

CROISSANCE DE LA CHÂTAIGNERAIE LIMOUSINE ET CLIMAT. RÉFLEXION SUR LA PLACE DU CHÂTAIGNIER DANS LES PROCHAINES DÉCENNIES

**FRANÇOIS LEBOURGEOIS – RAPHAËL AUSSENAC – JEAN LEMAIRE –
THIERRY NÉQUIER – JEAN-MARIE RIGHI**

Depuis le début des années 1990 (et surtout à la suite des problèmes sanitaires observés après la canicule de 2003), la question de la réponse des écosystèmes forestiers au réchauffement climatique et de la place future des essences dans ce contexte changeant est devenue majeure pour la communauté forestière. Si les connaissances sur la réponse au climat des essences comme le Hêtre, les Chênes sessile et pédonculé ou encore le Sapin pectiné ou l'Épicéa commun se sont améliorées depuis une dizaine d'années (Lebourgeois et Mérian, 2011), celles sur le Châtaignier restent encore à l'heure actuelle assez méconnues bien qu'il soit couramment admis que cette espèce est sensible à la sécheresse (Lemaire, 2008). Cependant, très peu d'études ont été menées en France sur cette question spécifique en intégrant à la fois la réponse au climat et à ses variations dans le temps et dans l'espace. Dans ce travail, nous nous sommes donc intéressés à cette essence et plus particulièrement à la châtaigneraie limousine qui, avec ses 200 000 ha, est le plus grand massif de Châtaignier d'Europe (Righi, 2011). Sous l'impulsion du groupe de travail Châtaignier mis en place dans les années 1980 (Lemaire, 2008), différents travaux ont été menés en France afin de mieux connaître l'autécologie de cette essence et d'élaborer des itinéraires sylvicoles pertinents au regard des exigences écologiques de cette essence, des contextes socioéconomiques et des peuplements existants constitués, à l'heure actuelle, à part égale de taillis pur et de taillis-sous-futaie (Cousseau, 2006). Étant donné le fort potentiel écologique et économique de cette essence (Lempire, 2011), la production de grumes de qualité est de plus en plus envisagée et des itinéraires sylvicoles visant à améliorer les peuplements existants se mettent en place. Pour répondre à ces nouveaux enjeux, la gestion des châtaigneraies en futaie régulière dynamique est également de plus en plus envisagée (Lemaire, 2008). Cependant, très peu de peuplements présentent cette structure et les connaissances du comportement de cette essence dans ces conditions restent à préciser.

L'objectif de ce travail était donc d'apporter aux gestionnaires des éléments d'information quant à la dynamique de croissance du Châtaignier en futaie régulière et ses relations avec le climat dans la châtaigneraie limousine. La connaissance de ces relations est un des éléments qui permet de raisonner la place future de cette essence dans le cadre des changements climatiques. Dans une telle étude, il est fondamental que l'échantillon couvre des gradients importants car, selon les conditions climatiques locales, les facteurs modulant la mise en place du cerne peuvent varier fortement. De plus, une même intensité de changement climatique peut avoir des effets très différents selon le contexte climatique initial. Ainsi, un réchauffement de 2°C n'aura pas le même effet pour des peuplements qui poussent déjà sous un climat chaud ou pour ceux qui bénéficient d'un climat plus frais. Dans le premier cas, le réchauffement peut se traduire par un dépassement du seuil physiologique des réponses de l'espèce et donc par des moindres

croissances voire des mortalités. Dans le second, par une levée d'une contrainte thermique et donc par des croissances plus soutenues. Pour appréhender la réponse du Châtaignier au climat, nous avons donc échantillonné le long d'un gradient de sécheresse de la région du Périgord, zone la plus sèche, au plateau de Millevaches, région la plus humide (figure 1, ci-dessous).

36 PEUPELEMENTS RÉGULIERS DANS TROIS RÉGIONS CLIMATIQUEMENT TRANCHÉES

L'étude a porté sur 146 arbres dominants échantillonnés dans 36 peuplements réguliers (tableau I, p. 753) et trois zones climatiques. La zone 1 correspond à la zone «humide» avec des pluies moyennes annuelles supérieures à 1 000 mm/an et une température de 10,6°C (moyenne 1945-2009). La zone 2 correspond à la zone «tempérée» avec des pluies annuelles moyennes de 940 mm/an et une température de 12 °C. La zone 3 correspond à la zone «sèche» avec un régime pluviométrique annuel de 860 mm/an et une température de 12,7 °C. La figure 1 (ci-dessous) présente les trois zones selon le niveau moyen de sécheresse printanière et estivale. Dans notre étude, la sécheresse a été définie comme la différence entre les pluies (P) et l'évapotranspiration potentielle (ETP, calculée selon la méthode Turc) sur la période s'étalant de mars à septembre («bilan hydrique climatique» sur la saison de végétation) (Lebourgeois et Piedallu, 2005). Plus la valeur $P - ETP$ est négative et plus la sécheresse est importante. Nous avons considéré cet indicateur car il a été utilisé avec succès dans de nombreuses études pour expliquer non seulement la croissance des arbres mais également les dépérissements (Lemaire, 2011) ou encore la niche des espèces (Piedallu *et al.*, 2012). Concernant les conditions de sols, les peuplements échantillonnés correspondent à des stations classiques pour cette essence c'est-à-dire des sols acides à très acides. D'après l'étude du catalogue des stations forestières de la châtaigneraie limousine et des données acquises sur le terrain, la réserve utile maximale en eau du sol (qui traduit la capacité du sol à stocker l'eau) est apparue équivalente entre les sites et en moyenne égale à 110 mm.

