

## RELATIONS CROISSANCE DU CHÊNE PÉDONCULÉ ET CLIMAT SUR DEUX TYPES DE SOL À NAPPE TEMPORAIRE EN LORRAINE (RÉDOXISOL ACIDE ET PÉLOSOL DIFFÉRENCIÉ)

FRANÇOIS LEBOURGEOIS - FABIEN SPICHER - YVES LEFÈVRE

Les sols forestiers à nappe temporaire occupent en France une surface d'environ 2 millions d'hectares. De par la double contrainte que représente l'alternance d'une période "humide" de l'automne au printemps (excès d'eau dû au mauvais drainage, à la faible évapotranspiration...) et d'une période "sèche" en période estivale (absence de nappe, forte évapotranspiration, enracinement limité...), ces sols sont difficiles à mettre en valeur (Becker *et al.*, 1996 ; Becker *et al.*, 1997 ; Lefèvre *et al.*, 2006 ; Lévy, 1986 ; Lévy *et al.*, 1992 ; Lévy *et al.*, 1999). De plus, les prévisions dans le contexte de réchauffement climatique annoncent une modification de la répartition saisonnière des pluies, avec moins de pluie en été et davantage de pluie en hiver (Déqué, 2007). Cette nouvelle répartition de la pluviométrie risque donc d'aggraver encore les contraintes relatives à ces sols.

De façon à mieux comprendre l'autécologie des essences dans ces contextes stationnels et d'apporter des éléments d'information permettant de mieux guider le gestionnaire dans le choix des essences à favoriser, de nombreuses expérimentations ont été mises en place dans les années 1970, notamment en Lorraine (Lévy et Lefèvre, 2001). Trois de ces dispositifs sont toujours en place après la tempête de 1999 et encore suivis dans le cadre de travaux de recherche forestière. Il s'agit de plantations de Chênes (pédonculé essentiellement) sur rédoxisol acide et pélosol différencié dans lesquelles des travaux d'assainissement mécanique (billons, fossés) ou biologique (culture associée avec l'Aulne glutineux) ont été effectués lors de l'installation. Les mesures initiales ont porté principalement sur des suivis de reprise des plants puis sur des mesures d'accroissement en hauteur dans les différentes modalités de façon à quantifier précisément l'effet des améliorations des conditions locales (Lefèvre *et al.*, 2006 ; Lévy et Lefèvre, 2001 ; Lévy *et al.*, 1990).

Depuis le début des années 2000, ces dispositifs ont fait l'objet de nouvelles observations plus fines liées au suivi du régime de nappe, de croissance radiale intra-annuelle, de débourrement et d'enracinement. L'objectif de ces plantations étant d'aboutir à la constitution de futaies régulières, des interventions sylvicoles ont également été pratiquées dans les peuplements. Ainsi, pendant l'hiver 2005-2006, les deux dispositifs âgés d'une trentaine d'années (plantations de 1972 en forêts communales de Charmes et de Damas-aux-Bois) ont fait l'objet d'une éclaircie. Cette intervention a permis de récolter plusieurs centaines de rondelles et ainsi d'analyser rétrospectivement la dynamique d'accroissement radial du Chêne pédonculé. Cet article présente les résultats obtenus lors de cette étude en relation avec certaines observations faites dans les plantations depuis le début des années 2000.

Plus précisément, les objectifs de cet article sont :

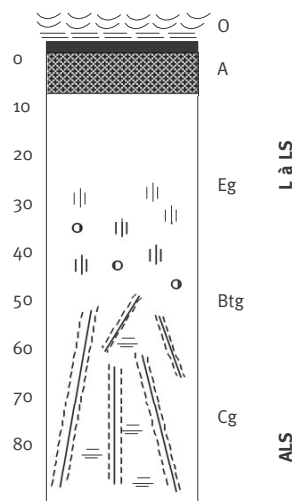
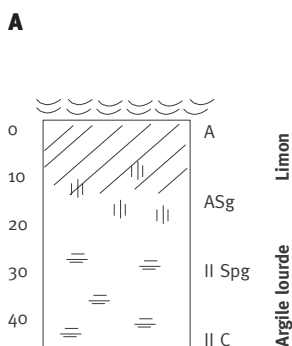
- de comparer la dynamique d'accroissement radial du Chêne pédonculé (*Quercus robur*) sur les deux types de sols à nappe temporaire ;
- de définir les principaux paramètres climatiques modulant la croissance ;
- de mettre en évidence d'éventuelles différences de réponse entre situations écologiques ou modalités d'assainissement.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Présentation des dispositifs expérimentaux

Les deux expérimentations étudiées sont situées en plaine dans le département des Vosges (88) sur la rive droite de la Moselle entre Épinal (30 km) et Nancy (40 km) et dans la région naturelle du Plateau lorrain. Elles ont été installées en 1972 (plants locaux issus de la pépinière domaniale de Darney) et correspondent à deux essais d'assainissement par billons (B), fossés à écartements 10 m (F10) ou 20 m (F20) associés ou non à une fertilisation. Les dispositifs ayant

été largement décrits par Lévy et Lefèvre (2001), nous ne présenterons ici que les principales caractéristiques. Le premier dispositif a été installé en forêt communale de Damas-aux-Bois. Dans la plantation, le sol est formé par une mince couche de limons (20-25 cm) reposant sur une marne du Keuper (pélosol différencié) (photo A, ci-contre). Cette couche d'argile lourde constitue le plancher qui est donc proche de la surface. Le terrain est en légère pente (1 à 2 %). Les contraintes de ce sol sont importantes et sont liées à la présence d'une nappe superficielle en hiver et au printemps (engorgement important et de longue durée) et au dessèchement estival (Lefèvre *et al.*, 2006). En termes de nutrition, le problème essentiel de ce sol est le très faible taux en phosphore assimilable  $P_2O_5$  dans le premier horizon minéral. Le second dispositif a été installé en forêt communale de Charmes en situation moins contraignante. Le sol s'est formé sur les alluvions anciennes (pléistocènes) de la Moselle (rédoxisol acide) (photo B, ci-contre).



