RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

Office National des Forêts

#73

RenDez-Vous techniques

DOSSIER

Sols forestiers à engorgement temporaire

Hiver 2022

SOMMAIRE

3 **ÉDITO**
La mue des RenDez-Vous techniques se poursuit

4 **ENQUÊTE**
Retour sur l'enquête de perception des RenDez-Vous techniques à l'ONF
Par Xavier Bartet

7 **DOSSIER**
THÉMATIQUE
Sols forestiers à engorgement temporaire

8 **Les sols forestiers à nappe temporaire : fonctionnement, particularités et enjeux actuels**
Par Caroline Petitjean, Marco Bastianelli, Joseph Levillain, Nathalie Bréda, Philippe Durand, Noé Dumas, François Lebourgeois et Catherine Collet

16 **Les cloisonnements sylvicoles sur sols à engorgement temporaire : à quel degré de perturbation des sols et des peuplements s'attendre ?**
Par Noémie Pousse, Olivier Marcet, Jorge Blas-Larrosa, Stefan Schneider

22 **Fonctionnement des arbres et des semis soumis à ennoyage : ajustements écophysiologiques, désordres métaboliques et adaptations**
Par Nathalie Bréda et Bastien Gérard

29 **Comportement des chênes pédonculé et sessile sur deux sols à engorgement temporaire en Lorraine**
Par François Lebourgeois, Fabien Spicher, Sébastien Daviller, Benjamin Pires, Philippe Croizier, Sophie Lorentz et Caroline Petitjean

37 **Croissance racinaire du chêne en sol soumis à un engorgement temporaire en eau**
Par Philippe Balandier, Thierry Améglio

43 **Engorgement en eau puis sécheresse affectent différemment la croissance de jeunes chênes pédonculés et sessiles**
Par Thierry Améglio, Estelle Noyer et Philippe Balandier

48 **Interpréter la dynamique des nappes temporaires dans un diagnostic stationnel sur sols hydromorphes : cas de la forêt de Chaux**
Par Éric Lucot, Marc Steinmann, François Charnet, Pierre-Marie Badot

Cliquer sur un titre pour aller directement à l'article souhaité

En fin d'article, cliquer sur ce bouton pour revenir au sommaire

L'édito de...

ALBERT MAILLET
Directeur Forêts
et Risques Naturels

La mue des RenDez-Vous techniques se poursuit

Depuis le numéro précédent, les RenDez-Vous techniques ont étrenné un nouvel habillage correspondant à la nouvelle charte visuelle de l'ONF. Un changement de présentation, qui n'affectait ni la structure de la revue ni, bien sûr, son contenu. Aujourd'hui la mue se poursuit, avec une pagination plus libre grâce au passage au numérique.

Cette évolution offre deux avantages immédiats : la possibilité d'éditions plus légères mais plus fréquentes, et une plus grande souplesse de présentation pour faciliter la lecture à l'écran. À en juger par les résultats de l'enquête réalisée à l'automne 2021 auprès des personnels de l'ONF, ces deux points correspondent en effet à une attente des lecteurs. C'est donc une première mise en mouvement… vers des améliorations progressives au fil des prochaines éditions. Xavier Bartet revient dans ce numéro sur les autres résultats de cette enquête.

Pour l'heure, nous inaugurons donc cette formule avec un sommaire allégé, sans renoncer bien entendu à l'exigence technique et scientifique des contenus, en relation avec les enjeux auxquels notre établissement est confronté.

D'une façon ou d'une autre, les enjeux de gestion durable et d'adaptation des forêts au changement climatique sont étroitement liés à la vitalité et au fonctionnement des sols forestiers. Or il reste beaucoup à apprendre et comprendre du fonctionnement des sols eux-mêmes en climat changeant, notamment pour les sols à engorgement temporaire ; ces sols qui représentent une part significative du socle des forêts françaises, ont des fragilités particulières contraignantes pour le développement racinaire et par conséquent pour la vie des arbres… situation qui pourrait s'aggraver avec l'évolution probable du régime des pluies.

La présente édition fournit donc un dossier qui fait le point des connaissances sur les mécanismes pédologiques et écophysiologiques et qui propose plusieurs exemples de recherche – et résultats – sur les interactions particulières entre ces types de sols et les arbres ou peuplements forestiers. Dossier qui inclut aussi une illustration pratique de la sensibilité au tassement, à l'initiative de l'unité territoriale ONF de Belfort. Tous ces travaux contribuent *in fine* à démêler la grande question du diagnostic stationnel en climat changeant.

Retour sur l'enquête de perception des RenDez-Vous techniques à l'ONF

En septembre 2021, tous les personnels de l'ONF ont été invités par courriel à répondre à un questionnaire rapide pour donner leur avis sur l'évolution de nos RenDez-Vous techniques. L'introduction de l'enquête disait ceci :

« *RenDez-Vous Techniques (RDVT) est la revue scientifique & technique de l'ONF, destinée en premier lieu aux personnels techniques de l'établissement. Cette revue, auparavant diffusée sous format papier, et disponible également au format pdf dans le Portail biblio et sur le site onf.fr, sera désormais accessible uniquement en format numérique. Ce nouveau format de diffusion nous incite à adapter la forme de RenDez-Vous Techniques pour le faire évoluer.*

Nous souhaitons recueillir votre avis, et vous proposons de répondre à un questionnaire tant sur la forme que sur les contenus. Les réponses nous permettront de le faire évoluer en cohérence avec vos besoins et de partager le plus efficacement possible les connaissances scientifiques et techniques sur les sujets qui vous concernent en tant que forestiers. »

Nous revenons ici sur les principaux résultats de l'enquête, en remerciant sincèrement pour leur contribution les 572 personnes qui se sont prêtées à l'exercice.

Quels types de lecteurs et quels types de lecture ?

Assez logiquement, plus de 90% des personnes qui ont répondu ont déjà lu RDVT et près des trois quarts viennent de la filière « gestion forestière » ; les autres appartiennent, par ordre décroissant, aux domaines « travaux », « autres filières techniques support », « études », « autres filières administratives support », « risques naturels, » « recherche développement innovation » et « géomatique ». La tranche d'âge ne semble pas avoir d'influence sur la propension à consulter RDVT, signe que les personnels cherchent à approfondir leur culture technique tout au long de leur carrière.

Les habitudes de lecture varient selon les individus, mais si un quart des lecteurs se plonge dans la revue à chaque parution, ils sont près des deux tiers à ne la consulter que lorsqu'un sujet les intéresse ; les autres ne la lisent que rarement.

À réception d'un numéro, 14% ne font que le survoler mais la plupart vont plus loin en le parcourant pour cibler les articles à approfondir plus tard (32%), ou en lisant attentivement les articles qui les intéressent quand il y en a (46%), ou encore en se réservant un créneau pour le lire en quasi-intégralité (5%). Mais « *encore faut-il le recevoir…* ». Ceux qui ont une « autre » façon de lire RDVT (3%) font surtout état d'une lecture assez aléatoire, selon que la revue leur parvient ou pas et aussi par manque de temps. Apparemment, le passage à la diffusion exclusivement numérique (effectif avant l'enquête) leur a échappé, ce qui donne à penser que l'information a été insuffisante.

Quant à ceux qui n'ont pas lu RDVT, c'est essentiellement parce qu'on ne leur a « jamais transmis en format papier », qu'ils « ne [savent] pas ce que c'est » ou que « la revue ne concerne pas [leur] domaine d'activité » ; le manque de temps est assez secondaire, devant les motifs comme ne pas en ressentir le besoin ou ne pas souhaiter lire sur écran, et la teneur des articles arrive encore après (longueur, complexité, absence de résumé). Ces réponses sont à rapprocher du fait que les filières « gestion forestière » et « travaux » sont beaucoup moins représentées (et la RDI pas du tout) parmi ces non-lecteurs que sur l'ensemble des participants à l'enquête.

Il est possible que RDVT passe en partie à côté de sa cible, mais le fait est que c'est une revue de R&D et progrès technique, centrée sur les enjeux de la gestion forestière durable, qui ne s'adresse pas à pas tous les métiers de l'ONF…

Privilégier la fréquence plutôt qu'un type de composition

Les avis sont assez partagés quant à la nécessité d'une évolution de la fréquence de parution ou de la consistance de chaque numéro. Néanmoins l'idée se précise avec les préférences exprimées sur les 4 propositions suivantes :

a. Un dossier thématique de fond 2 fois par an avec uniquement des articles sur le sujet
b. Un regroupement d'articles techniques sans lien forcément les uns avec les autres 4 fois par an
c. Une transmission régulière dès que 2 ou 3 articles sont finalisés
d. Un dossier thématique complété par quelques articles sur d'autres sujets 3 fois par an

56% des retours mettent en premier choix les propositions b et c qui correspondent aux formules avec des diffusions plus fréquentes. On peut penser que la composition est assez secondaire car, dans leurs habitudes actuelles, les

deux tiers des lecteurs n'ont pas de préférence particulière entre dossier thématique ou articles distincts sur des sujets divers, et pour le tiers restant les avis s'équilibrent entre les deux options.

Un format qui doit évoluer avec le mode de diffusion en ligne

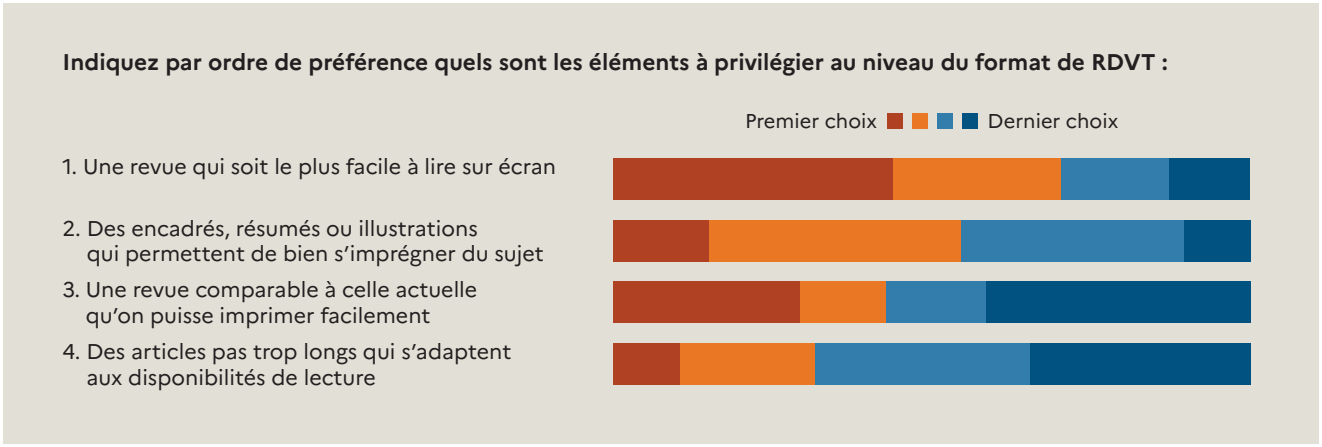
Le format de RDVT était plutôt bien apprécié des lecteurs jusqu'ici : maquette et mise en page, illustrations, nombre d'articles, contenu des articles ou taille des articles, aucun item ne ressort à moins de 87% de satisfaction. Cependant, RDVT n'étant désormais publié que sous format numérique, 62% des participants souhaitent que la maquette et la mise en page évoluent pour une lecture facilitée à l'écran (11% ne le souhaitent pas et 27% ne se prononcent pas). C'est d'ailleurs l'option qui arrive en tête des préférences parmi les 4 suggestions proposées ensuite (cf. Fig. 1) avec 70% de classement en premier ou deuxième choix.

Il est intéressant de constater aussi que tout ce qui peut aider à s'imprégner d'un sujet (encadrés, résumés, illustrations) semble plus important que le fait d'avoir des articles pas trop longs. Ce qui n'empêche pas, bien sûr, de varier les productions.

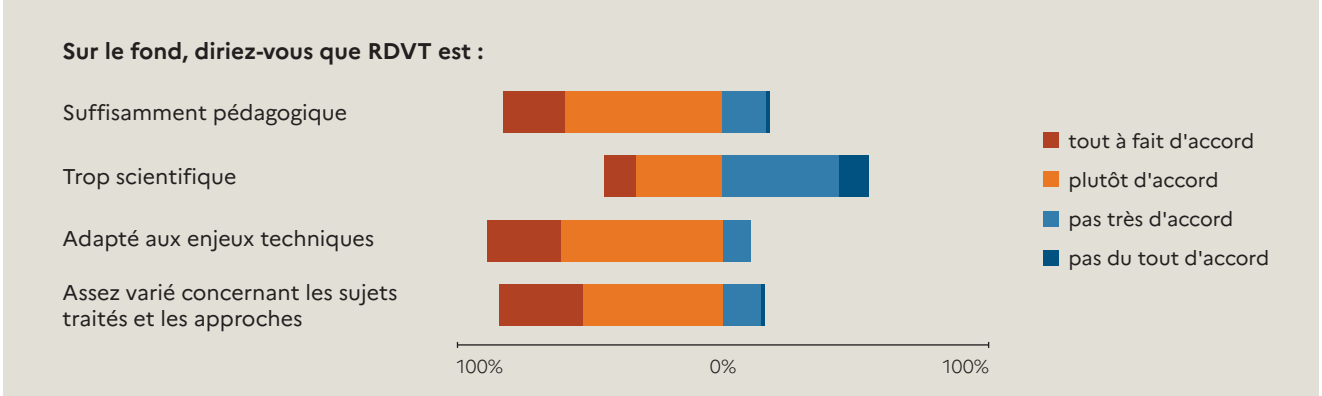
Un contenu fidèle à la ligne éditoriale et plus proche des personnels techniques

Sur le fond, la revue RDVT est perçue par ses lecteurs comme suffisamment pédagogique, adaptée aux enjeux techniques et avec un contenu assez diversifié en termes de sujets traités, et son positionnement n'est pas jugé trop scientifique (cf. Fig. 2). Pour autant, l'appréciation globale de RDVT comme revue technique ONF par rapport aux attentes professionnelles n'est pas absolument enthousiaste : notée de 0 à 10, la revue compte, selon le vocabulaire consacré, 16% de «supporters» (notes 9 et 10) et 56% de satisfaits «passifs» (notes 7 et 8) mais aussi 28% de «détracteurs» (notes 0 à 6). Cela signifie probablement que les lecteurs apprécient que la revue expose des résultats et travaux solides scientifiquement, mais jugent qu'elle n'illustre pas assez la manière dont ils pourraient être transférés en gestion.

Fort logiquement, les 3 thématiques qui suscitent le plus d'intérêt sont la sylviculture, la biodiversité et l'adaptation des forêts aux changements climatiques. De fait, elles représentent les enjeux primordiaux auxquels les gestionnaires sont confrontés et peuvent d'ailleurs englober les autres thèmes proposés dans le questionnaire, plus circonscrits et par conséquent moins plébiscités (génétique, mobilisation du bois et filière bois, travaux forestiers, forêt/société, équilibre sylvo-cynégétique, nouvelles technologies, crises sanitaires).



↑ **Figure 1.**



↑ **Figure 2.**

Quels seraient vos propositions ou souhaits particuliers d'évolution pour RDVT ?

C'est la seule question ouverte de l'enquête. Sur 572 participants, 205 soit plus du tiers y ont exprimé leur avis (dont 8 ne lisent pas RDVT). En voici une synthèse, forcément approximative.

Sur ces 205 avis 62 (30%) demandent expressément un retour de la diffusion papier, alors que l'enquête portait sur les adaptations à envisager compte tenu d'une diffusion exclusivement numérique. Impossible d'éluder cette réaction, même s'il n'est pas envisagé de revenir à une édition imprimée. Et ce n'est pas une affaire de « dinosaures » : il n'y a pas de différence dans la répartition des âges entre l'ensemble des réponses exprimées et celles qui demandent une diffusion papier ; pas de différence non plus avec les âges de l'ensemble des participants à l'enquête, lesquels sont d'ailleurs cohérents avec la démographie des personnels ONF.

Cette demande (parfois rageuse) est assortie de commentaires assez fournis :

- Besoin de temps et de concentration : RDVT est une revue qu'on lit ailleurs qu'au travail, à tête reposée et en situation confortable ; on veut l'avoir sous la main -et sous les yeux- pour y revenir dès qu'on a un moment, alors que l'annonce d'une parution numérique s'oublie très vite si on ne lit pas immédiatement.
- Besoin d'une diffusion papier très large (individuelle) faute de quoi RDVT ne circule pas.
- Refus du numérique (fatigue des écrans, besoin de concentration, contradiction avec les réflexions sur la santé au travail, fichiers lourds à charger…) et de l'impression locale (contresens énergétique et empreinte carbone). Ou bien une sorte de fatalisme : à force de sollicitations numériques, et même si on juge que les applications métiers sont utiles, on perd l'habitude de lire vraiment.

Les autres avis sont très divers voire contradictoires selon les points de vue (ce qui est assez normal). Quelques-uns sont hors sujet (14) au sens où ils manifestent un appétit pour divers autres types de revues plutôt qu'une proposition d'évolution pour RDVT.

Beaucoup précisent le sens des réponses à l'enquête, avec un besoin de facilitation face au manque de temps (accès, résumés, etc.) mais aussi un éventail d'exigences entre un caractère beaucoup plus vulgarisé et pratique et à l'opposé un ancrage scientifique affirmé. Et surtout ils invitent à aborder toute la gamme des actions techniques de l'ONF (Risques naturels, incendie, accueil du public, sylvicultures à objectifs divers, nouvelles techniques de travaux et d'exploitation, nouvelles visions génétiques, etc.) en élargissant les points de vue géographiquement (DOM-TOM, étranger…) et professionnellement (diverses parties prenantes).

Enfin il y a les suggestions (≈ 40 avis) plus spécifiquement liées à l'édition numérique, sous 4 aspects :

- Mieux annoncer les parutions : envoi du sommaire par mail + accès direct à la revue voire à chaque article ; abonnement RSS (dans Outlook)…
- Faciliter la consultation : espace web dédié RDVT avec accès aux articles des numéros anciens (méthodo de recherche *a posteriori*) ; site dédié enrichi périodiquement de nouveaux articles signalés chaque fois par brève Intraforêt(+ résumé) ; version pour lecture sur tablette ou smartphone…
- Faciliter la lecture : donner le temps de lecture estimé des articles ; faire des fiches résumées/techniques à imprimer ; sommaire interactif avec résumés renvoyant renvoyant aux articles complets pour qui le veut… (type Forêt-mail)
- Aller plus loin : liens vers d'autres articles ou contenus (interviews, débats, webinaires…) intégration de présentations powerpoint, graphiques animés, etc.

Enfin près d'un tiers des participants a répondu favorablement à la question « Seriez-vous prêt(e) à contribuer à l'alimentation de RDVT sous une forme à définir (article, témoignage, encadré…) ? ». Même si nous savons d'expérience qu'entre intention de départ et concrétisation, il y a souvent des difficultés ou contraintes imprévues qui obligent à réduire les ambitions, cette implication est en soi un encouragement.

À nous de jouer !

Les ajustements commencent modestement dès à présent avec un numéro allégé, un sommaire interactif, une mise en page un peu plus confortable à l'écran et qui reste compatible avec l'impression par article pour qui le souhaite.

En ce qui concerne la diversité des sujets et des approches, RDVT n'a pas la réactivité d'un magazine et l'évolution est nécessairement plus progressive, mais elle est engagée. Le numéro 69-70 consacré à la crise des scolytes, par exemple, a donné l'occasion de formes de contributions diversifiées, que nous nous efforcerons d'élargir à d'autres thèmes, en faisant appel autant que possible aux bonnes volontés. Le tout sans renoncer à l'exigence scientifique et technique.

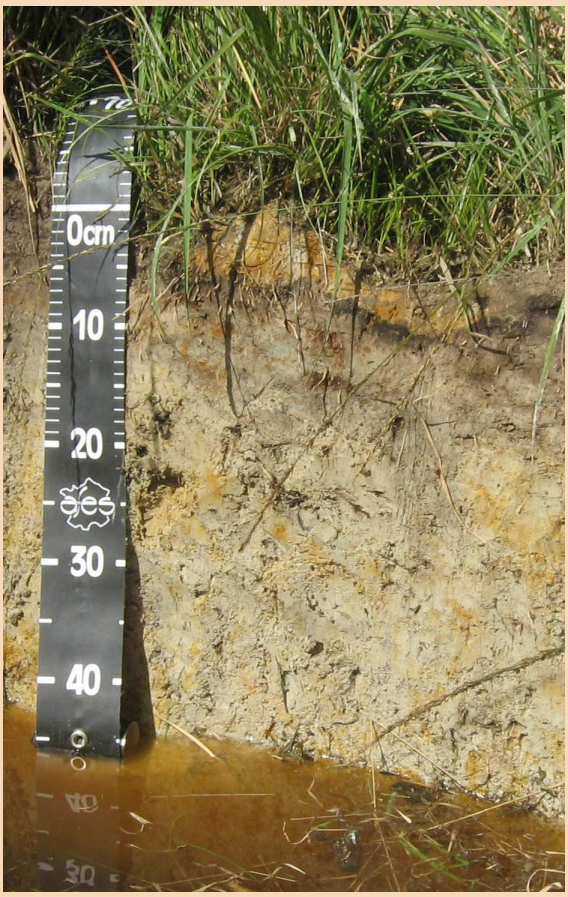
Enfin nous chercherons aussi à améliorer l'accès à la revue, non seulement pour le personnel de l'ONF mais aussi pour l'ensemble de la communauté forestière et au-delà. Une démarche est lancée pour créer un espace spécialisé accessible via onf.fr, d'où il sera possible de s'abonner aux alertes de parution et de faire des recherches par mots-clés pour retrouver tel ou tel article ou dossier.

Xavier Bartet,
ONF-DFRN-RDI, animateur du Comité Éditorial de RDVT

Noémie Pousse / ONF

DOSSIER

Sols forestiers à engorgement temporaire



Noémie Pousse / ONF

Les sols à nappe temporaire forment une part considérable du « socle » des forêts françaises. Les forestiers sont donc assez familiers des difficultés qu'ils présentent pour la conduite et le renouvellement des peuplements, l'exploitation des bois, etc. Cependant les potentialités et les techniques sylvicoles sont désormais à envisager à l'aune des évolutions climatiques en cours, qui pourraient bien exacerber les contraintes propres au fonctionnement de ces sols.

Ce dossier, coordonné par Noémie Pousse*, rassemble des contributions diverses. Il s'agit d'abord de faire le point sur l'état des connaissances sur les mécanismes pédologiques et écophysiologiques, pour bien appréhender les défis qui nous attendent. Il s'agit aussi d'évoquer les recherches récentes concernant plus particulièrement le comportement des chênes sur les sols à nappe perchée temporaire. Et c'est enfin l'occasion de zoomer sur des problématiques particulières : l'impact de l'entretien des cloisonnements sylvicoles ou, dans un autre ordre d'idée, le lien entre traces d'hydromorphie et dynamique de nappe temporaire distribuée dans tout le profil en forêt de Chaux.

*Noémie Pousse est chargée de R&D à l'ONF, pôle RDI de Chambéry, sur les questions de « Pédologie et stations en climat changeant »

Les sols forestiers à nappe temporaire : fonctionnement, particularités et enjeux actuels

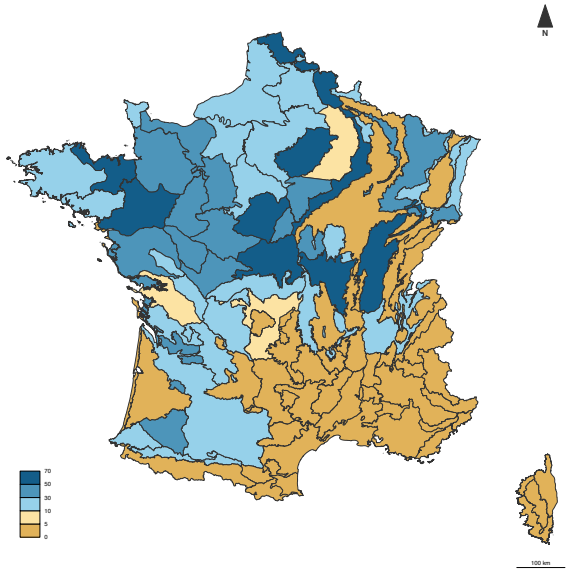
Pour fixer les idées, cet article propose quelques rappels et détaille les particularités des sols forestiers à nappe perchée temporaire : conditions de formation d'une nappe perchée, formation des traces d'hydromorphie, sensibilité au tassement et principales contraintes pour les essences forestières. Il aborde enfin les principaux enjeux auxquels la recherche devra répondre pour l'avenir.