FIGURE 1 LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE DES 36 PEUPELEMENTS ÉCHANTILLONNÉS (146 ARBRES) DANS LES TROIS ZONES CLIMATIQUES (SOMME DES $P - ETP$ TURC) DE MARS À SEPTEMBRE; moyenne 1961-1990 [données spatialisées de Météo-France (AURHELLY) et du LERFOB]

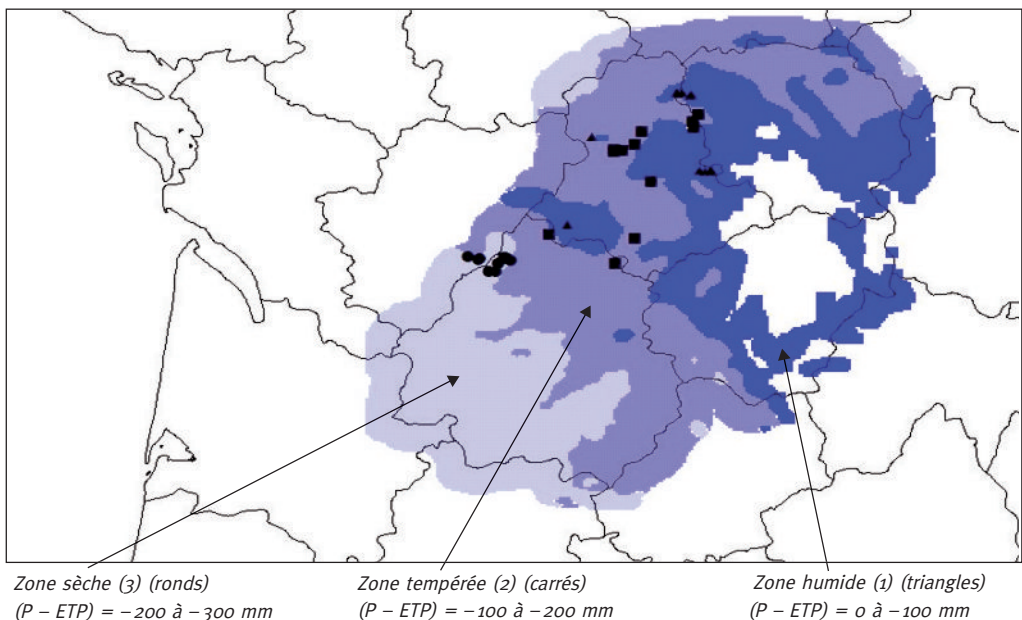


TABLEAU I

**Caractéristiques climatiques moyennes (1945-2009)
des trois zones étudiées et caractéristiques dendrométriques des arbres
(en 2009, moyenne et écart type)**

La largeur moyenne des cernes (en mm) a été calculée sur la période commune (1945-2009). Un indice de compétition a été calculé pour chaque arbre et correspond au rapport entre la hauteur totale (en m) et le diamètre de son houppier (m). Les arbres de futaie ont typiquement des valeurs inférieures à 0,5.

	Zone humide	Zone tempérée	Zone sèche
Précipitations (mm)			
Année entière	1007	947	863
Mai à septembre	380	374	327
Juin à août	206	202	178
Température (°C)			
Année entière	10,5	12	12,7
Janvier	3,1	4,7	5,1
Juin à août	17,6	18,8	19,8
(P - ETP) (mm)			
Mai à septembre	- 147	- 173	- 195
Juin à août	- 147	- 162	- 233
Données dendrométriques			
Nombre de peuplements	12	13	11
Nombre d'arbres	51	48	47
Âge (années)	51 (16)	64 (20)	47 (15)
Largeur du cerne (mm)	4,2 (2,3)	3,2 (2)	3,9 (2,0)
Diamètre (cm)	48 (9,4)	47,6 (7,7)	45 (7,1)
Hauteur (m)	25 (4)	24,5 (3,6)	23,2 (2,6)
Diamètre du houppier (m)	4 (1)	3,2 (0,7)	3,2 (0,8)
Indice de compétition	0,17 (0,06)	0,13 (0,04)	0,14 (0,03)

UN RÉCHAUFFEMENT GÉNÉRALISÉ MAIS DES ÉVOLUTIONS DE PLUVIOSITÉ VARIABLES

Les données climatiques de températures et de précipitations issues de 24 stations du réseau Météo-France disponibles dans la zone étudiée ont été utilisées pour analyser les changements sur la période 1945-2009 et le déterminisme climatique de la croissance radiale du Châtaignier. Afin d'estimer les évolutions moyennes des paramètres climatiques mais également de la variabilité entre les années, nous avons analysé les tendances en considérant 41 périodes de 25 ans (première période 1945-1969; dernière 1985-2009) (Lebourgeois *et al.*, 2012; Mérian *et al.*, 2011). Sur ces 64 ans, l'analyse montre que la température moyenne annuelle a augmenté d'une façon homogène pour les trois zones d'environ + 1°C. Cette augmentation est due en grande partie à l'augmentation des températures minimales. En ce qui concerne le régime annuel des précipitations, des différences notables apparaissent entre les zones: stabilité pour la zone sèche (valeurs stables autour de 850 mm/an), augmentation modérée pour la zone tempérée et forte pour la zone humide (environ + 100 mm/an). Pour toutes les zones, on constate une forte diminution de la variabilité interannuelle (diminution de l'écart type), c'est-à-dire que le total annuel est moins variable d'une année sur l'autre. Pour les pluies de printemps, on observe au contraire une forte augmentation de la variabilité entre les années pour toutes les zones et des tendances différentes

TABLEAU II **Évolution de la proportion de bois initial dans le cerne selon l'âge cambial et la largeur totale du cerne annuel**

Seuls les cas pour lesquels au moins 10 cernes étaient disponibles ont été pris en compte. Le tableau montre que la proportion de bois initial passe de 17 à 30 % de la classe d'âge 1 à 5 ans à la classe 56 à 65 ans et que, pour chaque classe d'âge cambial, la proportion diminue quand la largeur du cerne annuel augmente. Par exemple, pour la classe 26 à 35 ans, la proportion passe de 35 % pour un cerne large de 1,5 à 2 mm à 23 % pour un cerne large de 4 à 4,5 mm.

		Classe de largeur						
		< 1	[1 à 1,5]	]1,5 à 2]	]2 à 2,5]	]2,5 à 3]	]3 à 3,5]	]3,5 à 4]
Classe d'âge cambial	1 à 5 ans			0,23	0,24	0,23	0,19	0,18
	6 à 15 ans	0,42	0,35	0,32	0,28	0,25	0,23	0,21
	16 à 25 ans		0,40	0,34	0,31	0,28	0,26	0,24
	26 à 35 ans	0,49	0,42	0,35	0,33	0,30	0,27	0,25
	36 à 45 ans	0,46	0,42	0,37	0,33	0,29	0,26	0,24
	46 à 55 ans	0,44	0,40	0,37	0,32	0,29	0,27	0,24
	56 à 65 ans	0,43	0,41	0,36	0,34	0,31	0,27	0,26
Ensemble		0,45	0,40	0,33	0,31	0,28	0,25	0,23

sur les cumuls : pluies plus abondantes en zone humide, stables en zone tempérée et plus faibles en zone sèche. Ainsi, depuis 1945, les conditions de croissance des châtaigniers ont fortement évolué dans le sens d'un réchauffement notable dans l'ensemble de la zone et d'une aridification dans la zone 3 déjà la plus sèche.

