

Comportement des chênes pédonculé et sessile sur deux sols à engorgement temporaire en Lorraine

Dans les années 1970-1980, l'INRA (aujourd'hui INRAE) a installé des plantations expérimentales de chênes sur deux types de sol à nappe temporaire de la Plaine lorraine, en forêts communales de Charmes et Damas-aux-bois (88). Le but initial était de tester différents types d'« assainissement » destinés à améliorer la reprise et la croissance des chênes. Après 4 à 5 décennies, ce dispositif continue de livrer des informations précieuses.

Les sols à engorgement temporaire représentent près de deux millions d'hectares en contexte forestier. Ces sols se caractérisent par la présence, à des profondeurs variables, d'un plancher plus ou moins imperméable, entraînant la formation d'une nappe au-dessus de celui-ci quand les apports d'eau par les pluies sont supérieurs à la capacité de drainage naturel du sol et à l'évapotranspiration (on parle aussi de nappe perchée pluviale). Cette nappe est généralement présente en fin d'automne et en hiver puis disparaît au printemps. Selon la hauteur du plancher et le régime des pluies, elle peut remonter à la surface durant plusieurs mois. Quand les horizons de surface sont saturés en eau (c'est l'engorgement), ils sont fortement déficitaires en oxygène (on parle d'hypoxie puis d'anoxie). Dans ces conditions, des minéraux du sol tels que le fer et le manganèse sont réduits, puis ils sont ré-oxydés lorsque le sol n'est plus engorgé. La redistribution de fer et de manganèse lors de ces processus d'oxydo-réduction entraîne l'apparition de traces d'hydromorphie dans le sol : zones décolorées, taches de teinte rouille, concrétions.

Les conditions anoxiques hivernales ont des répercussions pendant la saison de végétation. En effet, pour la majorité des espèces, la nappe et l'horizon plancher limitent le développement racinaire (en surface et/ou en profondeur). Ceci diminue le réservoir utile en eau du sol ce qui se traduit par des périodes de sécheresse édaphique. Ces sols présentent donc deux contraintes successives dont les intensités sont liées d'abord à la pluviosité, ensuite à la topographie, et enfin à la morphologie du profil (succession des horizons, texture). Les sols à engorgement temporaire sont donc généralement difficiles à mettre en valeur (Lebourgeois *et al.*, 2008; Lévy et Lefèvre, 2001) et les modifications prévues des régimes saisonniers pluviométriques pourraient encore augmenter les contraintes que subissent déjà la majorité des espèces poussant sur ces types de sol (Lefèvre *et al.*, 2006; Madesclaire *et al.*, 2016).

Le caractère longévif des arbres oblige les forestiers à raisonner sur le temps long, renforçant l'importance de tirer des enseignements des expérimentations menées en conditions naturelles sur plusieurs décennies. C'est l'objet de cette synthèse qui présente les résultats, au bout de 40-50 ans, de plantations de chênes sur deux types contrastés de sols engorgés concernant le fonctionnement des nappes et le comportement des chênes sessile et pédonculé.

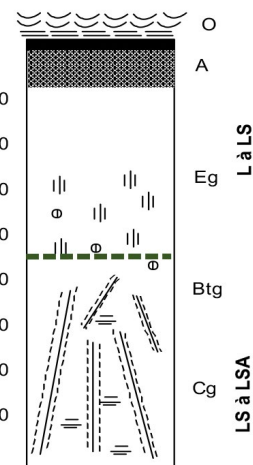
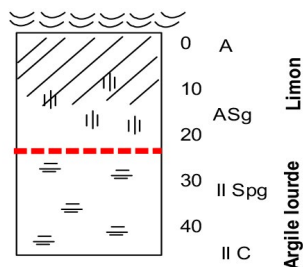
Présentation des dispositifs expérimentaux et des sols étudiés

Dans les années 1970-1980, trois plantations de chênes ont été réalisées par INRAE en Plaine lorraine (Département des Vosges) dans les forêts communales de Charmes et de Damas-aux-Bois, dans deux grands types contrastés de sols à engorgement temporaire de façon à préciser le comportement des arbres (Lévy et Lefèvre, 2001; Lebourgeois *et al.*, 2008). Le but de ces plantations était de tester différentes méthodes d'assainissement des sols pour diminuer la contrainte liée à l'engorgement et pour améliorer la reprise et la croissance des chênes : assainissement mécanique (notamment fossés à écartement de 10 m et de 20 m) ou biologique (culture associée avec l'aulne glutineux). Dans chaque cas, les modalités témoins correspondaient à une plantation pure de chênes sans modification des conditions de milieu (plants âgés de 2 ans et d'origine locale, à forte densité pour les nécessités de l'expérimentation; espacement d'environ 0,8 x 0,8 m).

Deux de ces plantations (nommées Charmes 2 et Damas) se situent sur un pélosol différencié (nommé « pélosol » dans la suite de l'article) (Fig. 1). Ce sol, riche en éléments minéraux, correspond à des limons éoliens déposés sur des argiles et marnes du Keuper. Le plancher est proche de la

Pelosol différencié
Damas-aux-Bois et Charmes 2

Luvisol dégradé redoxisol
Charmes 1



↑ **Figure 1.** Profils simplifiés des deux types de sols étudiés.
Le trait vert ou rouge en pointillé correspond au niveau du plancher.
L, LS, LSA = Limon, Limon-Sableux et Limon-Sableux-Argileux.