Les estimations du réseau de placettes forestières de l'institut national de l'information géographique et forestière (IGN) indiquent que les sols forestiers présentant des traces liées à un engorgement (temporaire ou permanent) à moins de 65 cm de profondeur occupent une surface de 2,4 millions d'hectares en France métropolitaine (Fig. 1). Ces sols à engorgement contribuent de façon conséquente à la filière bois avec un volume de bois de 420 millions de m^3 (17,4 %) et une production de 14,7 millions de $m^3.an^{-1}$ (17,8 %) (données IGN, hors peupleraie).

Parmi ces sols, les sols à nappe temporaire se distinguent par la formation d'une nappe d'eau au-dessus d'un horizon très peu perméable (appelé « plancher ») lorsque les entrées d'eau dans le sol sont supérieures aux sorties; la nappe circule dans les horizons supérieurs plus perméables puis disparait temporairement lorsque les sorties excèdent les entrées. Ces sols se caractérisent par une double contrainte pour les essences forestières : une hypoxie (insuffisance en oxygène) en période hivernale et printanière puis un déficit hydrique estival. Ces deux contraintes entrainent des perturbations au niveau de la croissance, de la survie et de la distribution des racines dans les horizons de battement de nappe (à cause de l'engorgement) mais aussi dans les horizons situés sous le plancher (à cause de sa compacité). Ces deux altérations du régime hydrique des arbres s'accompagnent le plus souvent d'une dégradation du statut nutritionnel des arbres, l'absorption hydrominérale étant largement perturbée.

La mise en valeur forestière des sols à engorgement temporaire est difficile, cependant les gestionnaires forestiers disposent de deux leviers : le choix des essences et l'adaptation de la gestion. Durant la période 1970-2000, diverses techniques ont été développées et mises en œuvre pour atténuer les contraintes. Pour réduire la contrainte « hypoxie », des méthodes d'assainissement mécaniques (fossés, billons) ou biologiques (plantation d'aulne glutineux) ont été expérimentées, afin de tester leur efficacité à diminuer la durée et l'intensité de l'engorgement (Lévy et Lefèvre, 2001). Pour réduire la contrainte « déficit hydrique estival », c'est la limitation de la compétition entre les plants forestiers et les herbacées (molinie et carex notamment) qui a été testée par l'utilisation d'herbicides et/ou l'installation de paillages naturels ou plastiques (Lévy et Lefèvre, 2001).

Aujourd'hui, la gestion forestière des sols à nappe temporaire doit s'envisager dans un tout autre contexte : évolution de la législation, prise en considération grandissante de la multifonctionnalité des forêts et bouleversements liés aux changements climatiques.



↑ **Figure 1.** Pourcentage de surface forestière où les sols présentent des traces d'hydromorphie de surface (entre 0 et 60 cm de profondeur) par sylvoécorégion

© IGN, données de l'inventaire forestier national 2006-2018

La législation française a évolué en faveur de la protection des milieux humides. Ainsi, la loi sur l'eau de 1992 (révisée en 2006) soumet les travaux forestiers d'assainissement mécanique au régime de déclaration (voire d'autorisation) préalable au titre des Installations, Ouvrages, Travaux et Activités (IOTA) en rapport avec l'eau, ce qui a un certain effet de dissuasion. Par ailleurs, les grands acteurs forestiers mettent en place des démarches volontaires pour réduire, voire proscrire, l'utilisation de produits phytosanitaires dans les forêts qu'ils gèrent ; par exemple, l'ONF n'utilise plus de produits phytosanitaires depuis octobre 2019.

En outre, les politiques publiques et la société s'intéressent de plus en plus aux multiples services écosystémiques rendus par les forêts : services d'approvisionnement, services de régulation et services culturels. À cet égard, les forêts sur sols à nappe temporaire présentent une variété de services écosystémiques originaux et d'importance cruciale, du fait notamment des habitats particuliers qu'elles offrent (zones humides) et du rôle tampon qu'exercent leurs sols : capacité à retenir momentanément de l'eau puis à la restituer progressivement. L'importance des services écosystémiques milite pour une meilleure préservation de ces milieux, afin de les pérenniser et de les optimiser.

Enfin, la gestion des peuplements sur sols à nappe temporaire devra s'adapter aux évolutions climatiques. En effet, les projections indiquent une réduction globale des précipitations dans de nombreuses régions d'Europe pendant l'été et une augmentation probable d'évènements de précipitations extrêmes, y compris pendant la période de végétation (IPCC, 2007), accentuant la double contrainte de ces sols sur le développement des essences forestières.

Dans ce contexte, cet article propose d'abord quelques rappels sur les sols, puis s'intéresse aux particularités des sols à nappe temporaire : les conditions de formation d'une nappe, la formation des traces d'hydromorphie, la sensibilité de ces sols au tassement et leurs principales contraintes pour les essences forestières. Enfin, l'article présente certains enjeux actuels auxquels devront répondre les futures recherches concernant ces types de sols en milieu forestier.

Le sol : des constituants solides et une porosité où peuvent circuler l'eau et l'air

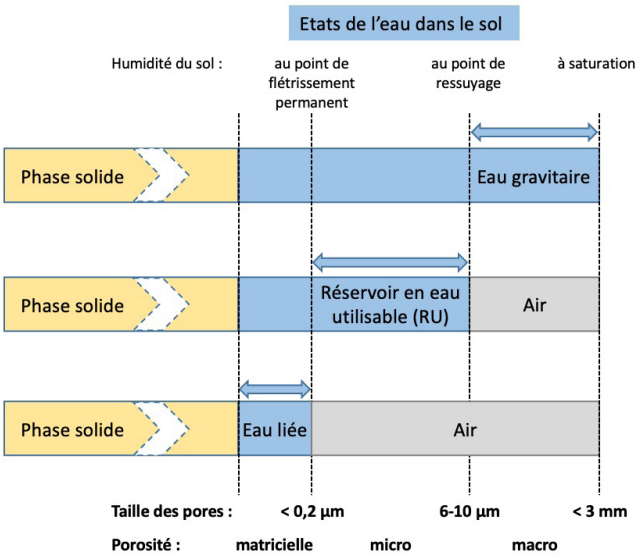
Le sol est constitué de trois phases : solide, gazeuse et liquide.

La phase solide comprend des constituants organiques et des constituants minéraux de granulométrie variée : les argiles (constituants de moins de 2 µm), les limons (de 2 à 50 µm), les sables (de 50 µm à 2 mm) et les éléments grossiers (plus de 2 mm). La détermination du pourcentage d'argiles, limons et sables d'un échantillon de sol permet de définir sa texture (par exemple : texture limoneuse, argilo-sableuse…). Le sol est aussi caractérisé par sa structure, c'est-à-dire l'agencement dans l'espace de ses constituants solides (par exemple : structure grumeleuse avec des agrégats arrondis).

1 micromètre (µm) = 10^{-3} millimètre (mm) = 10^{-6} mètre

Les phases liquide et gazeuse circulent dans la porosité du sol, c'est-à-dire le volume « vide », non occupé par la phase solide. En fonction de la taille des pores, on distingue la macroporosité (pores de taille comprise entre 6-10 µm et 3 mm), la microporosité (entre 0,2 et 6-10 µm) et la porosité matricielle (moins de 0,2 µm) (Baize, 2016) (Fig. 2).

Lorsque le sol est saturé en eau, celle-ci circule rapidement dans la macroporosité, entrainée par la gravité, jusqu'à atteindre un seuil d'humidité appelé point de ressuyage (Fig. 2). Cette eau gravitaire n'est pas retenue dans le sol et n'est donc pas disponible pour la végétation ; elle n'est présente dans le sol qu'après une pluie ou en cas de formation d'une nappe. Quand la macroporosité n'est pas occupée par de l'eau, elle est l'élément clé de la diffusion des gaz dans le sol.



↑ **Figure 2.** Dans le sol, plusieurs porosités et différents états de l'eau peuvent coexister.

Dans la microporosité, l'eau contenant des substances dissoutes est retenue par le sol et son extraction est possible par les racines des végétaux ; c'est le réservoir en eau utilisable (RU). Ce RU se situe entre le point de ressuyage et le point de flétrissement permanent, seuil au-delà duquel la plante n'est plus capable d'extraire l'eau du sol (Fig. 2).

Enfin, dans la porosité matricielle, l'eau est trop fortement retenue par les particules solides du sol : c'est l'eau liée, elle n'est pas disponible pour la végétation (Fig. 2).

Conditions de formation d'une nappe temporaire dans un sol

Les sols à nappe temporaire ont la particularité de présenter un horizon plancher, situé généralement à moins de 60 cm de profondeur. Ce plancher présente une plus faible perméabilité que les horizons de surface, qui peut s'expliquer par des caractéristiques texturales et/ou structurales particulières.

Un horizon plancher peu perméable

Concernant l'aspect textural, l'imperméabilité du plancher correspond à des teneurs élevées en argile, matériau de faible **conductivité hydraulique**, qui rendent l'infiltration de l'eau très lente et le drainage naturel insuffisant. Ces fortes proportions d'argile peuvent apparaitre dans le **solum** de manière brutale ou progressive. La transition est brutale si le sol se développe sur deux matériaux différents (comme un placage limoneux sur un matériau argileux), mais elle est progressive lorsqu'elle résulte d'un phénomène de lessivage et d'accumulation des argiles.

Concernant l'aspect structural, l'imperméabilité peut s'expliquer par un changement brutal de structure, notamment lié à des tassements d'origine naturelle (action des glaciers) ou anthropique (passage d'engins, gestion sylvicole) qui diminuent drastiquement la macroporosité et limitent la capacité de drainage naturel.

Enfin, les aspects structuraux et texturaux peuvent s'additionner, par exemple dans le cas d'un horizon cumulant une forte proportion d'argile et une structure massive, c'est-à-dire sans agrégat.

Des arrivées d'eau qui dépassent les capacités de stockage et de drainage naturel du sol

Dans le solum, quand les entrées d'eau (précipitations, fonte de neige) sont supérieures aux sorties (infiltration, percolation, évapotranspiration), l'excès d'eau occupe la macroporosité du sol au-dessus du plancher (engorgement) et forme une nappe temporaire dans l'horizon de fluctuation. Sous nos climats, la proximité de cette nappe par rapport à la surface du sol fluctue selon les saisons et les conditions météorologiques : elle apparait régulièrement en période hivernale ou printanière et de manière plus fugace en saison de végétation après des pluies intenses. De manière générale, la nappe disparaît au printemps lorsque les sorties d'eau excèdent les entrées, en raison notamment de l'augmentation de la transpiration de la végétation et de l'évaporation par le sol.

Réactions d'oxydo-réduction liées à l'engorgement temporaire : l'origine des traces d'hydromorphie

Lors de l'installation de la nappe, l'air de la macroporosité du sol est progressivement remplacé par l'eau. L'oxygène dissout dans l'eau provenant des pluies est rapidement consommé par les activités biologiques aérobies du sol, telle que la respiration (microorganismes **aérobies**, racines…). La baisse progressive, en quelques heures à quelques jours, de la teneur en oxygène dans le sol conduit à une période d'hypoxie puis d'anoxie (insuffisance puis absence d'oxygène).

Alternance d'oxydation et de réduction des éléments chimiques du sol

Les racines (voir Bréda et Gérard, ce numéro) et certains microorganismes vont alors modifier leurs voies métaboliques, tandis que d'autres microorganismes vont se développer, pour utiliser les **oxydants** disponibles à défaut d'oxygène : par exemple les nitrates (NO_3^-), les oxydes de manganèse III et IV (Mn^{3+}, Mn^{4+}) puis les oxydes de fer III (Fe^{3+}), qui vont être successivement **réduits**.

Ainsi, lors des périodes d'engorgement du sol, après les nitrates et le manganèse, le fer est réduit et solubilisé dans la nappe sous forme de cations Fe^{2+} ; il devient donc mobile et peut être déplacé dans le solum sous l'influence de la circulation de la nappe (lixiviation), ce qui conduit à un appauvrissement localisé en fer du sol. Lorsque l'eau de la nappe disparait, elle est progressivement remplacée par de l'air, plus riche en oxygène. Alors le fer

Conductivité hydraulique : aptitude d'un milieu poreux à permettre le déplacement de l'eau sous l'effet de la gravité ou d'un gradient de pression. Unité : mètre par seconde.

Solum : tranche verticale d'un sol observable dans une fosse pédologique ou une tranchée.

Aérobie : qui a besoin d'oxygène pour fonctionner.

Oxydant : composé ou ion qui reçoit un ou plusieurs électrons d'une autre espèce chimique lors d'une réaction d'oxydo-réduction. L'oxydant subit une réduction, il est « réduit ».

Réducteur : composé ou ion qui donne un ou plusieurs électrons à une autre espèce chimique lors d'une réaction d'oxydo-réduction. Le réducteur subit une oxydation, il est « oxydé ».

se ré-oxyde (cations Fe^{3+}), redevient insoluble et s'accumule localement dans le sol (Fig. 3 et 4). Les mêmes dynamiques sont observées pour le manganèse : la forme réduite en cation Mn^{2+} (présence de la nappe) se ré-oxyde quand la nappe disparaît en Mn^{3+} ou Mn^{4+}.

La formation de traces d'hydromorphie et d'horizons rédoxiques

La particularité des processus d'oxydo-réduction du fer et du manganèse est qu'ils laissent des traces visibles dans le sol, appelées traces d'hydromorphie, qui sont une conséquence de l'engorgement des sols. Ces traces d'hydromorphie peuvent prendre la forme de taches ou de concrétions (petits nodules) de différentes couleurs (ocre, noire…) mais aussi de **décolorations** spécifiques (Fig. 3 et 4). Les traces grises (ou plus claires que la matrice) sont dues aux processus de réduction puis de lixiviation du fer ; tandis que celles de couleur rouille s'expliquent par une accumulation locale de fer ré-oxydé (Fig. 3 et 4). En cas de fortes exportations latérales de fer, les couleurs grise (décoloration) ou blanche (déferrification complète) sont alors dominantes voire exclusives (Baize et Jabiol, 2011).

Les traces d'hydromorphie liées à un engorgement temporaire peuvent persister même s'il n'y a plus la présence d'une nappe récente (par exemple après un drainage artificiel). Il s'agit alors de traces d'hydromorphie « fossiles », témoignant d'un passé engorgé du sol. Cela signifie que l'observation de ces traces ne permet pas de diagnostiquer un régime de nappe actuel. La seule preuve que le régime de nappe est fonctionnel nécessite la mesure du niveau de la nappe avec précaution (à la tarière ou sur fosse) en période hivernale.

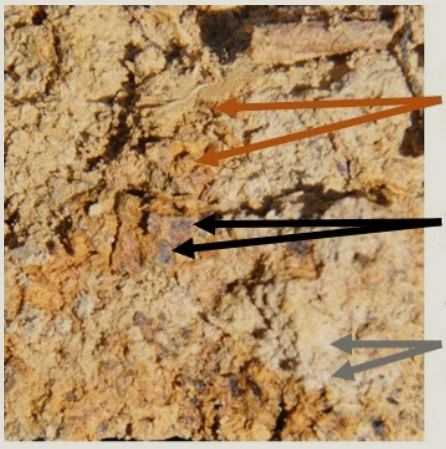
Dans la classification française des sols (Référentiel Pédologique ; Afes, 2008), un horizon est qualifié de rédoxique si les traces d'hydromorphie, toujours fonctionnelles, couvrent plus de 5 % de la surface de l'horizon sur au moins 50 cm d'épaisseur. Si cet horizon rédoxique apparait à moins de 50 cm de la surface et si le processus pédogénétique d'oxydo-réduction est considéré comme prépondérant, alors le sol pourra être qualifié de Redoxisol (Afes, 2008).

Des sols particulièrement sensibles aux tassements avec des conséquences sur le peuplement

Du fait de leur saturation en eau une grande partie de l'année, les sols à nappe temporaire sont sensibles aux tassements. Une texture limoneuse dans les couches supérieures et une absence d'éléments grossiers (ou faible teneur) rendent les sols particulièrement vulnérables aux tassements liés aux passages d'engins. Ces tassements diminuent la macroporosité par dégradation de la structure dans la couche supérieure du sol. Ils se traduisent par une moindre perméabilité (gaz et eau) du sol et réduisent, voire empêchent, le drainage vertical de l'eau. Ainsi, la conductivité hydraulique à saturation (aptitude d'un sol saturé en eau à se laisser traverser par l'eau) sur les 30 premiers centimètres de sol est divisée par trois sur les cloisonnements par rapport aux zones non circulées (Martin, 2019). Dans les cloisonnements, cela se traduit par la naissance d'un plancher structural (structure massive ou lamellaire) « artificiel » qui perturbe le fonctionnement hydrique du sol et peut donner naissance à une nappe d'origine anthropique proche de la surface du

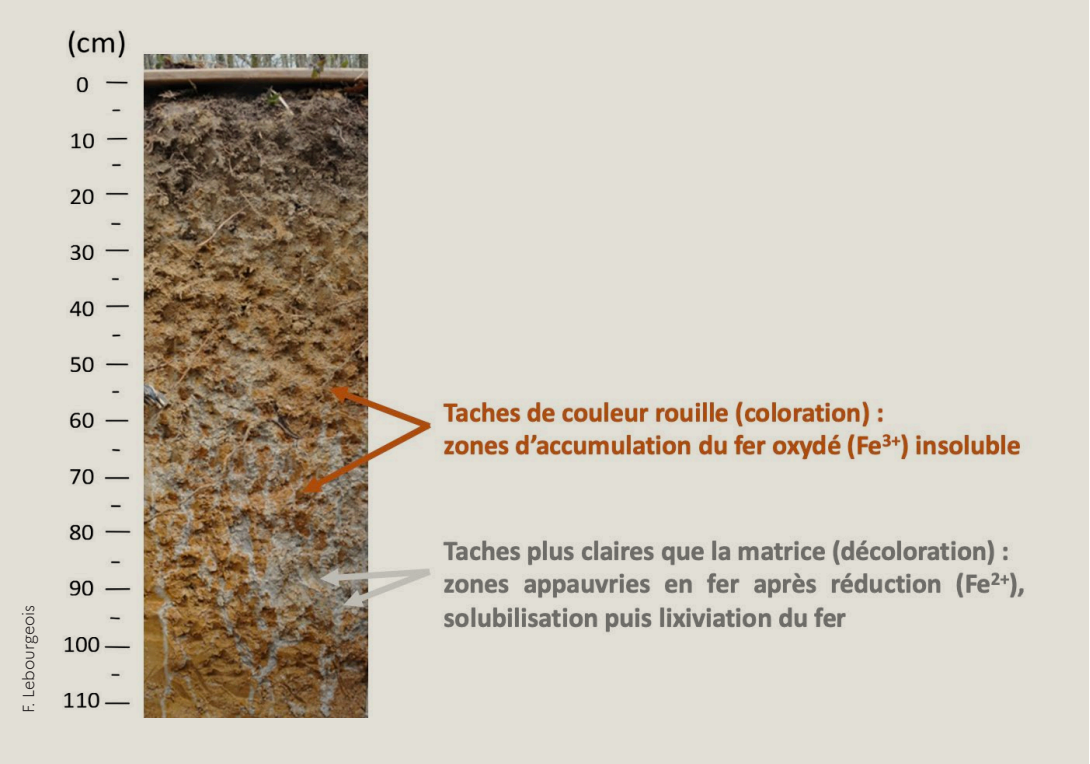
La coloration des sols : Les oxydes de fer sont de couleurs rouge, brune, jaune ou orange, selon les minéraux de fer présents. Les oxydes de manganèse sont de couleur noire.

Les oxydes de fer et de manganèse recouvrent les surfaces des particules de sable, de limon et d'argile et « colorent » ainsi les horizons de sols. Sans les oxydes de fer et de manganèse, ces particules sont grises.



F. Lebourgeois

← **Figure 3.** Les traces d'hydromorphie sont la conséquence de l'engorgement du sol. Ces traces sont dues à la réduction puis ré-oxydation du fer et du manganèse, et à la migration du fer, beaucoup plus mobile sous forme réduite (Fe^{2+}).



← **Figure 4.** Les horizons rédoxiques sont caractéristiques des sols à nappe temporaire ; ils présentent des taches de couleurs très hétérogènes.

sol, néfaste pour les racines (voir Bréda et Gérard, ce numéro). Sur le long terme, la restauration naturelle de la macroporosité des cloisonnements après tassement est extrêmement lente (plusieurs dizaines d'années) et dépend du niveau de fertilité et de la texture du sol. Cette restauration peut être de différentes natures : phénomène de retrait-gonflement des argiles, action du gel, activité biologique (racines et faune du sol).

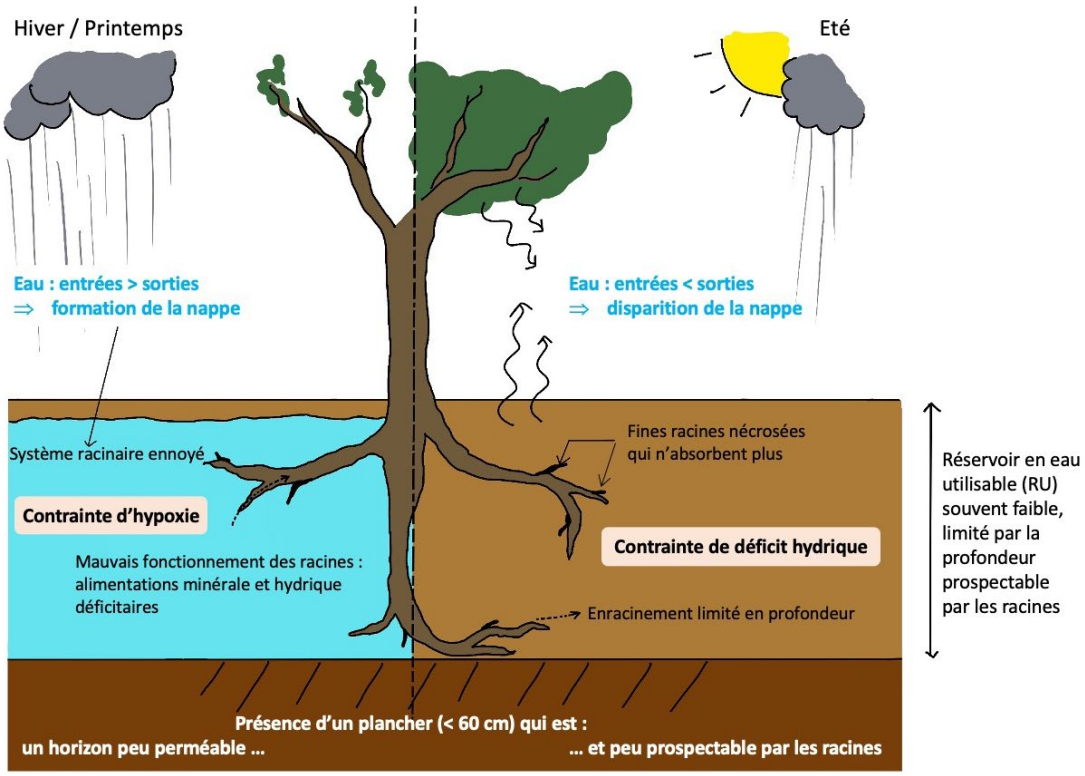
Par ailleurs, les résultats d'une étude réalisée dans le sud-ouest de l'Allemagne sur un ensemble de 36 peuplements de chênes pédonculés et sessiles montrent que, dans les sols compactés, la densité de racines fines diminue de manière significative avec la baisse de la perméabilité aux gaz du sol ; une aération insuffisante du sol est un facteur important du déclin des chênes étudiés (Gaertig *et al*. 2002).