L'ÂGE : PREMIER FACTEUR DE VARIATION DE L'ACCROISSEMENT RADIAL ET DE L'ANATOMIE DU CERNE

Pour les 146 arbres échantillonnés, les valeurs de l'indice de compétition, défini comme le rapport de la hauteur totale (m) de l'arbre au diamètre de son houppier (m), sont inférieures à 0,5 traduisant bien des structures régulières (moyenne = 0,14; max. = 0,31) (Lemaire, 2010). L'étude de la croissance radiale a été effectuée à partir de la lecture des cernes issus de carottes prélevées sur chaque arbre à 1,30 m à l'aide d'une tarière de Pressler motorisée (1 carotte à cœur par arbre). Les 7427 cernes correspondant aux 146 arbres ont été mesurés avec précision (0,01 mm). Dans chaque cerne, la largeur du bois initial (= printemps, gros vaisseaux) et du bois final (= été, petits vaisseaux et fibres) a été considérée séparément de façon à mieux appréhender le déterminisme climatique de la mise en place du cerne (Lebourgeois *et al.*, 2010).

Le cerne annuel du Châtaignier contient une faible proportion de bois initial (tableau II, pp. 754-755). Cependant, les proportions varient selon l'âge cambial⁽¹⁾ et la largeur du cerne. Ainsi, quel que soit l'accroissement radial, la proportion de bois initial augmente avec l'âge cambial (en moyenne de 17% à 30% entre 1 et 65 ans). Cependant, pour chaque classe d'âge cambial, cette proportion diminue fortement quand la largeur du cerne augmente. Elle évolue de 40 à 45 % pour des cernes de moins de 1,5 mm à moins de 20% pour des cernes de plus de 4,5 mm.

(1) L'âge cambial correspond à l'âge de l'arbre au moment de l'élaboration du cerne. Par exemple, un arbre de 50 ans en 2012 a germé en 1962. Le cerne élaboré en 1963 est le cerne d'âge cambial 1 an; 2 ans pour 1964, 3 ans pour 1965... et 50 ans pour 2012.

de cerne (en mm)									
	]4 à 4,5]	]4,5 à 5]	]5 à 5,5]	]5,5 à 6]	]6 à 6,5]	]6,5 à 7]	]7 à 8]	> 8 mm	Ensemble
	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	0,13	0,12	0,12	0,17
	0,20	0,19	0,17	0,16	0,16	0,16	0,14	0,12	0,22
	0,22	0,21	0,19	0,18	0,17	0,17	0,15	0,14	0,23
	0,23	0,21	0,20	0,19	0,19	0,18	0,17	0,16	0,26
	0,22	0,21	0,20	0,18	0,19	0,17	0,16	0,16	0,26
	0,24	0,21	0,20	0,18	0,19	0,18	0,16	0,16	0,26
	0,25	0,22					0,18		0,30
	0,22	0,20	0,18	0,17	0,17	0,16	0,16	0,14	0,24

Ainsi, quel que soit l'âge cambial, des forts accroissements (pouvant être obtenus par une sylviculture dynamique) favorisent une plus forte proportion de petits vaisseaux et de fibres (bois final), ce qui permet d'obtenir un bois plus dense et plus dur.

Pendant la phase « juvénile » (jusqu'à 10-15 ans), la largeur du cerne augmente fortement pour atteindre des valeurs moyennes de 5 à 7 mm. Par la suite, celle-ci décroît régulièrement d'environ 0,4 à 0,5 mm tous les 10 ans pour atteindre des valeurs moyennes de 2,5 à 4 mm après 40 ans. Cette variation est essentiellement due à la variation de la largeur du bois final, la largeur du bois initial étant très stable quel que soit l'âge cambial considéré et voisine de 1 mm.

La comparaison de l'accroissement par zone climatique montre que la largeur moyenne du cerne est supérieure pour les châtaigniers poussant sous climat humide. Ainsi, entre 20 et 40 ans, la différence est en moyenne de 14 %. Le seuil de 4 mm qui correspond au niveau d'accroissement en dessous duquel la roulure du Châtaignier augmente fortement (Fonti et Sell, 2003) est atteint entre 20 et 25 ans pour les zones tempérée et sèche et entre 30 et 35 ans pour la zone plus humide. Sachant qu'il faut attendre 45 à 50 ans, au minimum, avant de produire des grumes ayant atteint un diamètre acceptable (environ 40 cm), la sylviculture doit être très dynamique pour la production de grumes exemptes de roulure.

PLUIES PRINTANIÈRES : RÔLE DE PLUS EN PLUS IMPORTANT DEPUIS LES ANNÉES 1980

Les procédures classiques de dendroclimatologie ont été appliquées pour l'étude du déterminisme climatique de la croissance radiale. Ainsi, afin de retirer les signaux non liés au climat, les 146 séries individuelles ont d'abord été standardisées pour chaque compartiment du cerne selon le processus classique appelé double pondération (Lebourgeois *et al.*, 2010; Mérian, 2012). Par la suite, les chronologies standardisées ont été moyennées par date pour chaque zone climatique et compartiment afin d'établir une chronologie moyenne régionale de référence. Les chronologies régionales ont été établies sur environ 50 arbres par zone, ce qui assure la fiabilité statistique

TABEAU III Synthèse des facteurs climatiques influençant l'accroissement radial du Châtaignier selon la zone échantillonnée (seuls les coefficients de corrélation significatifs au moins au seuil de 5 % ont été retenus à l'issue du calcul des fonctions de corrélation de type *bootstrap*).

Une flèche vers le bas indique un effet négatif du facteur et une flèche vers le haut un effet positif.

Les flèches blanches correspondent à la température et les flèches noires aux précipitations.

Par exemple, les températures (maximales) élevées en février, mars ou avril se traduisent par une réduction de la largeur du bois initial et des précipitations abondantes en mai et juin avec une zone de bois final large.