Photos et profils schématiques des deux types de sols :

- A** : pélosol différencié à Damas-aux-Bois ;
- B** : rédoxisol acide à Charmes

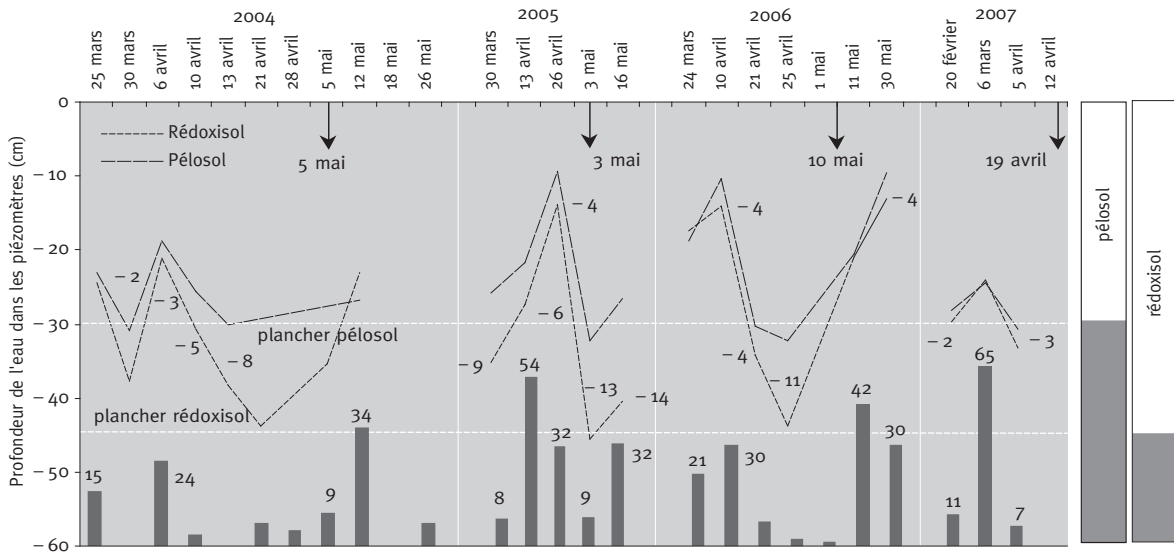
Photos F. LEBOURGEOIS

Le plancher se situe entre 45 et 50 cm. Le pH de ce sol est acide (< 5) et les teneurs minérales en potassium et phosphore sont réduites. Pour ce dispositif, deux témoins sont disponibles variant selon la densité des plants lors de la plantation (faible écartement TFE : 0,8 x 0,8 m et grand écartement TGE : 1,6 x 1,6 m).

Concernant le régime des nappes, les mesures effectuées entre 2004 et 2007 ont montré une dynamique d'eau dans le sol différente. Les écarts moyens s'échelonnent de 0 à - 15 cm dans le sens d'une nappe plus profonde sur rédoxisol (moyenne - 5 cm) (figure 1, ci-dessous). Les variations des niveaux de nappe sont étroitement liées au cumul des pluies de la semaine qui précède la mesure (figure 1). Après le débourrement des arbres, certains épisodes très pluvieux comme celui de mai 2006 peuvent se traduire par la réapparition d'une nappe ; nappe fugace qui disparaît en réalité très rapidement en 1 ou 2 jours. Ainsi, sur rédoxisol, l'engorgement du sol est plus modéré que sur pélosol car la nappe est en moyenne plus profonde.

**FIGURE 1** ÉVOLUTION DE LA PROFONDEUR DE L'EAU (en cm) DANS LES PIÉZOMÈTRES POUR LES DEUX TYPES DE SOL ENTRE 2004 ET 2007 (modalité témoin)

Chaque point est la moyenne calculée sur 9 piézomètres pour les deux sols. La zone grisée sur les dessins de droite indique la profondeur moyenne du plancher observé sur fosse pédologique. Les chiffres en gras indiquent la différence entre le niveau du rédoxisol et celui du pélosol. Les dates en gras indiquent les dates de débourrement des chênes pédonculés (bourgeons ouverts laissant apparaître les jeunes feuilles) [observations réalisées sur 57 chênes à Damas (pélosol) et 67 chênes à Charmes (rédoxisol)]. Les barres grisées et les chiffres représentent le cumul des pluies pendant les 8 jours précédant la mesure piézométrique (données journalières de la station Météo-France d'Épinal-Dognéville).

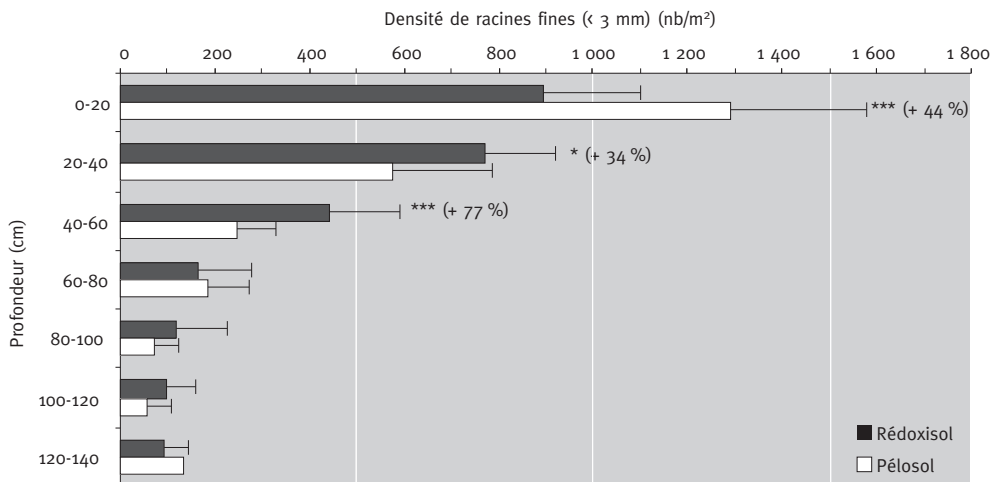


De par leurs caractéristiques intrinsèques (texture et profondeur d'apparition du plancher), ces deux types de sol présentent une différence importante d'intensité des contraintes pour le Chêne. Sur pélosol différencié, les deux contraintes hypoxie et sécheresse sont marquées. Sur rédoxisol acide, l'engorgement est moins accentué, par contre la sécheresse peut être marquée. Cela se traduit en termes de croissance aérienne et de développement racinaire des chênes.

Concernant l'enracinement, l'étude menée en 2004 selon la méthode du comptage des impacts racinaires sur profils verticaux sur tranchées a permis d'illustrer ces différences (Lebourgeois *et al.*, 2004). Même si la densité globale de racines fines est comparable sur les deux stations (environ 2 600 racines par m<sup>2</sup> sur une profondeur d'observation de 1,40 m), leur répartition diffère fortement entre le pélosol différencié et le rédoxisol acide (figure 2, ci-dessous). Sur pélosol, 50 % des racines fines se trouvent dans les 20 premiers centimètres (dans l'horizon limoneux au-dessus du plancher) et, après 20 cm, la densité de racines fines diminue de près de 50 %. Sur rédoxisol, la densité racinaire est forte dans les horizons de surface et diminue fortement seulement après 50 cm (niveau du plancher). Ainsi, entre 20 et 60 cm, il y a environ 50 % de racines fines en plus dans le rédoxisol par rapport au pélosol. Concernant la croissance, la hauteur et la circonférence ont été supérieures respectivement d'environ + 10 % et + 7 % sur rédoxisol (tableau I, p. 415). La moindre contrainte engorgement associée à une prospection racinaire différente permet donc un niveau de croissance plus soutenue du Chêne pédonculé. Concernant les effets des différents travaux d'assainissement, des écarts significatifs sont encore observables 30 ans après la plantation entre modalités (billon, fossés, témoins) mais pas entre traitement (différences non significatives entre fertilisés ou non). Ainsi, sur rédoxisol, le billon se distingue des autres modalités avec une différence de l'ordre de + 6 % et + 11 % sur la hauteur et la circonférence (tableau I, p. 415). Le billon se traduit par une augmentation du volume de sol prospectable et par une augmentation de l'enracinement (+ 25 % de racines fines dans la modalité billon par rapport aux autres modalités) (Lebourgeois *et al.*, 2004). Ceci a pour conséquences de diminuer la contrainte hypoxique mais également la sécheresse (enracinement plus dense sur un plus grand volume). Sur pélosol, c'est le fossé 10 m qui se distingue encore des autres modalités avec un accroissement en hauteur supérieur d'environ + 8 % (tableau I, p. 415). Pour la circonférence, les gains par rapport aux témoins sont d'environ 10 %. Cette modalité correspond à l'abaissement le plus important de la nappe (0 à - 12 cm ; 4 cm en moyenne ; figure 3, p. 415). Enfin, il est à noter que, sur pélosol, seule la modalité fossé à 10 m permet d'avoir des accroissements équivalents à ceux des témoins sur rédoxisol.