Principales contraintes des sols à nappe temporaire pour les essences forestières

Les sols à nappe temporaire engendrent deux contraintes successives pour les essences forestières. Durant la période hivernale et printanière, les arbres sont confrontés à une contrainte d'hypoxie due à la nappe qui sature la macroporosité du sol. Cette contrainte a pour conséquence immédiate des effets négatifs sur la croissance racinaire, l'absorption (Lévy, 1981a) et l'alimentation minérale des arbres, notamment la nutrition azotée (Lévy, 1981b) (Fig. 5, page suivante).

Puis, durant la période estivale, les arbres doivent faire face à une contrainte de déficit hydrique, qui n'est pas spécifique de ces sols mais s'y trouve exacerbée. En effet, d'une part, l'hypoxie augmente la mortalité des racines fines et impose leur renouvellement accéléré et, d'autre part, les propriétés physiques de l'horizon plancher limitent l'enracinement en profondeur (Lévy et Lefèvre, 2001). En particulier, lorsque le plancher de la nappe constitue une discontinuité physique importante, il limite fortement la colonisation par les racines fines de certaines essences (Lebourgeois et Jabiol, 2002). Ainsi le RU est restreint par la faible profondeur de prospection racinaire, ce qui a pour effet de renforcer le déficit hydrique estival (il est plus fréquent et plus intense) (Fig. 5).

De plus, la végétation spontanée typique de ces sols (molinie, joncs, carex…) forme souvent des tapis monospécifiques (Fig. 6) car les conditions d'engorgement et d'acidité sont défavorables à un grand nombre d'espèces végétales. Cette végétation spontanée s'avère souvent très compétitive vis-à-vis des jeunes arbres, en particulier pour l'eau en période estivale. De surcroît, certaines espèces comme la molinie sont connues pour leurs propriétés allélopathiques, c'est-à-dire la production de substances biochimiques qui influencent le développement d'autres espèces.



→ **Figure 5.** Les arbres se développant sur les sols à nappe temporaire subissent deux contraintes successives : hypoxie puis déficit hydrique. (Les auteurs remercient Solenn Chauvel pour la réalisation de cette figure).

Enjeux actuels et projets de recherche & développement

Adapter l'exploitation des peuplements forestiers sur sols à nappe temporaire

La praticabilité des parcelles dépend notamment de l'humidité du sol et de la texture de la couche supérieure. Pour les sols à engorgement temporaire, le guide PROSOL (2009) préconise une exploitation par voie terrestre seulement si le sol est assez sec (période estivale) ou si le sol est gelé pendant une période suffisamment longue dans l'année. Sinon, l'exploitation devra s'effectuer par câble aérien ou à l'aide de petite mécanisation (plus légère).

La préservation des propriétés physiques du sol, notamment le maintien d'une macroporosité suffisamment importante pour permettre le drainage vertical de l'eau, passe également par la mise en place de cloisonnements d'exploitation sur lesquels se limite la circulation des engins. Cela permet de réduire la surface forestière impactée par le tassement. Il est à noter cependant que les cloisonnements peuvent générer des modifications de la circulation latérale de l'eau, pour l'instant encore mal connues.

En outre, les projections climatiques indiquent une diminution du nombre de jours de gel et une augmentation des précipitations hivernales, ce qui réduirait les périodes où les conditions de praticabilité des cloisonnements seront réunies et rendra l'exploitation forestière plus difficile encore sur ces types de sols.

Assurer le renouvellement forestier sur les sols à nappe temporaire

La conduite des peuplements sur sols à nappe temporaire requiert une attention particulière, notamment lors de la phase de régénération naturelle ou lors de la plantation.

Le retrait du couvert forestier provoque un double effet sur le bilan hydrique : arrêt de la pompe par arrêt de la transpiration des arbres et augmentation des entrées d'eau par arrêt de l'interception des précipitations par la canopée. Cette phase est donc délicate puisqu'elle s'accompagne inéluctablement d'une remontée de la nappe pendant des périodes plus longues. Des études menées sur sols à nappe temporaire ont mis en évidence que des coupes fréquentes du taillis, tous les 25 à 30 ans en traitement de taillis-sous-futaie (Aussenac et Becker, 1968 ; Becker, 1972), et les coupes à blanc (Lévy, 1990) engendrent, outre une remontée de la nappe, une dégradation difficilement réversible des propriétés physiques du sol (détérioration de la structure, tassement). De plus, certaines espèces herbacées (carex, molinie...) profitent de la mise en lumière pour se développer massivement, constituant un obstacle à la régénération des essences ligneuses et contribuant à une baisse de la productivité de la station (Becker, 1972 ; Lévy, 1990) (Fig. 6).

En futaie régulière, la régénération naturelle est bien souvent privilégiée mais les opérations sylvicoles doivent être minutieusement programmées afin d'éviter le développement d'une strate herbacée qui empêcherait la germination des essences objectifs. Le gestionnaire devra donc tout mettre en œuvre pour permettre la croissance des jeunes semis tout en contrôlant l'éclairement arrivant au sol de manière à limiter le développement de la végétation adventice. Il faut alors attendre une bonne fructification

F. Lebourgeois, oct. 2021

↑ **Figure 6.** Taillis sous futaie vieilli en conversion sur sol à nappe temporaire, forêt communale de Chamagne. Surface terrière : 20-25 $m^2.ha^{-1}$; hauteur des réserves : 20-23 m ; âge des arbres : 150-200 ans. Le sol est couvert par un tapis continu de *Carex brizoides* (Crin végétal).

suivie de germination effective pour réaliser (rapidement) une coupe apportant de la lumière au sol de sorte que les semis puissent se développer, tout en conservant suffisamment d'arbres adultes pour limiter la remontée de nappe. Dans le même ordre d'idée, le sylviculteur peut s'orienter vers un traitement irrégulier pour tenter de mieux maîtriser la lumière au sol et toute remontée de nappe préjudiciable au renouvellement des peuplements.

Pour les cas où la régénération artificielle s'impose (échec de la régénération naturelle, substitution d'essence, problème sanitaire…), il est nécessaire de développer des méthodes de conduite du renouvellement adaptées à ces sols. Par exemple, le pôle RENFOR de l'UMR Silva conduit, avec ses partenaires (ONF et OFB-Office français de la Biodiversité), des travaux de recherche et développement concernant la plantation sur sols à nappe temporaire, dans le cadre notamment des réseaux d'expérimentation PILOTE et ALTER. Une préparation mécanisée du site est souvent nécessaire pour installer correctement les plants dans ces types de sols, avec trois objectifs : réduire la compétition herbacée, décompacter le sol et rehausser les plants par rapport au niveau de la nappe en hiver. Cependant la préparation mécanisée elle-même peut avoir des impacts négatifs sur ces sols sensibles aux tassements, notamment si elle est pratiquée en conditions trop humides. L'enjeu est donc de faire la préparation minimale pour permettre l'installation des plants, tout en réduisant les impacts sur le sol.

Mieux comprendre la dynamique des contraintes des sols à nappe temporaire et leurs effets sur les essences forestières

Pour les prochaines décennies, un des enjeux pour aider les gestionnaires forestiers dans le choix des essences et l'adaptation des itinéraires techniques est de mieux comprendre la dynamique spatio-temporelle des contraintes liées aux sols à nappe temporaire ainsi que leurs effets sur le fonctionnement hydrique, carboné et nutritionnel des arbres (Bréda et Gérard, ce numéro).

Dans ce contexte, l'UMR Silva a amorcé en 2020 un projet de recherche dont les objectifs visent à décrire conjointement les dynamiques du niveau de la nappe et des flux et stocks d'eau dans le sol en fonction des conditions climatiques et des propriétés hydrodynamiques des sols. Plus précisément, les objectifs à court terme consistent à évaluer la durée et l'intensité des contraintes (excès d'eau et déficit hydrique) sur la croissance radiale et la phénologie des arbres, à partir des variations climatiques (précipitations arrivant au sol, évapotranspiration potentielle) et des prélèvements par les arbres (transpiration, absorption racinaire). À cette fin, des instruments de mesure ont été installés en 2021 sur le dispositif expérimental « Charmes 1 » (Lebourgeois *et al.*, ce numéro) pour mesurer et suivre certaines propriétés du sol (teneur en eau, température, hauteur de la nappe), la croissance radiale et racinaire, et la pluviométrie incidente et au sol. À moyen terme, le projet vise à définir des seuils (date, durée) de hauteur de nappe qui impactent le fonctionnement des arbres dans une chronologie qu'il conviendra d'établir (croissance secondaire du bois et des racines, phénologie foliaire, transpiration, absorption racinaire…).

Modéliser la dynamique de la nappe sur ces types de sols

Les recherches à mener visent aussi à améliorer les outils de modélisation du régime hydrique de ces sols. Des outils existent déjà mais se focalisent sur la contrainte sécheresse, qui est largement la plus limitante, comme par exemple le modèle de bilan hydrique forestier BILJOU© (Granier *et al.*, 1999). Un des principaux enjeux des futurs projets de recherche réside donc dans la simulation des phénomènes d'engorgement temporaire dans les modèles de bilan hydrique forestiers et dans la définition d'indicateurs pertinents d'impact sur les arbres. À long terme, après des observations sur plusieurs années météorologiquement contrastées, le projet de l'UMR Silva ambitionne de conceptualiser un module « nappe d'eau temporaire » dans ces modèles de bilan hydrique.

Étudier les services écosystémiques fournis par les sols forestiers à nappe temporaire

Par la présence de la nappe une partie de l'année, les sols forestiers à nappe temporaire fournissent des services écosystémiques de régulation en lien avec l'eau. Sur l'aspect qualitatif, le pouvoir épurateur des zones humides est reconnu et le milieu forestier est souvent privilégié comme occupation du sol sur les périmètres de protection rapprochée de captage d'approvisionnement en eau potable. Sur l'aspect quantitatif, les zones humides assurent un rôle tampon de l'eau lors d'excès de précipitation puis elle la restitue plus lentement au milieu lors de période sèche. Dans le contexte de changement climatique, il semble important de pouvoir préciser la contribution des sols forestiers à nappe temporaire à soutenir les débits des cours d'eau en période d'étiage (basses eaux lors des sécheresses estivales). Cependant, la répartition de l'eau restituée au milieu va dépendre de nombreux paramètres : i) données météorologiques, ii) transpiration par la végétation et évaporation par le sol, iii) drainages superficiel (res-

titution dans les cours d'eau) et profond (recharge des nappes phréatiques). Les deux premiers points sont relativement bien abordés aujourd'hui dans les modèles de bilan hydrique à l'échelle de la parcelle (par exemple : BILJOU©); néanmoins, la gestion du drainage n'est pas bien prise en compte dans ces modèles. Les modèles de bilan hydrologique (par exemple : SWAT) sont plus intégratifs à l'échelle du bassin versant et vont mieux gérer les notions de drainages superficiel et profond, cependant ils présentent souvent des modules de végétations et de sols moins fiables que les modèles de bilan hydrique. À l'avenir, des travaux sur le couplage de ces deux types de modèles (bilan hydrique et bilan hydrologique) seront indispensables afin d'améliorer les estimations du volume d'eau que les sols à nappe temporaire peuvent stocker, à l'échelle de la parcelle et également du bassin versant, ainsi que la répartition de cette eau lors de sa restitution au milieu (végétation, sol, cours d'eau).

Conclusion

La mise en valeur forestière des sols à nappe temporaire a toujours été délicate avec, notamment, des vulnérabilités multiples au dépérissement, des difficultés et des échecs dans la phase clé de renouvellement et des potentialités sylvicoles limitées. Les évolutions climatiques en cours renouvellent l'intérêt d'affiner la compréhension du fonctionnement hydrodynamique complexe de ces sols, de la dynamique spatio-temporelle des contraintes qu'ils engendrent et de leurs effets sur les essences forestières. En parallèle, préserver et améliorer les fonctions hydrologiques, biogéochimiques et écologiques des sols à nappe temporaire, ainsi que les services écosystémiques qu'ils fournissent, sont aussi des enjeux d'importance grandissante. Ainsi, la gestion de ces sols en milieu forestier implique une coopération multi-acteurs et des compromis entre les enjeux de protection, de production et de durabilité.

Caroline Petitjean, Marco Bastianelli, Joseph Levillain, Nathalie Bréda, Philippe Durand, Noé Dumas, François Lebourgeois, Catherine Collet

UMR Silva (Université de Lorraine, AgroParisTech, INRAE), Nancy

RÉFÉRENCES

À consulter sur le web

- Données de l'inventaire forestier : inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/France_part2.pdf inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/France_part4-2.pdf
- Zéro phyto en forêt publique – Communiqué de presse : www.onf.fr/outils/presse/eb1d8b00-d79f-4d37-a947-4c15a4cd4d2a/++versions++/1/++paras++/3/++ass++/1/++i18n++data:fr?_=1571387772.973006&download=1
- Webinaire AFES (45) de C. Ducommun (2019) - Vers une harmonisation de la caractérisation de l'hydromorphie des sols : vimeo.com/379954004
- Guide PROSOL : www.onf.fr/produits-services/+/18b::prosol-guide-pour-une-exploitation-forestiere-respectueuse-des-sols-et-de-la-foret.html
- Pôle RENFOR : www6.inrae.fr/renfor/Le-pole-RENFOR
- Unité Mixte de Recherche Silva (Université de Lorraine, AgroParisTech, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement) : www6.nancy.inrae.fr/silva/
- Modèle de bilan hydrique forestier BILJOU© : appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/
- Modèle de bilan hydrologique : swat.tamu.edu

Références bibliographiques

- Afes - Association française pour l'étude du sol, 2009. Référentiel pédologique 2008. Editions Quae, coll. Savoir-faire. 405 p.
- Aussenac G., Becker M., 1968. Écologie d'un massif sur sols hydromorphes : la forêt de Charmes (Vosges). Contribution à la mise au point d'une méthode d'étude dynamique du milieu forestier. Ann. Sci. For., vol. 25(4) pp. 291–332. doi.org/10.1051/forest/19680404
- Baize D., 2016. Petit lexique de pédologie - Nouvelle édition augmentée. Editions Quae
- Baize D., Jabiol B., 2011. Guide pour la description des sols. Editions Quae
- Becker M., 1972. Etude des liaisons station-production, dans une forêt sur sols hydromorphes (forêt communale de Charmes - Vosges). Rev. For. Fr. XXIV(4) pp. 269-287. doi.org/10.4267/2042/20620
- Gaertig T., Schack-Kirchner H., Hildebrand E.E., Wilpert K. v, 2002. The impact of soil aeration on oak decline in southwestern Germany. For. Ecol. Manag., vol. 159(1-2) pp. 15–25. doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00706-X
- Granier A., Bréda N., Biron P., Villette, S., 1999. A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. Ecol. Model., vol. 116(1-2), pp. 269–283. doi.org/10.1016/S0304-3800(98)00205-1
- IPCC 2007. Climate Change 2007: the physical science basis. In: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller. Cambridge University Press, Cambridge, 940 p.
- Lebourgeois F., Jabiol B., 2002. Enracinements comparés du Chêne sessile, du Chêne pédonculé et du Hêtre. Réflexions sur l'autécologie des essences. Rev. For. Fr. LIV(1) pp. 17-42. doi.org/10.4267/2042/4898
- Lévy G., 1990. Incidences possibles d'une coupe à blanc sur la remontée des nappes et la stabilité structurale des sols à hydromorphie temporaire. Rev. For. Fr. XLII(5) pp. 517–522. doi.org/10.4267/2042/26101
- Lévy G., 1981a. Comportement de jeunes plants d'Epicéa commun en sol à engorgement temporaire de surface : influence de divers facteurs du milieu. Ann. Sci. For., vol. 3 pp. 3–30
- Lévy G., 1981b. La nutrition azotée de l'Épicéa en sol engorgé : étude expérimentale. Ann. Sci. For., vol. 38 pp. 163–178
- Lévy G., Lefèvre Y., 2001. La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire. Editions Engref. 223 p.
- Martin M., 2019. Développement d'un modèle de transfert hydrique des sols forestiers partiellement tassés dans un contexte de données parcimonieuses. Thèse de doctorat. Université d'Avignon.

Les cloisonnements sylvicoles sur sols à engorgement temporaire : à quel degré de perturbation des sols et des peuplements s'attendre ?

Les cloisonnements sylvicoles ne sont pas censés être sujets au tassement, leur fonction étant de faciliter le cheminement et le travail des ouvriers forestiers pour les opérations indispensables dans les très jeunes peuplements. Mais ils sont en général entretenus mécaniquement (par broyage) avant chaque intervention. Et si c'est peu de chose sur l'ensemble du cycle sylvicole, ce n'est pas anodin pour les sols à engorgement temporaire comme ici, en forêt de Belfort. La vigilance s'impose.

Les cloisonnements sylvicoles sont nécessaires à la réalisation des opérations sylvicoles indispensables dans les premiers stades d'un peuplement forestier régulier. Conçus pour faciliter le cheminement et le travail des ouvriers, ils sont dégagés en tant que de besoin par broyage, avec des engins de plus en plus lourds et larges (photo). Le passage des engins sur les sols forestiers modifie profondément l'agencement des particules solides. D'après une méta-analyse récente, cette déformation du sol peut diminuer la biomasse aérienne et souterraine des végétaux, quel que soit le type de sol (Mariotti *et al.*, 2020). Les effets sur la biomasse aérienne sont souvent complexes car l'absence de compétition dans les zones tassées ou en bordure de cloisonnement peut conduire à une aussi bonne voire meilleure croissance en diamètre qu'au cœur de la bande boisée. La croissance en hauteur est diminuée de 20% en moyenne (30 études internationales) mais la surface foliaire n'est pas significativement affectée (7 études internationales). La biomasse souterraine est souvent plus impactée que la biomasse aérienne (Mariotti *et al.*, 2020) et les effets de la circulation des engins sur l'enracinement sont visibles dès les premiers passages (Malo & Messier, 2011), y compris dans les horizons profonds, et durent plusieurs décennies (Wilpert & Schäffer, 2006). La densité de l'enracinement est ainsi un indicateur sensible à la déformation des sols suite au passage des engins et permet de détecter des impacts à long terme sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers.

Afin d'étudier l'impact du passage des broyeurs sur des sols limoneux à engorgement temporaire et sur l'enracinement des chênes, l'unité territoriale ONF de Belfort a réalisé des comptages racinaires sur des fosses creusées perpendiculairement aux cloisonnements sylvicoles et d'exploitation (encadré et Fig. 1). Puis le service RDI (Recherche, développement, innovation) a réalisé des mesures de résistance à la pénétration et des descriptions de sol sur la fosse présentant le plus de différences entre les deux types de cloisonnements et la bande boisée.

materielagricoleforestier.net/valtra_forestier.htm

Type d'équipement (tracteur + broyeur) souvent utilisé pour l'entretien des cloisonnements

Pourquoi compter les racines ?

Olivier Marcet, responsable de l'UT de Belfort, voulait montrer les impacts du passage des engins sur les sols de ses forêts, impacts parfois visibles dès la surface (ornières) mais souvent invisibles. Pour cela, il creuse à la tarière des trous d'une vingtaine de cm de profondeur et y verse un même volume d'eau. Le temps nécessaire pour que le volume d'eau s'infiltre dans le sol s'avère beaucoup plus long sur les cloisonnements que dans la bande boisée. Cependant, même après constat manifeste des impacts aux sols, le lien entre ces impacts et la réaction des peuplements restait à mettre en évidence, d'autant que la fermeture assez rapide du couvert au-dessus des cloisonnements peut faire illusion. Des fosses ont alors été creusées à la mini-pelle perpendiculairement aux bandes boisées d'un perchis, afin de visualiser les impacts de la circulation des engins sur l'enracinement des chênes. Si les effets se voyaient en partie à l'œil nu, faire un comptage rigoureux a permis d'objectiver les choses.

Le site d'étude : des sols sujets à engorgement et sensibles au tassement

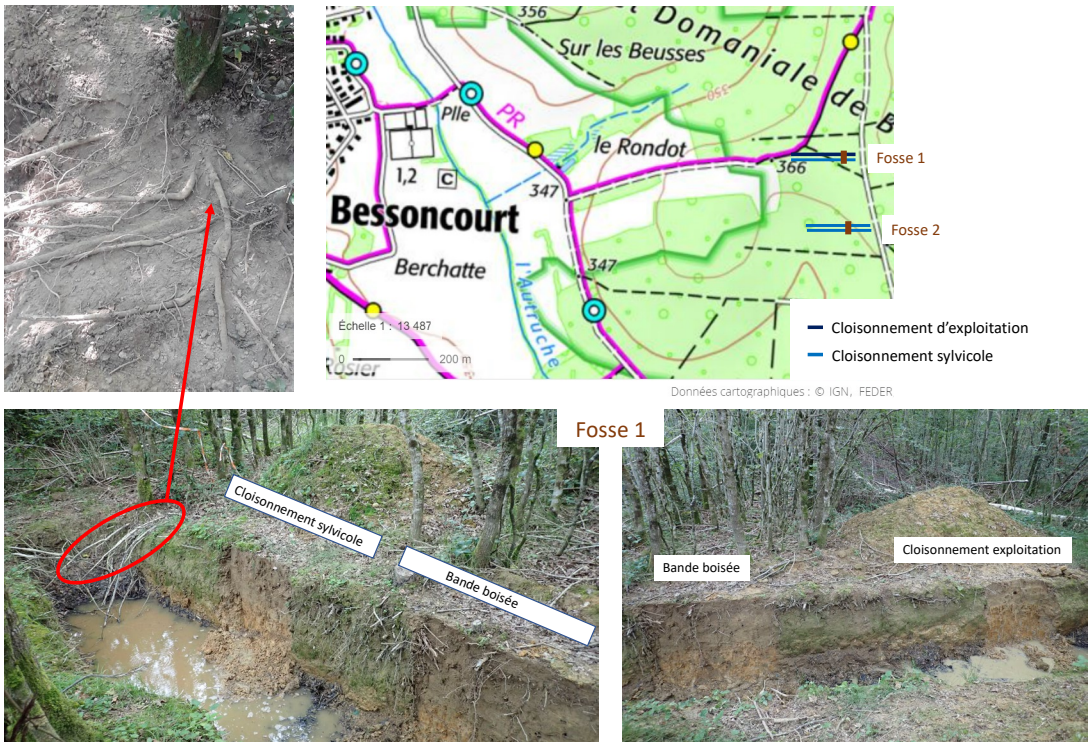
La parcelle étudiée est la parcelle 11 de la forêt domaniale de Belfort, située à 370m d'altitude sans relief marqué. Le peuplement est une chênaie mixte-charmaie d'une trentaine d'années issue de régénération naturelle. La coupe définitive, en 2007, correspond au dernier passage enregistré de porteurs sur les cloisonnements d'exploitation. Les cloisonnements sylvicoles ont été créés en 2001 et entretenus à l'occasion des dégagements de semis (quatre passages de 2001 à 2010), puis du nettoiement en plein réalisé en 2015.

Les sols de la parcelle se sont développés dans des dépôts limoneux, leur texture est équilibrée à dominance limoneuse. La forme d'humus de type mésomull montre que le recyclage des éléments nutritifs par les organismes du sol est rapide et ne limite pas la nutrition du peuplement. La nappe temporaire se manifeste à partir de 45 cm de profondeur par une hydromorphie contraignante. En effet, à partir de 45 cm, la couleur de la matrice ne se voit plus ; on n'observe plus que des traces de déplacement du fer sous l'effet de l'asphyxie du sol quand la nappe est présente (traces blanches d'où le fer est parti pendant l'engorgement et traces ocres et noires là où le fer se réoxyde dès que le sol s'assèche). Le plancher de la nappe (horizon imperméable) n'est pas visible dans les 90 premiers centimètres, même si un léger lessivage a occasionné une augmentation de la teneur en argile avec la profondeur. Cette augmentation est très progressive et ne suffit pas à former un plancher qui doit être plus profond que le bas de la fosse.

