

SENSIBILITÉ DES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS TEMPÉRÉS FRANÇAIS À LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE ET AUX ÉVÈNEMENTS EXTRÊMES EXEMPLE DU RÉSEAU RENECOFOR

*SENSITIVITY OF FRENCH TEMPERATE FORESTS TO CLIMATE VARIABILITY AND EXTREME EVENTS:
EXAMPLE OF THE FRENCH NETWORK RENECOFOR*

FRANÇOIS LEBOURGEOIS¹, CYRILLE B.K RATHGEBER², PIERRE MÉRIAN¹, ERWIN ULRICH³

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

² INRA, UMR1092, Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt Bois (LERFoB), Centre INRA de Nancy, F 54280 Champenoux.

³ Office National des Forêts, Département Recherche et développement, F 77000 Fontainebleau.

Contact : francois.lebourgeois@engref.agroparistech.fr

RÉSUMÉ

Les relations entre le climat et la croissance radiale de 63 peuplements (1879 arbres) du réseau RENECOFOR ont été étudiées à travers la réponse aux événements extrêmes (années caractéristiques) et à la variabilité normale du climat (fonctions de réponse) sur la période 1949-1994. L'étude a porté sur 15 hêtraies (450 arbres), 11 chênaies sessiliflores (324), 4 chênaies pédonculées (119), 11 sapinières (328), 8 pessières (239) et 14 pineraies sylvestres (419) réparties sur l'ensemble du territoire. Les deux approches se sont révélées complémentaires et ont montré l'importance des conditions thermiques hivernales et du bilan hydrique sur la croissance des arbres forestiers. Globalement, les conditions automnales de l'année précédente (à travers les températures ou le bilan hydrique) et les températures hivernales (essentiellement février et avril) modulent la croissance du bois initial et le bilan hydrique du début d'été (juin-juillet) celle du bois final. Le sapin, l'épicéa et les chênes sont les essences pour lesquelles la mise en place du bois initial dépend le plus fortement des conditions de l'automne précédent (à travers la température et le bilan hydrique) et des conditions thermiques hivernales. Pour ces espèces, la croissance du bois final est gouvernée essentiellement par le bilan hydrique estival. En revanche, pour le hêtre et le pin sylvestre, la croissance du bois initial dépend essentiellement des conditions de sécheresse du début de saison de végétation. Pour toutes les essences, l'effet du bilan hydrique est d'autant plus fort que les conditions locales de xéricité augmentent : réserve utile maximale en eau (RUM) du sol inférieure à 100 mm pour le hêtre, altitude inférieure à 800 m et/ou RUM < 100 mm pour le sapin, climat océanique de plaine peu arrosé (précipitations annuelles de l'ordre de 700 mm) pour le pin sylvestre et les chênes.

MOTS-CLÉS : DENDROÉCOLOGIE, ANNÉES CARACTÉRISTIQUES, FROIDS HIVERNAUX, SÉCHERESSE, CROISSANCE RADIALE, QUERCUS PETRAEA, QUERCUS ROBUR, FAGUS SYLVATICA, ABIES ALBA, PICEA ABIES, PINUS SYLVESTRIS.

ABSTRACT

The influence of climate on the radial growth of 63 mature stands (1879 trees) growing under different climatic and soil conditions was investigated using chronologies developed from the French Network RENECOFOR. The relationships between climate and ring widths were analyzed using extreme growth years and response functions analysis (1949-1994). The study was led on 15 beech stands (450 trees), 11 sessile oak stands (324), 4 pedunculate oak stands (119), 11 silver fir stands (328), 8 Norway spruce stands (239) and 14 Scots pine stands (419). Both approaches highlighted the major role of winter temperatures and water balance on radial growth. For Silver fir, Norway spruce and oaks, prior autumn weather conditions (through temperature and water balance) and winter temperatures (February and April) influence earlywood growth whereas summer water balance influences latewood enhancement. On the other hand, the growth of both ring components for beech and Scots pine depends mainly on current summer water balance. For all the studied species, the importance of the water balance increases with increasing local water stress : maximal soil water content (SWC) < 100 mm for beech, altitude < 800 and/or SWC < 100 mm for Silver fir, oceanic climate with low annual precipitations (about 700 mm) for Scots pine and oaks.