**FIGURE 2 NOMBRE MOYEN DE RACINES FINES (< 3 mm) PAR M<sup>2</sup> POUR CHAQUE TYPE DE SOL (rédoxisol acide à Charmes et pélosol différencié à Damas-aux-Bois)**

N = 6 chênes pédonculés par sol (modalité témoin). \*\*\* et \* : différence significative au seuil de 1 p. mille et 5 % (non significatif sinon). Les chiffres entre parenthèses correspondent aux écarts relatifs entre les deux sols.



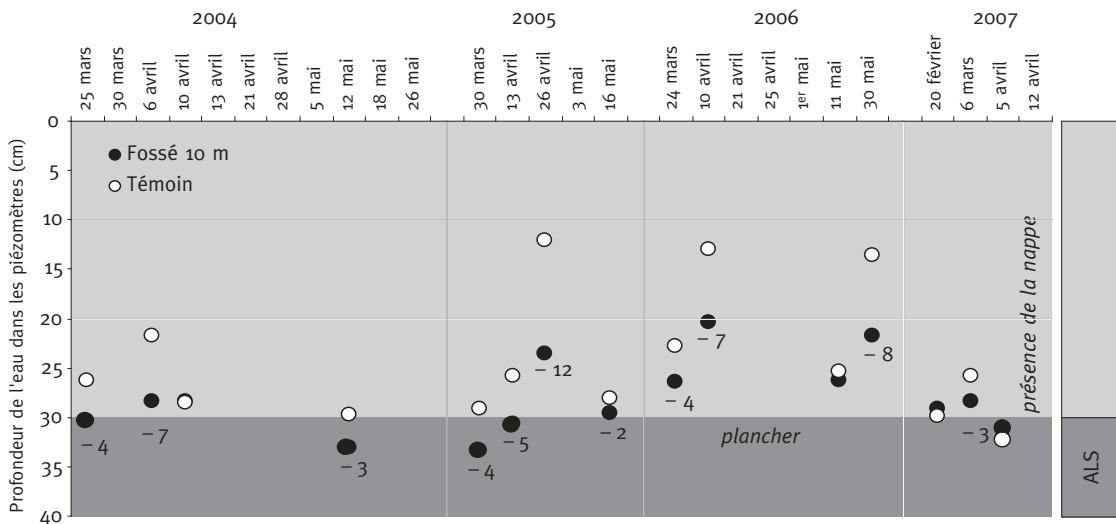
**TABLEAU I** **Caractéristiques dendrométriques des chênes pédonculés par site et par modalité en 2003**

Des lettres toutes différentes indiquent des différences significatives au seuil de 5 % (Anova suivie du test de Bonferroni). Les chiffres entre parenthèses correspondent aux écarts-types. Fertilisés et non fertilisés confondus (pas de différences significatives).

	n	Hauteur (m)	Circonférence (mm)
<b>Rédoxisol acide</b>			
Billon .....	146	14,8 (0,8) a	438 (62) a
Fossé 10 m .....	38	14 (1) b	419 (67) ab
Fossé 20 m .....	70	14,1 (0,7) b	417 (64) ab
Témoin faible écartement .....	53	14 (0,8) b	391 (72) b
Témoin grand écartement .....	100	14 (0,8) b	433 (63) a
	<b>407</b>	<b>14,3 (0,9)</b>	<b>425 (66)</b>
<b>Pélosol différencié</b>			
Billon .....	65	12,9 (0,8) bc	386 (61) a
Fossé 10 m .....	38	13,8 (0,7) a	376 (57) ab
Fossé 20 m .....	41	13,3 (0,9) b	394 (73) a
Témoin faible écartement .....	42	12,7 (0,8) c	351 (48) b
	<b>186</b>	<b>13,1 (0,9)</b>	<b>378 (62)</b>

**FIGURE 3** **ÉVOLUTION DE LA PROFONDEUR DE NAPPE (en cm) DANS LES PIÉZOMÈTRES POUR LA MODALITÉ TÉMOIN ET FOSSÉ 10 m AU PRINTEMPS DES ANNÉES 2004 À 2007 SUR PÉLOSOL DIFFÉRENCIÉ**

Chaque point est la moyenne calculée sur 8 (témoin) et 12 (fossés 10 m) piézomètres. Voir la figure 1 (p. 413) pour la caractérisation des épisodes pluvieux. La zone grisée indique le niveau du plancher. Les chiffres indiquent la différence de hauteur de la nappe entre les deux modalités.



## Analyse dendroclimatique

Un total de 414 rondelles a été prélevé (à 1,30 m) au moment de l'éclaircie (hiver 2005-2006) sur des arbres dominants ou codominants (tableau II, ci-dessous). Chaque rondelle a été mesurée au 1/100<sup>e</sup> de millimètres sur deux rayons (nord-sud, environ 12 000 cernes). Les séries individuelles ont ensuite été interdatées à l'aide d'années caractéristiques de façon à s'assurer du bon synchronisme des séries (Schweingruber et Nogler, 2003 ; Schweingruber *et al.*, 1990). Ces années reflètent généralement des conditions climatiques particulières et correspondent aux années pour lesquelles au moins 75 % des arbres du peuplement présentent une variation relative de croissance d'au moins 10 % par rapport à l'année précédente. L'année sera positive en cas de cerne plus large et négative sinon. L'analyse de ces années caractéristiques permet de mettre en évidence l'effet de conditions climatiques extrêmes sur l'accroissement des arbres. Après interdatation, les chronologies individuelles ont été calculées en faisant la moyenne des largeurs sur les deux rayons. La part de la variation des largeurs de cernes non liée au climat ("bruit") a été ensuite éliminée à l'aide de programmes spécifiques (ARSTAN) largement éprouvés en dendroclimatologie (Cook, 1987 ; Holmes, 1983). Dans une dernière étape, les séries d'indices obtenus ont été moyennées par date de façon à obtenir les chronologies moyennes de chaque modalité (billon, fossés 10 m, fossés 20 m, témoins) dans chaque station (période commune : 1975-2005). Divers paramètres statistiques ont également été calculés afin de juger de la qualité et de la force du signal climatique contenu dans les cernes. L'intercorrélation (IC) permet de juger du bon synchronisme des séries entre elles. L'autocorrélation (AC) permet de juger de l'importance de la croissance de l'année précédente (et donc du climat) sur celle de l'année en cours. Enfin, la sensibilité moyenne (MS) donne une estimation de la variation de croissance entre deux années successives et donc de la sensibilité aux facteurs environnementaux. Dans un premier temps, les traitements fertilisé et non fertilisé ont été séparés dans les analyses. Cepen-