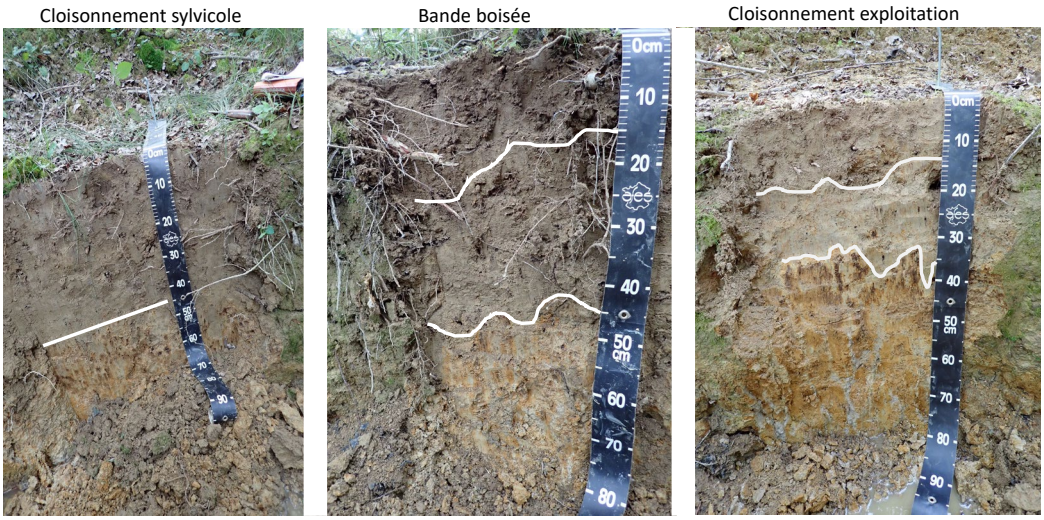
La position topographique de plaine, la texture et la présence d'un frein à l'écoulement de l'eau en bas de profil rendent ces sols particulièrement sensibles à la déformation sous les engins. En effet, le premier facteur de déformation est l'humidité du sol qui, dans le cas étudié, est souvent forte et pendant longtemps (faible capacité à drainer l'eau qui arrive *via* les précipitations). Une texture équilibrée, de par le mélange entre les fractions limoneuse, argileuse et sableuse, représente un fort potentiel de réorganisation lors de la mise sous pression du sol (les particules les plus fines peuvent facilement se glisser entre les particules les plus grossières).

Diminution de l'aération sous les cloisonnements sylvicoles et d'exploitation

Pour les deux cloisonnements étudiés sur la fosse 1 (Fig. 1), les traces d'engorgement temporaire sont visibles, sous les bandes de roulement, dès la surface, puis à partir de 45cm de profondeur on retrouve la même intensité de traces d'engorgement temporaire que dans la bande boisée avec cependant plus de concrétions ferromanganiques (Fig. 2). Dans la partie supérieure du sol, de 0 à 45cm de profondeur, les traces d'engorgement temporaire sont plus marquées pour le cloisonnement d'exploitation (5% de taches d'hydromorphie entre 0 et 15 cm puis 100% au-delà) que pour le cloisonnement sylvicole (15% de taches entre 0 et 45 cm), tandis qu'il n'y en a pas du tout sous la bande boisée. Ces traces témoignent d'un défaut d'aération, mis en évidence également sur les deux sites de suivi à long terme des effets du tassement, situés dans la région



← **Figure 1.** Deux fosses ont été creusées perpendiculairement aux cloisonnements d'exploitation et sylvicoles pour compter les racines en FD de Belfort.
Sur la fosse 1 (photos) ont été réalisées les descriptions de sol (surfaces rafraichies de la paroi ; voir Fig. 2) et les mesures de résistance à la pénétration. Des racines déviées, devenant horizontales, y sont visibles au contact entre la bande boisée et le cloisonnement sylvicole (ellipse rouge).



← **Figure 2.** La structure des sols et les traces d'engorgement temporaire montrent un état de compaction et d'asphyxie croissant dans l'ordre bande boisée < cloisonnement sylvicole < cloisonnement d'exploitation. Les lignes blanches permettent de distinguer les différents horizons du sol (zones homogènes).

Grand Est sur des sols similaires à cette étude, grâce au suivi de l'atmosphère du sol en parallèle des traces d'hydromorphie (Goutal *et al.*, 2013; Goutal Pousse *et al.*, 2014). La présence des traces d'engorgement temporaire en surface sous les cloisonnements est liée à la diminution des espaces vides et à la diminution de la capacité d'infiltration de l'eau dans les sols suite au tassement. Ces deux processus augmentent la fréquence et durée de la saturation du sol en eau et de l'asphyxie, la diffusion de l'oxygène dans l'eau étant très faible.

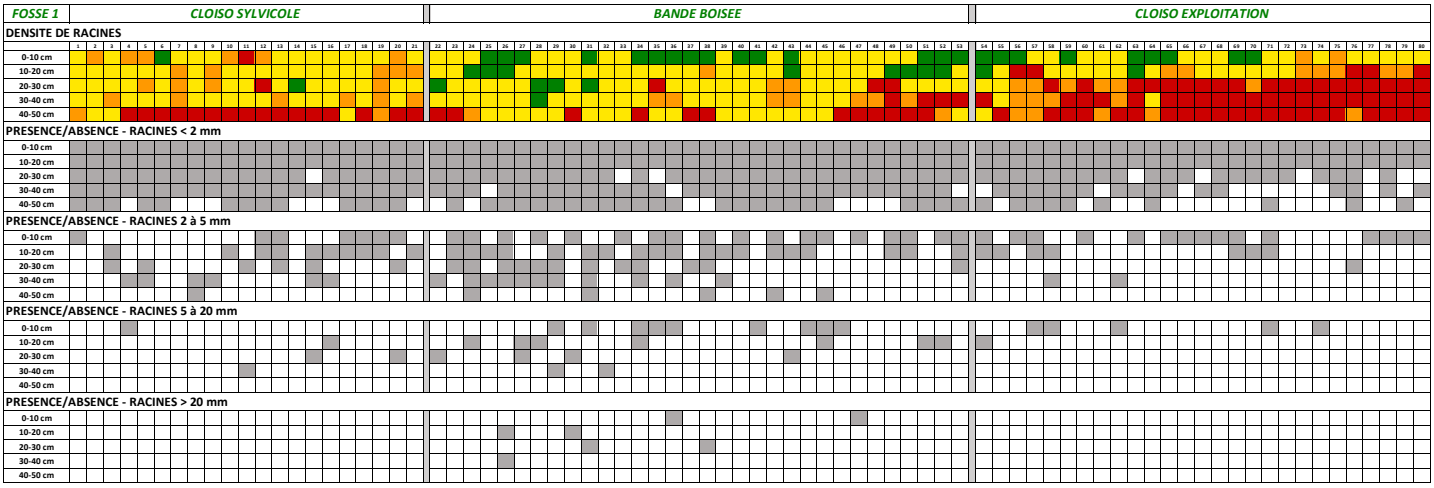
L'enracinement diminue quand l'intensité de déformation du sol sous les engins augmente

L'enracinement a été étudié à l'aide d'une grille de maille 10cm x 10cm (Fig. 3) jusqu'à 50cm de profondeur sur deux fosses. Au sein de chaque cellule, l'abondance des racines a été notée par classe de grosseur (<2mm, 2 à 5mm, 5 à 20mm et > 20mm) (Fig. 4). La première fosse recoupe un cloisonnement d'exploitation orniéré et un cloisonnement sylvicole non orniéré, la seconde fosse recoupe deux cloisonnements sylvicoles non orniérés (Fig. 1).

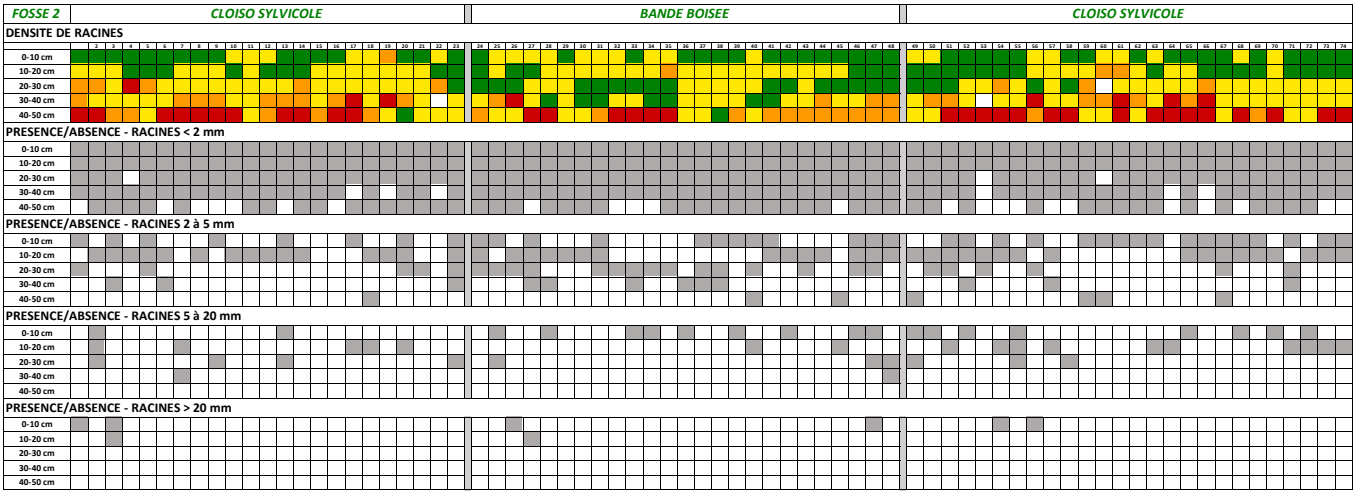
Pour la première fosse, le cloisonnement sylvicole fait 2,10m, la bande boisée 3,20m et le cloisonnement d'exploitation 2,70m de large. La faible largeur apparente du cloisonnement d'exploitation vient de son entretien qui, comme pour les cloisonnements sylvicoles, s'est fait en une seule passe avec un tracteur de 2,20m de large en général. Le cloisonnement d'exploitation est en réalité plus large (≈ 4m), on le constate *via* la densité racinaire (Fig. 4 fosse 1). Cependant, il est difficile à délimiter de manière fiable car il est également possible que le passage du porteur ait eu des effets latéraux sur l'enracinement plus larges que l'emprise de ses roues (ornières encore visibles). Quoi qu'il en soit, l'enracinement global est nettement diminué par le passage des engins, dans l'ordre bande boisée > cloisonnement sylvicole > cloisonnement d'exploitation (Fig. 4). La catégorie 0 à 3 racines par dm² (faible densité) est plus représentée dans les cloisonnements, avec 39% des cellules pour le cloisonnement sylvicole et 67% pour le cloisonnement d'exploitation, que dans la bande boisée (19%).

↑ **Figure 3.** La grille de comptage des racines, un équipement simple et efficace mais un comptage fastidieux

Profil racinaire de la fosse 1



Profil racinaire de la fosse 2



Densité de racines : 1 ou 2 / dm² 2 à 3 / dm² 4 à 10 / dm² 11 à 50 / dm²
Présence/absence de racines de la grosseur considérée : Présence Absence

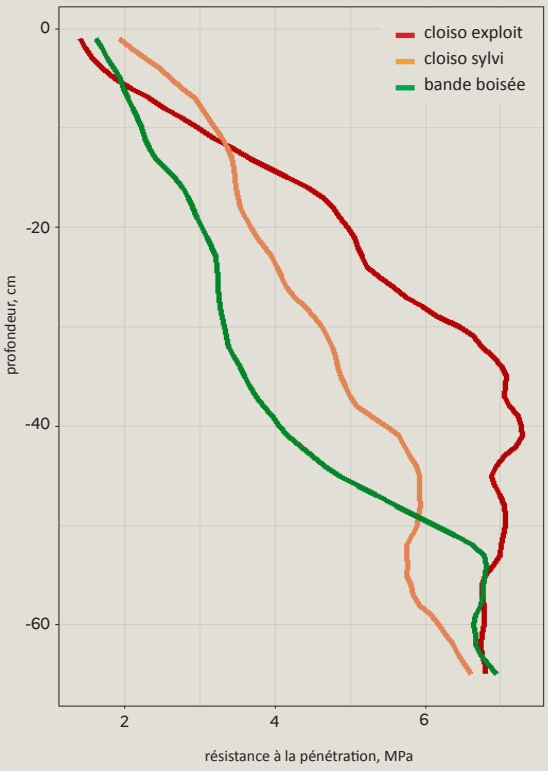
↑ **Figure 4.** La densité globale de racines diminue avec la profondeur et dès qu'on se trouve sous le passage des engins. Les racines de grosseur comprise entre 2 et 20 mm sont les plus affectées par la circulation des engins.

Pour la deuxième fosse, les cloisonnements sylvicoles mesurent 2,30 et 2,60 de large contre 2,50 de large pour la bande boisée; on arrive à 50% de la surface parcellaire affectés par la circulation. L'impact observé de la circulation sur l'enracinement est plus faible que sur la première fosse (Fig. 4). La catégorie 0 à 3 racines par dm² est légèrement plus représentée dans les cloisonnements sylvicoles (28%) que dans la bande boisée (18% des cellules).

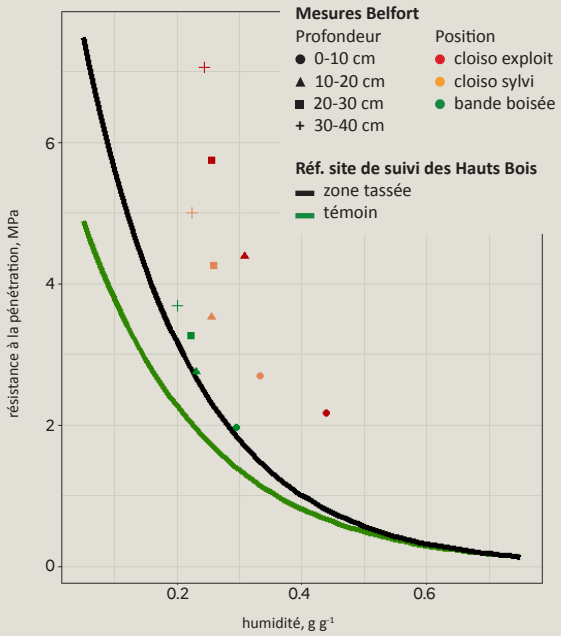
La densité d'enracinement est plus fortement réduite en profondeur qu'en surface (0-10cm) pour les deux fosses et les deux types de cloisonnement (Fig. 4). Par ailleurs, il a été observé une plus forte densité de turricules de vers de terre à la surface des cloisonnements sylvicoles qu'à celle des cloisonnements d'exploitation. Les deux sites expérimentaux de suivi à long terme des effets du tassement montrent que les processus de gel-dégel et d'humectation-dessiccation sont responsables d'un début de restructuration en surface dans les premières années après tassement (durée variable selon le climat). Cette restructuration ne permet pas de rétablir une porosité verticale car la fissuration se fait selon les plans de fragilité du sol qui sont horizontaux après le passage des engins (réaction pour contrer la pression majoritairement verticale exercée par les engins) mais peut permettre un début de recolonisation racinaire et par les organismes du sol (Bottinelli *et al.*, 2014).

Les impacts sur l'enracinement sont en lien avec la résistance à la pénétration

La résistance à la pénétration permet de mesurer la force que les racines doivent contrer pour arriver à prospecter le sol. Les mesures réalisées sur la première fosse montrent que cette résistance est très fortement augmentée par le passage des engins, avec des valeurs plus élevées pour le cloisonnement d'exploitation que pour le cloisonnement sylvicole (Fig. 5). Dans la couche 0-10cm, cependant, la résistance à la pénétration sous le cloisonnement d'exploitation est d'abord très faible puis elle augmente fortement, ce qui est lié à la différence d'humidité avec la bande boisée. La résistance à la pénétration dépend très fortement de l'humidité du sol au moment de la mesure, avec une plus grande facilité de pénétration quand les sols sont humides. Nous retrouvons les mêmes tendances que celles décrites dans la littérature scientifique : les cloisonnements ont une humidité plus élevée que la bande boisée en surface, et cette différence diminue avec la profondeur (Fig. 6). C'est parce que la circulation des engins réduit la capacité d'infiltration verticale de l'eau (Martin, 2019), qui a ainsi tendance à stagner en surface et n'atteint pas les horizons inférieurs (Goutal *et al.*, 2013); stagnation d'autant plus prononcée que la capacité de diffusion latérale de l'eau est aussi naturellement très faible. Les cloisonnements ayant une humidité de surface (0-10cm) plus élevée que la bande boisée, cela réduit l'écart de résistance à la pénétration entre eux (Fig. 6). Dès qu'ils ont une humidité proche de celle de la bande boisée, la différence de résistance est plus forte. Ainsi, sous les cloisonnements, quand les sols sont humides ils sont asphyxiés et quand ils sont secs ils sont improspectables (résistance supérieure à 8 MPa).



↑ **Figure 5.** La résistance à la pénétration augmente avec la profondeur et l'intensité de la circulation



↑ **Figure 6.** La résistance à la pénétration diminue de façon exponentielle quand l'humidité augmente.
Les valeurs trouvées en FD de Belfort sont proches de celles de la FD des Hauts Bois sur le site de suivi à long terme des effets du tassement, mais la résistance à la pénétration de la bande boisée en FD de Belfort est du niveau de celle la zone tassée du dispositif en FD des Hauts Bois (Pousse *et al.*, 2021)

Conclusion

Les résultats montrent que les cloisonnements sylvicoles ont un degré de perturbation intermédiaire entre la bande boisée non circulée et le cloisonnement d'exploitation. L'enracinement est fortement réduit dans ces cloisonnements sylvicoles en lien avec un déficit d'aération et une augmentation de la résistance à la pénétration des racines, conséquences bien connues de la circulation des engins sur les sols forestiers. En extrapolant ces impacts, on constate que près de la moitié de la surface forestière est affectée, sans doute durablement d'après les résultats sur d'autres sites expérimentaux. Cet impact est rarement considéré quand on analyse les coûts-bénéfices de la mécanisation terrestre alors qu'il est conséquent quand on regarde la productivité future des peuplements forestiers. Il est également essentiel d'analyser la perte de réservoir en eau occasionnée par l'ensemble des passages d'engins ; un enracinement plus superficiel et une réduction de la recharge en eau des horizons profonds (stagnation de l'eau en surface en plaine, ruissellement en zone de relief) compromettent fortement les chances d'adaptation des peuplements aux changements climatiques, notamment à l'augmentation des sécheresses.

Adapter nos pratiques semble nécessaire ; il est essentiel, à minima, de bien choisir les dates d'entretien (sols secs) et le matériel le plus léger et étroit possible pour réduire les impacts liés au broyage des cloisonnements sylvicoles. Avec la tendance actuelle à travailler tout au long de l'année avec des matériels assez lourds (question de polyvalence), il est peu probable que les 5 passages (en moyenne) sur la durée de la régénération se fassent toujours sur sol sec.

Cette étude fait également ressortir l'importance de reprendre les cloisonnements et pistes existants, d'en tenir compte dans les schémas de plantation et d'espacer les nouveaux cloisonnements de façon à concentrer les impacts sur la surface la plus faible possible.

Noémie Pousse[1] Olivier Marcet[2], Jorge Blas-Larrosa [3], Stefan Schneider[3]

1. ONF, pôle RDI Chambéry
2. ONF, unité territoriale Belfort
3. ONF, agence Nord Franche-Comté - service forêt

Remerciements aux autres compteurs de racines : Michel Mouhat, Christophe Bolchert, Thibaud Roy

RÉFÉRENCES

- Bottinelli, N., Hallaire, V., Goutal, N., Bonnaud, P., Ranger, J., 2014. Impact of heavy traffic on soil macroporosity of two silty forest soils: Initial effect and short-term recovery. Geoderma 217–218, 10–17. doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.10.025
- Goutal, N., Bottinelli, N., Gelhaye, D., Bonnaud, P., Nourrisson, G., Demaison, J., Brêthes, A., Capowiez, Y., Lamy, F., Johannes, A., Boivin, P., Ranger, J., 2013. Le suivi de la restauration du fonctionnement de deux sols forestiers après tassement dans le Nord Est de la France. Étude Gest. Sols 20, 163–177.
- Goutal Pousse, N., Bock, J., Ranger, J., 2014. Impacts de la circulation d'un porteur forestier sur deux sols sensibles au tassement et dynamique de restauration naturelle. RDV Tech. 43, 33–39.
- Malo, C., Messier, C., 2011. Impact of primary and secondary machinery tracks on fine root growth of sugar maple after selection cutting. Can. J. For. Res. 41, 892–897. doi.org/10.1139/x10-245
- Mariotti, B., Hoshika, Y., Cambi, M., Marra, E., Feng, Z., Paoletti, E., Marchi, E., 2020. Vehicle-induced compaction of forest soil affects plant morphological and physiological attributes: A meta-analysis. For. Ecol. Manag. 462, 118004. doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118004
- Martin, M., 2019. Développement d'un modèle de tranfert hydrique des sols forestiers partiellement tassés dans un contexte de données parcimonieuses. Avignon Université, Avignon, France.
- Pousse, N., Bonnaud, P., Legout, A., Darboux, F., Ranger, J., 2021. Forest soil penetration resistance following heavy traffic: A 10-year field study. Soil Use Manag. doi.org/10.1111/sum.12730
- Wilpert, K. von, Schäffer, J., 2006. Ecological effects of soil compaction and initial recovery dynamics: a preliminary study. Eur. J. For. Res. 125, 129–138. doi.org/10.1007/s10342-005-0108-0

Fonctionnement des arbres et des semis soumis à ennoyage : ajustements écophysiologiques, désordres métaboliques et adaptations

Noyées par une nappe temporaire, les racines manquent rapidement d'oxygène et les arbres ou semis doivent adapter leur fonctionnement. Sont détaillés ici les mécanismes écophysiologiques et les adaptations contribuant à la tolérance de la contrainte d'hypoxie chez certaines espèces, en l'état actuel des connaissances.

Les sols à nappe temporaire sont depuis toujours parmi les plus difficiles à mettre en valeur, en raison de l'amplitude des contraintes imposées aux essences forestières (Lévy et Lefèvre, 2001). L'ennoyage des systèmes racinaires exerce une pression de sélection aux différents stades de leur développement, générant des difficultés de régénération naturelle ou artificielle et des productivités faibles. Les peuplements matures installés sur ce type de sol sont ainsi vulnérables aux dépérissements, exposés à des contraintes hydriques fréquentes qui alternent en cours de saison entre excès d'eau et déficit hydrique. Les chênaies sont très représentées dans ce type de milieu, y compris des chênaies réputées pour leur bois à grain fin et leurs cernes étroits. C'est ainsi que les dépérissements historiques de chêne pédonculé en forêt de Tronçais, après la sécheresse de 1976, étaient localisés sur les sols les plus acides et à nappe temporaire. Plus récemment, les dépérissements des années 2005-2010 en forêt de Vierzon ont pointé une nouvelle fois cette vulnérabilité accrue aux dépérissements, particulièrement pour le chêne pédonculé là encore, sur les rédoxisols à nappe temporaire superficielle.

L'objectif de cet article est de détailler les mécanismes écophysiologiques et les adaptations contribuant à la tolérance de la contrainte hypoxie chez certaines essences forestières, moins connue des forestiers que la tolérance à la contrainte sécheresse. Pourtant des recherches sont menées sur ces mécanismes depuis de nombreuses années. Faisons le point sur les connaissances acquises et sur la compréhension des effets de quelques pratiques sylvicoles sur l'atténuation ou l'amplification de cette contrainte en forêt.