	Année précédente				Année courante							
	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août
Zone humide	↓						↓		↑	↑		↑
Zone tempérée			↓ ↓		↓	↓			↑	↓	↑	↓
Zone sèche			↑ ↑		↓		↓		↑	↑	↓	↑

mise en place du bois initial
mise en place du bois final

des résultats (Mérian *et al.*, 2012; Mérian et Lebourgeois, 2011). Pour chaque modalité, les corrélations entre les cernes et les données climatiques ont été calculées par la technique des corrélations de type *bootstrap* sur la période entière 1945-2009 et sur des périodes glissantes plus courtes de façon à analyser d'éventuels changements dans le déterminisme climatique de la croissance (41 périodes de 25 ans; 1945-1969 à 1985-2009) (Lebourgeois *et al.*, 2012; Mérian *et al.*, 2011). Les paramètres climatiques mensuels ont été considérés selon l'année biologique c'est-à-dire de septembre de l'année $n - 1$ à août de l'année n . Les analyses ont été menées en utilisant 12 variables de précipitations et 12 variables de températures maximales ou minimales (Mérian, 2012). Seuls les coefficients significatifs au moins au seuil de 5% ont été considérés.

La croissance du Châtaignier dépend, dans un premier temps, des conditions climatiques de l'automne précédent (novembre) (tableau III, ci-dessus). Les processus de mise en réserve carbonée en fin de saison sont souvent évoqués pour expliquer ces corrélations, réserves qui sont utilisées l'année suivante pour mener à bien les différents processus de réactivation du cambium (responsable de la production des nouvelles cellules de bois) et de mise en place des feuilles (Barbaroux et Bréda, 2002; Barbaroux *et al.*, 2003; Genet *et al.*, 2010; Michelot *et al.*, 2012). La différence de sens d'action selon la zone reste en revanche difficile à expliquer bien que l'effet positif des conditions de novembre dans les situations les plus sèches ait été déjà observé pour d'autres essences forestières (Mérian *et al.*, 2011).

Par la suite, ce sont les conditions thermiques hivernales (février et mars) qui agissent principalement sur la mise en place du bois initial. Des températures (maximales) trop élevées pendant cette période limitent la mise en place du cerne. Ceci confirme les observations réalisées sur le Châtaignier dans les Alpes suisses (Fonti et Garcia-Gonzalez, 2004; Fonti *et al.*, 2007) mais également sur le Chêne sessile dans toute la moitié Nord de la France (Mérian *et al.*, 2011) ou le Pin cembro dans les Alpes (Saulnier *et al.*, 2011). Ces auteurs expliquent que des hivers chauds peuvent augmenter la sensibilité à l'auxine (hormone) avant la mise en place des feuilles. Ceci a pour effet de stimuler la différenciation des cellules et non leur élongation et donc de réduire

l'accroissement final. Des températures trop élevées peuvent également favoriser la respiration et donc la consommation des réserves carbonées (Wieser *et al.*, 2005) ou encore avancer l'émergence des nouvelles feuilles et donc augmenter les risques de dégâts foliaires liés aux gelées. Notre étude confirme que le Châtaignier est une essence sensible au grand froid. Par exemple, les grands froids de l'hiver 1956 (moyenne des températures minimales de février de -10°C à -12°C selon la zone) se sont traduits par des réductions d'accroissement de -22% à -28% .

Au cours de la saison, ce sont les précipitations du début de saison qui modulent la croissance essentiellement à travers la largeur du bois final. Le régime hydrique de mai et juin joue un rôle majeur pour les trois zones mais, pour la zone 3 plus sèche, les conditions hydriques de juillet jouent également un rôle important (tableau III, p. 756). Par exemple, les précipitations exceptionnelles des années 1946, 1958, 1987 et 1993 (généralement plus du double de la normale) se sont traduites par des accroissements supérieurs de 30 à 70% par rapport à la normale. À l'opposé, les très fortes sécheresses des années 1976, 1989 ou 1995 (pluies inférieures de plus de 50% par rapport à la normale) ont réduit la croissance de 20 à 30%. En association avec les pluies faibles, de trop fortes chaleurs en juin et juillet réduisent également la croissance. En revanche, en fin d'été, la croissance est stimulée par des températures élevées en août.

Il apparaît également que la dépendance de la croissance du Châtaignier aux pluies du début de saison (mai à juillet) a fortement augmenté au cours du temps, et ceci particulièrement pour la zone la plus sèche. Ainsi, alors que le cumul des pluies pendant cette période expliquait entre 10% et 20% de la variabilité interannuelle de la croissance jusque dans les années 1970-1980, il explique entre 30% et 40% de cette variabilité depuis les deux dernières décennies (figure 2, p. 758). Une plus forte variabilité interannuelle observée du régime hydrique explique en grande partie ces changements de comportement des peuplements. La dépendance a plus fortement augmenté dans la zone sèche car cette augmentation de la variabilité s'est accompagnée d'une diminution du cumul des pluies : les conditions étant plus variables d'une année sur l'autre mais globalement plus sèches, les arbres deviennent de plus en plus «sensibles» à ce facteur climatique.

PEUT-ON PRÉDIRE LA CROISSANCE RADIALE DU CHÂTAIGNIER EN FONCTION DE L'ÂGE ET DU CLIMAT ?