**TABEAU II** **Caractéristiques des cernes des chênes pédonculés échantillonnés pour l'étude dendroclimatique (période 1975-2005)**

Lc = largeur moyenne de cernes (en mm) ; EcT : écart type ; IC = intercorrélation entre les séries ; AC = autocorrélation d'ordre 1 des largeurs de cernes ; MS = sensibilité moyenne (*Mean Sensitivity*). TFE et TGE : témoin à faible et grand écartement. Les traitements fertilisés et non fertilisés ont été confondus (voir texte). Des lettres toutes différentes indiquent des différences significatives au seuil de 5 % (Anova suivie du test de Bonferroni).

	Nb arbres	Nb cernes	Lc	EcT	IC	AC	MS
<b>Rédoxisol acide</b>							
Billon .....	63	1 903	2,13	0,84 a	0,753	0,593	0,263
Fossé 10 m .....	19	567	2,23	0,88 a	0,743	0,556	0,273
Fossé 20 m .....	46	1 346	2,03	0,76 b	0,731	0,556	0,256
TFE .....	33	962	2,17	0,79 a	0,666	0,6	0,245
TGE .....	32	920	2,21	0,86 a	0,659	0,672	0,252
	<b>193</b>	<b>5 698</b>	<b>2,15</b>		<b>0,71</b>	<b>0,595</b>	<b>0,258</b>
<b>Pélosol différencié</b>							
Billon .....	77	2 244	1,81	0,69 b	0,725	0,452	0,251
Fossé 10 m .....	30	873	1,99	0,78 a	0,794	0,536	0,244
Fossé 20 m .....	64	1 825	1,94	0,69 a	0,762	0,493	0,234
TFE .....	50	1 433	1,84	0,64 b	0,757	0,473	0,244
	<b>221</b>	<b>6 375</b>	<b>1,89</b>		<b>0,76</b>	<b>0,489</b>	<b>0,243</b>

dant, comme il n'est apparu aucun effet de la fertilisation sur la réponse au climat, les arbres ont été regroupés dans l'analyse finale présentée ici.

Les données climatiques utilisées proviennent de la station Météo-France d'Épinal-Rogneville (48°12'N ; 6°27'E ; 320 m) ; station la plus proche des dispositifs disposant à la fois de données pluviométriques et thermiques sur une longue durée. Le climat de la zone d'étude est de type semi-continentale. Sur la période 1975-2005, les précipitations annuelles ont été en moyenne de 1 007 mm. Le régime mensuel est assez élevé (70 à 100 mm mensuels) avec un pic relatif en mai et un creux au mois d'août. Environ 20 % des pluies tombent au début de l'hiver (environ 190 mm de novembre à décembre), 15 % au début du printemps (environ 150 mm de mars à avril) et 40 % pendant la saison de végétation (environ 410 mm de mai à septembre). Il y a près de 200 jours de pluie par an et il pleut en moyenne un jour sur deux pendant la saison de végétation. La température annuelle est proche de 10 °C avec un minimum de moins de 2 °C en janvier. Il gèle plus de 70 jours par an. Les gelées tardives de mai et précoces de septembre sont fréquentes. Des mesures effectuées en forêt entre 1966 et 1971 indiquent effectivement des gelées tardives fréquentes et fortes (-1 à -4 °C) ainsi que des extrêmes de température importants (-24,9 °C le 13 janvier 1968 ; +33 °C le 30 juin 1968) (Becker, 1972). En été, la température moyenne reste inférieure à 18,5 °C mais les températures maximales supérieures à 25 °C sont fréquentes en juillet et août (un jour sur deux).

L'effet du climat a été analysé sous deux angles. Dans un premier temps, seules les années caractéristiques ont été comparées aux différentes variables climatiques disponibles. Dans un second temps, les corrélations entre les paramètres climatiques et les indices de croissance ont été calculées sur la période 1975-2005 à l'aide du programme DENDROCLIM2002 (Biondi et Waikul, 2004). Les paramètres climatiques ont été organisés de façon à former des combinaisons de régresseurs mensuels : températures, précipitations (P), évapotranspiration (ETP), bilan hydrique "climatique" (P-ETP), etc. (Lebourgeois et Piedallu, 2005) associant à la fois les données de l'année  $n - 1$  (septembre à décembre) et de l'année  $n$  (janvier à août) afin de prendre en compte d'éventuels arrière-effets. Afin de ne pas biaiser les analyses statistiques en intégrant un nombre trop important de régresseurs et compte tenu de la relativement courte période analysable (31 ans), seuls les arrière-effets de l'année  $n - 1$  ont été testés. Les calculs permettent de préciser les variables et les périodes clés jouant un rôle significatif sur la croissance des arbres.