KEYWORDS: DENDROECOLOGY, POINTER YEARS, WINTER FROSTS, DROUGHT, RADIAL GROWTH, QUERCUS PETRAEA, QUERCUS ROBUR, FAGUS SYLVATICA, ABIES ALBA, PICEA ABIES, PINUS SYLVESTRIS.

lement la grande partie nord de la France sous climat doux et peu arrosé de plaine avec cependant des stations à RUM élevées (180 mm en moyenne). Enfin les hêtraies couvrent une vaste gamme allant des hêtraies d'altitude froides et arrosées aux contextes océanique ou semi-continentale de plaine (RUM de 77 à 274, 130 mm en moyenne).

2 - Standardisation et calcul des fonctions de réponse

1879 arbres dominants ont été carottés (en 1995) jusqu'à la moelle à 1,30 m à l'aide d'une tarière de Pressler (une carotte par arbre, 28 à 30 arbres par peuplement). Les 140 000 cernes correspondants ont été mesurés avec une précision en 1/100 de mm à l'aide d'un système vidéo-informatisé spécifique. Dans chaque cerne, la largeur du bois initial et du bois final a été mesurée séparément (Lebourgeois, 2000). Après mesure, chaque série individuelle a été interdatée à l'aide d'années caractéristiques (Schweingruber *et al.*, 1990). Dans notre étude, les années caractéristiques correspondent aux dates pour lesquelles au moins 75 % des arbres du peuplement ont présenté une variation relative de croissance d'au moins 10 % par rapport à l'année précédente (Becker,

1989). La sensibilité moyenne (MS) et l'autocorrélation d'ordre 1 (AC) ont été calculées pour chaque arbre et compartiment du cerne et moyennées par peuplement. La standardisation et le calcul des chronologies maîtresses (standard chronology STD) ont été réalisés à l'aide du programme ARSTAN v6.05P (Cook, 1985).

Les données mensuelles de températures minimales et maximales (Tmin et Tmax en °C) et de précipitation, issues de 50 stations du réseau Météo-France, ont été utilisées pour calculer les fonctions de réponse (période 1919-1994). Pour chaque peuplement, les fonctions de réponse ont été calculées pour le bois initial et le bois final à l'aide du logiciel DENDROCLIM2002 (Biondi et Waikul, 2004). Les paramètres climatiques ont été considérés de septembre de l'année n-1 à août de l'année n. Les analyses ont été menées en utilisant 12 variables de précipitations ou 12 variables de températures maximales ou minimales. Des analyses en composantes principales suivies de classifications ascendantes hiérarchiques ont été réalisées sur les années caractéristiques et les coefficients « *bootstrapped* » en utilisant le logiciel SPLus 2000 (Data Analysis Products Division, MathSoft, Seattle, WA) de façon à mettre en évidence les similitudes de réponse au climat entre espèces et sites.

II - RÉSULTATS

1 - Sensibilité aux événements extrêmes

Dans la majorité des cas, les croissances extrêmes sont la résultante d'années particulièrement sèches ou pluvieuses ou de froids hivernaux intenses (Figure 2). Les hêtraies ont réagi fortement et négativement en 1959, 1962, 1976 et 1989. Ces années font partie des trois ou quatre sécheresses les plus longues (1 à 2 mois de plus que la normale) et les plus intenses (jusqu'à 8 fois la normale) sur la période analysée (Lebourgeois, 2006 ; Lebourgeois, 2007 ; Lebourgeois *et al.*, 2005). Pour ces quatre années, la réduction a été en moyenne de 33 %. À l'opposé, les années 1958 et 1977 ont été très peu contraignantes ce qui s'est traduit par des croissances plus fortes que la moyenne (63 % en moyenne). Pour les hêtraies, la station module clairement la sensibilité aux extrêmes qui apparaît d'autant plus forte que la station est sèche. Ainsi, sous le seuil de 100 mm, la fréquence d'années caractéristiques dépasse le seuil de 40 % et les réductions de croissance sont d'autant plus fortes que la RUM est faible (non montré). Pour les chênaies, l'année 1976 a marqué 80 % des peuplements avec une diminution moyenne de croissance de 31 %. Pour les autres années, ce sont essentiellement les chênaies de l'ouest qui ont présenté des réductions de croissance notables (Figure 2). Concernant les deux

