Quercus*  
436 *petraea* and *Q. robur*) to moderate drought. – *Annals of Forest Science*, vol. 57, n° 4, 2000, pp. 325–333.
- 437 ZANG (C.), ROTHE (A.). – Effect of nutrient removal on radial growth of *Pinus sylvestris* and *Quercus petraea*  
438 in Southern Germany. – *Annals of Forest Science*, vol. 70, 2013, pp. 143–149.
- 439 ZWEIFEL (R.), ZIMMERMANN (L.), ZEUGIN (F.), NEWBERY (D.M.). – Intra-annual radial growth and  
440 water relations of trees: implications towards a growth mechanism. – *Journal of Experimental Botany*,  
441 vol. 57 n° 6, 2006, pp. 1445–1459.

442 **Tableaux**

443

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

Chr.	Localisation géographique			Climat moyen 1914-1993										Statistiques				
	Longitude	Latitude	Alt.	Température			Précipitation		Fréq. froids		Fréq. sécheresses			Nb. arbres (nb. plac)	Age	LC (mm)	ACn	ACp
				An	Jan.	MJJ	An	MJJ	Jan.	Fév.	Mai	Juin	Juil.					
A	1° 32' 05" W	48° 10' 37" N	80	11,8	4,83	16,5	727	154	3	3	14	33	40	28 (1)	99 (7)	2,05 (0,72)	9	11
<b>B1</b>	0° 36' 47" E	48° 29' 06" N	242	10,9	3,08	16,1	695	159	10	5	14	30	31	20 (7)	143 (41)	1,49 (0,62)	6	9
<b>B2</b>	0° 28' 10" E	48° 31' 41" N	250	10,9	3,82	15,6	689	162	9	5	14	23	30	18 (6)	124 (20)	1,64 (0,66)	7	15
B3	0° 40' 46" E	48° 31' 21" N	220	11,0	3,73	15,6	674	159	9	5	14	28	28	30 (1)	85 (2)	1,75 (0,62)	12	14
<b>C</b>	0° 27' 19" E	47° 48' 46" N	126	11,2	3,66	16,6	672	161	5	4	13	30	34	27 (10)	95 (13)	2,13 (0,85)	8	7
<b>D</b>	0° 25' 20" E	47° 14' 16" N	96	11,0	3,08	16,7	670	155	6	4	13	30	44	15 (5)	107 (14)	1,81 (0,64)	4	6
E	0° 29' 40" E	46° 37' 36" N	116	10,7	2,80	16,5	691	162	11	6	11	31	41	28 (1)	81 (4)	1,89 (0,81)	13	15
F1	1° 15' 33" E	47° 34' 07" N	127	10,8	2,73	16,7	649	158	11	5	15	26	36	30 (1)	90 (7)	2,05 (0,77)	15	14
<b>F2</b>	1° 26' 38" E	47° 33' 43" N	102	10,7	2,58	16,4	648	158	13	6	15	28	36	18 (6)	117 (32)	2,02 (0,83)	16	16
<b>F3</b>	1° 22' 34" E	47° 34' 50" N	117	11,0	2,81	16,7	646	158	11	5	15	28	38	17 (6)	115 (23)	1,63 (0,60)	9	8
G1	2° 07' 28" E	47° 15' 14" N	176	10,9	2,98	16,5	686	175	13	5	11	21	35	23 (1)	78 (8)	2,35 (0,88)	16	12
<b>G2</b>	2° 16' 12" E	47° 12' 27" N	179	10,9	3,00	16,5	686	175	13	5	11	21	35	15 (6)	103 (18)	2,06 (0,69)	12	7
<b>H1</b>	2° 43' 27" E	46° 38' 11" N	267	11,0	3,06	16,5	693	203	10	6	6	11	33	18 (6)	116 (29)	1,47 (0,52)	8	6
H2	2° 43' 35" E	46° 40' 01" N	260	11,2	3,06	16,5	695	202	10	6	6	11	33	30 (1)	111 (6)	1,68 (0,61)	14	13
<b>H3</b>	2° 45' 32" E	46° 40' 14" N	254	10,8	3,06	16,5	694	203	10	6	6	11	33	14 (5)	137 (40)	1,75 (0,60)	4	6
<b>J</b>	3° 06' 41" E	46° 30' 38" N	282	11,1	3,14	16,8	710	221	10	6	5	10	33	15 (5)	134 (35)	1,79 (0,63)	7	7
K	2° 43' 43" E	48° 27' 10" N	80	10,8	3,25	16,4	640	165	13	9	18	20	25	29 (1)	108 (4)	1,85 (0,79)	14	9
L	4° 57' 36" E	49° 01' 58" N	180	9,4	0,90	15,4	829	210	31	18	8	9	20	26 (1)	137 (22)	1,60 (0,68)	12	13
M	4° 27' 34" E	48° 17' 50" N	160	9,9	0,98	15,8	809	204	26	15	6	10	25	24 (1)	84 (6)	2,00 (0,82)	15	18
N	5° 04' 27" E	47° 04' 56" N	220	10,7	1,52	16,7	781	207	19	8	5	11	26	30 (1)	84 (5)	2,27 (0,95)	10	12
O	5° 14' 18" E	46° 10' 14" N	260	11,3	2,06	17,1	821	244	18	9	8	10	28	30 (1)	85 (8)	1,91 (0,66)	11	13
P	6° 02' 22" E	48° 01' 33" N	330	9,4	0,83	15,3	922	234	35	20	6	8	13	30 (1)	127 (19)	1,48 (0,60)	11	15
<b>Q1</b>	6° 13' 39" E	48° 40' 24" N	286	10,2	1,25	15,8	756	198	28	16	10	13	25	18 (6)	104 (13)	2,05 (0,80)	10	12
<b>Q2</b>	6° 18' 18" E	48° 44' 31" N	266	9,8	1,18	15,8	792	205	28	18	9	10	21	19 (7)	103 (18)	2,15 (0,92)	10	15
Q3	6° 29' 39" E	48° 52' 18" N	315	9,7	1,06	15,7	847	220	31	18	5	8	16	30 (1)	83 (3)	2,18 (0,80)	14	15