## RÉSULTATS

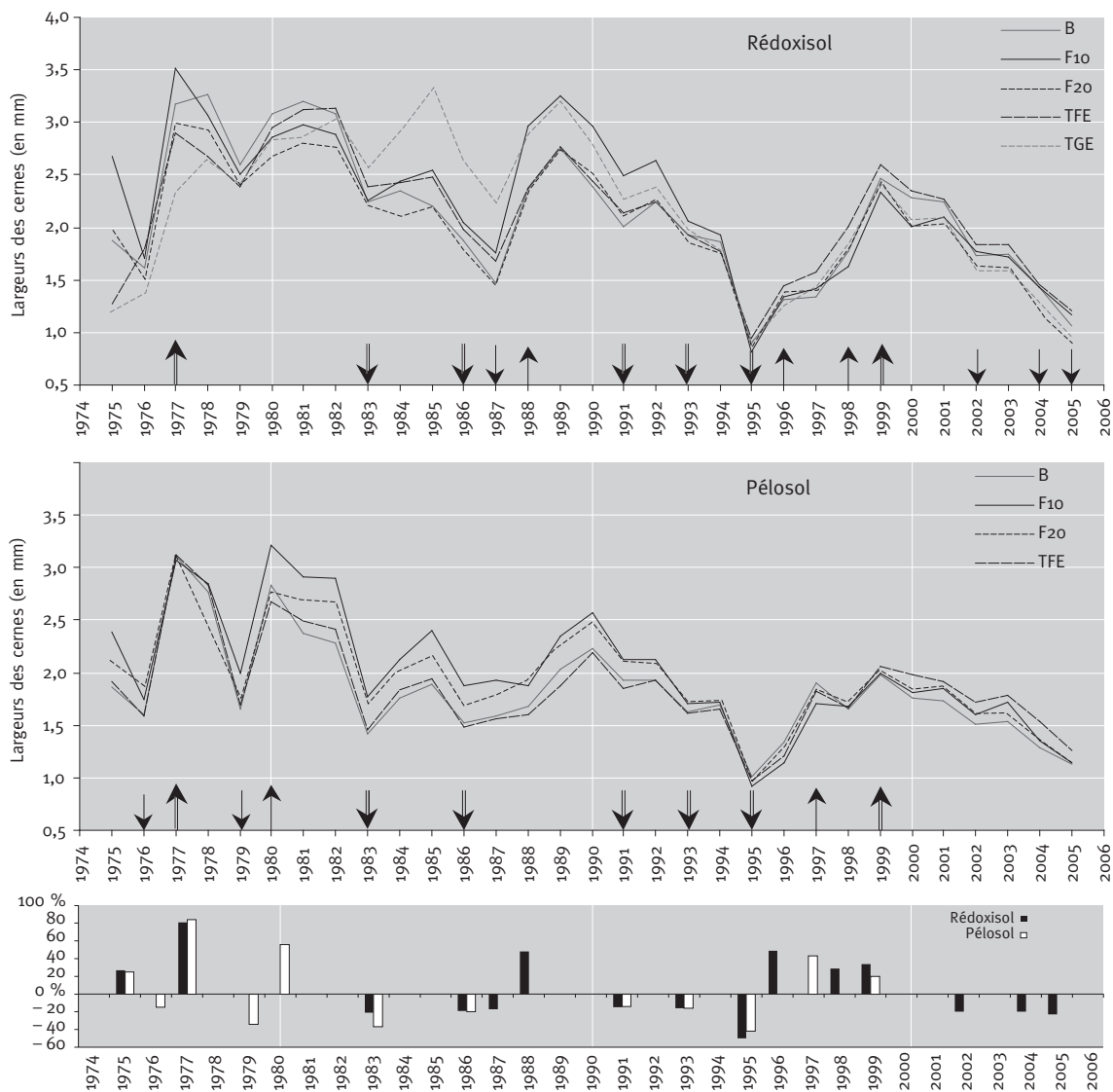
Comme déjà observé par l'analyse des données dendrométriques (voir tableau I, p. 415), les profils chronologiques confirment une différence nette de comportement du Chêne entre les deux stations avec un accroissement radial plus soutenu de l'ordre de 15 % sur rédoxisol (tableau II, ci-contre et figure 4, p. 418). Pour l'ensemble des courbes, il apparaît une décroissance régulière<sup>(1)</sup> des largeurs de cernes sur l'ensemble de la période (effet de l'âge ou de la densité) (Lebourgeois, 1999), mais également une très forte réduction synchrone en 1995 (figure 4, p. 418). Cette date correspond à l'année caractéristique négative qui a présenté la réduction de croissance la plus forte (-50 %). Il est très probable que ceci soit l'expression des effets des gelées tardives observées fin avril (-2 °C le 14 et 15 avril ; -1 °C le 21 avril) mais surtout mi-mai juste après la feuillaison (-1,3 °C le 15 mai). La forte croissance observée les années

(1) La diminution des largeurs des cernes avec la date cache un effet normal de décroissance avec l'âge. En effet, les arbres ayant le même âge ici, les effets âge et date sont confondus. Ainsi, les dates anciennes correspondent à des "jeunes" cernes et les dates récentes à des cernes "âgés". Indépendamment de tous les autres facteurs, les cernes jeunes sont normalement plus larges que les cernes "âgés". Cette décroissance apparaît nettement ici car les courbes correspondent à des accroissements bruts, c'est-à-dire sans élimination des effets environnementaux divers. L'intérêt de conserver ces courbes est qu'elles sont plus parlantes pour le praticien de terrain que des courbes standardisées exprimées sans unité. Nous avons cherché avec ces courbes à illustrer les années repères et mettre en évidence d'éventuelles différences entre les deux sols. Toute autre interprétation de ces courbes doit être considérée avec précautions. Notamment, il n'est pas possible de discuter d'un éventuel effet stimulant du CO<sub>2</sub> atmosphérique !

suivantes est en grande partie l'expression des éclaircies pratiquées dans les dispositifs pendant cette période. Concernant les interventions anciennes, l'effet du dépressage de l'hiver 1988-1989 sur pélosol a été également observable pendant 2 à 3 ans.

**FIGURE 4** ÉVOLUTION DES LARGEURS DE CERNES PAR DATE SELON LA MODALITÉ POUR CHAQUE SOL

Les flèches indiquent les années caractéristiques (voir texte). Une flèche dirigée vers le bas indique une année négative (positive sinon). Les doubles flèches correspondent aux années communes entre les deux sites. B = billon ; F10 et F20 = fossés 10 m et 20 m ; TFE et TGE = témoin faible écartement et grand écartement. La figure du bas présente les variations relatives de croissance (en %) pour les années caractéristiques pour les deux sols.





Parmi les autres variations notables communes aux deux sites, on peut signaler les années négatives 1983, 1986 et 1991 (réduction de croissance de - 20 % en moyenne) caractérisées par des températures extrêmement basses en février. En effet, ces trois années font partie des 4 années les plus froides sur la période 1975-2005 avec des moyennes des températures minimales respectivement de - 3,1 °C, - 10,2 °C et - 6,1 °C (normale sur la période : - 1,2 °C). D'une façon générale, les années caractéristiques sont apparues plus nombreuses sur rédoxisol que sur pélosol (14 contre 11), ceci traduisant une sensibilité accrue aux événements climatiques. Cette observation est étayée par les valeurs plus élevées de sensibilité moyenne sur rédoxisol (0,258 contre 0,243) (tableau II, p. 416). Le déterminisme des autres années caractéristiques est moins évident. L'année caniculaire 2003 (Bréda *et al.*, 2004) n'a pas eu de conséquences sur la croissance de l'année mais semble avoir particulièrement affecté le comportement des chênes sur rédoxisol les années suivantes. En effet, 2004 et 2005 correspondent à des années de croissance très réduites seulement sur cette station (- 21 % en moyenne). Ces deux années pourraient donc exprimer des arrière-effets plus marqués de stress dans ce contexte ; observation étayée par les valeurs d'autocorrélation de ces cernes nettement plus élevées sur rédoxisol que sur pélosol (0,595 contre 0,489) (tableau II, p. 416). Il est toutefois à noter que le début de 2004 a été également très sec (- 40 % de précipitation par rapport à la normale de février à juin) avec un retour à une situation normale par la suite. Concernant les arrière-effets, le même raisonnement peut être avancé pour la réduction en 1987 observée seulement sur rédoxisol (est-ce un arrière-effet de 1986 ?). Outre la réponse aux interventions sylvicoles, le déterminisme de certaines années à forte croissance est moins évident. Une partie de ces années pourrait s'expliquer par un rétablissement "normal" après un stress important sans correspondre forcément à des conditions climatiques particulièrement favorables (années 1996 à 1999 par exemple).