chênes, il n'est pas apparu d'année caractéristique spécifique à chaque espèce. Cependant, le chêne pédonculé a tendance à répondre plus fortement aux sécheresses (Lebourgeois, 2006). Les chênes ont également fortement réagi au froid intense de l'hiver 1956 qui a été le mois le plus froid de toute la période pour tous les peuplements. En moyenne, la température minimale a été de -9,4 °C (-7 °C pour CHS61 à -13,5 °C pour CHS01). En ce qui concerne les résineux, la réponse du sapin est fortement liée aux années froides (1956, 1986) (Lebourgeois, 2007 ; Lebourgeois *et al.*, 2010) (Figure 2). Pour les sites d'altitude, la réduction moyenne de croissance passe de 26 % à 36 % entre 1000 et 1400 m. Pour les sites plus bas et plus secs (< 1000 m, RUM < 100 mm), l'effet du froid est moins fréquent mais la croissance apparaît plus fortement réduite en cas de sécheresses prononcées (1976, 1989). La réponse des pins sylvestres est fortement associée aux conditions hydriques estivales. Les peuplements de plaine de l'ouest de la France poussant sous climat océanique chaud et sec (P moyenne : 700 mm) présentent une plus forte sensibilité aux années sèches (1959, 1969, 1976, 1989) par rapport aux pineraies plus continentales ou d'altitude. Enfin, pour l'épicéa, il n'a pas été possible de mettre en évidence un effet notable des conditions du milieu sur la réponse aux extrêmes qui

apparaît être liée à la fois à la sécheresse et au froid hivernal. Il faut cependant noter qu'à conditions de milieu équivalentes, l'épicéa est apparu moins sensible au froid que le sapin.

2 - Réponse au climat moyen

Trois périodes clés ont été mises en évidence. Elles sont liées aux conditions automnales de l'année précédente (à travers les températures ou le bilan hydrique), aux températures hivernales (essentiellement février et avril) et au bilan hydrique du début d'été (juin et juillet). L'importance de ces périodes varie fortement selon les espèces mais également, au sein d'une même espèce, selon les conditions écologiques de croissance des arbres (Figure 3). Pour 70% des hêtraies, la mise en place du bois initial dépend exclusivement du bilan

hydrique du début d'été (effet négatif des Tmax et positif de P des mois de juin et juillet) et celle du bois final des températures minimales du mois d'août. Ce modèle de réponse correspond aux hêtraies de plaine (alt. moyenne : 340 m) peu arrosées (800 mm) et poussant sur des sols à RUM moyenne (130 mm). Dans ce groupe, la liaison avec le bilan hydrique augmente quand la RUM diminue et, comme pour les années caractéristiques, le seuil de 100 mm apparaît être un seuil important de sensibilité (Lebourgeois, 2006 ; Lebourgeois *et al.*, 2005). Pour les autres hêtraies poussant à des altitudes plus élevées (moy. 550 m) et bénéficiant de conditions hydriques plus favorables (P > 1000 mm, RUM = 150 mm), le bilan hydrique estival n'est plus un facteur explicatif majeur. La croissance annuelle dépend en grande partie des conditions automnales de l'année précédente (septembre et octobre) et des températures en début de saison de végétation (avril). La réponse des chênes est apparue très hétérogène et sans logique stationnelle claire (Lebourgeois, 2006). Ainsi, pour 46% des chênaies, la mise en place du bois initial est gouvernée par un automne clément l'année précédente (effet positif des températures d'octobre ou novembre n-1). Pour le bois final, la relation constatée avec le bilan hydrique du début d'été (essentiellement juin) correspond aux chênaies les plus « sèches » (RUM < 180 mm) et majoritairement situées dans le secteur ligérien (P < 750 mm, températures moyennes estivales de 20°C). Pour les résineux, les modèles de réponse sont apparus assez différents entre les espèces (Figure 4) (Lebourgeois, 2007 ; Lebourgeois *et al.*, 2010).