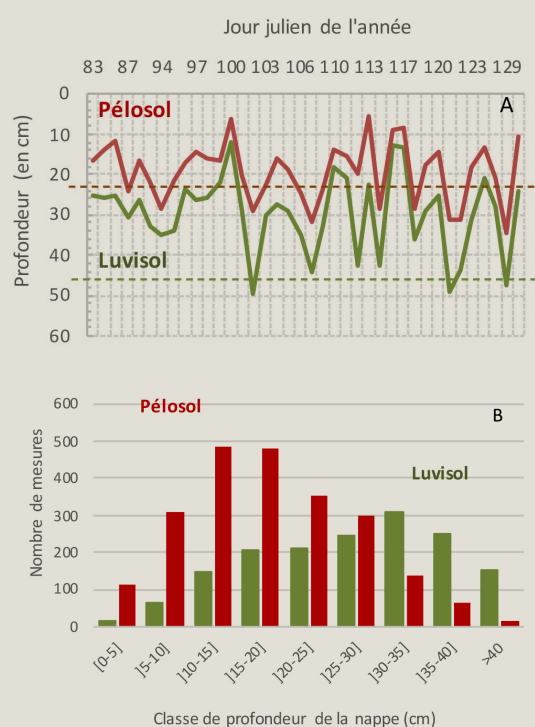
surface (environ 25 cm). Sur ce sol, les deux contraintes (hypoxie et sécheresse) sont fortes et s'enchaînent rapidement ce qui en fait l'un des plus contraignants pour les arbres forestiers.

La troisième, nommée Charmes 1, est installée sur un luvisol dégradé-rédoxisol (nommé « luvisol » dans la suite de l'article). Ce sol est acide (pH < 5) et pauvre en éléments minéraux, de texture limono-sableuse en surface avec un enrichissement en argile en profondeur (Fig. 1). Il est développé sur les alluvions anciennes de la Moselle. Le plancher est plus profond (environ 45 cm) avec des contraintes moins fortes que sur le pélosol différencié. Toutefois, l'acidité et la pauvreté chimique entraînent d'autres contraintes comme un déséquilibre nutritionnel pour les arbres (Lebourgeois et al., 2008; Lefèvre et al., 2006). Ces trois plantations sont géographiquement très proches les unes des autres (quelques centaines de mètres) et donc soumises aux mêmes conditions climatiques.

Évolution des niveaux de nappes hivernales et déterminisme climatique

Les 23084 mesures piézométriques réalisées depuis 2003 à partir de 199 piézomètres manuels (précision de la mesure : 0,5 cm) ont permis de préciser le niveau des nappes en période hivernale et jusqu'au début du printemps. Dans les modalités « témoin », la nappe est plus profonde de 10 cm en moyenne dans le luvisol que dans le pélosol (~ 27 cm versus 18 cm) (Fig. 2A). Dans le pélosol, des nappes à moins de 15 cm ont été observées dans 40 % des cas (20 % à moins de 10 cm) contre seulement 14 % dans le luvisol. À l'inverse, des nappes à plus de 30 cm ont été mesurées dans 44 % des cas dans le luvisol et moins de 10 % dans le pélosol (Fig. 2B).

Les deux niveaux de nappe présentent une forte synchronicité temporelle (Fig. 2A).



↑ **Figure 2.** [A] Niveau moyen de la nappe (en cm) de fin mars à mi-mai sur les deux sols étudiés (modalité témoin), et [B] nombre total de mesures par classe de niveaux de nappe.

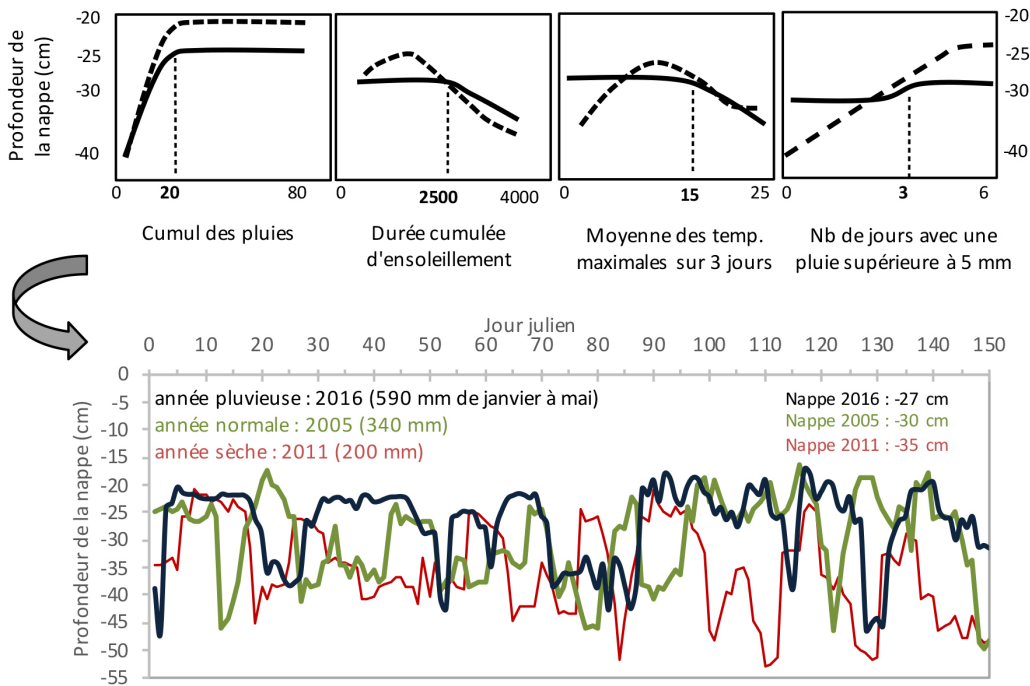
La figure A a été construite à partir des mesures effectuées de 2003 à 2018 entre les jours juliens 83 à 130, soit 1209 mesures sur luvisol (11 piézomètres ; 4 à 73 mesures disponibles par jour julien ; moyenne = 35) et 1506 sur pélosol (24 piézomètres ; 10 à 91 mesures disponibles par jour julien ; moyenne = 40). Sur pélosol, le plancher (ligne rouge pointillée) est à 25 cm environ pour un niveau moyen de la nappe de 18,5 (± 8,7) cm. Sur luvisol, le plancher (ligne verte pointillée) est à environ 45 cm et le niveau de la nappe 27,6 (± 10,5) cm.