Q4	6° 40' 30" E	48° 49' 58" N	275	9,6	0,99	15,6	870	224	33	18	5	6	15	15 (6)	80 (8)	2,50 (1,09)	8	8
R1	7° 27' 40" E	49° 00' 56" N	320	9,7	0,91	16,0	819	221	36	19	6	5	16	29 (1)	127 (6)	1,33 (0,44)	12	13
<b>R2</b>	7° 27' 55" E	48° 57' 19" N	333	9,6	0,89	15,9	824	223	36	19	6	5	18	24 (8)	129 (31)	1,60 (0,63)	13	12
<b>R3</b>	7° 30' 67" E	48° 56' 34" N	318	9,5	0,89	15,9	818	222	36	19	6	5	16	29 (10)	107 (24)	2,06 (0,81)	11	8
<b>R4</b>	7° 30' 50" E	48° 59' 28" N	346	9,5	0,91	16,0	810	221	36	19	6	5	16	17 (6)	118 (25)	1,51 (0,76)	15	14
R5	7° 43' 43" E	48° 59' 22" N	350	9,9	0,94	16,0	783	217	34	19	9	6	19	24 (1)	76 (3)	1,99 (0,80)	10	13

445

446 L'écart type est affiché entre parenthèses. Les noms de chronologie en gras indiquent celles issues de regroupement de plusieurs placettes. Chr. : chronologie ; Alt. : altitude ;

447 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

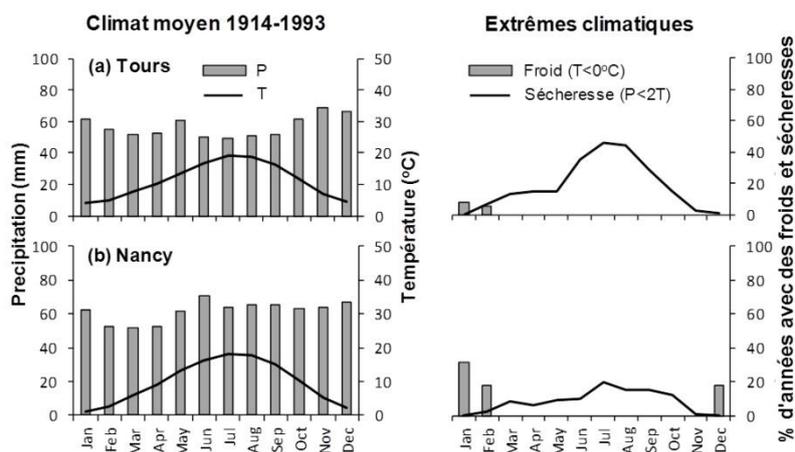
448 caractéristiques négatives et positives.