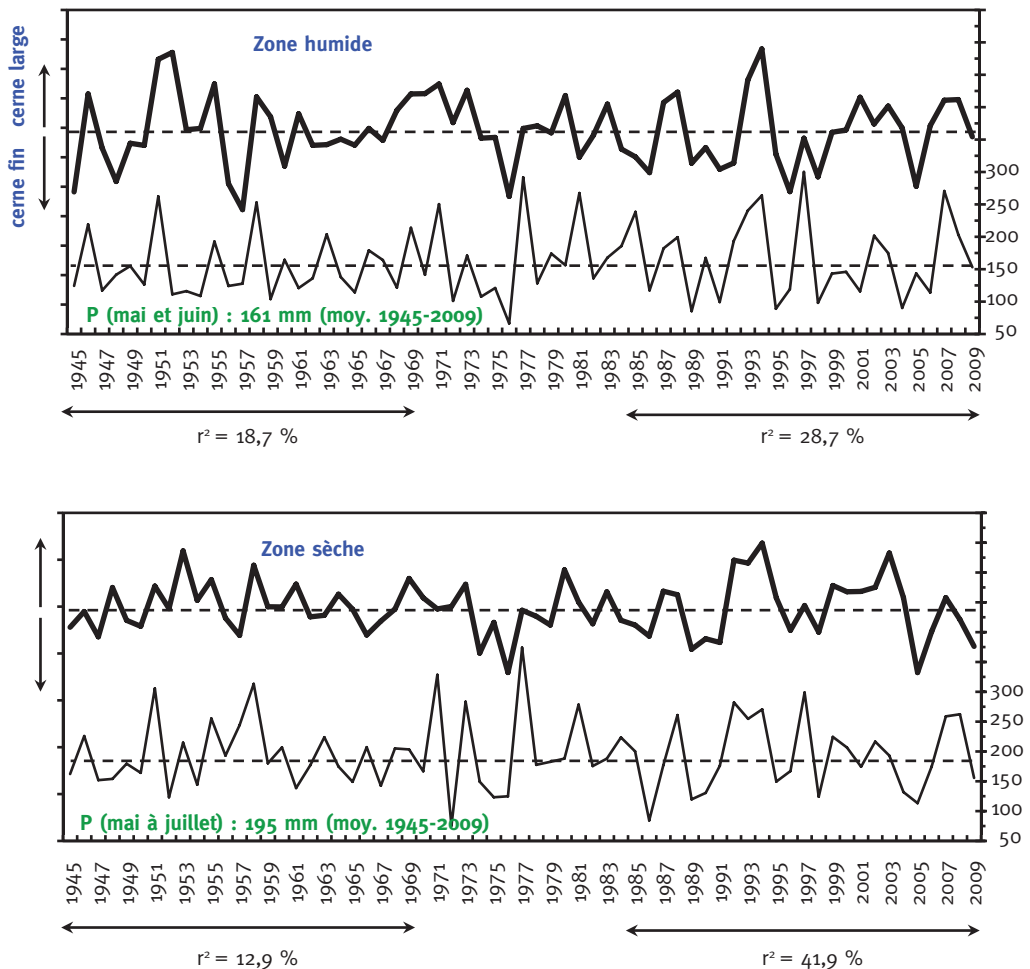
Les analyses précédentes ont permis de cerner l'effet de l'âge cambial et des variables climatiques sur la croissance radiale de la châtaigneraie limousine. Nous avons combiné ces différentes variables afin d'établir un «arbre de prédiction» de la croissance radiale (figure 3, p. 759). Ces méthodes font appel à des procédures complexes (forêts d'arbres aléatoires de Breiman) (Breiman, 2001) dont les résultats peuvent fortement varier selon les données prises en compte. Nous présentons ici un des arbres de décision les plus simples prenant en compte essentiellement l'âge cambial et le régime hydrique du début de saison c'est-à-dire de mai à juillet. Pour chaque variable, la figure 3 présente le seuil de séparation. À la fin de chaque branche apparaît la largeur moyenne du cerne et son écart type. Par exemple, pour les cernes d'âge cambial de 20 à 26 ans, la largeur moyenne prédite est de 3,7 mm et l'écart type de 1,9 mm quand les pluies de mai à juillet sont inférieures à 253 mm et la température maximale du mois d'août inférieure à $28,3^{\circ}\text{C}$.

INCERTITUDES SUR LA PLACE DU CHÂTAIGNIER DANS LES PROCHAINES DÉCENNIES

Nous avons pu voir par différentes méthodes l'importance des pluies du début de saison (mai à juillet) pour le Châtaignier dans le territoire de l'étude. Sur la période 1945-2009, le cumul des pluies de mai à juillet a été en moyenne égal à 210 mm mais le seuil de 250 mm semble être une limite importante pour discriminer la croissance de cette espèce. Dans notre étude, le cumul

FIGURE 2 RELATIONS ENTRE LA VARIABILITÉ INTERANNUELLE DE LA CROISSANCE (trait épais) ET LA VARIABILITÉ DES PLUIES PRINTANIÈRES (trait fin; échelle à droite en mm) POUR LA ZONE HUMIDE ET LA ZONE SÈCHE

Pour la croissance, les données présentées ici sont des indices (exprimés sans unité) dans lesquels les effets de l'âge cambial et de la compétition ont été éliminés. Pour la zone humide, le cumul des pluies de mai et juin expliquait 18,7% de la variation interannuelle sur la période 1945-1969 et près de 29% sur la période récente 1985-2009. Pour la zone sèche, la corrélation a évolué de 12,9% à près de 42% pour les pluies de mai à juillet.



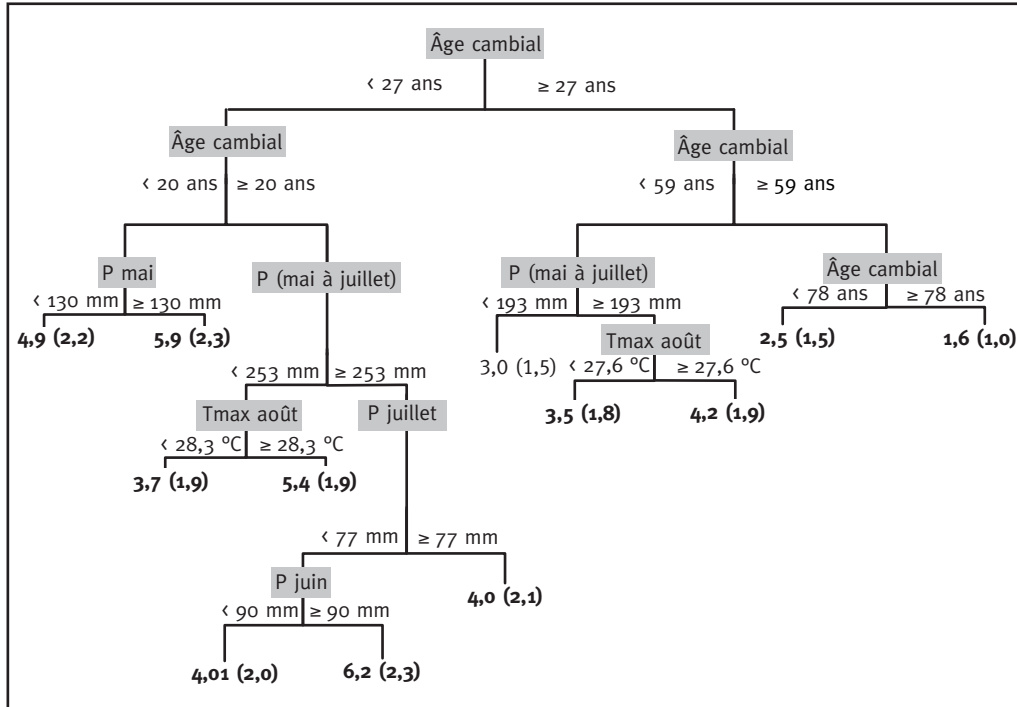
moyen pour le seuil inférieur à 250 mm correspond à 180 mm (environ - 15% par rapport à la moyenne). Il est de 300 mm (+ 40%) pour le seuil supérieur. Afin d'apprécier la progression de l'aridité dans la région, nous avons cartographié l'évolution future de ces pluies printanières à partir du modèle HadCM3 et du scénario A2 disponibles au Tyndall Centre for Climate Change Research (figure 4, p. 760), considérés comme les plus pessimistes il y a encore quelques mois.