Espèce	<i>Hêtre</i>		<i>Chênes</i>		<i>Epicéa</i>	<i>Sapin</i>		<i>Pin sylvestre</i>	
Alt. (m)	290	623	181*	245	1014	802	1105	128*	731
RUM (mm)	93	169	189	180	108	99	113	119	68
P année (mm)	845	1051	748	899	1320	1219	1078	691	1018
T Jan (°C)	1,9	4,3	3,4	1,8	1,2	2,1	0,7	3,7	1,9
T Juil (°C)	18	19,2	18,6	19,2	16,8	17,8	17,7	18,3	18,2
Nb peupl.	7	8	8	5	8	5	6	8	6
1949					-14				-33
1950							-19		26
1951	57						43		43
1952	-33						-20		-29
1954			-28						
1955	67				31		35		
1956			-25	-29			-33		
1957		-27							30
1958	54		58	64					
1959	-38								-40
1960									30
1961				32			39		
1962	-33		-23		-27	-27	-28		-31
1963					40				33
1964	-29						42		-35
1965	47			41			-21		39
1966						29			56
1969							34		-18
1970							-22		
1971									26
1972			-21						
1973					-25				-17
1975	39		34						
1976	-51	-32	-32	-31	-28	-36	-17	-26	-32
1977	69	52				78	37		
1978	59								
1980	45		37						46
1982				65					10
1983	-39								-11
1984							-26		17
1985	56						34		
1986					-26	-31	-33		
1987		-77				26	31		
1988		67				31			
1989	-39	-27	-25			-20			-23
1991								-19	-27
1992									33
1993	50		61		48		33		
1994	35			31					39

Figure 2 - Années caractéristiques calculées pour le cerne complet (voir texte pour détails). Pour chaque espèce, les regroupements ont été définis suite à l'analyse des résultats de l'ACP suivie de la CAH effectuée sur les années caractéristiques (analyse non montrée). Pour chaque groupe, seules les années pour lesquelles au moins 50% des peuplements ont présenté un comportement particulier sont présentées dans ce tableau. Les lignes orange indiquent des années sèches et les lignes bleues des années à hiver froid. L'altitude, la réserve utile maximale (RUM) et les conditions climatiques moyennes (période 1961-1990) sont présentées. *: peuplements de l'Ouest de la France.