La nappe temporaire induit une diminution de l'oxygène dans le sol

L'atmosphère du sol, principalement localisée dans sa macroporosité, contient de l'air avec une teneur en oxygène proche de celle de l'atmosphère. Lorsque le sol est ennoyé et que la macroporosité se remplit d'eau libre, les propriétés physico-chimiques du sol sont profondément modifiées (niveau d'oxygène, pH, potentiel d'oxydoréduction dit potentiel rédox). L'oxygène consommé par la respiration aérobie des racines et en particulier par les microorganismes du sol n'est pas renouvelé en raison de la faible diffusion de l'oxygène dans l'eau. La teneur en oxygène s'épuise très rapidement. En fonction de la durée de l'ennoyage, le sol passe d'un état de normoxie (teneur normale en oxygène) à un état d'hypoxie (manque d'oxygène) voire d'anoxie (absence complète d'oxygène, en milieux tourbeux par exemple). La composition des populations microbiennes et leurs activités évoluent d'un métabolisme aérobie vers un métabolisme anaérobie (voir Petitjean *et al.*, ce numéro). Plus la teneur en oxygène du sol est faible, plus le taux de survie des semis diminue. Le seuil de teneur en oxygène du sol pour lequel les fonctions physiologiques et la croissance sont affectées dépend de l'espèce considérée et de son stade de développement. Lorsque la nappe disparait, on observe alors une ré-oxygénation rapide du milieu. Le temps de retour à l'état de milieu aéré, normoxique, est variable selon la macroporosité des horizons situés au-dessus du plancher (environ une dizaine de jours).

Pendant la phase d'ennoyage dans les sols à nappe temporaire, les racines fonctionnent en hypoxie, parfois proche de l'anoxie lorsque la durée de l'ennoyage est longue. Or les arbres, qui sont des organismes aérobies, dépendent d'un apport régulier en oxygène pour toutes leurs cellules vivantes. L'interruption de la disponibilité de l'oxygène, même limitée au compartiment racinaire, entraîne donc une perturbation

de leur métabolisme s'ils n'ont pas des adaptations permettant l'apport d'oxygène aux organes souterrains (comme l'exemple particulier des pneumatophores dans les mangroves). Les besoins en oxygène varient selon les tissus et leur activité : la respiration est plus forte dans une racine en croissance que dans une racine mature, le déficit en oxygène y entrainera plus rapidement des perturbations.

L'hydromorphie, l'ennoyage, l'anoxie : des notions précises entre causes et conséquences

L'**engorgement** s'applique à un sol ou un horizon dont la macroporosité est occupée par de l'eau libre, c'est-à-dire une nappe.

Toute partie d'un système racinaire située dans un sol engorgé est soumis à **ennoyage**. L'hypoxie est le déficit en oxygène subi par les racines situées en sol engorgé. Elle est parfois proche de l'**anoxie** (absence totale d'oxygène).

Le terme **hydromorphie** correspond aux traces laissées sur le profil par les processus de redistribution du fer avec passage par différents états. Il y a couramment confusion entre la conséquence (hydromorphie) et la cause (engorgement, nappe).

Une **nappe temporaire**, qui fluctue entre un plancher et la surface du sol, est générée par un excès de pluviométrie par rapport à l'évapotranspiration du peuplement. C'est donc très différent d'une nappe phréatique profonde ou d'un système alluvial.

Nappe printanière : une contrainte de plus lors de la délicate phase de reprise de végétation

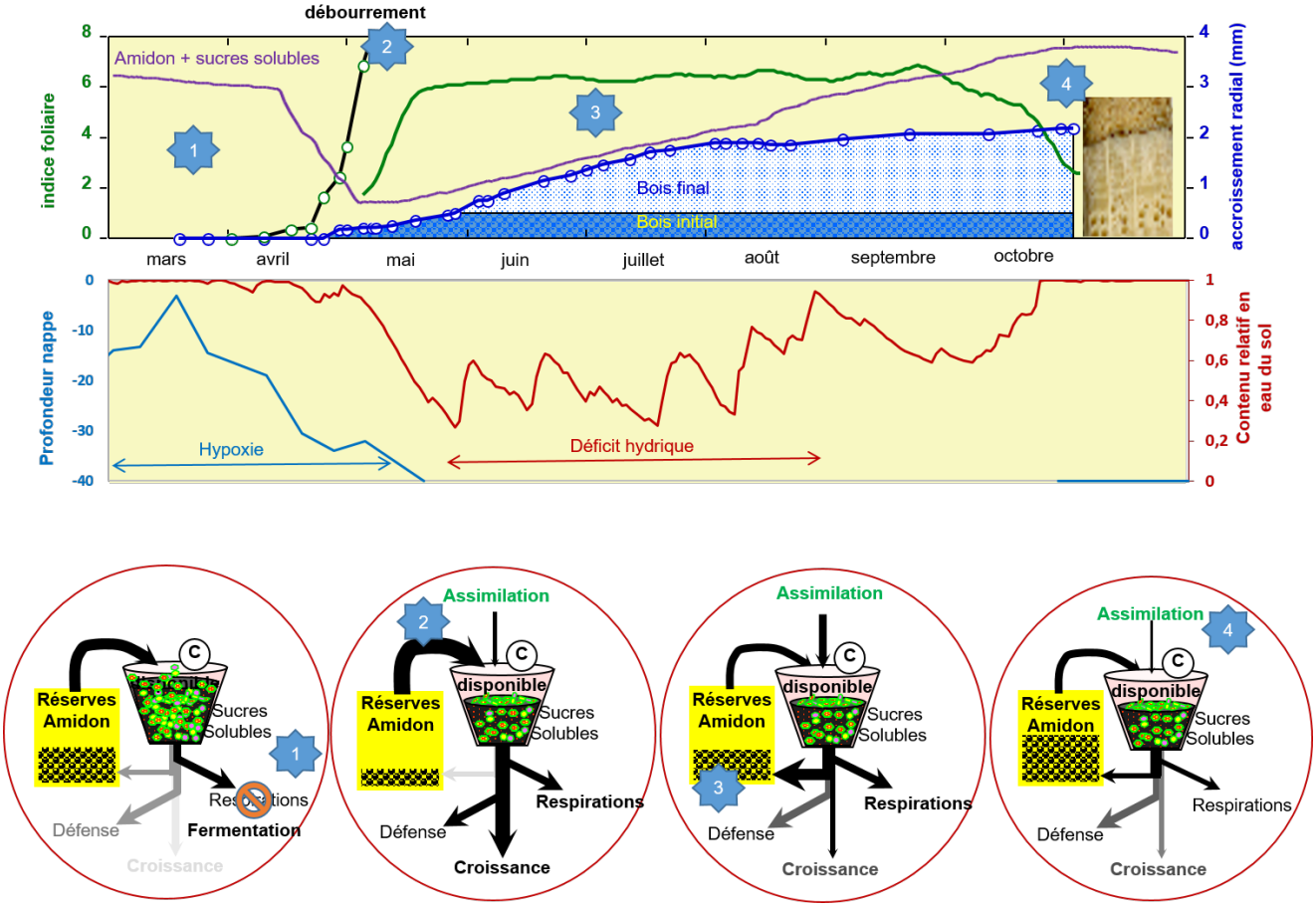
La nappe temporaire est essentiellement hivernale et printanière, et c'est à la reprise de la saison de végétation que les impacts sont les plus dommageables. Une forte mobilisation de carbone issu des réserves d'amidon et sucres solubles intervient avant que la photosynthèse ne soit possible : désendurcissement au froid, levée de dormance puis débourrement, allongement et expansion foliaire, croissance racinaire, mise en place des premières rangées de vaisseaux conducteurs, rétablissement des potentiels hydriques et osmotiques, augmentation de la respiration d'entretien et de la croissance… Cette réactivation printanière exerce une forte tension sur le schéma d'allocation du carbone, particulièrement pour les espèces caducifoliées et plus encore pour le chêne qui élabore son bois initial avant complète expansion de sa surface foliaire (Fig. 1). L'état initial du stock de réserves carbonées de l'arbre à la sortie de l'hiver est donc déterminant pendant cette phase délicate de réactivation. Ce stock est largement tributaire de l'effet différé des contraintes intervenues l'année précédente (déficit hydrique, défoliation, infection oïdium…).

Lorsque la photosynthèse se met en place, l'absorption racinaire compense la transpiration des arbres et la nappe temporaire disparait. Le réservoir en eau du sol est mobilisé et rechargé au rythme des précipitations, le schéma d'allocation du carbone est en même temps modifié, avec une forte assimilation de carbone, investie à la fois en stockage, en croissance aérienne et souterraine, qui s'accompagne d'une respiration accrue. On parle généralement d'une respiration dite de croissance qui correspond aux besoins métaboliques dédiés à la croissance et que l'on distingue d'une respiration de maintenance dédiée aux besoins métaboliques de base « d'entretien » des tissus vivants. Ce schéma sera à nouveau modifié si un déficit hydrique s'installe, avec régulation stomatique, diminution de l'assimilation de carbone et arrêt de croissance.

L'hypoxie induit une diminution de photosynthèse, de transpiration et de transport de l'eau

De nombreuses expériences d'écophysiologie comparative, essentiellement menées en conditions contrôlées, ont été conduites depuis les années 1990 sur des semis ou sur de jeunes plants en pots, permettant d'imposer la hauteur de la nappe, de suivre la teneur en oxygène dans l'eau du sol, le potentiel rédox du substrat et la cinétique de retrait de la nappe. En effet, après le dépérissement du chêne pédonculé en forêt de Tronçais dans les années 1980, les gestionnaires se sont interrogés sur les espèces tolérantes à l'ennoyage qui pourraient être substituées au chêne pédonculé. Pour identifier des marqueurs de tolérance ou de sensibilité à l'hypoxie, la plupart des travaux ont comparé une espèce réputée très sensible à l'anoxie (chêne rouge, hêtre) à des espèces plus tolérantes (chênes pédonculé, sessile, des marais). Les premiers travaux se sont intéressés aux modifications des échanges gazeux foliaires, la photosynthèse et la transpiration. D'ailleurs des travaux similaires ont eu lieu à la même époque aux États-Unis (sur *Fraxinus pennsylvanica*, *Nyssa aquatiqua*, *Quercus alba*, *Quercus nigra* notamment) qui pourraient élargir la liste d'essences tolérantes à ces contraintes.

Il a ainsi été montré que l'ennoyage partiel ou total du système racinaire induit d'importantes perturbations dans l'assimilation du carbone : la capacité photosynthétique est inhibée par une forte réduction de la conductance stomatique et des teneurs en chlorophylles s'accompagnant de dysfonctionnements au niveau cellulaire. Ces désordres sont graduellement plus marqués sur les espèces plus sensibles comme le chêne rouge et le hêtre, comparativement au chêne pédonculé, ce qui confirme la bonne corrélation existant entre perturbations à court terme de la photosynthèse et leur autécologie (Dreyer, 1994). Chez les chênes sessile, pédonculé et rouge, l'ombrage des semis permettrait de limiter et de retarder l'apparition de ces perturbations physiologiques (Wagner et Dreyer, 1997) ; favoriser un abri dans les régénérations naturelles ou artificielles pourrait ainsi diminuer les risques d'échec.



↑ **Figure 1.** Étapes clés au cours d'une saison de végétation illustrées ici chez le chêne sur sol à nappe temporaire.

(1) Fin d'hiver et début de printemps : pas de feuille ni de photosynthèse, la respiration et le métabolisme des tissus vivants mobilisent des réserves carbonées accumulées l'année précédente qui diminuent lentement ; la nappe génère une hypoxie qui modifie le métabolisme dans les cellules racinaires avec l'arrêt de la respiration, substituée par la fermentation dont le rendement énergétique est fortement réduit, mobilisant aussi des sucres.

(2) Débourrement et expansion du feuillage (augmentation de l'indice foliaire), reprise de l'accroissement radial (croissance du bois initial), effondrement du stock total de réserves carbonées car la photosynthèse n'est pas encore active ; la nappe disparait en mai lorsque l'évapotranspiration potentielle augmente et que la transpiration des arbres démarre.

(3) L'eau en excès étant consommée, la transpiration génère une absorption équivalente dans la réserve utile. L'indice foliaire est en place, transpiration et photosynthèse sont maximales, le carbone assimilé est alloué à la fois à la croissance du bois final et à la reconstitution des réserves carbonées. En cas de déficit hydrique, la régulation stomatique induit une réduction de transpiration et de photosynthèse, la croissance du bois final est stoppée.

(4) À la chute des feuilles, l'arrêt de la transpiration et de l'interception des précipitations permet le remplissage du réservoir en eau du sol jusqu'à atteindre la capacité au champ. Sur cet exemple, la nappe n'est pas encore remise en charge en fin d'année.

Les schémas du bas synthétisent les modifications, au cours de ces 4 étapes clés, de l'allocation du carbone vers les principales fonctions : croissance, respiration (ou fermentation racinaire en situation d'hypoxie), stockage et défense. Le stockage des glucides se fait essentiellement sous forme d'amidon (schématisé par une réserve de grains d'amidon noir dans le pavé jaune). Les sucres solubles sont disponibles pour les cellules et directement utilisables (ils alimentent le métabolisme) et peuvent être transportés (dans la sève élaborée du phloème). Ce sont de petites molécules schématisées en vert dans un « seau ». L'épaisseur des flèches schématise l'intensité du flux de C vers la fonction. Plus la flèche est claire, moins la fonction est active (l'intensité de la fonction défense est largement hypothétique, rarement quantifiée, elle se caractérise par la synthèse de molécules complexes naturellement présentes et peut être stimulée par exemple en réponse à des agressions biotiques).

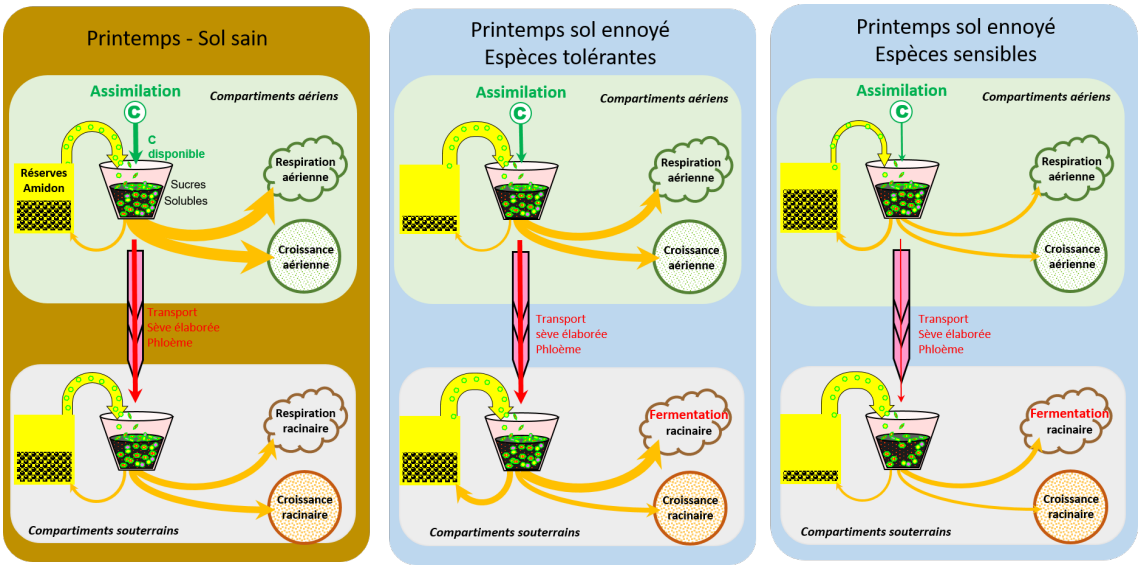
Les expériences d'écophysiologie comparative montrent qu'en conditions d'ennoyage, la transpiration est davantage réduite chez le hêtre que chez le chêne pédonculé, en lien avec une perte de conductivité hydraulique des racines, une chute de potentiel hydrique foliaire et de conductance hydraulique rapportée à la masse foliaire (Schmull et Thomas, 2000). Plus récemment, on a cherché à comprendre le mécanisme sous-jacent pour la conductivité racinaire. La crise énergétique (décrite plus loin) dans les cellules en hypoxie s'accompagne d'une réduction de perméabilité cellulaire, en lien avec l'inhibition des aquaporines de la membrane (protéines qui forment les pores). Au demeurant l'implication des aquaporines dans l'amélioration du transport de l'eau dès les premières heures après le début de l'ennoyage a été démontrée récemment (Parent, 2008).

La réduction de la transpiration limite l'absorption d'eau mais aussi de nutriments par l'arbre

La fermeture des stomates observée lorsque le système racinaire est ennoyé limite la transpiration au niveau des feuilles, diminue le flux de sève brute dans le tronc, ce qui a pour conséquence de limiter l'absorption racinaire d'eau et d'éléments minéraux et de réduire le transport par le xylème vers les feuilles. Ainsi, les teneurs foliaires en éléments minéraux (en particulier azote, souffre, potassium) sont parfois sensiblement diminuées au cours de l'ennoyage, sans pour autant atteindre des seuils de carence (Colin-Belgrand *et al.*, 1991). Les modifications de disponibilité minérale dans les sols ennoyés ne semblent pas toujours impacter la nutrition minérale des arbres. Ainsi, l'ennoyage réduit fortement l'absorption de l'azote chez le hêtre mais pas chez les chênes pédonculé et sessile. La disparition des nitrates dans la rhizosphère ennoyée est partiellement compensée par une accumulation d'ammonium qui est efficacement assimilée par les semis de chênes pédonculé et sessile (Gérard, 2008). Bien que les seuils de carence azotée ne soient pas atteints, l'ennoyage provoque une perturbation de la nutrition azotée remarquée à travers une baisse des teneurs foliaires en acides aminés et en chlorophylles (molécules riches en azote), qui a été observée chez ces deux espèces de chênes.

Sans oxygène point de respiration : désordres dans le métabolisme du carbone

Pendant l'ennoyage, les cellules du tissu racinaire sont en hypoxie. L'oxygène étant essentiellement destiné à la respiration mitochondriale pour produire de l'énergie (principalement sous forme d'ATP), ce processus ne peut être maintenu et doit être remplacé par d'autres voies (Fig. 2).



↑ **Figure 2.** Effets de l'hypoxie sur l'allocation du carbone dans les compartiments aériens et souterrains au printemps (étape 2 de la figure 1), comparaison d'espèces décidues tolérantes et sensibles à l'ennoyage en référence à un sol sain.

La quantité et les formes d'hydrates de carbone disponibles dans les parties aériennes ou souterraines sont proportionnelles à la taille des réservoirs. L'intensité des flux de carbone est proportionnelle à la taille des flèches : en vert pour les photo-assimilats, en jaune la mobilisation des sucres issus des réserves d'amidon (hydrolysées en sucres solubles), en orange l'allocation des sucres solubles vers les fonctions de croissance, de respiration et de stockage. Le transport des sucres solubles entre les deux compartiments via le phloème est figuré en rouge. Chez les espèces tolérantes, les sucres sont transportés des feuilles vers les racines et approvisionnent activement la voie fermentaire. Chez les espèces sensibles, le transport des sucres vers les racines via le phloème est inhibé, les sucres foliaires s'accumulent alors sous forme d'amidon. L'approvisionnement en sucre de la voie fermentaire dans les cellules racinaires sous hypoxie est limité par la disponibilité des réserves d'amidon racinaire (risque d'épuisement des réserves glucidiques racinaires et de mortalité).

Pour les cellules racinaires, c'est donc une question de survie : en situation d'hypoxie, la voie de la glycolyse est amplifiée mais sa production énergétique est 18 fois moins efficace que la respiration aérobie, et elle est complétée par la voie fermentaire. En raison de la faible efficacité de ce processus à produire des équivalents énergétiques (ATP), le métabolisme énergétique et le métabolisme du carbone des arbres sont généralement fortement affectés. L'ensemble du métabolisme est ralenti pour surmonter la crise énergétique provoquée par l'hypoxie cellulaire.

Les racines peuvent compenser le faible rendement énergétique de la fermentation selon deux voies : (1) en diminuant la demande d'énergie par une réduction des processus énergivores, tels que la croissance des racines et/ou l'absorption des nutriments, ou (2) en consommant davantage de glucides par unité de temps afin de générer suffisamment d'équivalents énergétiques (Kreuzwieser *et al.*, 2004). Une caractéristique cruciale de la tolérance à l'ennoyage est l'approvisionnement régulier des racines en hydrates de carbone (glucides) afin d'alimenter la glycolyse et la fermentation alcoolique dans les tissus sous hypoxie. Or, nous avons vu que dans le même temps l'assimilation foliaire du carbone est réduite par l'ennoyage. La mobilisation des réserves carbonées (amidon) et / ou le transport des glucides depuis les parties aériennes vers les racines avec le maintien d'une assimilation réduite sont des caractéristiques des espèces plus tolérantes à l'ennoyage (Fig. 2). Les arbres sensibles au stress ne parviennent pas à maintenir une disponibilité suffisante en hydrates de carbone dans les tissus sous hypoxie, ce qui entraîne la mortalité des cellules stressées (Kreuzwieser et Rennenberg, 2014).

En effet, sans doute en raison de la réduction du transport par le phloème (tissu conducteur de la sève élaborée), on observe que plus les arbres sont sensibles à l'ennoyage, plus ils accumulent des sucres solubles et de l'amidon dans leurs feuilles en situation d'hypoxie racinaire. Ainsi, la croissance et la survie des racines, voire des semis entiers, sont affectées négativement à la fois par les changements du métabolisme du carbone racinaire et par l'altération de l'allocation du carbone aux racines via le transport phloémien.

Les voies fermentaires décrites ci-dessus se caractérisent également par une production accrue d'éthylène et par l'accumulation de produits toxiques (produits finaux des voies métaboliques fermentaires non recyclés). Il en découle une cascade de signaux chimiques comprenant un réseau d'hormones (éthylène, auxine, acide abscissique, cytokine, gibbérelline…) et d'autres molécules secondaires de signalisation (Dat *et al*, 2004). Ces phytohormones sont impliquées dans la régulation stomatique, l'allongement des tiges et racines, l'initiation de nouvelles racines, le transport de l'eau et la mort cellulaire programmée qui permet la formation de lacunes dans les tissus racinaires (voir ci-après).

Des adaptations racinaires pour tolérer l'ennoyage

Chez les espèces tolérantes, des réponses morphologiques racinaires se mettent en place très rapidement (quelques heures à quelques jours) après ennoyage : des lenticelles hypertrophiées se forment au collet du pivot racinaire, des racines superficielles voir adventives apparaissent (Fig. 3) et des lacunes se forment dans les tissus racinaires (Parent *et al.*, 2008). De nombreuses expérimentations, sur semis ou jeunes plants de chênes, ont mis en évidence une forte diversité intra- et inter-spécifique dans l'apparition de ces réponses morphologiques (Parelle, 2006). Bien que le rôle des lenticelles hypertrophiées ne soit pas encore bien compris, on observe régulièrement leur formation en cas de stress hypoxique et elles sont plus nombreuses chez les espèces plus tolérantes à l'ennoyage. L'excès d'eau dans le sol se traduit par une forte inhibition de la croissance racinaire, avec formation de nécroses et mortalité, mais les espèces les plus tolérantes sont capables de mieux explorer la couche superficielle du sol en développant des racines latérales superficielles pendant l'ennoyage. Ces racines sont susceptibles d'être moins fortement et moins longtemps soumises au stress hypoxique (Colin-Belgrand *et al.*, 1991; Gérard, 2008; Parelle, 2006).

Les composés phyto-toxiques, comme l'acétaldéhyde, issus des voies fermentaires nuisent au métabolisme racinaire en abaissant le pH et induisent la mort cellulaire. Si l'une des principales caractéristiques de la tolérance des arbres à l'engorgement semble être l'apport régulier d'hydrates de carbone aux racines, il semble aussi que les racines des arbres tolérants évitent l'accumulation des molécules phyto-toxiques produites lors de la fermentation. Ces composés (CO_2, éthanol, CH_4) pourraient être détoxifiés par circulation, sous forme gazeuse via les lacunes formées dans les tissus des racines et élimination dans l'atmosphère à travers les lenticelles hypertrophiées. On suppose que celles-ci pourraient aussi faciliter l'entrée et la diffusion de l'oxygène de l'air vers les racines (Parent *et al.*, 2008).

B. Gérard, UMR SILVA

← **Figure 3.** Système racinaire de semis de chêne pédonculé 39 jours après germination ; le semis a été soumis à ennoyage à partir du 5ème jour après germination.