Pour la figure B, toutes les données disponibles sur l'année entre 2013 et 2018 ont été considérées : n = 1609 mesures sur luvisol et 2262 sur pélosol.

LUVISOL DÉGRADÉ-REDOXISOL

% de variance expliquée par le modèle : 45 %
Précision d'ajustement du modèle = 3,7 cm

— Effet du facteur seul
- - - Effet du facteur combiné



← **Figure 3.** Modèle de nappe hivernale élaboré sur luvisol dégradé-redoxisol à partir de données climatiques journalières (source station Météo-France d'Épinal, 48°12'39" N, 6°27'06" E, altitude 317 m).

Le modèle de nappe a été élaboré à partir des 1609 mesures effectuées entre 2003 et 2018 sur la modalité « témoin ».

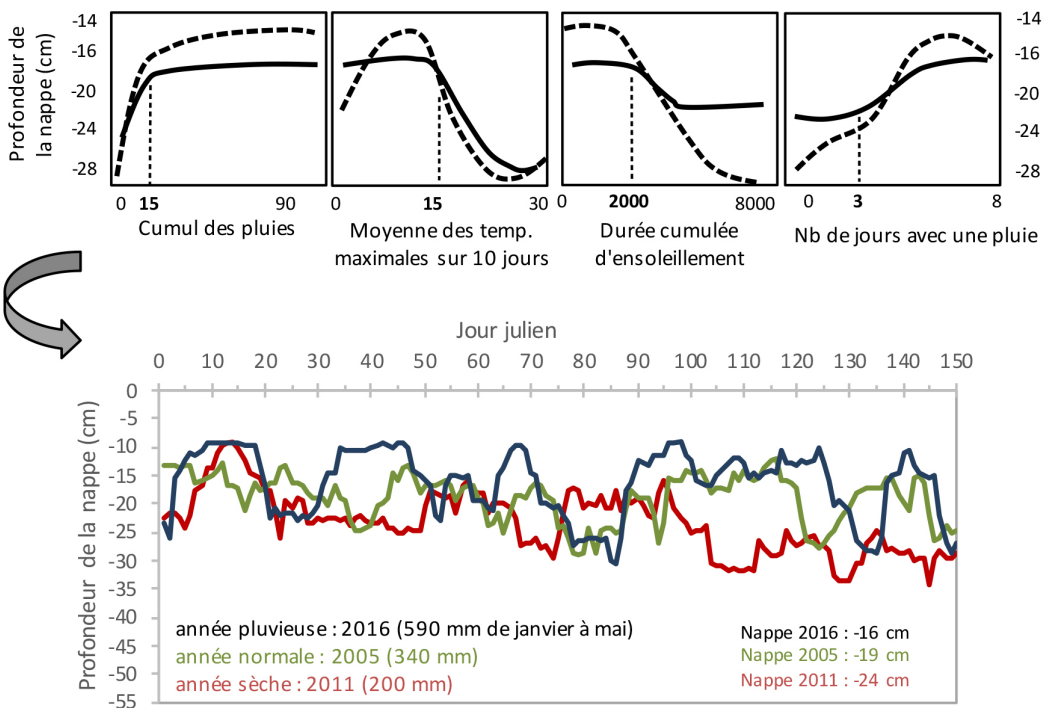
En haut, représentation graphique du modèle à travers les 4 variables principales identifiées.

En bas, prédiction du modèle pour trois années à régime de pluies contrasté (selon le cumul des pluies de janvier à mai).

PÉLOSOL DIFFÉRENCIÉ

% de variance expliquée par le modèle : 54 %
Précision d'ajustement du modèle = 2,9 cm

— Effet du facteur seul
- - - Effet du facteur combiné



← **Figure 4.** Modèle de nappe hivernale élaboré sur pélosol différencié à partir de données climatiques journalières (source station Météo-France d'Épinal, 48°12'39" N, 6°27'06" E, altitude 317 m).

Le modèle de nappe a été élaboré à partir des 2262 mesures effectuées entre 2003 et 2018 sur la modalité « témoin ».

En haut, représentation graphique du modèle à travers les 4 variables principales identifiées.

En bas, prédiction du modèle pour trois années à régime de pluies contrasté (selon le cumul des pluies de janvier à mai) sont présentées.

Les modèles de nappe élaborés à partir des approches de modélisation par « RandomForest » (Breiman, 2001) ont permis de mettre en évidence le déterminisme climatique des niveaux des nappes hivernales dans les deux types de sol. Pour le luvisol, le niveau de la nappe hivernale dépend très fortement du cumul des pluies sur les 6 jours précédents avec une nappe qui apparaît d'autant plus proche de la surface que le cumul des pluies augmente jusqu'à un seuil environ 20 mm de pluie cumulée (Fig. 3, page précédente). En complément de cette variable, il apparaît qu'une succession de journées ensoleillées (sur 5 jours) ou chaudes (sur 3 jours avec un seuil autour de 15°C) diminue le niveau de la nappe; c'est l'effet de l'évaporation du sol et/ou de la transpiration de la strate herbacée, les arbres n'étant pas feuillés à cette période. Le dernier facteur est plus marginal et correspond au nombre de jours de fortes pluies (ici 3 jours avec des pluies supérieures à 5 mm). Pour le pélosol, le modèle de nappe apparaît plus explicatif (~ 10 % de plus de variance expliquée). Il fait intervenir les mêmes variables climatiques mais avec des cumuls sur une plus longue période (7 à 10 jours contre 3 à 6 jours pour le luvisol) et des seuils différents (Fig. 4). Dans ce sol, le niveau de la nappe hivernale dépend fortement du cumul des pluies des 10 jours précédents avec une forte augmentation jusqu'à environ 15 mm de pluie cumulée. Pour les deux types de sols, les modèles de nappe illustrent bien les différences entre années sèches et humides avec des écarts entre le niveau des nappes qui peuvent être largement supérieurs à 20 cm sur certaine période (Fig. 3 et 4).