449 **Figures**

450

451 **Figure 1** : Climat moyen (gauche) et pourcentage des années présentant un extrême climatique (droite) sur la  
452 période 1914-1993 pour les stations météorologiques de Tours (a: 47° 26' 36'' N, 00° 43' 36'' W, 108 m) et  
453 Nancy (b: 48° 41' 12'' N, 06° 13' 18'' W, 212 m).

454



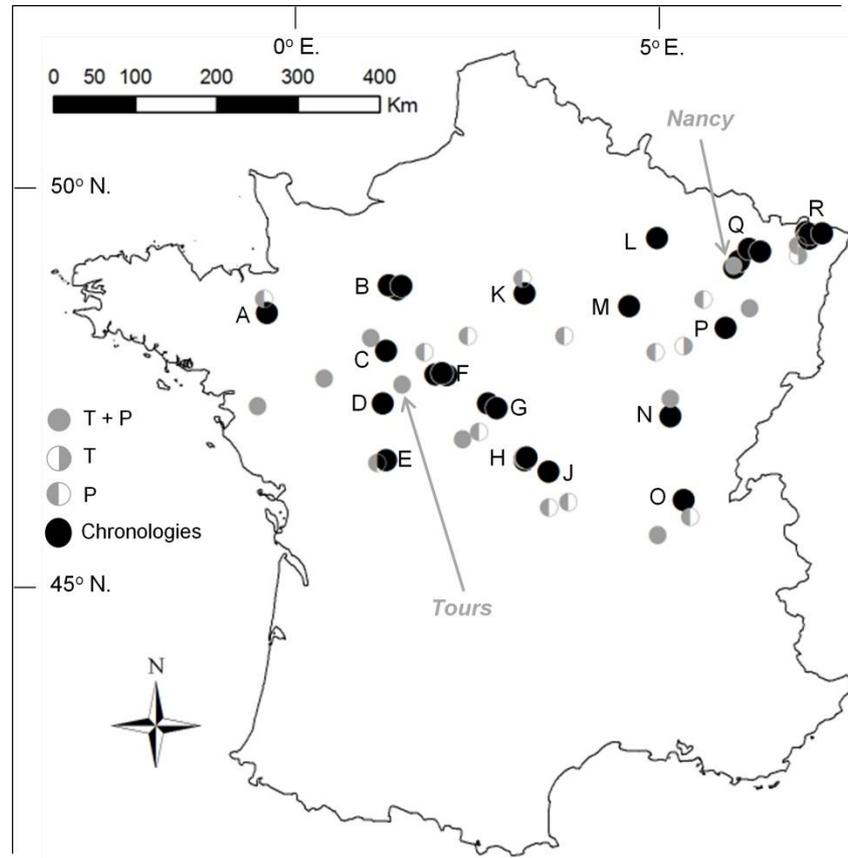
455

456

457 Voir la figure 2 pour la localisation géographique de ces deux stations. Climat moyen : températures mensuelles  
458 moyennes (°C; ligne noire) et cumul mensuel des précipitations (mm; histogrammes gris). Extrêmes  
459 climatiques : sécheresses ( $P < 2T$ ; ligne noire) et froids ( $T < 0$  °C; histogrammes gris).