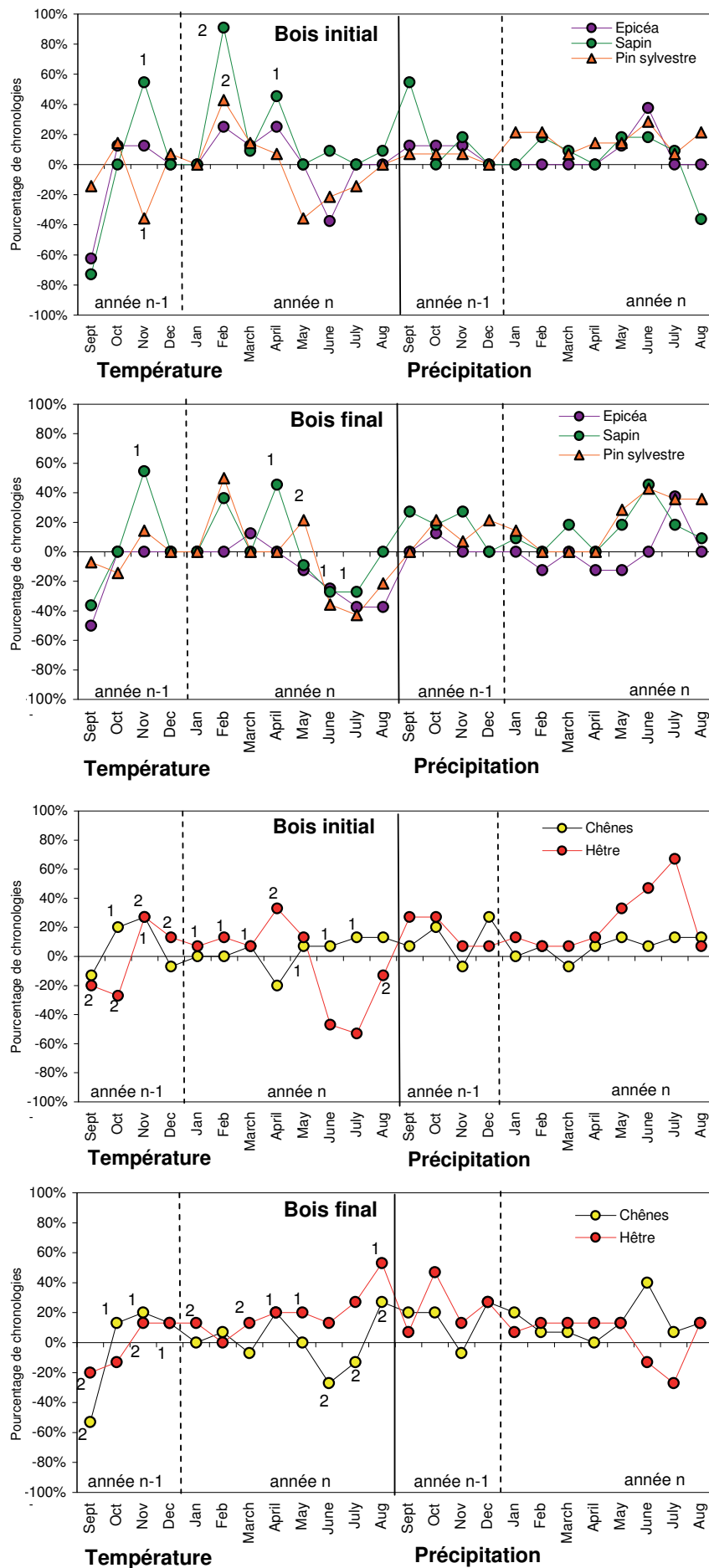


Figure 3 - Pourcentage de chronologies répondant aux variables mensuelles de température et de précipitation pour le bois initial et le bois final et pour les 5 espèces étudiées (coefficient de corrélations bootstrapped ; $p < 0,05$) : 100% = 8, 11, 14, 15 et 15 pour l'épicéa, le sapin pectiné, le pin sylvestre, le hêtre et les chênes (sessile, 11 sites et pédonculé, 4 sites). Température = T_{max} sauf 1 = réponse significative pour T_{min} et 2 = réponse pour T_{min} ou T_{max} selon les sites. Un pourcentage négatif indique un effet défavorable des valeurs élevées du paramètre sur la croissance.

vales et principalement du bilan hydrique. Globalement, les effets des sécheresses sont d'autant plus forts que les conditions locales de xéricité augmentent : RUM < 100 mm pour le hêtre, à des altitudes inférieures à 800 m et/ou RUM < 100 mm pour le sapin, ou sous climat océanique de plaine peu arrosé (P de l'ordre de 700 mm) pour le pin sylvestre et les chênes. Pour les deux chênes, la différence de réponse aux fortes sécheresses n'est pas évidente mais la comparaison faite sur quelques peuplements est cohérente avec des travaux précédents montrant une sensibilité plus forte du chêne pédonculé (Lévy *et al.*, 1992) en liaison avec un fonctionnement physiologique différent (Cochard *et al.*, 1992). Pour le chêne sessile, une étude récente menée dans le nord de la France le long d'un gradient ouest-est confirme également une sensibilité accrue sous climat océanique (Pays de Loire notamment) en précisant également un seuil de sensibilité vis-à-vis de la RUM autour de 120 mm (Mérian, 2008). Concernant les froids hivernaux, les chênes apparaissent plus sensibles aux faibles températures que le hêtre ; résultat qui est en accord avec les connaissances écophysologiques