Concernant la réponse au climat moyen, les paramètres et les périodes clés pour la croissance sont apparus différents sur les deux sols (tableau III, ci-dessous). En revanche, sur un même site, la modalité d'assainissement n'a pas eu d'effet notable sur la réponse au climat. Les corrélations les plus fortes ont été obtenues en considérant les températures minimales ou maximales au lieu de la température moyenne ainsi que les pluies au lieu des bilans hydriques "climatiques" (P - ETP). Les différences sont cependant faibles avec des résultats cohérents quels que soient

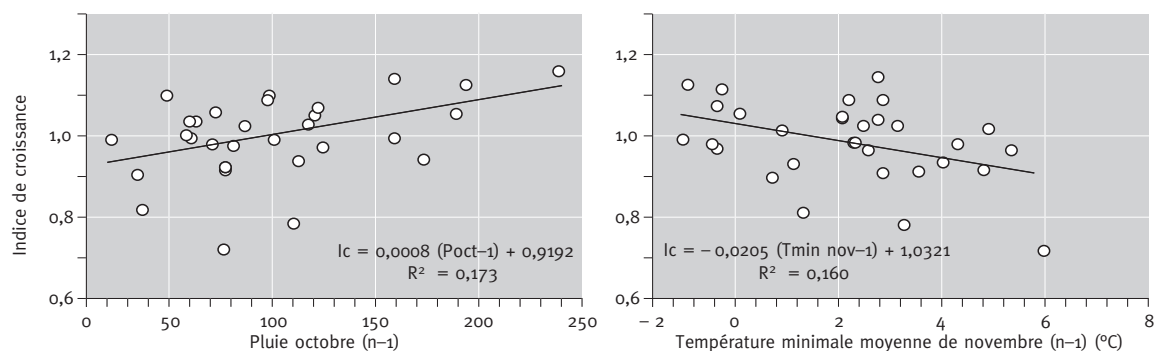
**TABLEAU III** **Coefficient de corrélation "bootstrapped"**  
**entre les paramètres climatiques et les indices de croissance**  
**des chênes pédonculés selon les modalités pour les deux sols**

Un signe - indique une corrélation négative. Seules les corrélations au moins significatives au seuil de 5 % sont présentées (programme DENDROCLIM2002). Pour le rédoxisol, ce sont les températures minimales qui sont significatives. Sur pélosol, ce sont les températures maximales. Période analysée 1975-2005. F10 et F20 = fossés 10 et 20 m ; TFE et TGE = témoin à faible et grand écartement.

		Rédoxisol acide					Pélosol différencié			
		Billon	F10	F20	TFE	TGE	Billon	F10	F20	TFE
Pluie (mm)	n-1 Oct	0,361	0,397	0,429	0,352	0,532		0,35		
	n Mai Juin				-0,38	-0,384	0,313	0,318		0,338
Temp. (°C)	n-1 Sept Nov	-0,388	-0,337	-0,392	-0,41		-0,31	-0,335	-0,323	
	n Mai Juin	0,316	0,316	0,323	0,294		-0,343			-0,314

les paramètres considérés. Ainsi, sur rédoxisol, la croissance de l'année  $n$  dépend en grande partie des conditions automnales de l'année précédente à travers le régime des pluies d'octobre et les températures (minimales) de novembre. Pendant la saison, c'est le régime printanier (mai) qui est l'élément clé, à travers les températures (minimales) et les pluies (pour les témoins seulement) (tableau III, p. 419 et figure 5, ci-dessous). Ainsi, **sur rédoxisol, un cerne large correspond à un automne pluvieux et frais puis à un début de printemps plutôt chaud et sec**. Sur pélosol, la mise en place du cerne apparaît essentiellement sous la dépendance des conditions de fin d'été de l'année précédente à travers les températures maximales de septembre puis, au cours de la saison, des conditions du début d'été à travers les conditions du mois de juin (tableau III, p. 419). Ainsi, **sur pélosol, un cerne large correspond à un début d'été plutôt humide et frais, suivi par une fin d'été fraîche**.

FIGURE 5  
EXEMPLES DE RELATION ENTRE L'INDICE DE CROISSANCE  
ET LES PLUIES D'OCTOBRE ( $N - 1$ )  
ET LES TEMPÉRATURES MINIMALES DE NOVEMBRE ( $N - 1$ )  
POUR LA MODALITÉ FOSSÉ 20 m SUR RÉDOXISOL



## DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Le comportement du Chêne pédonculé apparaît donc assez différent entre ces deux stations. La croissance est supérieure de 10 à 15 % sur rédoxisol en grande partie en relation avec un régime de nappe moins contraignant et un enracinement plus important (modification de la répartition spatiale). Sur les deux sols, les différents travaux d'assainissement n'ont pas modulé significativement la réponse des chênes au climat même si pendant certaines périodes la croissance est apparue différente selon les modalités.

Même si les fortes crises de croissance sont identiques dans les deux situations (et essentiellement en relation avec des froids extrêmes), les chênes poussant sur rédoxisol sont plus sensibles aux aléas climatiques avec des arrière-effets plus marqués. Dans cette situation, la mise en place du cerne annuel dépend des conditions automnales de l'année précédente puis de celles du début de printemps. Ainsi, un automne pluvieux (octobre) et frais (novembre) suivi par un printemps (mai) chaud et plutôt sec correspond à la mise en place d'un cerne large.

L'importance des froids hivernaux et des conditions automnales est cohérente avec des travaux précédents (Becker *et al.*, 1996 ; Becker *et al.*, 1997 ; Lebourgeois, 2006 ; Lévy *et al.*, 1992). Les connaissances récentes acquises sur le fonctionnement physiologique de cette essence apportent des éléments d'explication de ces observations (Barbaroux et Bréda, 2002 ; Cochard *et al.*,

1992 ; Cruiziat *et al.*, 2002 ; Morin *et al.*, 2007). Les larges vaisseaux de Chêne étant très sensibles à l'embolie hivernale et printanière (gel du xylème entre 0 et - 2 °C), seuls quelques cerne restent fonctionnels pour le transport de l'eau. L'effet des froids (surtout extrêmes) s'explique donc en partie par une perte de l'intégrité du système conducteur nécessaire à la croissance annuelle. La sensibilité au froid étant observée pour des températures peu négatives (fréquentes sur le Plateau lorrain), il apparaît que la production de (larges) vaisseaux avant l'apparition des feuilles est nécessaire chaque printemps pour une restauration du système conducteur. Celle-ci n'est possible que grâce à la forte remobilisation printanière des réserves carbonées stockées en automne. Ainsi, les automnes humides et frais participent à la mise en place d'un cerne large l'année suivante en favorisant le stockage de carbone et la translocation des différents nutriments des feuilles aux branches et aux bourgeons avant la sénescence.