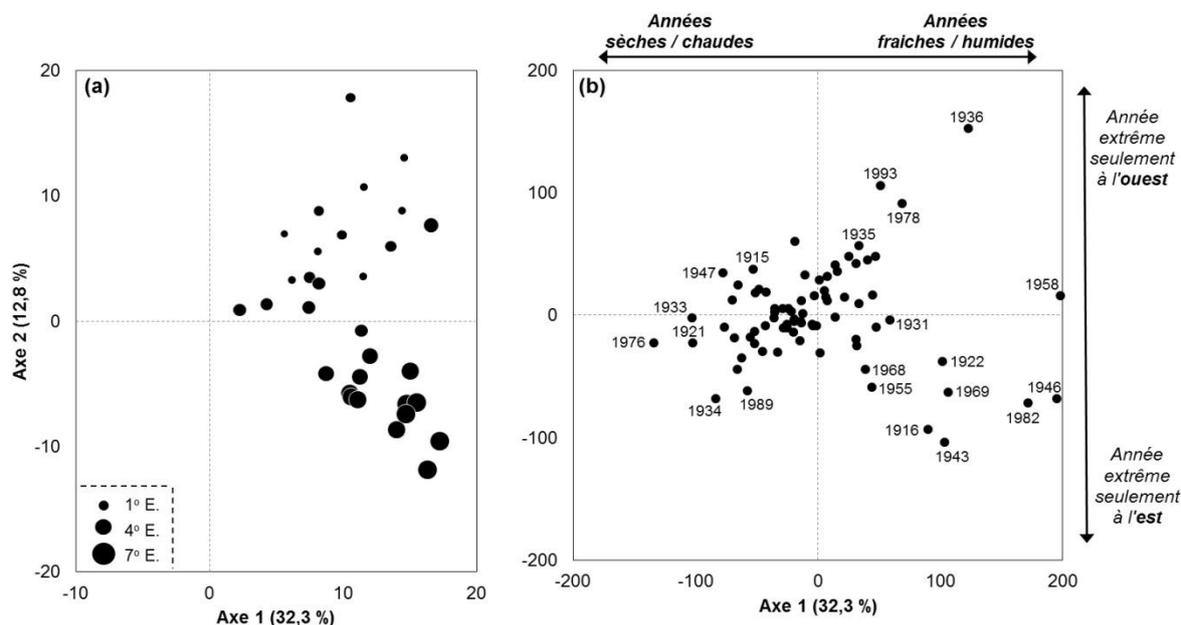
460

461 **Figure 2** : Localisation des 31 chronologies (cercles noirs) et 24 stations météorologiques du réseau Météo-  
462 France (cercles gris : séries de températures et de précipitations ; cercles blanc et gris : séries de températures ;  
463 cercles gris et blanc : séries de précipitations).



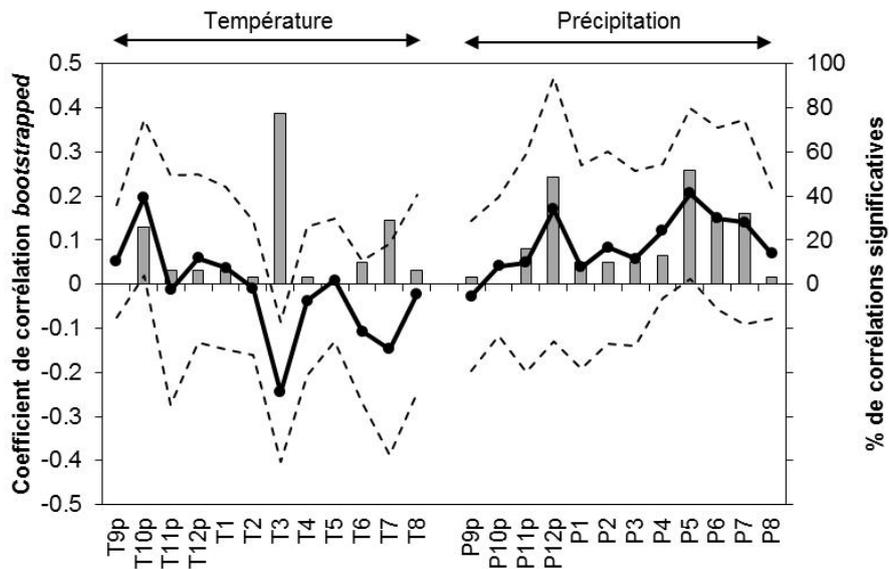
464  
465 T : température ; P : précipitation. Les flèches grises indiquent la localisation des deux stations météorologiques  
466 présentées dans la **figure 1**.  
467

468 **Figure 3** : Répartition des 31 chronologies (a) et des 80 années (de 1914 à 1993, b) sur le plan factoriel 1-2 de  
469 l'analyse en composantes principales effectuée sur les variations relatives de croissance (voir texte pour plus de  
470 détails).



471  
472 La taille des points des chronologies augmente avec la longitude est. Les années les plus discriminantes sont  
473 notées dans le graphique de droite (b). L'axe 1 traduit une homogénéité de la réponse aux extrêmes climatiques  
474 des 31 chronologies (coordonnées factorielles toujours positives), avec une croissance forte les années fraîches et  
475 humides, contre une croissance faible les années chaudes et sèches. L'axe 2 discrimine les chronologies selon  
476 leur longitude, révélant des années extrêmes localisées soit dans l'ouest (climat océanique), soit dans l'est (climat  
477 semi-continentale) de la moitié nord de la France.  
478

479 **Figure 4** : Réponse moyenne au climat des chênaies sessiliflores dans la moitié nord de la France.