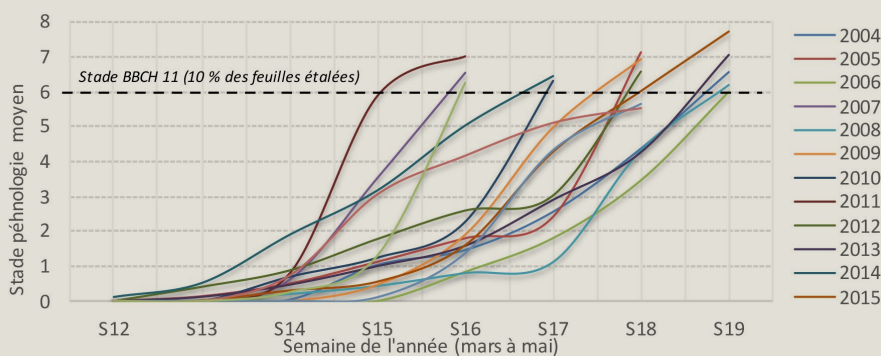
Comportement différentiel des chênes sur les deux sols

Les plantations de Charmes 1 et Damas-aux-bois ont été réalisées en 1972 (âge actuel 49 ans) et celle de Charmes 2 en 1984 (âge actuel 37 ans). Les objectifs initiaux correspondaient à des plantations pures de chêne pédonculé mais des « contaminations » en pépinière ont abouti à la présence de chêne sessile dans les lots. Ainsi, actuellement, les plantations sont des mélanges entre du chêne pédonculé (~ 90 %) et du chêne sessile (~ 10 %), l'un et l'autre d'origine

locale. Même si le nombre d'arbres analysés est très déséquilibré, la prise en compte de l'espèce apporte des informations précieuses pour illustrer les différences spécifiques. Depuis 2003, en complément des mesures des nappes, des suivis réguliers de la croissance radiale intra-annuelle et du débournement ont été entrepris sur un échantillon de 273 arbres, soit un total, respectivement, de 31 210 mesures et 16 122 observations jusqu'en 2018. Ces suivis ont été complétés par un total de 1940 mesures de la croissance en hauteur réalisées en 2003 et 2016 et par 194 analyses de tiges réalisées en 2016. Des analyses dendroclimatologiques ont été réalisées sur la période 1975-2005 à partir de 770 arbres et la mesure de 16 911 cernes. Ces analyses ont été complétées pour la période 1972-2014 à partir de 268 arbres et 8 612 cernes. Enfin, en 2003, des analyses des enracinements dans les différents types de sols ont été réalisées sur 12 chênes pédonculés.

Une phénologie foliaire identique sur les deux types de sols

Sur la période 2004-2018, aucune différence de phénologie foliaire n'a été observée entre les types de sols. En moyenne, les chênes débourrent (stade BBCH¹ modifié 11 : environ 10 % des feuilles étalées sur l'arbre) le 30 avril (jour julien 120) mais des différences très importantes peuvent être observées entre les années avec, pour la période étudiée, un débournement précoce le 13 avril (jour 103) en 2011 ou très tardif le 10 mai (jour 130) en 2006 ou 2013 (Fig. 5). Pour les deux espèces de chênes, la date correspondant au stade BBCH 11 est la même. En revanche, il apparaît un développement plus lent chez le chêne pédonculé c'est-à-dire qu'à une date donnée, les bourgeons des pédonculés sont moins développés que ceux des chênes sessiles. Cependant, fin avril, les chênes pédonculés rattrapent toujours « leur retard » ce qui se traduit par une concomitance du débournement des deux espèces et donc une date identique (données non montrées).



← **Figure 5.** Dynamique hebdomadaire de la phénologie foliaire des chênes (sessile et pédonculé) entre 2004 et 2018.

Le débournement est acquis quand les arbres ont atteint le stade BBCH 11 (notation individuelle des chênes) (ligne pointillée). Aucune différence entre les types de sols et les modalités d'assainissement. Pour les deux chênes, la date pour le stade BBCH 11 est la même.

1. Échelle internationale de notation des stades phénologiques des mono et dicotylédones cultivées

La phénologie foliaire dépend très étroitement des conditions thermiques de début du printemps (Fig. 6). La moyenne des températures maximales journalières de mars et avril explique plus de 80 % de la variabilité des dates de débournement des chênes. Une augmentation de 1°C se traduit par un débournement plus précoce d'environ 4 jours.

Une prospection racinaire très différente entre les deux sols

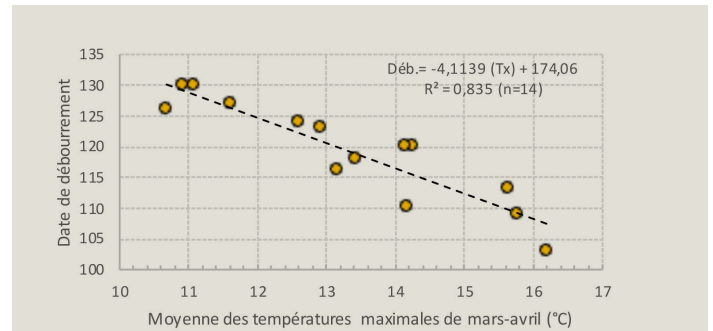
Les racines fines (< 3 mm) représentent 90 % des racines pour les deux sols mais les dynamiques des nappes hivernales se traduisent par des répartitions différentes entre les deux conditions édaphiques (Fig. 7). Dans le pélosol, avec un plancher à 25 cm et une nappe hivernale à -18 cm en moyenne, 46 % des racines sont localisés dans les 20 premiers cm. Entre 20 et 40 cm, on ne retrouve que 20 % des racines fines et seulement 8 % entre 40 et 60 cm. Dans le luvisol, l'enracinement est beaucoup mieux réparti avec un très bon enracinement jusqu'à 40 cm (60 % des racines fines) et encore 16 % de racines entre 40 et 60 cm. Si l'enracinement est significativement différent dans les 60 premiers cm entre les deux types de sols, on observe en revanche les mêmes taux dans les deux sols en profondeur (environ 1-3 %).