L'importance des faibles températures automnales pourrait s'expliquer par l'équilibre des processus de photosynthèse et de respiration. En effet, si les températures plus clémentes en automne permettent une meilleure fixation de carbone par photosynthèse (en augmentant la durée de la saison de végétation), elles augmentent davantage la respiration foliaire (et celle du sol) entraînant ainsi une perte de carbone et donc une moindre disponibilité pour la croissance de l'année suivante (Piao *et al.*, 2008). Pour que le stockage de carbone soit optimal, il est donc nécessaire que l'automne soit non seulement pluvieux mais frais. Cet antagonisme pose, par ailleurs, une question essentielle encore largement débattue quant à la capacité de stockage à long terme du carbone des écosystèmes terrestres dans l'hypothèse de modifications importantes de ces conditions automnales (Déqué, 2007 ; Piao *et al.*, 2008). Une dernière explication quant à cette période clé pourrait être que ces bonnes conditions automnales et hivernales favorisent le développement ou le maintien du système racinaire, ce qui à terme permet une meilleure efficacité de l'utilisation des ressources (Riedacker, 1976).

Plus tard dans la saison, des températures élevées en mai favorisent une croissance forte certainement en relation avec le développement foliaire. En effet, les observations phénologiques ont montré que l'éclatement des bourgeons et la sortie des jeunes feuilles ont lieu début mai (voir figure 1, p. 413) avec un développement maximal du feuillage pendant la première quinzaine de mai. On sait que le débourrement et l'extension foliaire sont fortement sous la dépendance des conditions thermiques et que des températures clémentes favorisent leur développement (Lebourgeois *et al.*, 2006). Pour les témoins, on observe également un effet négatif des fortes pluies en mai. Ceci pourrait être l'expression de l'effet de la nappe plus présente dans cette modalité par rapport aux autres situations. Les mesures piézométriques effectuées entre 2004 et 2007 tendent à confirmer cette hypothèse avec une nappe en moyenne plus proche de la surface dans les témoins (différence de l'ordre de 5 cm) et une différence maximale au moment des pluies abondantes (différence de 10 à 15 cm) (données non montrées mais similaires à celles présentées dans la figure 3, p. 415).

La réponse au climat moyen apparaît différente sur pélosol. Sur cette station, les arrière-effets sont moins marqués et s'expriment essentiellement à travers le régime thermique de septembre ; des températures trop élevées se traduisant l'année suivante par une croissance réduite. Les mêmes hypothèses que celles faites sur rédoxisol quant au stockage de carbone peuvent être avancées pour expliquer ces effets. Par la suite, ce sont les conditions de juin qui conditionnent la croissance avec un cerne réduit en cas de sécheresse pendant cette période (pluies réduites ou températures élevées). L'enracinement étant concentré dans les premiers décimètres de sol, on peut émettre l'hypothèse qu'un début d'été sec entraîne un dessèchement rapide des horizons de surface, ce qui nuit à la croissance annuelle.

Même si les explications fonctionnelles ne sont pas toujours évidentes, il apparaît clairement que le type de sol module non seulement le niveau d'accroissement général mais également les

périodes clés dans le déterminisme des variations interannuelles. Nous n'avons pas pu mettre en évidence d'effet net des travaux d'assainissement sur la réponse au climat moyen. On peut émettre l'hypothèse que la courte période d'analyse (30 ans est une courte période en dendroclimatologie) associée à la jeunesse des arbres masque les effets des modalités mais ces derniers s'exprimeront davantage au cours du vieillissement des arbres.

En émettant l'hypothèse de la stabilité des fonctions de réponse des Chênes au climat, les modifications prévues des régimes saisonniers pluvio-thermiques pourraient donc avoir des conséquences assez différentes sur les deux types de sol. Les études en cours devraient apporter des éléments complémentaires à une échelle plus fine notamment sur les relations entre la phénologie, la nappe et la croissance intra-annuelle. Une meilleure connaissance de la dynamique de l'eau dans le sol et de son effet sur le fonctionnement écophysologique des Chênes apparaît également très importante pour mieux expliquer les comportements actuels et mieux prévoir les conséquences (encore largement inconnues) des changements en cours.

**François LEBOURGEOIS - Fabien SPICHER**

LERFOB (Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois)  
UMR ENGREF-INRA 1092  
Équipe Écologie forestière  
AgroParisTech-ENGREF  
14, rue Girardet - CS 14216  
F-54042 NANCY CEDEX  
(francois.lebourgeois@engref.agroparistech.fr)

**Yves LEFÈVRE**

EEF (Écologie et Écophysologie forestières)  
UMR INRA UHP  
Équipe Phytoécologie  
INRA  
F-54280 CHAMPENOUX  
(lefevre@nancy.inra.fr)

## 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.
- BECKER (M.). — Étude des liaisons Station-production dans une forêt sur sols hydromorphes (Forêt communale de Charmes, Vosges). — *Revue forestière française*, vol. XXIV, n° 4, 1972, pp. 269-287.
- BECKER (M.), LÉVY (G.), LEFÈVRE (Y.). — Effet du drainage, de la fertilisation et du désherbage sur la croissance en diamètre de chênes adultes. — *Revue forestière française*, vol. XLIX, n° 2, 1997, pp. 103-114.
- BECKER (M.), LÉVY (G.), LEFÈVRE (Y.). — Radial growth of mature pedunculate and sessile oaks in response to drainage, fertilization and weedings on acid pseudogley soils. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 53, n° 2-3, 1996, pp. 585-594.
- BIONDI (F.), WAIKUL (K.). — Dendroclim2002: a c++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. — *Computers and Geosciences*, vol. 30, 2004, pp. 303-311.
- BRÉDA (N.), GRANIER (A.), AUSSENAC (G.). — La Sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysologique et influence sur les arbres forestiers. — *Revue forestière française*, vol. LVI, n° 2, 2004, pp. 109-131.