Ces cartes suggèrent une diminution très forte des pluies du début de saison aboutissant à une réduction importante des zones favorables à la bonne croissance du Châtaignier. Ainsi, dès la moitié du XXI^e siècle, le cumul des pluies printanières ne devrait plus dépasser 150 mm (en

FIGURE 3

EXEMPLE D'UN ARBRE DE PRÉDICTION DE LA LARGEUR MOYENNE ET DE SON ÉCART TYPE (EN MM) DU CERNE ANNUEL (VALEURS EN GRAS) SELON DES SEUILS DES FACTEURS CLIMATIQUES

Le premier niveau de séparation est l'âge cambial du cerne, c'est-à-dire l'âge de l'arbre au moment de l'élaboration du cerne. Le nombre total de cerne pris en compte est 6 871. Pour le mois d'août, Tmax correspond à la moyenne des températures maximales. P = précipitations en mm.

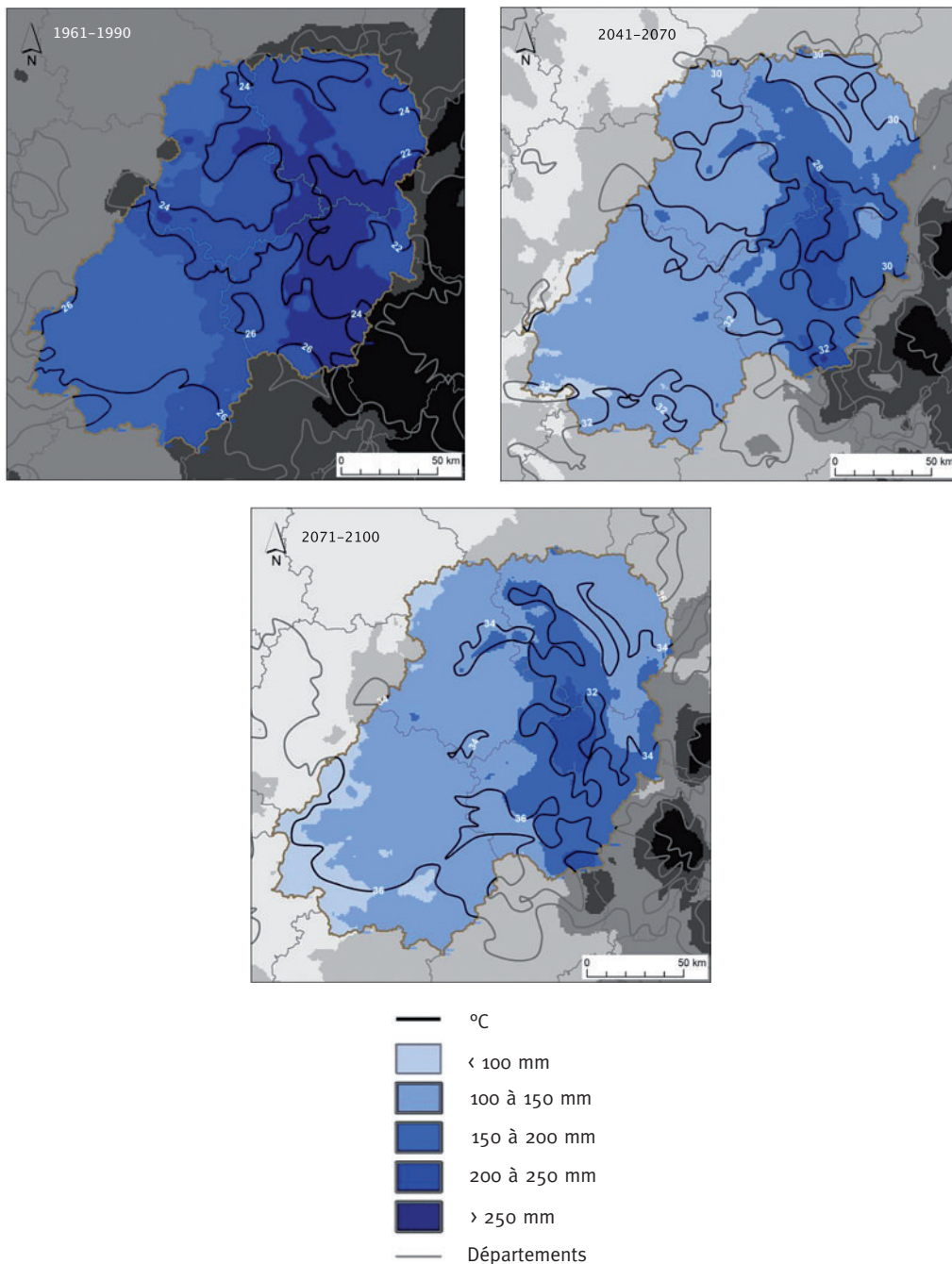


moyenne) dans une grande partie de la zone d'étude. Ces conditions étant selon nos observations éloignées de l'optimal pour cette espèce, on peut penser que l'accroissement devrait fortement se réduire dans les prochaines décennies. Des accroissements moins larges pourraient induire une augmentation du risque de roulure et se traduire par un rallongement des révolutions. Bien évidemment, des problèmes sanitaires pourraient également subvenir avec une mortalité accrue dans les conditions les plus sèches (Drénou *et al.*, 2012; Lemaire, 2011).