Une croissance plus soutenue sur luvisol que sur pélosol

En 2013, à 40 ans, les chênes pédonculés de la modalité témoin sur pélosol mesuraient 16,4 (± 1,8) m de haut pour un diamètre de 15,2 (± 3,1) cm (n=11 arbres). Sur luvisol, la hauteur était de 17,8 (± 1,6) m pour un diamètre de 17,7 (± 4,1) cm (n=27 arbres). Même si le nombre de chênes sessiles est plus faible, la même tendance significative a été observée entre les deux sols : sur pélosol, une hauteur et un diamètre moyens de respectivement 16,8 (± 1,3) m et 16,7 (± 2,0) cm (n=4 arbres) et sur luvisol de 18 (± 0,6) m et 19,5 (± 4,5) cm (n=5 arbres). La croissance est donc supérieure sur luvisol et particulièrement pour l'accroissement en diamètres des chênes sessiles.

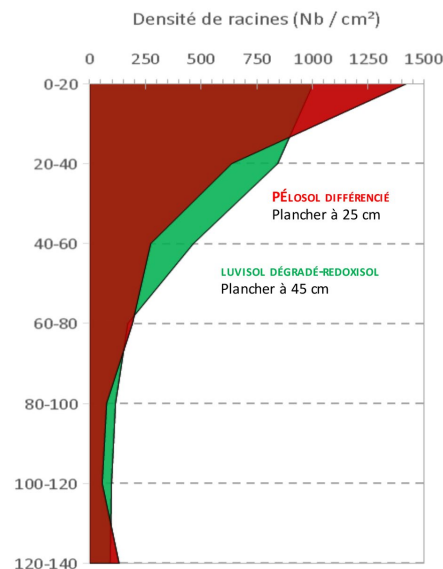
Les analyses de tiges réalisées sur chênes pédonculés en 2016 ont confirmé des dynamiques différentes entre les sols avec une croissance globale supérieure d'en moyenne 11 % sur luvisol par rapport au pélosol. La séparation des courbes est visible dès 8-10 ans et devient importante après 15 ans (15 % d'écart entre 20 et 35 ans) (Fig. 8).

L'analyse de la dynamique temporelle de la croissance radiale confirme une croissance plus importante des chênes sur luvisol que sur pélosol ($\Delta \sim 15\%$), et plus particulièrement pour les chênes sessiles par rapport aux chênes pédonculés ($\Delta \sim 30\%$) (Fig. 9).



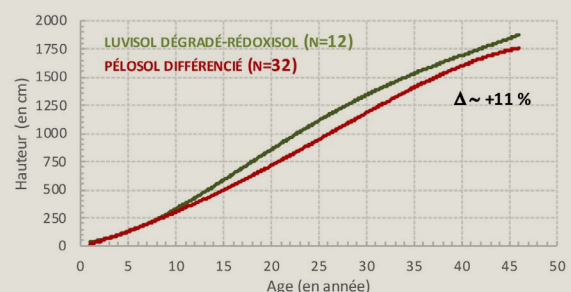
↑ **Figure 6.** Relation entre la date de débournement (en jour julien) des chênes (sessile et pédonculé) et la moyenne des températures maximales (Tx) de mars et avril, observées de 2004 à 2018, sauf 2017.

L'année 2017 a été enlevée en raison d'un gel tardif survenu début avril qui a ralenti le développement des bourgeons (30 % des arbres avec des signes de gel). Pour cette année, la moyenne des Tx a été assez élevée (14,7°C pour une moyenne sur les 15 ans de 13,4°C) mais le débournement a été observé au jour 130.



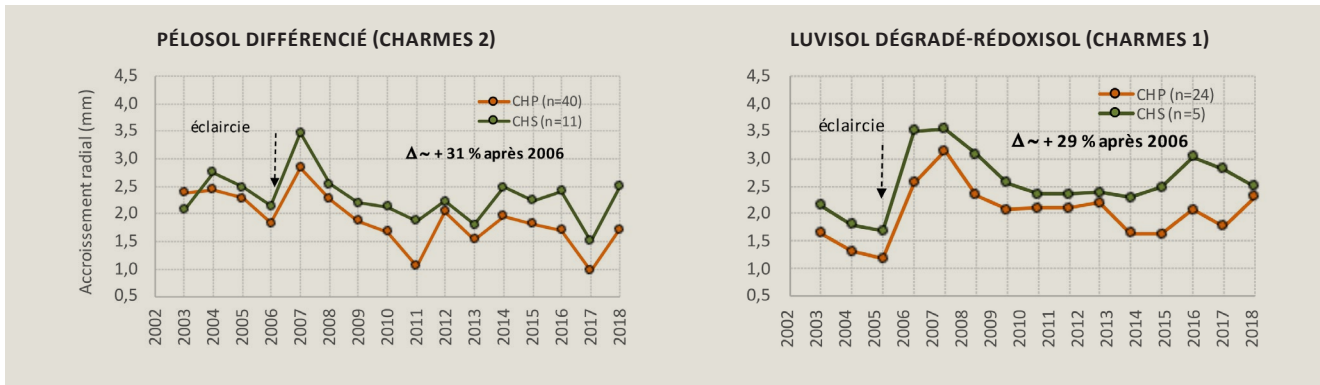
← **Figure 7.** Enracinement comparé des chênes pédonculés sur les deux types de sols (modalité témoin) à raison de 6 chênes analysés par sol.

Le graphique montre l'enracinement total (< 3 mm ; 3-5 mm ; 5-20 mm et > 20 mm) mais les racines fines représentent 90 % des racines. Entre les deux sols, les différences sont significatives au seuil de 1 p. mille jusqu'à 60 cm et non significatives au-delà.