Des lenticelles hypertrophiées sont apparues sur le collet et à la base du pivot ainsi que des racines superficielles latérales

La phénologie foliaire : une stratégie d'esquive de la contrainte hypoxie ?

Parmi les traits de tolérance à l'ennoyage, le retard de débourrement au printemps en présence d'une nappe temporaire est parfois évoqué comme un trait adaptatif. En effet, plusieurs observations très anciennes rapportent la présence de chênes pédonculés tardifs sur les sols à nappe temporaire : forêt de Vierzon (Molleveaux, 1926), de Brin (Riedacker, 1968), de Pourlans (Boutte et Legrand, 1996), dans la vallée de la Saône entre Pontarlier et Saint Amour… Or, en comparant les dates de débourrement soit sur différents types de sol à nappe temporaire plus ou moins superficielles et des sols sains, soit sur un même sol à nappe temporaire pour des années climatiquement contrastées, nous avons observé que le débourrement était différé lorsque la nappe est présente. Et cette observation vaut pour diverses essences : chêne pédonculé sur rédoxisol ou pseudogley podzolique, hêtre sur rédoxisol, alisier sur pseudogley acide… En revanche, les années à printemps sec où la nappe n'est pas présente au moment du débourrement, les différences de phénologie foliaire se réduisent voire disparaissent entre les sols sains et les sols à engorgement temporaire. Des signaux hormonaux induits par l'ennoyage sont vraisemblablement impliqués dans la signalisation entre partie souterraine et aérienne. La production racinaire d'éthylène pourrait être responsable d'une inhibition de l'acide gibbérellique impliqué dans le débourrement. Mais cette hypothèse n'a pas encore été testée.

Levée de la contrainte… retour à un fonctionnement aérobie

Lorsque l'évapotranspiration du couvert devient à nouveau supérieure aux précipitations, la nappe disparait, le sol se ré-oxygène, le métabolisme aérobie et la croissance racinaire peuvent reprendre. Peu d'études se sont intéressées aux comportements des arbres dans la phase de récupération après les stress induits par l'ennoyage. Pourtant, le comportement des semis pendant la phase de ressuyage permet de différencier fortement les espèces tolérantes ou sensibles à l'excès d'eau. Même si elles ne retrouvent pas un fonctionnement optimal après plusieurs semaines de ressuyage, les espèces les plus tolérantes montrent une meilleure capacité de récupération de leur croissance et de leur physiologie, tandis que les plus sensibles restent durablement affaiblies. Le chêne pédonculé montre la meilleure capacité de récupération, alors que le chêne sessile et le hêtre présentent progressivement des nécroses foliaires, un potentiel hydrique décroissant et des niveaux de photosynthèse très faibles pendant plusieurs semaines après levée de l'ennoyage. Enfin, le chêne rouge subit une très forte sénescence foliaire et une mortalité non négligeable au cours du ressuyage (Wagner et Dreyer, 1997). Les semis de chêne pédonculé montrent une plus forte reprise de la croissance racinaire -et cette reprise se met en place plus rapidement- que chez le chêne sessile (Gérard, 2008).

Les sols à engorgement temporaire : des alternances rapides de contraintes hydriques pour les arbres

Au-delà de ces perturbations métaboliques, morphologiques et écophysiologiques, les sols à nappe temporaire génèrent alternativement deux contraintes se succédant rapidement pendant la saison : semis, jeunes plants et arbres sont soumis à un excès d'eau en hiver et au printemps, puis à un déficit hydrique en été voire en automne (Lefèvre *et al*, 2006) (Fig. 1). Selon la sensibilité à la réduction de la disponibilité de l'eau, d'une part, et à l'appauvrissement en oxygène dû à la nappe temporaire, d'autre part, les performances physiologiques, la croissance et la compétitivité des arbres sont affectées de manière contrastée. La sécheresse et l'excès d'eau perturbent la nutrition minérale des arbres en modifiant d'une part la disponibilité des nutriments dans le sol et d'autre part la physiologie des systèmes racinaires mycorhizés des arbres et leur capacité d'absorption (Kreuzwieser et Gessler, 2010).

Notons que certaines espèces (hêtre, merisier, érables sycomore et plane) n'ont pas un système racinaire capable de percer le plancher. Leur système racinaire reste alors très superficiel et leur réservoir en eau utile est très faible : la contrainte liée au déficit hydrique s'installera donc très tôt, et elle sera longue et intense. Pour ces essences, les dépérissements observés sont souvent attribués à la contrainte sécheresse qui devient prépondérante à la contrainte hypoxie. D'autres essences comme les chênes, le charme, le bouleau, les aulnes ou les pins sylvestre et Weymouth sont capables de traverser le plancher grâce à leur pivot, ou à des pivots secondaires, leur permettant d'accéder à un second réservoir d'eau en profondeur. La distribution des racines fines dans les horizons situés sous le plancher sera la principale origine du comportement différentiel des essences en période de déficit hydrique. Toutefois, les propriétés intrinsèques des sols à nappe temporaire (faible porosité, densité apparente et compacité fortes du plancher, faible profondeur utile, structure instable dans le temps, texture grossière des horizons superficiels) (Petitjean *et al.*, ce numéro), conduisent à des réserves utiles limitées. Dans ces conditions, la fréquence et l'intensité des épisodes de déficit hydrique sont amplifiées. Quelques facteurs de compensation peuvent moduler la durée et l'intensité du déficit hydrique : humidité légèrement plus élevée en début d'été retardant l'entrée en déficit hydrique, écoulement rapide des précipitations estivales jusqu'au plancher où se forme un réservoir d'eau très facilement utilisable.

Soulignons enfin qu'en cas d'épisodes de pluies intenses en cours d'été, la nappe temporaire peut réapparaitre rapidement, alors que les arbres sont en pleine activité physiologique (transpiration, photosynthèse, croissance aérienne et souterraine…). Cette situation d'ennoyage estival a été assez peu étudiée, mais nos observations en cours semblent révéler des ralentissements de la dynamique de croissance du tronc et une modification de l'utilisation du carbone issu des réserves glucidiques.

La fluctuation de la hauteur de la nappe est influencée par la gestion du couvert

La dynamique de hauteur de nappe, tout comme l'intensité des déficits hydriques estivaux, est fortement dépendante de la phénologie du couvert : sempervirent ou décidu ou mixte, indice foliaire, degré de fermeture. Il est ainsi clairement établi que la nappe temporaire est moins proche de la surface et disparait plus rapidement au printemps sous couvert résineux que décidu. La permanence de l'indice foliaire agit sur les deux flux majeurs qui régulent la hauteur de nappe : l'interception des précipitations qui ralentit l'accumulation d'eau au-dessus du plancher et l'évapotranspiration du couvert qui pompe l'eau du sol (Lévy, 1969). Il est aussi établi que la durée d'engorgement et la hauteur de la nappe dans le sol sont plus contraignantes en régénération par plantation après coupe à blanc qu'en peuplement mature (G. Lévy, 1990). L'évapotranspiration réelle et l'interception des précipitations sont plus fortes en peuplement mature, contribuant à une dynamique plus rapide de disparition de la nappe. Cette phénologie sempervirente et à indice foliaire élevé est donc plus efficace pour limiter la contrainte hypoxie au printemps, mais à l'inverse devient plus contraignante en période de déficit hydrique. Il s'agit donc de doser le compromis entre les deux contraintes, dont l'impact respectif dépend de la sensibilité de chaque espèce (Lefèvre *et al.*, 2006).

Conclusion

L'ennoyage des racines situées entre le plancher et la surface du sol induit un déficit en oxygène qui s'accompagne de multiples dysfonctionnements métaboliques et physiologiques des semis et des arbres. Il entraine un déclin de leur croissance, de leur état sanitaire et de leur survie. Parmi les effets les plus importants figurent une altération des échanges gazeux, une réduction de l'absorption d'eau et de nutriments, du transport d'eau entre les parties aériennes et souterraines, puis de profondes perturbations du métabolisme carboné. De plus, l'alternance rapide de période d'excès d'eau puis de déficit hydrique est particulièrement difficile à gérer. Peu d'essences de production sont tolérantes aux deux contraintes. Outre les modifications climatiques, les perturbations anthropiques, au premier rang desquelles figure le tassement des sols, et tous les aléas biotiques pourraient amplifier la vulnérabilité des arbres à la contrainte hypoxie. Les phytophages (ongulés ou insectes), parasites secondaires, maladies fongiques foliaires et racinaires (*Phytopthora* en particulier) affectent les racines fines et le statut carboné et azoté des semis et des arbres, statut stratégique dans la tolérance et la résilience à l'hypoxie. Les forestiers des siècles passés ont réussi à installer et à éduquer des chênaies aujourd'hui réputées. Une meilleure compréhension des conséquences des itinéraires techniques sur le bilan hydrique des peuplements tout au long de la saison est une des clés pour doser finement les interventions et les mélanges d'essences. Tout mettre en œuvre pour préserver la porosité et la fertilité de ces sols à nappe temporaire est une autre clé de succès pour renouveler ces peuplements sans aggraver l'amplitude de ces contraintes.

Nathalie Bréda et Bastien Gérard
UMR Silva (Université de Lorraine – AgroParisTech – INRAE), Nancy

RÉFÉRENCES

- Boutte B., Legrand P., 1996. Le dépérissement actuel du chêne pedonculé en Foret Domaniale de Pourlans (Saône-et-Loire). Revue des Sciences Naturelles d'Auvergne, n° 60 pp. 27-44
- Colin-Belgrand M., Dreyer E., Biron, P., 1991. Sensitivity of seedlings from different oak species to waterloggings: effects on root growth and mineral nutrition. Annales Des Sciences Forestieres, vol. 48(2) pp. 193-204
- Dat J. F., Capelli N., Folzer H., Bourgeade P., Badot P.-M., 2004. Sensing and signalling during plant flooding. Plant Physiology and Biochemistry, vol. 42(4) pp. 273-282
- Dreyer E., 1994. Compared sensitivity of seedlings from 3 woody species (Quercus robur L, Quercus rubra L and Fagus silvatica L) to water-logging and associated root hypoxia: Effects on water relations and photosynthesis. Annales Des Sciences Forestieres vol. 51(4) pp. 417-429
- Gérard B., 2008. Recherche de marqueurs physiologiques de tolérance à l'ennoyage chez le chêne pédonculé (Quercus robur L.) et le chêne sessile (Quercus petraea [Matt] Liebl.). Thèse de doctorat en Biologie végétale, Université de Franche-Comté
- Kreuzwieser J., Gessler A., 2010. Global climate change and tree nutrition: influence of water availability. Tree Physiology, vol. 30(9) pp. 1221-1234
- Kreuzwieser J., Papadopoulou E., Rennenberg H., 2004. Interaction of Flooding with Carbon Metabolism of Forest Trees. Plant Biology, vol. 6(3) pp. 299-306
- Kreuzwieser J., Rennenberg H., 2014. Molecular and physiological responses of trees to waterlogging stress. Plant, Cell & Environment vol. 37(10) pp. 2245-2259
- Lefèvre Y., Lebourgeois F., Bréda N., 2006. Comportement des essences forestières sur sol à nappe temporaire. Revue Forestière Française vol LVIII(4) pp. 295-304
- Lévy G., 1969. Premiers résultats d'étude comparée de la nappe temporaire des pseudogleys sous résineux et sous feuillus. Annales Des Sciences Forestieres, vol. 26(1) pp. 65-79
- Lévy G., 1990. Incidences possibles d'une coupe à blanc sur la remontée des nappes et la stabilité structurale des sols à hydromorphie temporaire. Revue Forestière Française XLII(5) pp. 517-522.
- Lévy G., Lefèvre Y., 2001. La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire : contraintes subies, choix des essences, interventions et gestion durable. Nancy: ENGREF. 223 p.
- Molleveaux J., 1926. La faillite du chêne tardif à Vierzon. Revue des Eaux et Forets, vol. 64(12), pp. 614-617
- Parelle J., 2006. Réponses de jeunes chênes de deux espèces (Quercus robur L., Q. petraea [Matt] Liebl.) à l'hypoxie racinaire : Marqueurs physiologiques, moléculaires et génétiques de sensibilité et application à la comparaison des deux espèces. Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy 1.
- Parent C., 2008. Étude de la réponse à l'ennoyage chez le chêne sessile (Quercus petraea) et le chêne pédonculé (Quercus robur) : implication de l'hémoglobine non-symbiotique. Thèse de doctorat. Université de Bourgogne Franche Comté, Besançon.
- Parent C., Capelli N., Berger A., Crèvecoeur M., Dat J. F., 2008. An Overview of Plant Responses to Soil Waterlogging. Plant Stress, vol. 2(1) pp. 20-27
- Riedacker A., 1968. Le chêne de juin à l'étang de Brin. Rev. For. Fr. XX(7-8) pp. 487-492
- Schmull M., Thomas F. M., 2000. Morphological and physiological reactions of young deciduous trees (Quercus robur L., Q. petraea [Matt.] Liebl., Fagus sylvatica L.) to waterlogging. *Plant And Soil, vol. 225*(1-2) pp. 227-242
- 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 Forestieres, vol. 54(5), pp. 409-429

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 disparait 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 entraine 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.

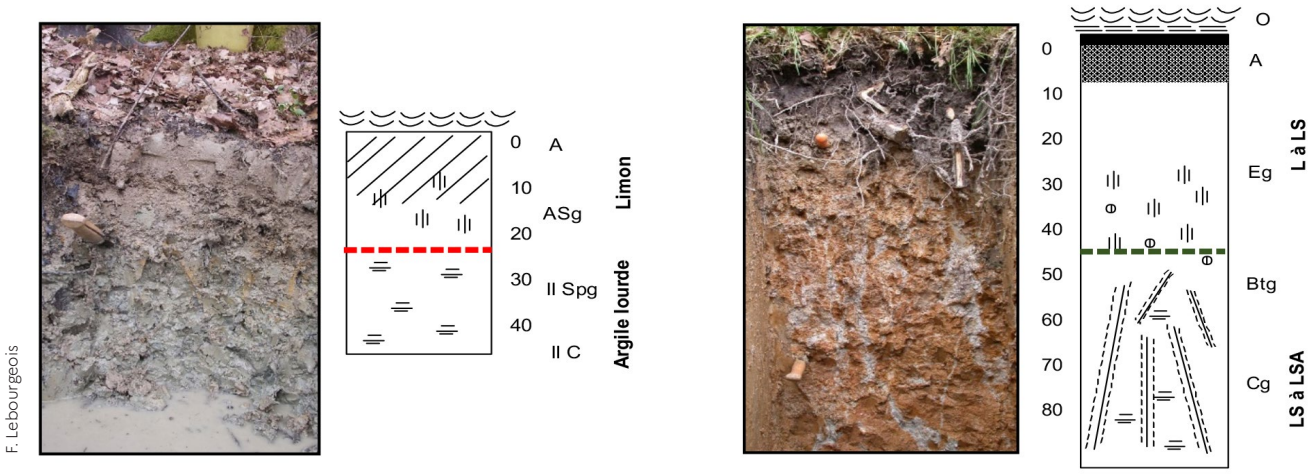
Présentation des dispositifs expérimentaux et des sols étudiés

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 differencié
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.

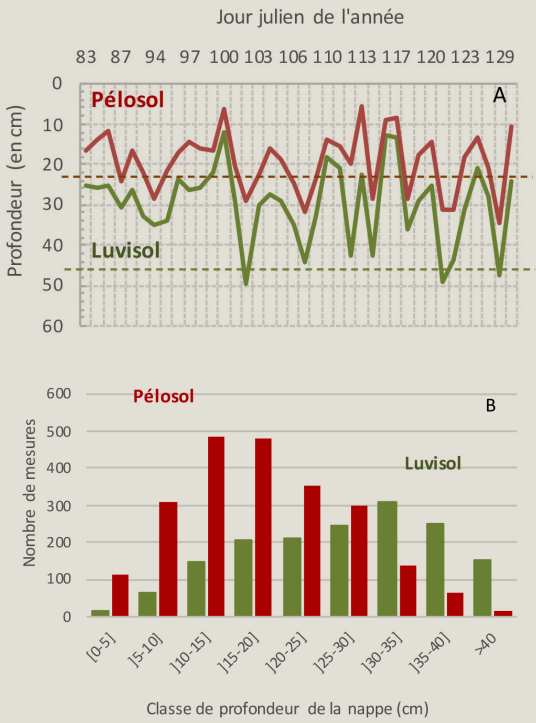
surface (environ 25 cm). Sur ce sol, les deux contraintes (hypoxie et sécheresse) sont fortes et s'enchaînent rapidement ce qui en fait l'un des plus contraignants pour les arbres forestiers.

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).

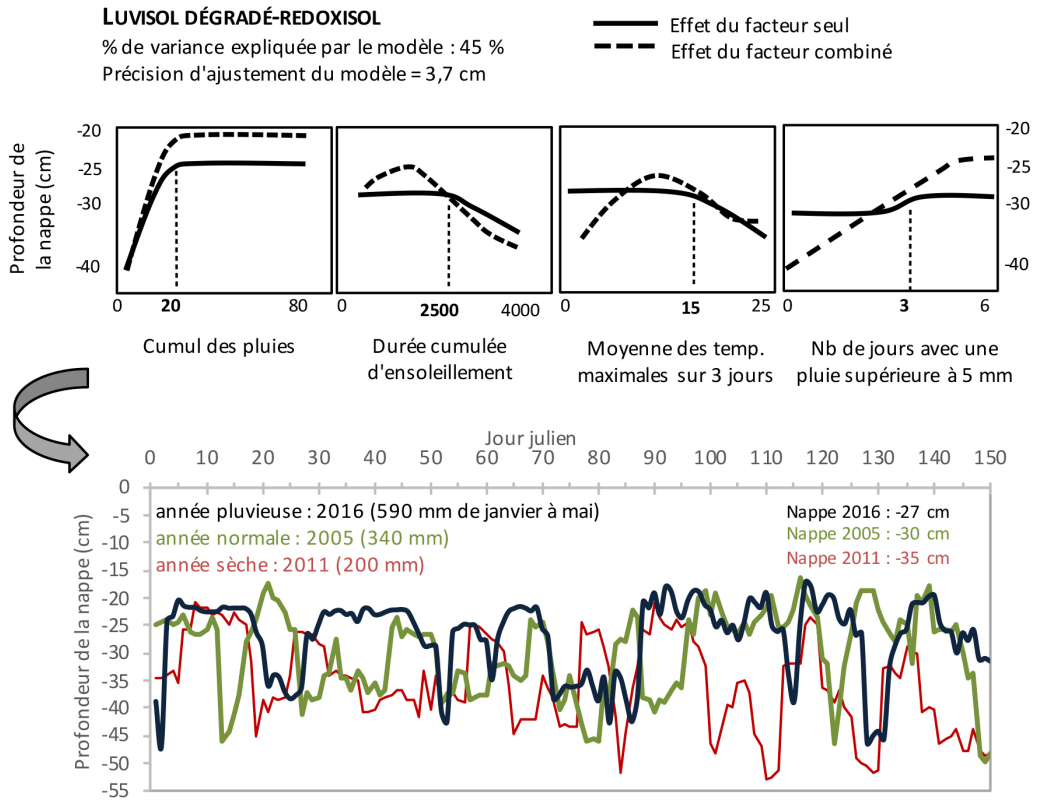
Les deux niveaux de nappe présentent une forte synchronicité temporelle (Fig. 2A).



↑ **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 pointillé) 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.

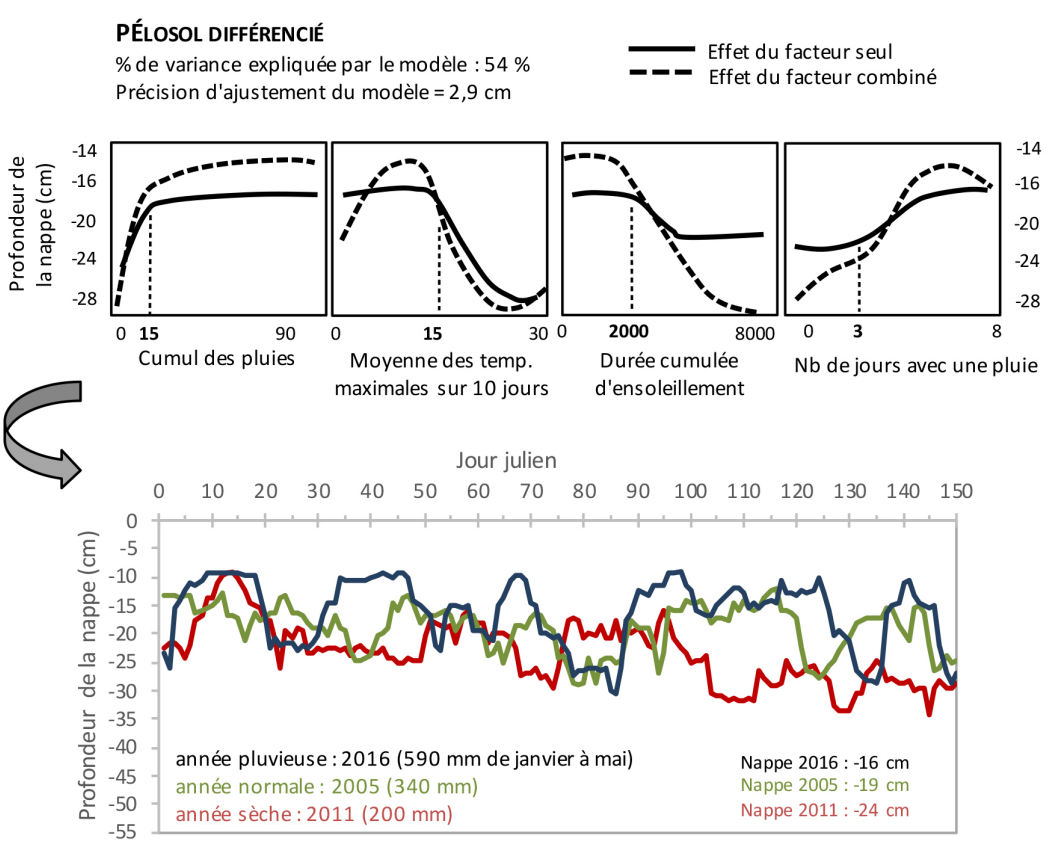


← **Figure 3.** Modèle de nappe hivernale élaboré sur luvisol dégradé-rédoxisol à partir de données climatiques journalières (source station Météo-France d'Épinal, 48°12'39" N, 6°27'06" E, altitude 317 m).

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).



← **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.

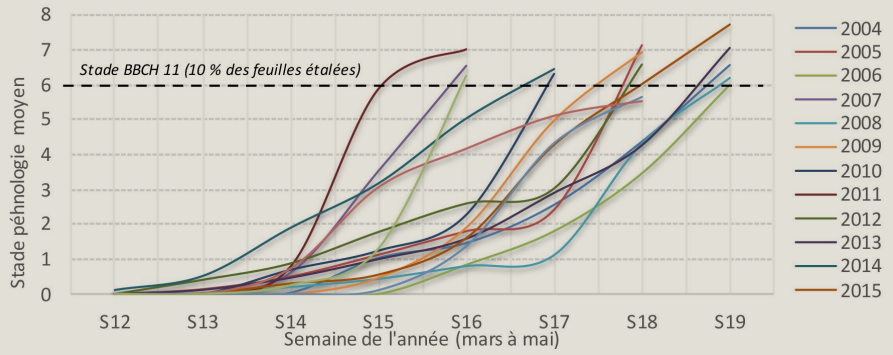
Les modèles de nappe élaborés à partir des approches de modélisation par « RandomForest » (Breiman, 2001) ont permis de mettre en évidence le déterminisme climatique des niveaux des nappes hivernales dans les deux types de sol. Pour le luvisol, le niveau de la nappe hivernale dépend très fortement du cumul des pluies sur les 6 jours précédents avec une nappe qui apparait 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 débourrement 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 1 940 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 BBCH[1] 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 débourrement 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 débourrement 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 débourrement 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 débourrement des chênes. Une augmentation de 1°C se traduit par un débourrement plus précoce d'environ 4 jours.