Même si de très grandes incertitudes demeurent tant sur les prévisions des climatologues que sur la réponse des essences forestières à ces modifications, il semble indispensable d'intégrer ces changements à venir et de favoriser les châtaigniers uniquement sur des stations où la sécheresse peut être compensée par d'autres facteurs: position topographique où les apports latéraux en eau sont supérieurs aux pertes; bonne profondeur du substrat permettant une prospection racinaire du sol importante (Righi, 2011). Plusieurs travaux récents montrent également que des peuplements moins denses ou mélangés favorisent la croissance des espèces qui les constituent ou encore la résistance aux aléas climatiques (Del Rio et Sterba, 2009; Kohler *et al.*, 2010; Misson *et al.*, 2003; Pinto *et al.*, 2008; Pretzsch *et al.*, 2010; Vallet et Pérot, 2011). Ainsi, même si les modalités précises restent à définir, la mise en place d'une sylviculture dynamique doit être considérée avec intérêt afin d'atténuer les effets des modifications environnementales sur les écosystèmes forestiers.

FIGURE 4 ÉVOLUTION DU CUMUL DES PLUIES AU DÉBUT DE SAISON (MAI À JUILLET EN MM) AU COURS DU XXI^e SIÈCLE

Les prévisions sont issues du modèle HadCM3-A2 (Tyndall Centre). L'isotherme correspond à l'évolution de la moyenne de la température maximale du mois d'août (°C).



François LEBOURGEOIS – Raphaël AUSSENAC
 AgroParisTech
 UMR1092, Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt Bois (LERFoB)
 14 rue Girardet
 F-54042 NANCY Cedex
 et
 INRA
 UMR1092, Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt Bois (LERFoB)
 Centre INRA de Nancy-Lorraine
 F-54280 CHAMPENOUX
 (francois.lebourggeois@agroparistech.fr)
 (raphael.aussenac@gmail.com)

Jean LEMAIRE
 CNPF Suf IDF Orléans
 13 avenue des Droits de l'Homme
 F-45921 ORLÉANS Cedex
 (jean.lemaire@cnppf.fr)

Thierry NÉQUIER – Jean-Marie RIGHI
 CRPF du Limousin
 SAFRAN
 2 avenue Georges Guingouin, CS 80912
 PANAZOL
 F-87017 LIMOGES Cedex 1
 (thierry.nequier@crpf.fr)
 (jean-marie.righi@crpf.fr)

Remerciements

Les auteurs remercient Vincent Perez du LERFOB pour l'aide apportée pour la réalisation des cartes ainsi que Sébastien Daviller pour la formation des agents du CRPF aux techniques de carottage.

BIBLIOGRAPHIE

- BARBAROUX (C.), BRÉDA (N.). — Contrasting distribution and seasonal dynamics of carbohydrate reserves in stem wood of adult ring-porous sessile oak and diffuse-porous beech trees. — *Tree Physiology*, vol. 22, 2002, pp. 1201-1210.
- BARBAROUX (C.), BRÉDA (N.), DUFRÉNE (E.). — Distribution of above-ground and below-ground carbohydrate reserves in adult trees of two contrasting broad-leaved species (*Quercus petraea* and *Fagus sylvatica*). — *New Phytologist*, vol. 157, n° 3, 2003, pp. 605-615.
- BREIMAN (L.). — RandomForests. — *Machine Learning*, vol. 45, 2001, pp. 5-32.
- COUSSEAU (G.). — Chez le Châtaignier, quel est l'impact des éclaircies sur le risque de roulures? — Nancy: ENGREF, 2006. — 140 p. (Mémoire de troisième année d'élève ingénieur de l'ENGREF).
- DEL RIO (M.), STERBA (H.). — Comparing volume growth in pure and mixed stands of *Pinus sylvestris* and *Quercus pyrenaica*. — *Annals of Forest Science*, vol. 66, n° 5, 2009, p. 502 (11 p.).
- DRÉNOU (C.), BOUVIER (M.), LEMAIRE (J.). — Rôles des gourmands dans la résilience des chênes pédonculés dépérissants. — *Forêt Wallone*, vol. 116, n° 1, 2012, pp. 42-55.
- FONTI (P.), SELL (J.). — Radial split resistance of chestnut earlywood and its relation to ring width. — *Wood and Fiber Science*, vol. 35, n° 2, 2003, pp. 201-208.
- FONTI (P.), GARCIA-GONZALEZ (I.). — Suitability of chestnut earlywood vessel chronologies for ecological studies. — *New Phytologist*, vol. 163, n° 1, 2004, pp. 77-86.
- FONTI (P.), SOLOMONOFF (N.), GARCIA-GONZALEZ (I.). — Earlywood vessels of *Castanea sativa* record temperature before their formation. — *New Phytologist*, vol. 173, n° 3, 2007, pp. 562-570.
- GENET (H.), BRÉDA (N.), DUFRÉNE (E.). — Age-related variation in carbon allocation at tree and stand scales in beech (*Fagus sylvatica* L.) and sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) using a chronosequence approach. — *Tree Physiology*, vol. 30, n° 2, 2010, pp. 177-192.
- KOHLER (M.), SOHN (J.), NAGELE (G.), BAUHHUS (J.). — Can drought tolerance of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) be increased through thinning? — *European Journal of Forest Research*, vol. 129, n° 6, 2010, pp. 1109-1118.
- LEBOURGEOIS (F.), MÉRIAN (P.). — La Sensibilité au climat des arbres forestiers a-t-elle changé au cours du XX^e siècle ? — *Revue forestière française*, vol. LXIII, n° 1, 2011, pp. 17-32.