↑ **Figure 8.** Évolution de la croissance en hauteur (en cm) selon l'âge des chênes pédonculés sur les deux types de sols (modalité témoin).

La croissance en hauteur a été reconstruite à partir de 12 analyses de tiges pour le luvisol et 32 pour le pélosol.



↑ **Figure 9.** Évolution de l'accroissement radial (en mm) pour les chênes sessile et pédonculé sur les deux types de sols (modalité témoin).

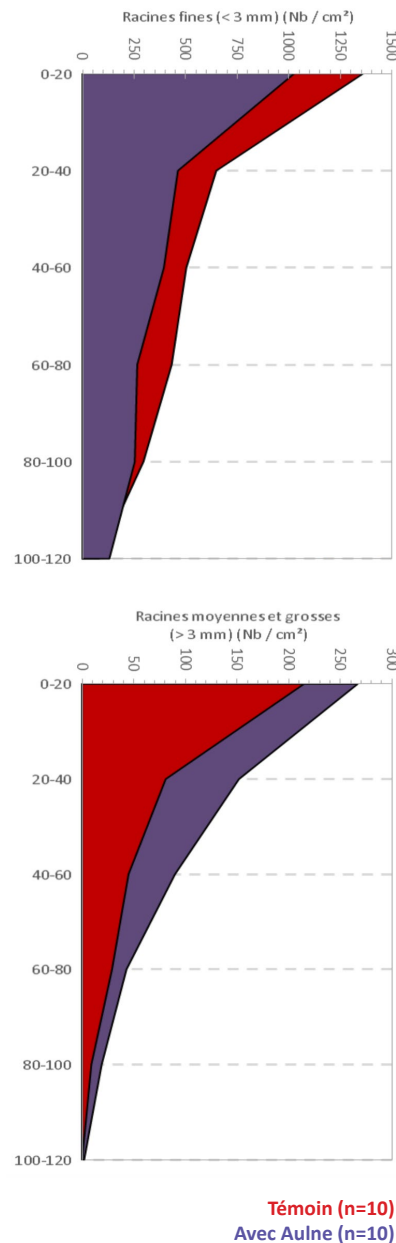
En 2006, une éclaircie a été réalisée dans les deux dispositifs (même intensité).

50 ans après les assainissements, effets sur la dynamique de l'eau et la croissance des arbres

Au moment de l'installation des plantations, des assainissements avaient été réalisés de façon à minimiser les effets des engorgements hivernaux. Les effets de l'assainissement ont été importants pendant les premières années de développement des arbres (Lefèvre et al., 2006; Lévy et Lefèvre, 2001) notamment sur l'amélioration de la reprise des plants (moindre mortalité), l'augmentation de la croissance initiale et la diminution des niveaux de nappe.

Une complémentarité fonctionnelle bénéfique entre l'aulne glutineux et les chênes

En 2018, les chênes pédonculé et sessile ayant été cultivés avec des aulnes (expérimentation seulement sur pélosol) avaient des diamètres supérieurs de 10 à 15 % par rapport aux témoins. La croissance a été plus soutenue en raison d'un effet significatif des aulnes sur les nappes, un abaissement du niveau de l'ordre de 5 cm (Lefèvre et al., 2006; Lévy et Lefèvre, 2001), et aussi en raison d'une modification de la prospection racinaire des chênes en présence d'aulne (Fig. 10). Il est apparu que les racines d'aulne prospectaient très bien les horizons très argileux («perforation du plancher») et que les racines de chênes «suivaient» ces racines d'aulne dans ces horizons. *In fine*, deux fois plus de racines de chênes moyennes à grosses (3-5, 5-20 et > 20 mm) ont été observées entre 40 et 60 cm dans le cas d'une culture associée avec l'aulne. Cet enracinement plus profond et mieux réparti donne accès à une plus forte réserve en eau du sol et augmente ainsi la capacité des arbres à résister à un stress hydrique important. Ceci a pu être vérifié lors de la sécheresse exceptionnelle de 2003 par un meilleur état hydrique des chênes en mélange qu'en peuplement pur. L'état hydrique est estimé à travers des mesures de potentiel hydrique de base qui donnent une estimation chiffrée de l'état de «liaison» de l'eau dans le végétal. Par convention, des valeurs (exprimées en MPa) de plus en plus négatives traduisent un état hydrique dégradé et donc des arbres subissant un stress hydrique fort. Ainsi, en 2003, le potentiel hydrique de base fin août 2003 a été de -0,9 MPa pour les chênes en mélange contre -1,5 MPa pour les chênes purs (Lefèvre et al., 2006).



← **Figure 10.** Enracinement comparé des chênes pédonculés sur pélosol (dispositif de Charmes 2; plancher vers 25 cm) en culture pure (témoin) ou associée avec l'aulne glutineux. L'enracinement est exprimé en nombre moyen de racines par cm². Culture associée avec aulne = plantation initiale une ligne de chêne et une ligne d'aulne, à écartement d'environ 80 cm. Le graphique distingue le cas des racines fines (< 3 mm) et des racines moyennes à grosses (3-5 mm; 5-20 mm et > 20 mm). Les différences sont significatives au seuil de 5 pour cent.

La forte sécheresse de 2003 n'a pas eu de répercussion sur l'état sanitaire des chênes mais a entraîné la disparition totale des aulnes en deux ans (80 % de mortalité dès 2004). Ainsi, depuis 2003, ces plantations mélangées sont devenues des plantations pures de chênes. Le suivi annuel de la croissance radiale a montré que jusqu'au début des années 2010, l'accroissement radial des chênes avec aulne est resté supérieur de 15 à 20 % par rapport aux témoins (2 mm / an versus 2,6 mm / an pour les chênes pédonculés; 2,3 versus 2,7 mm / an pour les sessiles). Mais depuis une dizaine d'années, il apparaît que l'accroissement radial est devenu équivalent avec cependant une croissance toujours supérieure des sessiles par rapport aux pédonculés (environ 10 %). La disparition de l'effet de « pompe » des aulnes (débourrement plus précoce de cette espèce de 10 à 15 jours par rapport aux chênes et donc diminution de la contrainte liée à l'engorgement au redémarrage de la croissance) pourrait expliquer ce phénomène.