Une prospection racinaire très différente entre les deux sols

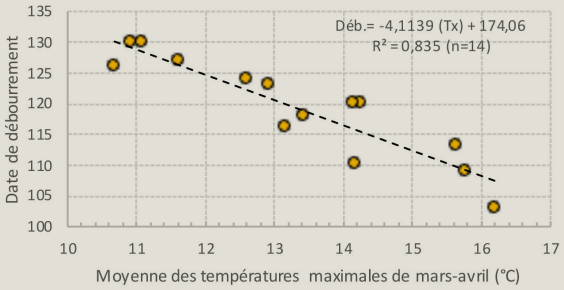
Les racines fines (< 3 mm) représentent 90 % des racines pour les deux sols mais les dynamiques des nappes hivernales se traduisent par des répartitions différentes entre les deux conditions édaphiques (Fig. 7). Dans le pélosol, avec un plancher à 25 cm et une nappe hivernale à -18 cm en moyenne, 46 % 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.

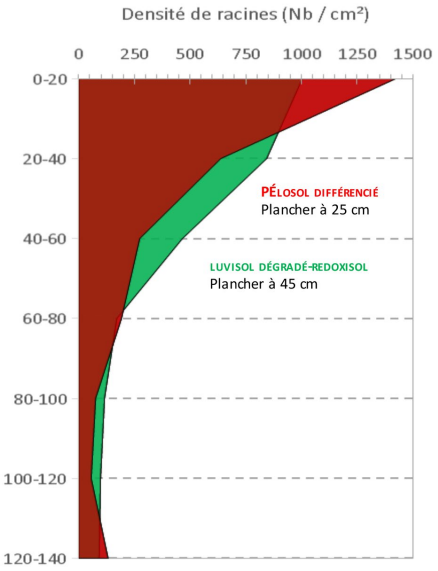
Les analyses de tiges réalisées sur chênes pédonculés en 2016 ont confirmé des dynamiques différentes entre les sols avec une croissance globale supérieure d'en moyenne 11 % sur luvisol par rapport au pélosol. La séparation des courbes est visible dès 8-10 ans et devient importante après 15 ans (15 % 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 (Δ ~ 15 %), et plus particulièrement pour les chênes sessiles par rapport aux chênes pédonculés (Δ ~ 30 %) (Fig. 9).



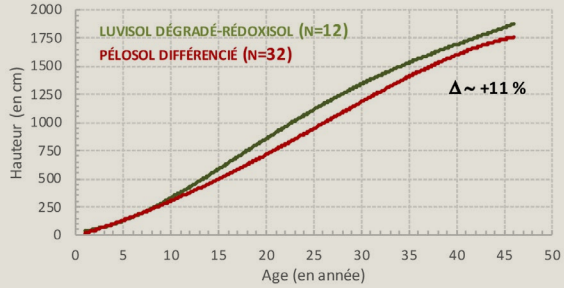
↑ **Figure 6.** Relation entre la date de débourrement (en jour julien) des chênes (sessile et pédonculé) et la moyenne des températures maximales (Tx) de mars et avril, observées de 2004 à 2018, sauf 2017.

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 débourrement a été observé au jour 130.



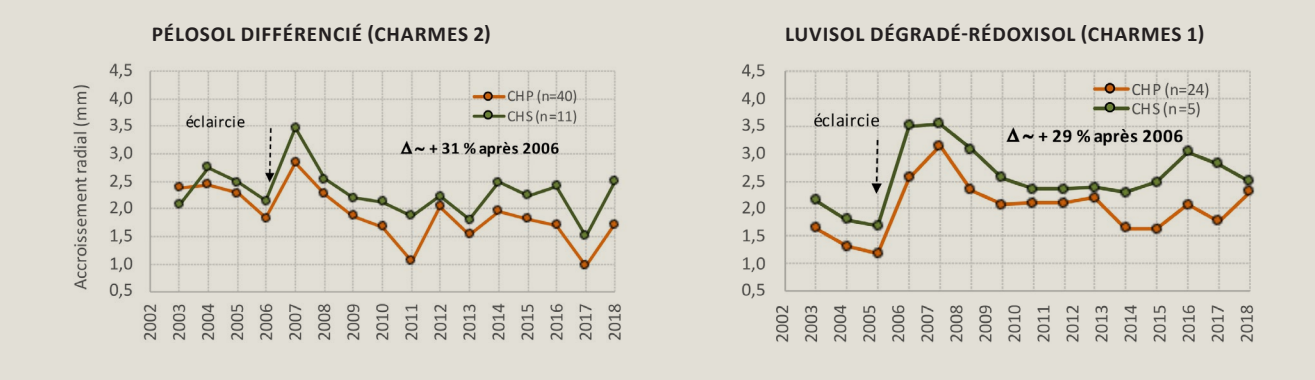
← **Figure 7.** Enracinement comparé des chênes pédonculés sur les deux types de sols (modalité témoin) à raison de 6 chênes analysés par sol.

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.



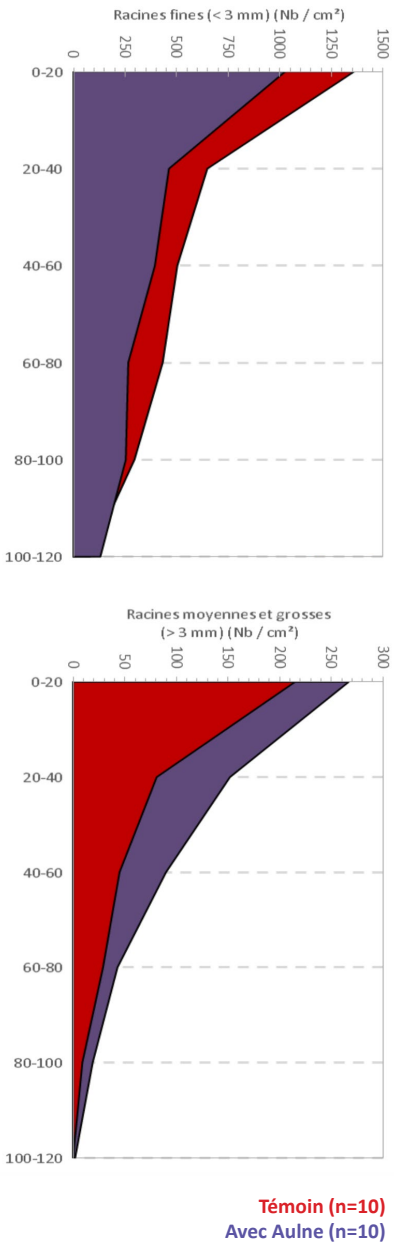
↑ **Figure 9.** Évolution de l'accroissement radial (en mm) pour les chênes sessile et pédonculé sur les deux types de sols (modalité témoin).
En 2006, une éclaircie a été réalisée dans les deux dispositifs (même intensité).

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 entrainé 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 apparait 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 apparait 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.

Modalités	Nappe	Chêne pédonculé		Chêne sessile	
		Dia. (cm) en 2018	*Lc (mm / an)*	*Dia. (cm) en 2018*	*Lc (mm / an)*
PÉLOSOL DIFFÉRENCIÉ					
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 observées 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 apparait 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).

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 a 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 Lebourgeois[1], Fabien Spicher[2], Sébastien Daviller[3], Benjamin Pires[1], Philippe Croizier[4], Sophie Lorentz[1], Caroline Petitjean[(1)]

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, Gérémia 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.

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. *Editeur : ENGREF*, pp. 223 p.

• 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 *Edition 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 Forestieres, 54 (5), pp. 409-429.

Croissance racinaire du chêne en sol soumis à un engorgement temporaire en eau

Ici, on cherche à comprendre et caractériser la manière dont la dynamique de la nappe temporaire affecte la distribution et la croissance des racines des chênes au fil du temps. La méthode ? Suivre pendant un an la colonisation par les racines des parois latérales de plusieurs fosses de 2 m de profondeur judicieusement disposées dans les chênaies étudiées. Méthode lourde (faute de mieux !) mais instructive.

Résumé

En sol à nappe d'eau perchée temporaire, le système racinaire du chêne est régulièrement soumis à un engorgement prolongé, suivi par des épisodes de sécheresse édaphique pouvant être marqués. En conditions anaérobies sous l'eau, la croissance des racines est inhibée et leur état se détériore rapidement. Au retrait de la nappe d'eau, seules les racines qui étaient hors de l'eau peuvent avoir une reprise de croissance rapide et recoloniser le sol en profondeur. L'état de santé de l'arbre dépend directement de cette potentialité, en interaction avec la précocité du retour de la sécheresse estivale, de la dimension effective du réservoir en eau, mais aussi de la profondeur de prospection des racines et de leur capacité à absorber l'eau aux grandes profondeurs.

Dans de nombreuses régions de France métropolitaine, les chênes sessile et pédonculé croissent dans des sols soumis à des engorgements temporaires en eau. Ils résultent, soit de la présence d'une nappe d'eau perchée au-dessus du socle argileux et alimentée par les pluies, soit de la remontée d'une nappe d'eau alluviale à plus large échelle spatiale. Ces nappes d'eau plus ou moins proches de la surface du sol peuvent persister de quelques jours à quelques mois. Elles soumettent tout ou partie du système racinaire du chêne à des conditions anaérobies (restriction en oxygène) qui perturbent leur fonctionnement. L'étape ultime, si la nappe persiste, est le pourrissement des racines soumises à l'engorgement. Dans les cas les plus extrêmes, la santé de l'arbre peut être affectée (perturbation du fonctionnement hydrique et carboné) et des dépérissements ont déjà été observés, pouvant aller jusqu'à la mort d'un individu. Le chêne pédonculé est réputé plus résistant à ces conditions d'engorgement que le chêne sessile (Lebourgeois *et al.*, ce numéro).

Cependant la nappe d'eau temporaire peut aussi avoir des effets positifs. Elle peut participer rapidement à la recharge en eau des horizons du sol et être un réservoir d'eau mobilisable par les racines échappant à l'engorgement. En fait tout dépend de la rapidité du retrait de la nappe d'eau et de la météorologie de l'année considérée et en particulier de la précocité de la sécheresse.

Nous avons voulu en savoir davantage sur la manière dont la nappe d'eau temporaire, d'origine alluviale dans le cas présenté ici, affecte la distribution et la croissance des racines du chêne, dans l'espace et le temps. Pour cela nous avons suivi pendant une année la colonisation par les racines des parois latérales de plusieurs fosses de 2 m de profondeur dans trois chênaies de l'Allier.

Les trois sites d'étude

Les trois chênaies retenues, dénommées P1, P2 et P3, se situent dans la plaine de l'Allier, respectivement en forêts de Chézy (à 7,5 km de la rive droite de l'Allier), Saint Augustin (5,5 km de la rive gauche) et Paray-Le-Frésil (21 km de la rive droite). Le climat y est de type tempéré, avec une pluviométrie annuelle de 790 mm, une température hivernale moyenne de 3,7°C et estivale de 18,9°C. Le sol de ces chênaies est caractérisé par un horizon argileux se situant de 20 à 50 cm en profondeur et surmonté par un horizon sablo-limoneux ou limono-sableux. Le sol est acide (pH de 4,7 à 5,2) et peu fertile avec en particulier une faible disponibilité en phosphore. Les traces d'oxydo-réduction montrent que la nappe d'eau est sans doute parfois affleurante en P1, 10 cm sous la surface en P2 et 30 cm en P3. La végétation de sous-bois est en majorité composée de molinie bleue (*Molinia caerulea*) et de quelques ronces (*Rubus section fruticosa*).

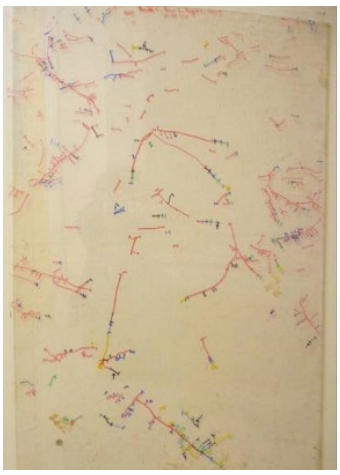
Les trois peuplements considérés sont adultes. P1 est principalement constitué de chêne pédonculé (*Quercus robur*) âgé en moyenne de 110 ans, une hauteur dominante de 24 m et un diamètre de tronc de 49 cm. P2 contient du chêne sessile (*Quercus petraea*) en mélange avec le chêne pédonculé, le peuplement est âgé de 128 ans, avec une hauteur dominante de 26 m et un diamètre de 55 cm. P3 contient également les deux espèces mais les arbres sont plus jeunes, 83 ans, avec une hauteur dominante de 22 m et un diamètre de 30 cm.

Le rhizotron, une vue sur le monde souterrain

Pour accéder aux racines, au printemps 2011, nous avons fait creuser à la pelle mécanique, trois fosses sur chacun des sites, soit 9 fosses au total. Elles mesurent 2 m de profondeur, 80 cm de large et 2 m de long (Fig. 1). Pour des raisons de sécurité, les deux côtés les plus longs des fosses ont été étayés par des planches en bois mais permettant de laisser l'eau circuler. Une vitre a été installée verticalement de chaque côté de la fosse sur les faces les plus petites (Fig. 1) et jusqu'à 2m de profondeur. Un couvercle ferme le tout pour éviter les perturbations par la lumière extérieure et de trop grandes variations de température.

À l'ouverture de la fosse, nous avons relevé la densité initiale de racines présentes (Fig. 2). À partir de juillet 2011, toutes les semaines ou deux semaines (en fonction de la vitesse de croissance des racines), le nombre et la longueur de toutes les racines visibles sur la vitre ont été relevés sur un calque à l'aide de feutres indélébiles pour une analyse ultérieure au laboratoire (Fig. 1). Quand la présence d'eau dans la fosse empêchait les observations (notamment durant la période de présence de la nappe), nous avons transvasé toute l'eau de la fosse dans une cuve à l'aide d'une motopompe, puis en sens inverse une fois les observations terminées. Les observations ont eu lieu jusqu'en août 2012 pour obtenir un cycle annuel complet. Cependant, nous ne les avons pas poursuivies au-delà car de précédents travaux montrent que les racines sur la vitre du rhizotron suivent le trajet privilégié de celles de l'année précédente, ce qui est un facteur de confusion des données.

Chaque fosse est équipée de capteurs de mesure de la teneur en eau du sol et de la température à différentes profondeurs et jusqu'à 2m. Un piézomètre a été installé sur chaque site pour mesurer la hauteur de la nappe d'eau en permanence ; il est situé à quelques mètres de distance des trois fosses pour éviter de fausser la mesure.



← **Figure 1.** Le rhizotron, vitre insérée verticalement sur l'une des faces de la fosse et jusqu'à 2 m de profondeur.

En haut à gauche, installation ; ci-dessus, quelques mois plus tard, les racines en croissance colonisent la vitre ; ci-contre, chaque semaine un calque et des feutres indélébiles permettent d'enregistrer la croissance des racines.

↑ **Figure 2.** Relevé de la densité initiale de racines aux différentes profondeurs des fosses à l'aide d'une grille maillée (mars 2011).

Calculs des densités et des accroissements racinaires

La localisation des fosses a été déterminée de façon à ce que chaque rhizotron (petite face vitrée de la fosse) soit disposé à proximité d'un tronc de chêne, à une distance d'environ 1m, ce qui permet, avec une même fosse, de suivre la croissance racinaire de deux arbres. Pour autant, cela n'a pas toujours été possible et la distance du rhizotron au tronc varie. Or, on sait que la densité racinaire décroît de façon exponentielle avec la distance au tronc. Par ailleurs, les arbres cibles n'avaient pas la même dimension ce qui peut aussi jouer sur la densité racinaire. C'est pourquoi nous avons normalisé la densité de racines (n, nombre par m² de vitre) à partir de la surface terrière de l'arbre le plus proche (G, cm²) et de la distance de l'arbre au rhizotron (D; cm). Ainsi nous utilisons un indice de densité racinaire (IGD) défini selon l'expression :

$$IGD = \frac{n}{(G * e^{(0,4-0,005xD)})}$$

Enfin, la densité initiale de racines sur les rhizotrons peut n'être pas homogène au départ des enregistrements. Nous avons évité les racines charpentières des arbres; toutefois la présence d'une grosse racine proche du rhizotron peut considérablement augmenter la densité racinaire et *vice versa*. C'est pourquoi nous avons calculé et utilisé l'accroissement relatif en longueur des racines qui tient compte de la densité initiale de racines pour chaque pas de temps :

$$\text{Accroissement relatif en longueur} = \frac{L_2 - L_1}{L_1} \times \frac{1}{(t_2 - t_1)}$$

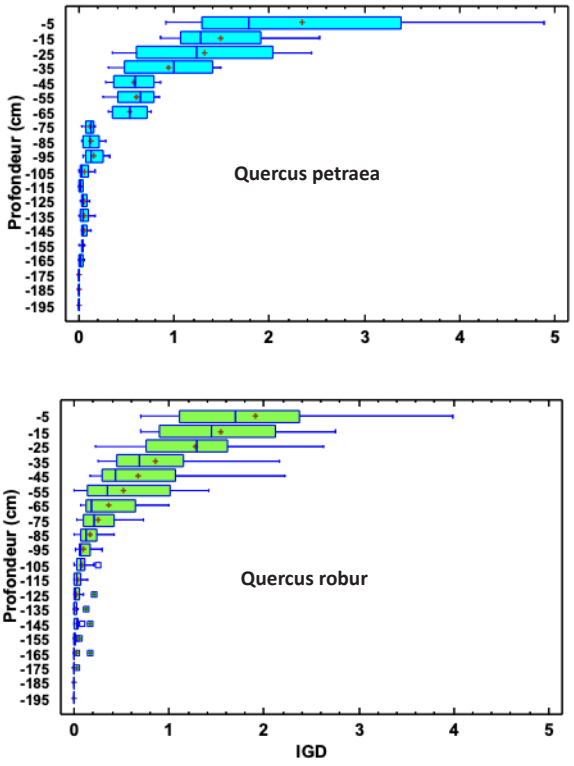
Avec L_1, la longueur racinaire au temps t_1 et L_2, la longueur racinaire au temps t_2.

Densité initiale de racines à l'ouverture des fosses

À l'ouverture des fosses au printemps 2011, les plus fortes densités racinaires (cf. encadré) sont observées en surface, puis décroissent très rapidement dès les 40 premiers cm de sol, avec une densité qui devient très faible en dessous de 80 cm (Fig. 3). Quelques racines éparses sont néanmoins observées jusqu'à 2m de profondeur. Nous n'avons pas mis en évidence d'effet significatif sur cette distribution de l'espèce de chêne considérée, mais avec trop peu d'arbres pour *Q. petraea* (3 individus) pour conclure définitivement à des enracinements semblables à *Q. robur* (12 individus). Les profils sont toutefois très proches pour les deux espèces. Seul le peuplement considéré a un effet avec des densités en surface plus faibles sur P1, site où la nappe d'eau est aussi la plus proche de la surface.

Une nappe d'eau présente cinq mois par an

Sur les trois sites, la dynamique de la nappe d'eau est assez semblable. Fin 2011, elle a commencé à s'installer à la mi-décembre pour atteindre son maximum à la mi-janvier 2012 (Fig. 4). Elle a persisté jusqu'à la mi-juin avant de commencer à décroître. Les maximums atteints en 2011-2012 sont différents entre les trois peuplements : environ 40 cm de profondeur pour P1, 50 cm pour P2 et 60 cm de profondeur pour P3. Cependant les mesures réalisées fin 2012, nappe d'eau proche de la surface en P2 (Fig. 4), laissent penser que ces hauteurs de nappe d'eau des hivers et printemps 2012 n'étaient pas particulièrement remarquables. Au 16 septembre, la nappe d'eau est passée en dessous de



→ **Figure 3.** Indice de densité racinaire (IGD, sans unité ; tous sites confondus) de *Q. robur* (n=12) et *Q. petraea* (n=3) en fonction de la profondeur dans le sol

Le graphique est présenté en boîte à moustache : minimum, premier quartile, médiane, troisième quartile, maximum. L'indice de densité racinaire correspond au nombre de racines par unité de surface échantillonnée et pondéré par la distance et la surface terrière de l'arbre le plus proche (voir encadré).

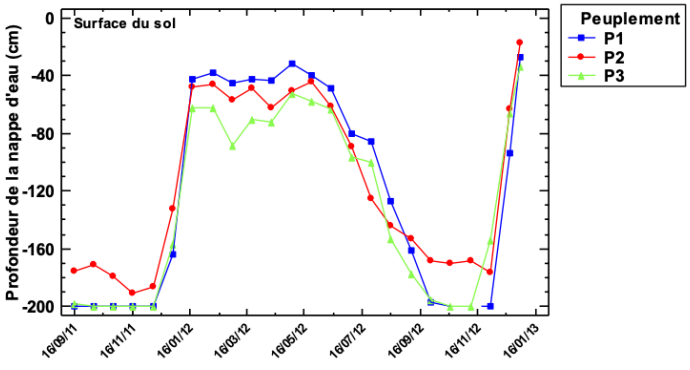
2 m de profondeur, profondeur maximale des piézomètres, sauf pour le site P2 où la nappe d'eau a persisté tout l'automne à 160 cm de profondeur.

Il faut souligner la concordance des relevés de densité racinaire (Fig. 3) réalisés au printemps 2012 avec ces enregistrements de la hauteur de la nappe d'eau (Fig. 4) : les densités maximales de racines sont observées au-dessus de la nappe d'eau, soit 40 cm sur P1.

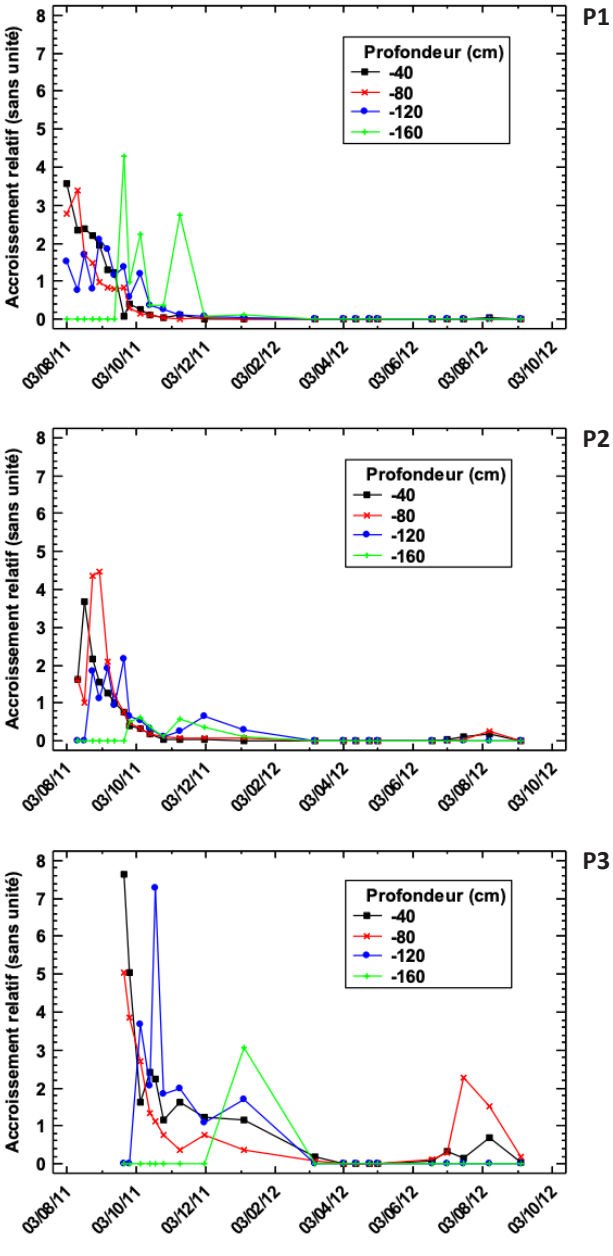
La croissance racinaire suit le retrait de la nappe d'eau

Quelle que soit la date d'observation considérée, printemps, été, automne ou hiver, nous n'avons pas observé de croissance racinaire en dessous de la surface de la nappe d'eau (Fig. 4 et 5). Ce résultat confirme la littérature, la croissance racinaire est totalement inhibée par les conditions anaérobies créées par la nappe d'eau. À l'opposé, dès que la nappe commence à se retirer, fin juin – début juillet, les premières croissances racinaires sont observées pour les horizons de surface, puis les pics de croissances sont observés pour des horizons de plus en plus profonds tout au long de l'automne, voire au début de l'hiver avant que la nappe d'eau ne remonte (Fig. 4 et 5). Quelle que soit la date considérée, les accroissements relatifs en longueur ont toujours été plus importants pour le peuplement P3. Cette observation peut être mise en relation avec, soit une nappe d'eau plus profonde sur ce site (Fig. 4) et donc un système racinaire moins affecté à la reprise de croissance, soit la relative jeunesse du peuplement (80 ans) et une différence de vigueur de la croissance par rapport aux deux autres peuplements plus âgés.