480

481 Ligne épaisse noire avec points : valeur moyenne des coefficients de corrélation *bootstrapped* sur les 31

482 chronologies. Lignes fines pointillées: intervalle de confiance *bootstrap* à 95 % de la moyenne. Bâtons gris :

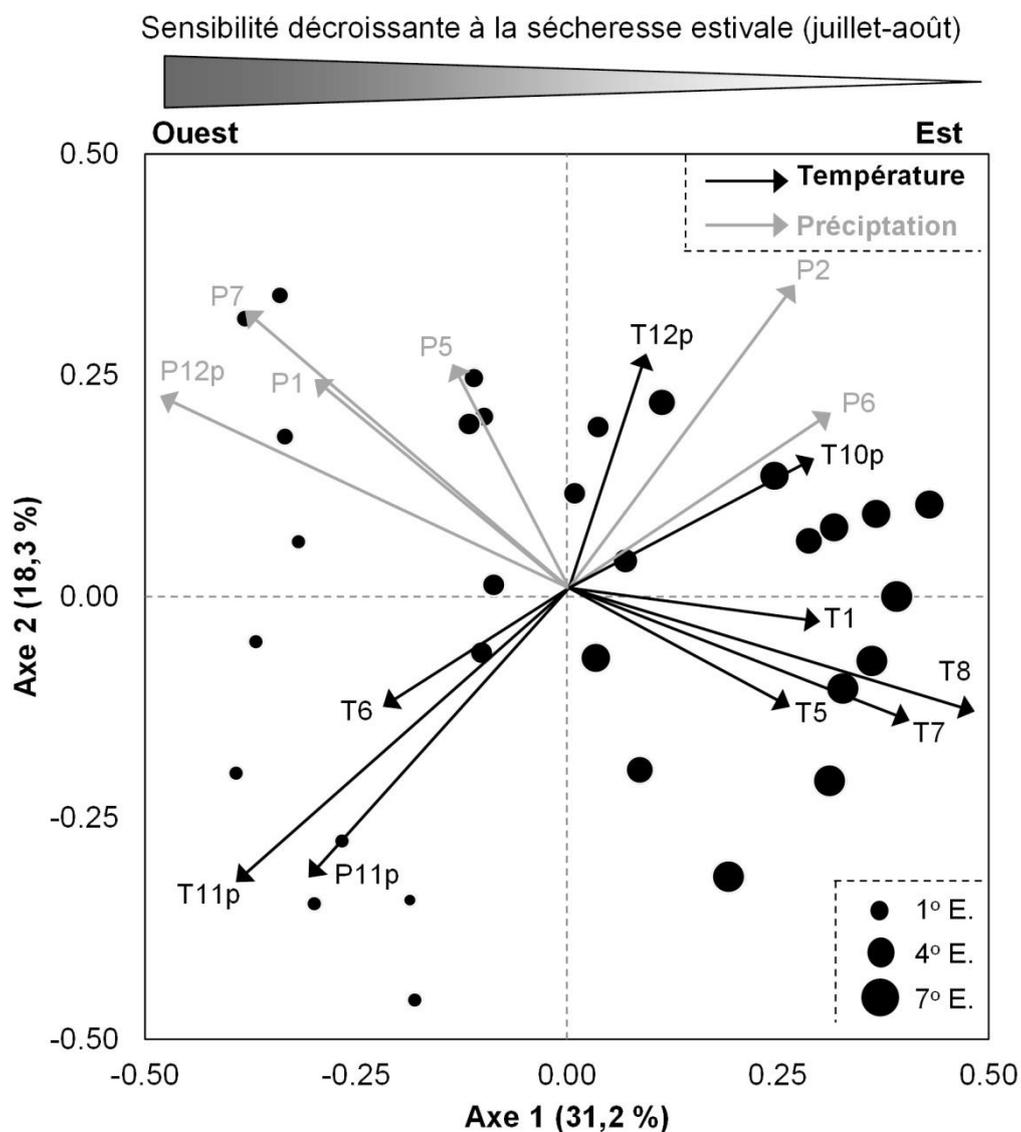
483 pourcentage des chronologies présentant un coefficient de corrélation *bootstrapped* significatif au seuil de 5 %.

484 T : température moyenne mensuelle. P : cumul mensuel des précipitations. Le mois est noté en chiffre (1 :

485 janvier, 2 : février, etc.) . p : mois de l'année précédente.