▲ Des fossés toujours efficaces pour minimiser les engorgements hivernaux mais des effets sur la croissance très contrastés

Après plusieurs décennies, il apparaît que les fossés (espacement de 10 ou 20 mètres) sont encore très efficaces pour réduire l'engorgement hivernal dans les deux types de sols étudiés. L'effet est particulièrement important dans le cas de fortes précipitations. Par exemple, pour des mesures de nappe réalisées en fin hiver et au début du printemps après des conditions particulièrement humides, on constate des écarts de 8 à 10 cm entre les niveaux des nappes des témoins et de celles des modalités à fossés (Tab. 1). Il est intéressant de noter que sur luvisol, les fossés à 10 ou 20 m engendrent les mêmes conséquences sur la nappe, alors que sur pélosol, on observe que les fossés plus rapprochés ont un effet plus fort de réduction de la nappe.

Dans les deux cas, les fossés réduisent bien la contrainte liée à l'engorgement hivernal mais les répercussions sur la

croissance à long terme diffèrent très fortement selon l'écartement des fossés et l'espèce. Sur pélosol (c'est-à-dire dans les conditions d'engorgement les plus contraignantes), la forte réduction de la nappe avec les fossés à 10 m s'est traduite par des croissances moindres des chênes pédonculés (Tab. 1). À l'opposé, un plus faible rabattement de nappe a eu des conséquences positives sur leur croissance. Pour le chêne sessile, une tendance inverse se dessine avec une croissance plus forte pour le plus fort rabattement de nappe. Même si les résultats doivent être considérés avec précaution (accroissements mesurés depuis 2003 mais sur un nombre d'arbres parfois faible), ils sont cohérents avec ce que nous savons maintenant sur le comportement différentiel des deux espèces. Un fort rabattement de nappe diminue la contrainte hivernale d'engorgement mais diminue également la disponibilité en eau pendant la saison de végétation, ce qui se traduit par des sécheresses accrues. Si le chêne pédonculé tolère mieux l'engorgement que le chêne sessile, ceci est particulièrement important lors de la phase d'installation des arbres. Par la suite, une fois les arbres installés, c'est la sécheresse estivale qui va contrôler la dynamique de croissance des deux espèces, le chêne sessile étant reconnu comme plus tolérant que le pédonculé (dans des conditions non extrêmes de stress hydrique). Ainsi, en continuant à rabattre fortement les nappes, les fossés espacés de 10 mètres augmentent également la sécheresse en début d'été ce qui défavorise à long terme le chêne pédonculé. Cet effet des sécheresses printanières a par ailleurs été confirmé par les études dendroclimatologiques. Ainsi, il est apparu que les variations de croissance radiale des chênes pédonculés poussant avec les fossés espacés de 10 m étaient très dépendantes des conditions de pluviosité des mois de mai et juin (effet favorable des pluies pendant cette période sur la croissance annuelle) mais que cette relation n'apparaissait pas avec les fossés espacés de 20 m (Lebourgeois *et al.*, 2008). En conclusion, pour cette espèce, le meilleur compromis pour les situations testées semble être des fossés à écartement de 20 m.

PÉLOSOL DIFFÉRENCIÉ					
Modalités	Nappe	Chêne pédonculé		Chêne sessile	
		Dia. (cm) en 2018	Lc (mm / an)	Dia. (cm) en 2018	Lc (mm / an)
Témoins	14,2 (6,7) cm (n=139)	17,7 (2,7) (n=10)	2,0 (1,0)	19,0 (1,4) (n=4)	2,6 (0,8)
Fossés à 20 m	23,3 (7,2) cm (n=120)	20,4 (3,0) (n=9)	2,1 (0,8)	20,8 (2,3) (n=5)	2,6 (0,7)
Fossés à 10 m	26,7 (6,8) cm (n=54)	17,8 (2,5) (n=7)	1,6 (0,7)	25,2 (3,2) (n=3)	3,0 (0,8)
LUVISOL DÉGRADÉ RÉDOXISOL					
Témoins	21,2 (8,6) cm (n=104)	20,0 (4,6) (n=25)	2,1 (1,1)	22,1 (4,7) (n=5)	2,5 (0,8)
Fossés à 20 m	30,2 (5,8) cm (n=43)	-	-	-	-
Fossés à 10 m	29,2 (6,2) cm (n=33)	19,3 (4,4) (n=8)	1,9 (0,9)	-	-

↑ **Tableau 1.** Comparaison de la croissance des chênes sessile et pédonculé (moyenne et écart-type et nombre d'arbres suivis depuis 2003) selon le type de sol et les différentes modalités.

Lc = largeur des cernes en mm par an sur la période 2003-2018. Les niveaux de nappe présentés correspondent à ceux observés après des journées très pluvieuses en fin d'hiver et début de printemps (mi-mars à mi-avril) : cumul des pluies supérieur à 30 mm les 10 jours précédant la mesure (moy. 44 mm) ; n = nombre de mesures.

Cet effet d'une sécheresse accrue avec des drainages plus importants est à mettre en parallèle avec l'absence de modification des enracinements des chênes poussant avec les fossés (données non montrées). Le système racinaire n'étant pas plus profond avec les fossés (en comparaison avec les témoins), la réserve utile en eau du sol n'est pas modifiée rendant les chênes pédonculés particulièrement sensibles au stress hydrique et notamment aux sécheresses du début de saison. Pour le chêne sessile, plus tolérant à la sécheresse que le pédonculé en raison de mécanismes physiologiques de régulation des pertes en eau plus efficaces (sauf en cas de sécheresse extrême), plus le rabattement est fort et meilleure est la croissance à long terme, même si l'enracinement n'est pas modifié.