- COCHARD (H.), BRÉDA (N.), GRANIER (A.), AUSSENAC (G.). — Vulnerability to air embolism of three European oak species (*Quercus petraea* (Matt) Liebl., *Q. pubescens* Willd., *Q. robur* L.). — *Annales des Sciences forestières*, vol. 49, 1992, pp. 225-233.
- COOK (E.R.). — The decomposition of tree ring series for environmental studies. — *Tree-ring Bulletin*, vol. 47, 1987, pp. 37-59.
- CRUIZIAT (P.), COCHARD (H.), AMÉGLIO (T.). — Hydraulic architecture of trees: main concepts and results. — *Annals of Forest Science*, vol. 59, 2002, pp. 723-752.
- DÉQUÉ (M.). — 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*, vol. 57, n° 1-2, 2007, pp. 16-26.
- HOLMES (R.L.). — Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurements. — *Tree-ring Bulletin*, vol. 43, 1983, pp. 69-78.
- LEBOURGEOIS (F.). — Les Chênes sessile et pédonculé (*Quercus petraea* Liebl. et *Quercus robur* L.) dans le réseau RENECOFOR : rythme de croissance radiale, anatomie du bois, de l'aubier et de l'écorce. — *Revue forestière française*, vol. LI, n° 4, 1999, pp. 522-536.
- LEBOURGEOIS (F.). — Sensibilité au climat des Chênes sessile et pédonculé dans le réseau RENECOFOR. Comparaison avec les hêtraies. — *Revue forestière française*, vol. LVIII, n° 1, 2006, pp. 29-44.
- LEBOURGEOIS (F.), CECCHINI (S.), GODFROY (P.), LANIER (M.), PIERRAT (J.-C.), ULRICH (E.). — Phénologie des peuplements du RENECOFOR : variabilité entre espèces et dans l'espace, et déterminisme climatique. — *Rendez-Vous Techniques*, n° 13, 2006, pp. 23-26.
- 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.), GODFROY (P.), HUMBERT (L.), BRÉDA (N.), LEFÈVRE (Y.). — Étude de l'effet de différents types d'assainissement sur la croissance aérienne et souterraine de Chênes sessile et pédonculé adultes sur deux types de sol à nappe temporaire dans le Plateau lorrain. — Rapport scientifique final, UMR LERBOB, ENGREF, septembre 2004. — 74 pages + annexes.
- LEFÈVRE (Y.), LEBOURGEOIS (F.), BRÉDA (N.). — Comportement des essences sur sol à nappe temporaire. — *Revue forestière française*, vol. LVIII, n° 4, 2006, pp. 295-304.
- LÉVY (G.). — Plantations sur sols à hydromorphie temporaire. — *Revue forestière française*, vol. XXXVIII, n° 3, 1986, pp. 307-314.
- LÉVY (G.), BECKER (M.), DUHAMEL (D.). — A comparison of the ecology of pedunculate and sessile oaks: radial growth in the centre and northwest of France. — *Forest Ecology and Management*, vol. 55, 1992, pp. 51-63.
- LÉVY (G.), FROCHOT (H.), BECKER (M.). — Installation des peuplements de Chêne et facteurs du milieu. — *Revue forestière française*, vol. XLII, n° 2, 1990, pp. 240-245.
- LÉVY (G.), LEFÈVRE (Y.). — La Forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire. — Nancy : ENGREF, 2001. — 223 p.
- LÉVY (G.), LEFÈVRE (Y.), BECKER (M.), FROCHOT (H.), PICARD (J.-F.), WAGNER (P.-A.). — Les excès d'eau : influence sur la croissance des chênes. — *Revue forestière française*, vol. LI, n° 2, 1999, pp. 151-161.
- MORIN (X.), AMÉGLIO (T.), AHAS (R.), KURZ-BESSON (C.), LANTA (V.), LEBOURGEOIS (F.), MIGLIETTA (F.), CHUINE (I.). — Variation in cold hardiness and carbohydrate concentration from dormancy induction to bud burst among provenances of three European oak species. — *Tree Physiology*, vol. 27, n° 6, 2007, pp. 817-825.
- PIAO (S.L.), CIAIS (P.), FRIEDLINGSTEIN (P.), PEYLIN (P.), REICHSTEIN (M.), LUYSSAERT (S.), MARGOLIS (H.), FANG (J.Y.), BARR (A.), CHEN (A.P.), GRELLA (A.), HOLLINGER (D.Y.), LAURILA (T.), LINDROTH (A.), RICHARDSON (A.D.), VESALA (T.). — Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. — *Nature*, vol. 451, n° 7174, 2008, pp. 49-52.
- RIEDACKER (A.). — Rythmes de croissance et de régénération des racines des végétaux ligneux. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 33, n° 3, 1976, pp. 109-138.
- SCHWEINGRUBER (F.H.), ECKSTEIN (D.), SERRE-BACHET (F.), BRÄKER (O.U.). — Identification, presentation and interpretation of even years and pointer years in dendrochronology. — *Dendrochronologia*, vol. 8, n° 1, 1990, pp. 9-38.
- SCHWEINGRUBER (F.H.), NOGLER (P.). — Synopsis and climatological interpretation of Central european tree-ring sequences. — *Botanica Helvetica*, vol. 2, n° 113, 2003, pp. 125-143.

---

**RELATIONS CROISSANCE DU CHÊNE PÉDONCULÉ ET CLIMAT SUR DEUX TYPES DE SOL À NAPPE TEMPORAIRE EN LORRAINE (RÉDOXISOL ACIDE ET PÉLOSOL DIFFÉRENCIÉ) [Résumé]**

Le comportement du Chêne pédonculé sur deux types de sol à nappe temporaire (rédoxisol acide et pélosol différencié) ayant fait l'objet de différents travaux d'assainissement (billons, fossés écartés de 10 ou 20 m) a été analysé en Lorraine. L'étude a porté sur la comparaison des accroissements de chênes âgés d'une trentaine d'années et sur l'analyse de leur sensibilité aux conditions climatiques. La croissance a été supérieure de 10 à 15 % sur rédoxisol en relation avec un régime de nappe moins contraignant (en durée et en intensité) et un enracinement plus important (modification de la répartition spatiale). Même si les fortes crises de croissance ont été identiques dans les deux situations (et essentiellement en relation avec des froids extrêmes en février), les chênes poussant sur rédoxisol ont été plus sensibles aux aléas climatiques avec des arrière-effets plus marqués (période analysée 1975-2005). Dans cette situation, la mise en place du cerne annuel dépend des conditions automnales de l'année précédente puis de celles du début de printemps. Ainsi, un automne pluvieux (octobre) et frais (température minimale de novembre) suivi par un printemps chaud (température minimale de mai) et plutôt sec correspond à la mise en place d'un cerne large. Sur pélosol, les arrière-effets du climat ont été moins marqués. Sur cette station, un cerne large correspond à un début d'été plutôt humide et frais (juin) suivi par une fin d'été fraîche (température maximale de septembre de l'année n-1). Les différentes modalités d'assainissement n'ont pas modifié la sensibilité au climat. Les différences de réponse ont été analysées en regard du fonctionnement de chaque sol et les résultats discutés du point de vue de la physiologie de cette essence.

**RELATIONS BETWEEN PEDUNCULATE OAK GROWTH AND CLIMATE ON TWO TYPES OF TEMPORARILY WATERLOGGED SOILS (ACIDIC REDOXISOL AND PELOSOL) IN THE LORRAINE REGION [Abstract]**

The behaviour of 30-year-old pedunculate oak trees growing in Lorraine on two different waterlogged soils (acidic redoxisol and pelosol) was studied. To reduce the constraints arising from excess water during autumn and winter, different drainage techniques were tested (ridge drainage, trenches 10 or 20 m apart). The study focussed on the effects of soil and drainage on the radial growth and on sensitivity to annual weather conditions. On redoxisol, growth was greater by about 10-15 % related to a more moderate groundwater regime (in duration and in intensity) and to deeper root development (altered spatial distribution). Even if extreme frosts in winter caused significant growth reductions in both ecological circumstances, sensitivity to climate appeared higher and after-effects more pronounced on redoxisol (period of study: 1975-2005). In this situation, a humid and fresh autumn (October and November) the previous year followed by a rather hot and dry spring (May) tends to give rise to a wide ring. In the case of the pelosol, sensitivity to weather conditions and climatic after-effects are less noticeable. A wide ring is produced when the end of the summer (September) of the previous year is cool, followed by a rather cool and wet onset of the current summer (June). Drainage was not found to have any influence in the response to annual weather conditions in either circumstance. Finally, the findings are discussed in the light of our partial knowledge of the functioning of these soils and of the ecophysiological characteristics of the species.

---