- LEBOURGEOIS (F.), MÉRIAN (P.), COURDIER (F.), LADIER (J.), DREYFUS (P.). — Instability of climate signal in tree-ring width under Mediterranean mountains: a multi-species analysis. — *Trees - Structure and Function*, vol. 26, n° 3, 2012, pp. 715-729.
- LEBOURGEOIS (F.), PIEDALLU (C.). — Appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière. Notions d'indices bioclimatiques. — *Revue forestière française*, vol. LVII, n° 3, 2005, pp. 331-356.
- LEBOURGEOIS (F.), RATHGEBER (C.), ULRICH (E.). — Effet de la variabilité climatique et des événements extrêmes sur la croissance d'*Abies alba*, *Picea abies* et *Pinus sylvestris* en climat tempéré français. — *Revue forestière française*, vol. LXII, n° 1, 2010, pp. 7-23.
- LEMAIRE (J.). — L'Autécologie du Chêne est mieux cernée. — *Forêt Entreprise*, n° 201, 2011, pp. 5-21.
- LEMAIRE (J.). — Le Chêne autrement : produire du chêne de qualité en moins de 100 ans en futaie régulière. — Paris: Institut pour le Développement forestier, 2010. — 176 p.
- LEMAIRE (J.). — Dossier «Sylviculture du Châtaignier». — *Forêt Entreprise*, n° 179, 2008, pp. 7-64.
- LEMPIRE (R.). — Le Châtaignier, un arbre, un bois résolument européen. — *Forêt Entreprise*, n° 198, 2011, pp. 10-12.
- MÉRIAN (P.). — Variations spatio-temporelles de la réponse au climat des essences forestières tempérées : quantification du phénomène par approche dendroécologique et influence de la stratégie d'échantillonnage. — Nancy: Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech), Thèse Spécialité Sciences forestières et du Bois, 2012. — 454 p. [En ligne]: URL: <http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00764526> (consulté le 09/04/2013).
- MÉRIAN (P.), BONTEMPS (J.-D.), BERGÈS (L.), LEBOURGEOIS (F.). — Spatial variation and temporal instability in climate-growth relationships of sessile oak (*Quercus petraea* [Matt.] Liebl.) under temperate conditions. — *Plant Ecology*, vol. 212, n° 11, 2011, pp. 1855-1871.
- MÉRIAN (P.), LEBOURGEOIS (F.). — Consequences of decreasing the number of cored trees per plot on chronology statistics and climate-growth relationships: a multispecies analysis in a temperate climate. — *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 41, n° 12, 2011, pp. 2413-2422.
- MÉRIAN (P.), PIERRAT (J.-C.), LEBOURGEOIS (F.). — Effect of sampling effort on the regional chronology statistics and climate-growth relationships estimation. — *Dendrochronologia*, 2012. [En ligne]: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dendro.2012.07.001>.
- MICHELOT (A.), SIMARD (S.), RATHGEBER (C.), DUFRÊNE (E.), DAMESIN (C.). — Comparing the intra-annual wood formation of three European species (*Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris*) as related to leaf phenology and non-structural carbohydrate dynamics. — *Tree Physiology*, vol. 32, n° 8, 2012, pp. 1033-1045.
- MISSON (L.), NICAULT (A.), GUIOT (J.). — Effects of different thinning intensities on drought response in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). — *Forest Ecology and Management*, vol. 183, n° 1-3, 2003, pp. 47-60.
- PIEDALLU (C.), GÉGOUT (J.-C.), PÉREZ (V.), LEBOURGEOIS (F.). — Soil water balance performs better than climatic water variables in tree species distribution modelling. — *Global Ecology and Biogeography*, 2012, DOI: 10.1111/geb.12012.
- PINTO (P.E.), GÉGOUT (J.-C.), HERVÉ (J.-C.), DHÔTE (J.-F.). — Respective importance of ecological conditions and stand composition on *Abies alba* Mill. dominant height growth. — *Forest Ecology and Management*, vol. 255, n° 3-4, 2008, pp. 619-629.
- PRETZSCH (H.), BLOCK (J.), DIELER (J.), DONG (P.H.), KOHNLE (U.), NAGEL (K.), SPELLMANN (S.), ZINGG (A.). — Comparison between the productivity of pure and mixed stands of Norway spruce and European beech along an ecological gradient. — *Annals of Forest Science*, vol. 67, n° 7, 2010, pp. 712-724.
- RIGHI (J.-M.). — Guide simplifié d'identification des stations et choix des essences en châtaigneraie limousine. — CRPF Limousin; Design'up, 2011. — 108 p.
- SAULNIER (M.), ÉDOUARD (J.-L.), CORONA (C.), GUIBAL (F.). — Climate/growth relationships in a *Pinus cembra* high-elevation network in the Southern French Alps. — *Annals of Forest Science*, vol. 68, n° 1, 2011, pp. 189-200.
- VALLET (P.), PÉROT (T.). — Silver fir stand productivity is enhanced when mixed with Norway spruce: evidence based on large-scale inventory data and a generic modelling approach. — *Journal of Vegetation Science*, vol. 22, 2011, pp. 932-942.
- WIESER (G.), GIGELE (T.), PAUSCH (H.). — The carbon budget of an adult *Pinus cembra* tree at the alpine timberline in the Central Austrian Alps. — *European Journal of Forest Research*, vol. 124, n° 1, 2005, pp. 1-8.

CROISSANCE DE LA CHÂTAIGNERAIE LIMOUSINE ET CLIMAT. RÉFLEXION SUR LA PLACE DU CHÂTAIGNIER DANS LES PROCHAINES DÉCENNIES [Résumé]

Cet article présente les relations entre le climat et les variations de largeur du bois initial, du bois final et du cerne complet (période 1945-2009) du Châtaignier (*Castanea sativa* Mill.) dans trois zones à climat contrasté (zone humide, mésophile et sèche) dans la châtaigneraie limousine (36 peuplements, 146 arbres échantillonnés en futaie régulière). La mise en place du bois initial dépend des conditions climatiques de l'automne précédent (novembre) puis des températures de fin d'hiver (février-mars, effet négatif des fortes températures). Par la suite, les sécheresses printanières (mai-juin) influencent la mise en place du bois final et ceci d'autant plus que la région est sèche. Les changements climatiques observés se sont traduits par une importance croissante du régime hydrique pour la croissance, ce qui interroge sur la place future de cette essence dans cette région.

GROWTH OF LIMOUSIN CHESTNUT GROVES IN CONNECTION WITH CLIMATE – THOUGHTS ON THE PLACE OF CHESTNUT IN THE COMING DECADES [Abstract]

This paper explores the growth/climate relationships in earlywood, latewood and total ring-width chronologies of Chestnut (*Castanea sativa* Mill.) in three areas with different climatic conditions (humid, mesic and dry climate) in the Limousin region (36 stands, 146 sampled trees in high forests). Earlywood growth mainly depends on the previous autumn's conditions (November) and late winter temperatures (February and March, negative effects of high temperatures). Subsequent spring precipitation (May-June) plays a major role for the production of earlywood; the effect of spring rainfall being greater under the driest climate. Temporal analyses revealed unstable sensitivity to spring conditions, which raises questions about the future of this species in the area of investigation.