Pour le luvisol, l'absence de suivi dans certaines conditions rend difficile les conclusions. Cependant, pour le chêne pédonculé, un effet négatif des fossés à 10 m semble également se dessiner à long terme (Tab. 1).

Conclusions : le choix du chêne sessile s'impose sur les deux types de sols

Les dispositifs expérimentaux mis en place dans les années 1970-1980, dont les objectifs initiaux étaient de constituer des futaies régulières de chênes pédonculés en testant différentes modalités « d'assainissement » sur deux types très contrastés de sols à engorgement temporaire, continuent d'apporter des informations précieuses sur la dynamique saisonnière des nappes et le comportement des chênes. Ils illustrent également l'importance de suivre sur des très longues périodes les dispositifs en adéquation avec la durée de vie des peuplements et les modifications du comportement des arbres selon leur stade de développement. Les résultats initiaux de ces recherches ont été publiés en 2001 dans un ouvrage de référence traitant de la culture des forêts sur sol à nappe temporaire (Lévy et Lefèvre, 2001). Depuis le début des années 2000, les nouvelles recherches permettent d'asseoir les connaissances sur les deux espèces majeures feuillues françaises. Bien que le luvisol soit caractérisé par une moindre fertilité chimique que le pélosol, la croissance des chênes y reste supérieure du fait d'un régime de nappe moins contraignant et un enracinement plus important (modification de la répartition spatiale). Dans les deux types de sols, la supériorité du chêne sessile apparaît nettement, suggérant que, une fois la phase d'installation passée, c'est la contrainte liée à la sécheresse qui prévaut pour la croissance des arbres; ceci confirmant l'intérêt majeur du chêne sessile sur ces sols. La phénologie foliaire étant identique entre les deux espèces et les deux types de sols, ce sont d'autres déterminants physiologiques qui expliquent ces différences (Wagner et Dreyer, 1997).

RÉFÉRENCES

- Breiman L., 2001. RandomForests. *Machine Learning*, 45 pp. 5-32.
- Lebourgeois F., Spicher F., Lefèvre Y., 2008. Relations croissance du chêne pédonculé et climat sur deux types de sol à nappe temporaire en Lorraine (rédoxisol acide et pélosol différencié). *Revue Forestière Française*, 60 (4), pp. 411-424.
- Lefèvre Y., Lebourgeois F., Bréda N., 2006. Comportement des essences sur sol à nappe temporaire. *Revue Forestière Française*, 53 (4), pp. 295-304.
- Lévy G., Lefèvre Y., 2001. La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire. *Éditeur : ENGREF*, pp. 223 p.

Il est possible d'améliorer très significativement la reprise et la croissance des arbres par un assainissement mécanique (fossés par exemple) ou biologique (mélange avec l'aulne glutineux) (Lévy et Lefèvre, 2001) mais le suivi sur le long terme montre que les effets peuvent s'estomper dans le temps voire être négatifs. La culture associée avec l'aulne glutineux est un bon moyen d'optimiser la croissance des chênes (pour les sols engorgés mais à bonne fertilité chimique) sans perturbation du contexte pédologique. Cependant, il est important de bien gérer les aulnes pendant les premières années après la plantation de façon à ne pas compromettre l'avenir des chênes (très forte croissance initiale des aulnes) (Lévy et Lefèvre, 2001). Là encore, les analyses sur le long terme montrent la supériorité du chêne sessile par rapport au chêne pédonculé.

Les changements des régimes hydriques prédits par les modèles climatiques (davantage de pluies en automne / hiver et moins de pluie en été) devraient également avoir des répercussions importantes sur la double contrainte et donc modifier la dynamique des espèces. Ceci rend encore plus important le diagnostic stationnel pour choisir les espèces les plus adaptées à ces types de sols et à leurs contraintes (Madesclaire et al., 2016). Dans ce travail, des modèles de nappe ont été établis et il apparaît très important de continuer ces travaux de façon à appréhender au mieux les effets des modifications climatiques sur la dynamique hivernale de l'eau dans ces sols.

François Lebourgeois¹, Fabien Spicher²,
Sébastien Daviller³, Benjamin Pires¹, Philippe Croizier⁴,
Sophie Lorentz¹, Caroline Petitjean^(*)

1. UMR Silva (Université de Lorraine, AgroParisTech, INRAE), Nancy
2. Université de Picardie Jules Verne, UMR CNRS 7058 EDYSAN, Amiens
3. ONF, agence travaux Lorraine-Champagne-Ardenne
4. ONF, unité territoriale de Vaucouleurs

REMERCIEMENTS

Cet article propose une synthèse de nombreux travaux menés au sein de trois dispositifs expérimentaux qui ont mobilisé de nombreuses personnes. Les auteurs remercient les stagiaires de master Philippe Godfroy et Lionel Humbert qui ont participé à la récolte des données en 2003 et 2004 ainsi que le personnel d'INRAE pour sa collaboration technique (notamment pour l'ouverture des fosses pédologiques en 2003, Clerc Bernard, Géréma François, Kieffer Christian, Schipfer Roger). Nous remercions également des collaborateurs d'AgroParisTech pour leur aide technique ponctuelle pour la récolte des données (Lehmann Sylvie, Putigny Lucas, Mayet Jean-Baptiste, Perez Vincent, Duverger Mathilde et Thiebaut David). Enfin, nous remercions l'Office National des Forêts et la commune de Charmes pour avoir permis l'installation des expérimentations.

- Madesclaire A., Gaudin S., Jabiol B., Lebourgeois F., 2016. Les milieux forestiers de la Plaine lorraine. Guide pour l'identification des stations et du choix des essences *Édition CNPF*, pp. 1-132.
- Wagner P.A., Dreyer E., 1997. Interactive effects of waterlogging and irradiance on the photosynthetic performance of seedlings from three oak species displaying different sensitivities (*Quercus robur*, *Q. petraea* and *Q. rubra*). *Annales Des Sciences Forestières*, 54 (5), pp. 409-429.