actuelles sur leur différence de sensibilité à l'embolie hivernale (Hacke et Sauter, 1996). Pour les résineux, à conditions stationnelles équivalentes, le sapin apparaît beaucoup plus thermophile que l'épicéa pour lequel les froids hivernaux intenses n'ont que très peu d'effet. Ce résultat est en accord avec une précédente étude menée dans les Alpes internes à des altitudes supérieures (Desplanque *et al.*, 1999). Dans le futur, une augmentation des pluies automnales et hivernales et un radoucissement hivernal (Déqué, 2007) pourraient donc influencer positivement la mise en place du bois initial. En revanche, une augmentation de la contrainte estivale pourrait réduire fortement la croissance du bois final. A plus ou moins long terme, ceci pourrait donc influencer les propriétés mécaniques du bois. En conclusion, même s'il est impossible de prédire avec certitude la dynamique future des écosystèmes forestiers dans le cadre de l'augmentation envisagée de la fréquence et de l'intensité des sécheresses, l'approche dendroécologique permet d'apporter des éléments de réponse quant au choix des stations à privilégier pour minimiser les risques de dysfonctionnement futur.

BIBLIOGRAPHIE

- 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.
- BERT D., BECKER M., 1990. Vitalité actuelle et passée du sapin (*Abies alba* Mill) dans le Jura. Etude dendroécologique. *Annales des Sciences Forestières*, 47(5), 395-412.
- BIONDI F., WAIKUL K., 2004. Dendroclim2002: a c++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers and Geosciences*, 30, 303-311.
- BRÉTHES A., ULRICH E., 1997. RENECOFOR, Caractéristiques pédologiques des 102 peuplements du réseau. Office National des Forêts, Département des Recherches Techniques, France, 573 p.
- 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). *Annales des Sciences Forestières*, 49, 225-233.
- COOK E.R., 1985. A time series analysis approach to tree-ring standardization. Lamont-Doherty Geological Observatory, New York Ph.D. dissertation, University of Arizona, Tucson, Tucson, AZ., 171 p.
- 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*, 57:16-26
- DESPLANQUE C., ROLLAND C. SCHWEINGRUBER F.H., 1999. Influence of species and abiotic factors on extreme tree ring modulation: *Picea abies* and *Abies alba* in Tarentaise and Maurienne (French Alps). *Trees*, 13(4), 218-227.
- HACKE U., SAUTER J., 1996. Xylem dysfunction during winter and recovery of hydraulic conductivity in diffuse-porous and ring-porous trees. *Oecologia*, 105, 425-439.
- LEBOURGEOIS F., 1997. RENECOFOR - Etude dendro-chronologique des 102 peuplements du réseau. 307 p.
- LEBOURGEOIS F., 2000. Climatic signals in earlywood, latewood and total ring width of Corsican pine from western France. *Annals of Forest Science*, 57(2), 155-164.
- LEBOURGEOIS F., 2006. Sensibilité au climat des chênes sessile et pédonculé dans le réseau RENECOFOR. Comparaison avec les hêtraies. *Revue Forestière Française*, 53(1), 29-44.
- 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, 333-343.
- LEBOURGEOIS F., BRÉDA N., ULRICH E. GRANIER A., 2005. Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Trees*, 19(4), 385-401.
- LEBOURGEOIS F., RATHGEBER C. ULRICH E., 2010. Sensitivity of French temperate coniferous forests to climate variability and extreme events (*Abies alba*, *Picea abies* and *Pinus sylvestris*). *Journal of Vegetation Science*, 21, 364-373.
- LÉVY G., BECKER M., DUHAMEL D., 1992. A comparison of the ecology of pedunculate and sessile oaks: radial growth in the centre and northwest of France. *Forest Ecology and Management*, 55, 51-63.
- MÉRIAN P., 2008. Dendroécologie du chêne sessile (*Quercus petraea*) dans la moitié Nord de la France. Master II, Fage, Université Nancy I, Henri-Poincaré, 38 p.
- SCHWEINGRUBER F.H., ECKSTEIN D., SERRE-BACHET F. BRÄKER O.U., 1990. Identification, presentation and interpretation of even years and pointer years in dendrochronology. *Dendrochronologia*, 8(1), 9-38.



Figure hors-texte - Peuplement mélangé de cèdre et de pin noir du Mont-Ventoux (photo Lebourgeois, octobre 2009).