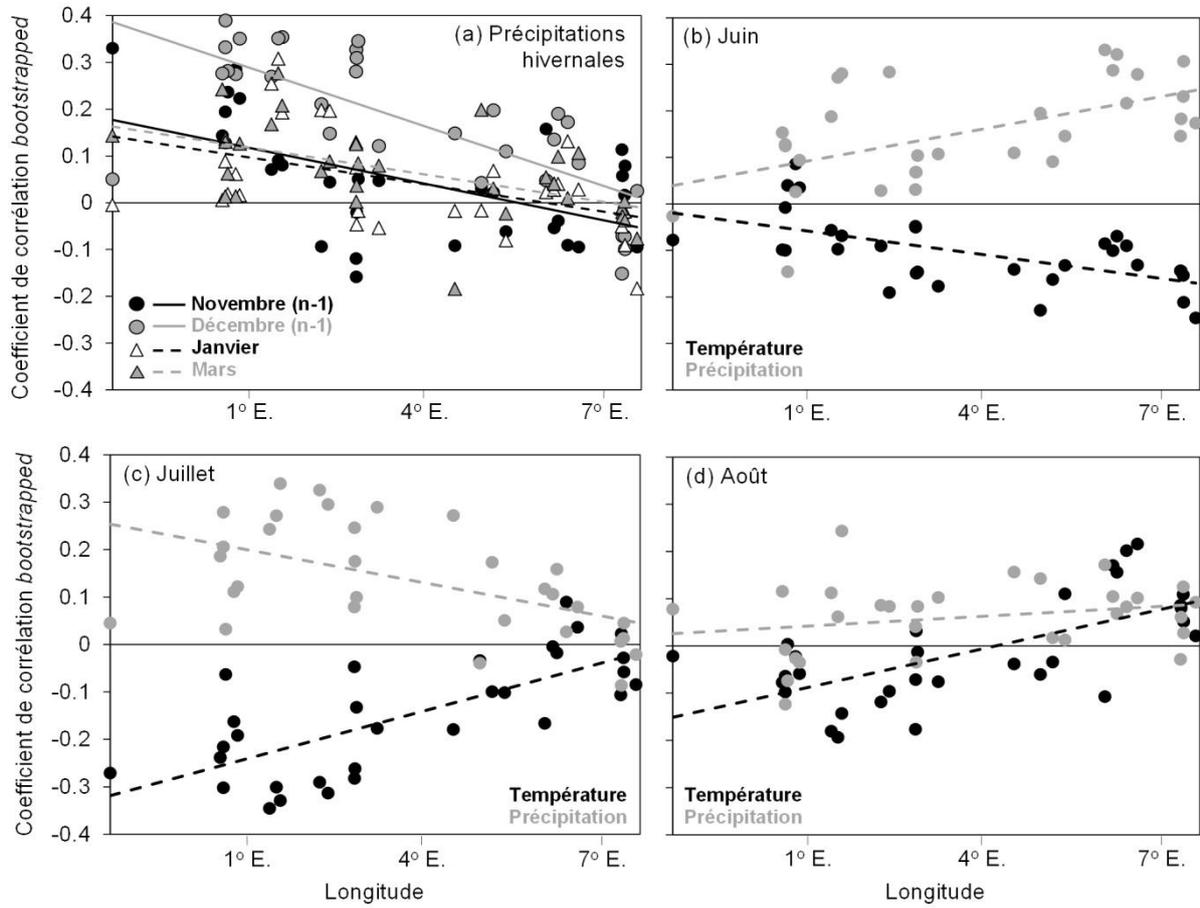
486

487 **Figure 5** : Répartition des 31 chronologies (points noirs) et des principales variables climatiques (flèches) sur le  
488 plan factoriel 1-2 de l'analyse en composantes principales effectuée sur coefficients de corrélation *bootstrapped*  
489 (voir texte pour plus de détails).



490  
491 La taille des points des chronologies augmente avec la longitude. T : température moyenne mensuelle. P : cumul  
492 mensuel des précipitations. Le mois est noté en chiffre (1 : janvier, 2 : février, etc.) . p : mois de l'année  
493 précédente. L'axe 1 discrimine fortement les chronologies selon leur longitude, révélant notamment une  
494 sensibilité à la sécheresse estivale (réponse négative aux températures et positive aux précipitations) plus forte  
495 pour les chronologies de l'ouest (climat océanique).  
496

497 **Figure 6** : Synthèse des coefficients de corrélation *bootstrapped* des principaux facteurs climatiques dont  
498 l'influence varie le long du gradient ouest-est de continentalité.



499

500 (a) Effets des précipitations hivernales (novembre de l'année précédente à mars de l'année en cours) ; (b-d) Effets

501 des précipitations et températures de juin, juillet et août.