En interaction avec la présence de la nappe d'eau, la phénologie de la croissance racinaire est très décalée par rapport au compartiment aérien. Pour les trois peuplements, les arbres ont débourré à la mi-avril puis ont eu des croissances radiales et longitudinales du tronc et des branches rapides jusqu'au début de l'été, alors qu'aucune croissance racinaire n'était enregistrée. Il est probable que les seules racines en surface et au-dessus de la nappe d'eau, qui sont aussi les plus nombreuses, aient suffi à alimenter les arbres en eau. Cela rejoint les observations de Breysse *et al.* (2019) qui n'ont pas constaté sur ces sites de problèmes marqués de croissance printanière de l'aubier de ces arbres. La croissance racinaire commence beaucoup plus tard, dans le courant de l'été, mais se poursuit à l'automne et au début de l'hiver, tant que la teneur en eau du sol le permet (donc à des profondeurs de plus en plus importantes) et que les températures du sol le permettent également (Fig. 6). La croissance racinaire, indépendamment de la nappe d'eau, semble stopper pour des températures du sol inférieures à environ 6-8°C, en accord avec les observations rapportées par Riedacker (1976) sur les Chênes.



↑ **Figure 4.** Évolution temporelle de la profondeur (cm) de la nappe d'eau temporaire dans les fosses des trois peuplements.



→ **Figure 5.** Évolution de l'accroissement relatif en longueur des racines (sans unité) en fonction de la profondeur considérée (0–40, 40–80, 80–120, 120–160 cm) dans les fosses des trois peuplements.

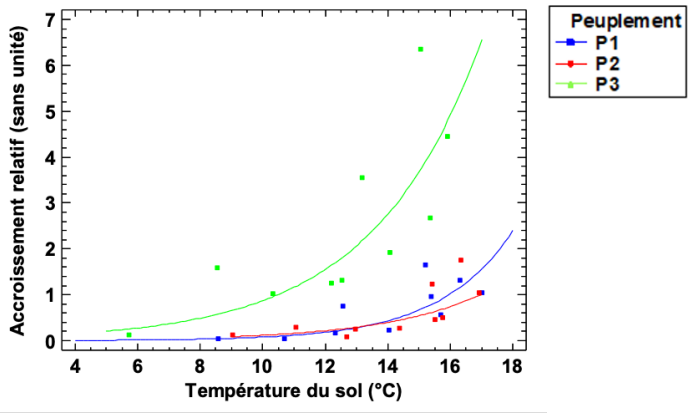
Le taux d'accroissement relatif en longueur des racines correspond à l'accroissement en longueur des racines par unité de temps pondéré par la densité initiale des racines, la distance et la surface terrière de l'arbre le plus proche (voir encadré).

La nappe d'eau, opportunité ou menace ?

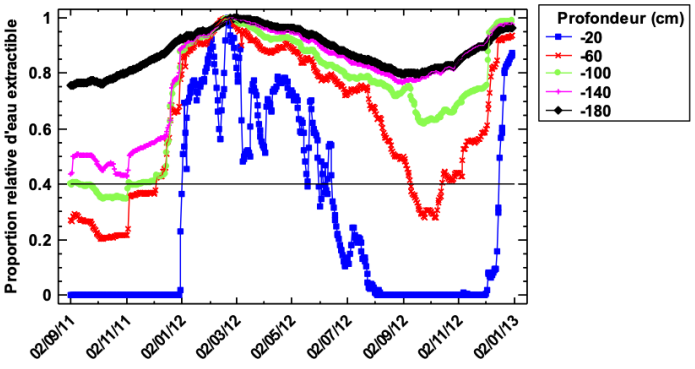
Nos observations confirment que la présence d'une nappe d'eau proche de la surface du sol perturbe la croissance des racines des deux espèces de chêne. Nous n'avons pas observé de pics de croissance en mai ou en juin comme rapporté par exemple par Riedacker (1976) en sol sain. Au contraire, le premier pic de croissance racinaire n'a pas lieu avant la mi-juillet, au moment où la nappe d'eau commence son retrait. Nous n'avons jamais observé de croissance racinaire sous la surface de la nappe d'eau, sans toutefois pouvoir dire si les racines observées dans l'eau étaient vivantes ou mortes. Certains signes comme un brunissement prononcé laissent penser que dans la nappe d'eau beaucoup de racines avaient perdu de leur vitalité sans toutefois pouvoir le confirmer. Néanmoins, c'est bien dans les horizons supérieurs de sol épargnés par la nappe d'eau que commence la croissance racinaire. Puis, au fur et à mesure du retrait de la nappe d'eau, des racines apparaissent et croissent dans des horizons de plus en plus profonds jusqu'à environ 160 cm de profondeur.

La croissance racinaire ne précède pas le retrait de la nappe d'eau mais le suit. Ceci est d'autant plus important que les horizons de surface du sol peuvent être alors soumis à une sécheresse plus ou moins marquée en fonction des années. Sur 2011 – 2012, les premiers horizons de sol ont montré un déficit en eau parfois marqué mais avec une teneur en eau du sol non contraignante en dessous d'environ 80 cm (Fig. 7). Cela souligne l'importance de la dynamique de recolonisation du sol en profondeur par les racines à partir des premiers horizons de surface libérés de la contrainte de la nappe d'eau. Ce résultat rejoint les observations de Lévy *et al.* (1999) où les chênaies les moins problématiques sont celles avec la nappe d'eau la plus affleurante à la surface du sol, comme si la réserve en eau disponible du sol était plus essentielle que l'importance du turnover racinaire dans les conditions de fortes anaérobies.

Toutefois, notre étude semble montrer une complexité un peu plus marquée que les conclusions de Lévy *et al.* (1999), avec un équilibre précaire et subtil entre la dynamique de la nappe d'eau et celle de la croissance aérienne et racinaire de l'arbre. Ainsi, d'un côté, les racines ne croissent pas dans la nappe d'eau temporaire qui les asphyxie, d'un autre côté, elles ont besoin d'eau non stagnante pour croître. Dans les deux années de notre étude, la contrainte météorologique d'un manque de précipitations n'a pas été suffisamment sévère pour empêcher la recolonisation racinaire en profondeur du sol, avec des réserves en eau encore abondantes et assurant l'approvisionnement des arbres. Mais qu'en serait-il d'une sécheresse plus précoce ou plus intense ? Quel impact peut avoir un démarrage de la végétation aérienne plus précoce ? Qu'advient-il si les racines ne parviennent pas à rejoindre les horizons les plus profonds et donc les plus humides car traversant des horizons de sol déjà trop secs ? Certains dépérissements du chêne sur ces dernières années ne sont-ils pas dus à de tels épisodes ?



↑ **Figure 6.** Accroissement relatif en longueur des racines (sans unité) en fonction de la température mesurée dans le sol pour les trois peuplements.



↑ **Figure 7.** Évolution de la teneur en eau extractible en proportion de la réserve utile pour différentes profondeurs de sol. Exemple du site P1.

On estime généralement que des valeurs en dessous de 0,4 (40% de la réserve utile en eau, e.g. Bertin et al., 2016) correspondent au début de la sécheresse, et des valeurs encore plus faibles traduisent une sécheresse marquée. C'est le cas ici pour le premier horizon de sol (20 cm) et dans une moindre mesure, le second (60 cm). La teneur en eau du sol n'a jamais été contraignante durant les deux années de l'étude pour des horizons plus profonds.

L'étude de ces dynamiques temporelles et spatiales entre le retrait de la nappe d'eau, le dessèchement précoce des horizons de sol, la croissance de la partie aérienne et la croissance des racines semble nécessaire pour caractériser plus finement les contraintes. Pour cela, à défaut d'outils non invasifs et aussi simples d'utilisation que les micro-dendromètres pour la partie aérienne, les rhizotrons, malgré leurs lourdeurs de mise en place, de suivi et l'artificialisation qu'ils provoquent en perturbant le sol et le système racinaire, restent des outils de connaissance précieux.

Philippe Balandier, Thierry Améglio
UMR547 PIAF (INRAE, Université Clermont-Auvergne), Clermont-Ferrand

REMERCIEMENTS PARTICULIERS

Le programme intitulé « Évaluation de la vulnérabilité des chênaies aux contraintes hydriques dans un contexte de changement climatique, conséquences sur la gestion des peuplements » à l'initiative de Jean-Paul Nebout (ingénieur au CRPF), financé par la DRAAF et les programmes Européen Leader sur le territoire du GAL (Groupe d'Action Locale) Sologne et Bocage Bourbonnais, fut initié en 2010 par l'UMR-PIAF (INRA) en partenariat avec l'Irstea et le CRPF Auvergne. Nos remerciements à l'ensemble des partenaires, propriétaires et gestionnaires. Merci aussi à tous ceux lors de cette étude qui ont manié la pioche, étayé, vidé l'eau des fosses pour assurer les observations, puis à nouveau rempli, les deux pieds dans la boue et par tous les temps ! Aline Faure, André Marquier, Christophe Serre, Fanette Chevallier, Patrice Chaleil, Pierre Conchon et Marc Vandame.

UMR PIAF

↑ Site d'étude P1

RÉFÉRENCES

• Bertin S., Balandier P., Becquey J., Bonal D., Breda N., Perrier C., Riou-Nivert P., Sevrin E., 2016. In : Le bilan hydrique des peuplements forestiers : Etat des connaissances scientifiques et techniques. Implications pour la gestion. Bertin S., Perrier C. (Coord.), RMT Aforce, 190 p.

• Breysse B., Ameglio T., Balandier P., 2019. Trop ou trop peu, le dépérissement du chêne est une histoire d'eau ! Forêt Entreprise n° 246, pp. 53-57

• Levy G., Lefevre Y., Becker M., Frochot H., Picard J.-F., Wagner P., 1999. Les excès d'eau : Influence sur la croissance des chênes. Revue forestière française vol. 51(2), pp. 151-161

• Riedacker A., 1976. Rythmes de croissance et de régénération des racines des végétaux ligneux. Annales des Sciences Forestières vol.33(3), pp. 109 – 138

Engorgement en eau puis sécheresse affectent différemment la croissance de jeunes chênes pédonculés et sessiles

En complément des dispositifs de terrain, l'expérimentation en conditions semi-contrôlées permet d'étudier finement, sur de jeunes plants en pots, les effets de la double contrainte infligée par les sols à nappe temporaire : engorgement et sécheresse. Pas de révélation fracassante, mais une illustration précise des différences de comportement des chênes sessile et pédonculé.

Dans la littérature, le chêne pédonculé (*Quercus robur*) est réputé plus tolérant à l'engorgement en eau du sol que le chêne sessile (*Quercus petraea*) qui, à l'opposé, serait plus tolérant à la sécheresse. En forêt, ces deux espèces sont souvent confrontées à la succession dans le temps de ces deux contraintes, engorgement puis sécheresse, dans la même année. Il nous a semblé important de mieux comprendre et caractériser l'effet de cette succession sur la dynamique de croissance des deux chênes. Pour cela, nous avons essayé de reproduire, en conditions semi-contrôlées, une contrainte édaphique de sécheresse estivale précédée ou non par un épisode d'engorgement printanier sur de jeunes plants en pot.

L'expérimentation

En fin d'hiver 2011, nous avons installé dans des pots de 30 litres, avec un sol riche à pH 6, des plants de chênes pédonculés et sessiles âgés de 2 ans, issus de pépinière. Après le rempotage, ils ont été élevés en extérieur dans des conditions optimales de croissance durant un an, avec une irrigation journalière. L'année suivante (2012), la moitié des plants a été élevée dans les même conditions optimales (témoin, T, Fig. 1), pendant que l'autre moitié était soumise à une situation d'hypoxie racinaire constante durant deux mois au printemps (E2, Fig. 1). Cet engorgement a été réalisé en plongeant les pots dans des contai-

Traitement d'engorgement à l'aide d'un système de double pot permettant l'ennoyage à un niveau constant (évacuation du trop-plein au niveau de la flèche).

Traitement de sécheresse : les pots ont été bâchés pour empêcher l'apport d'eau par la pluie et limiter l'évaporation de la surface du sol.

Détail d'un dendromètre LVDT – PépiPIAF pour la mesure en continu des variations de diamètre de tige (ou branche)

ners de 50 litres remplis d'eau de manière à avoir les trois quarts du volume de terre continuellement engorgés de mi-mars à mi-mai. Puis un mois plus tard, à la mi-juin, un arrêt de l'irrigation a été réalisé pour simuler une sécheresse édaphique sur une partie des arbres préalablement engorgés (E2 + S) et sur une partie des arbres jusqu'alors témoins (T+S, Fig. 1).

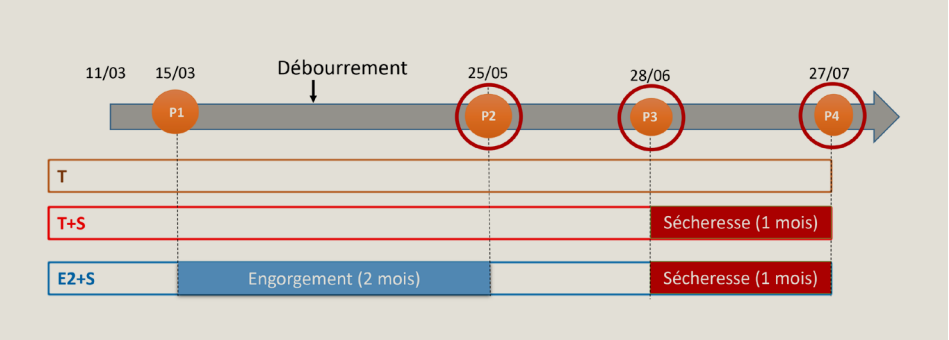
Différentes mesures ont été réalisées dans le but de suivre l'évolution de la croissance des jeunes chênes et leurs réponses spécifiques aux contraintes appliquées : des mesures d'état hydrique (**potentiel hydrique**, Ψ_{min}), de biomasses aérienne et souterraine (Fig. 2), mais aussi des mesures continues de variation du diamètre de la tige (dendromètre PépiPIAF; Capt-Connect, Clermont-Ferrand, France), durant toute l'expérimentation, pour trois plants par traitement. Ce sont ces dernières mesures qui seront principalement présentées ici, car leur suivi en continu intègre à la fois la dynamique de croissance apparente en diamètre de la tige, et la contrainte hydrique (engorgement et manque d'eau) par le suivi de la mobilisation des réserves en eau de l'écorce pour chaque journée (voir plus loin).

Résultats sur la croissance en diamètre des tiges

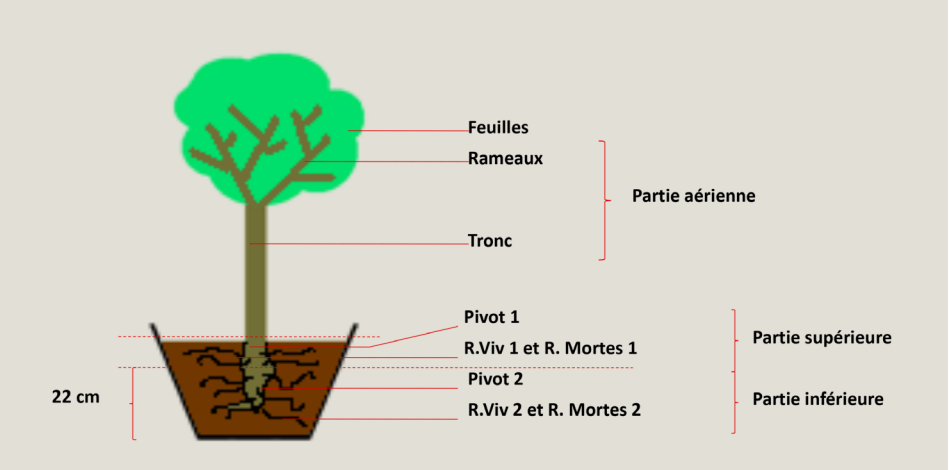
Nos résultats montrent clairement la sensibilité du chêne sessile à l'engorgement au moment du débourrement et dans le mois post-débourrement. Le chêne sessile manifeste en effet une absence totale de croissance en diamètre de la tige durant les 2 mois d'engorgement (-0,3 % ± 0,8), alors que le diamètre du chêne pédonculé s'accroit d'environ 12 % durant ces 2 mois (Fig. 3; 12,6 % ± 3,1).

La dynamique de variation de diamètre durant cette période montre également des amplitudes journalières de contraction supérieures pour le chêne sessile, avec une non-récupération chaque jour de l'eau des cellules de l'écorce cédée à la transpiration (Fig. 4). Clairement, le chêne sessile n'est plus, ou pas suffisamment, alimenté en eau par ses racines. Pour le chêne pédonculé, la contrainte hydrique est quasiment absente (plus faible amplitude de contraction journalière) et ces conditions d'engorgement pour les trois quarts du volume de terre semblent même plutôt favorables à la croissance au regard du traitement témoin (9,7 % ± 0,8, Fig. 3).

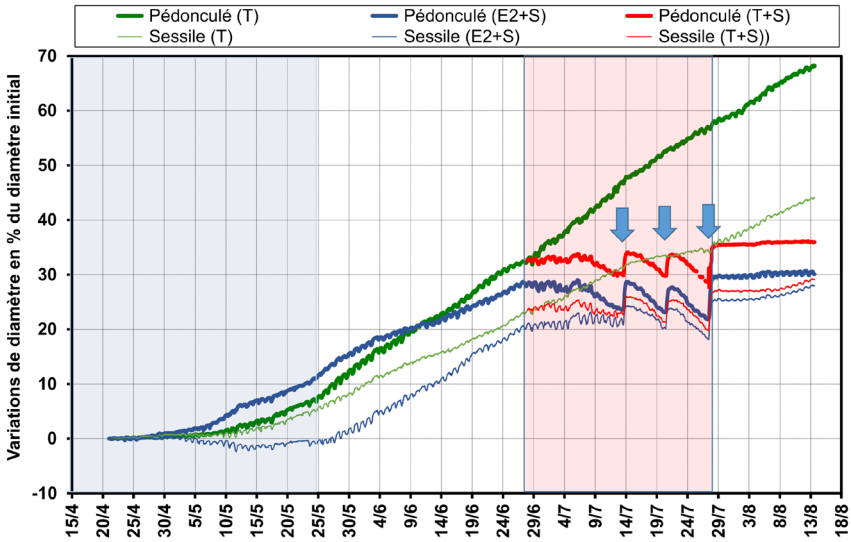
Le potentiel hydrique, Ψ, d'un organe correspond aux forces de rétention de l'eau dans la plante. Il exprime donc le travail qu'il faut fournir (la pression) pour extraire l'eau de la plante. C'est donc une valeur négative (une tension). Plus cette valeur est négative et plus l'eau est difficile à extraire, reflétant la force de la contrainte hydrique. Ψ_{min} est la valeur minimale du potentiel hydrique au cours de la journée (c'est-à-dire la valeur de la contrainte hydrique maximale journalière).



← **Figure 1.** Modalités des différents traitements et prélèvements (P1 à P4) pour les mesures de biomasse.
La biomasse des prélèvements entourés d'un cercle rouge est présentée dans la figure 6.

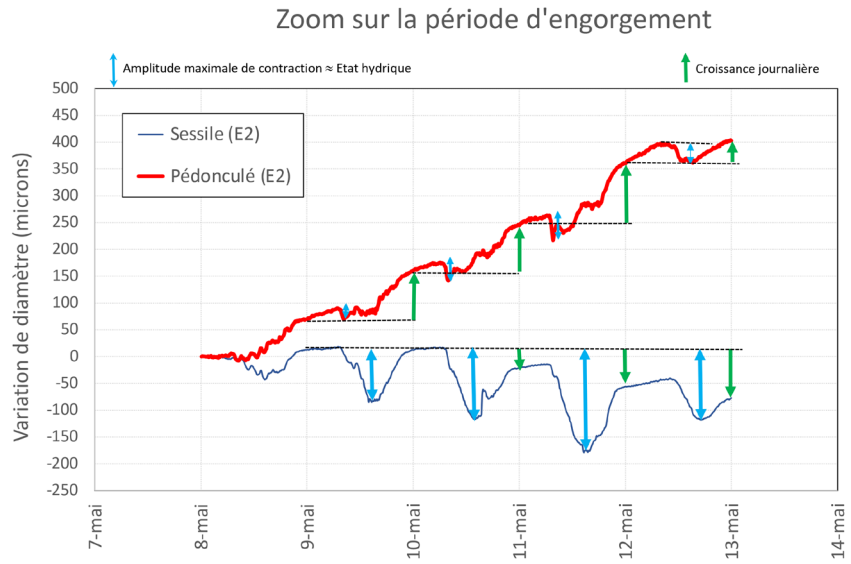


← **Figure 2.** Schéma des différents prélèvements (cf. figure 1) de biomasse (n=5 plants par espèce et par traitement).



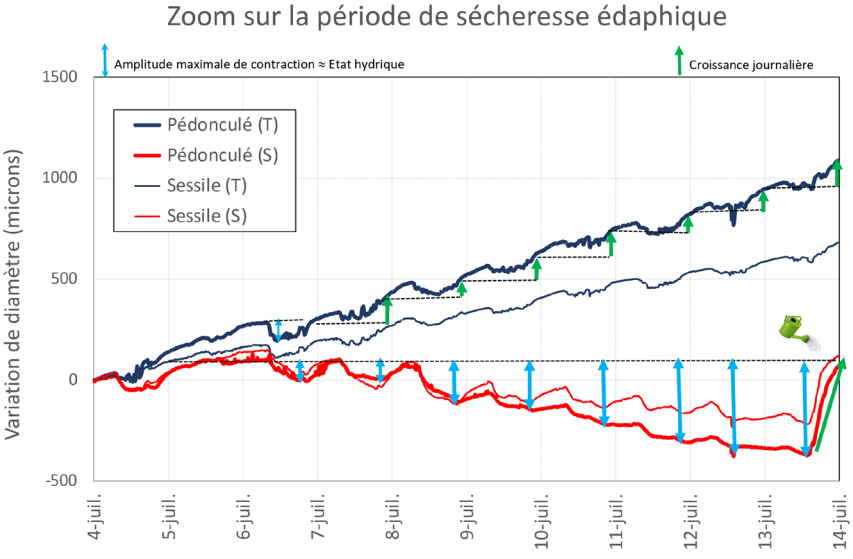
← **Figure 3.** Suivi micrométrique et continu des variations de diamètre de tige de chênes sessiles et pédonculés.

Ces chênes ont été soumis à un engorgement printanier de 2 mois, puis à une sécheresse estivale **(E2+S)** comparés aux témoins **(T)** et aux chênes ne subissant que la sécheresse estivale **(T+S)**. Les courbes moyennes par traitement (n=3) des variations de diamètre du tronc exprimé en % de variations par rapport au diamètre initial du point de mesure sont présentés pour les 2 espèces de chênes (trait épais pour le chêne pédonculé et trait fin pour le sessile). L'encadré bleu marque la période d'engorgement. L'encadré rouge marque la période de sécheresse édaphique. On peut noter durant la période de sécheresse des irrigations partielles de survie (0,5 l/pot ; flèches bleues) lorsque le Ψ_{Min} était proche de -4 MPa et qui ont permis une récupération très temporaire du diamètre.



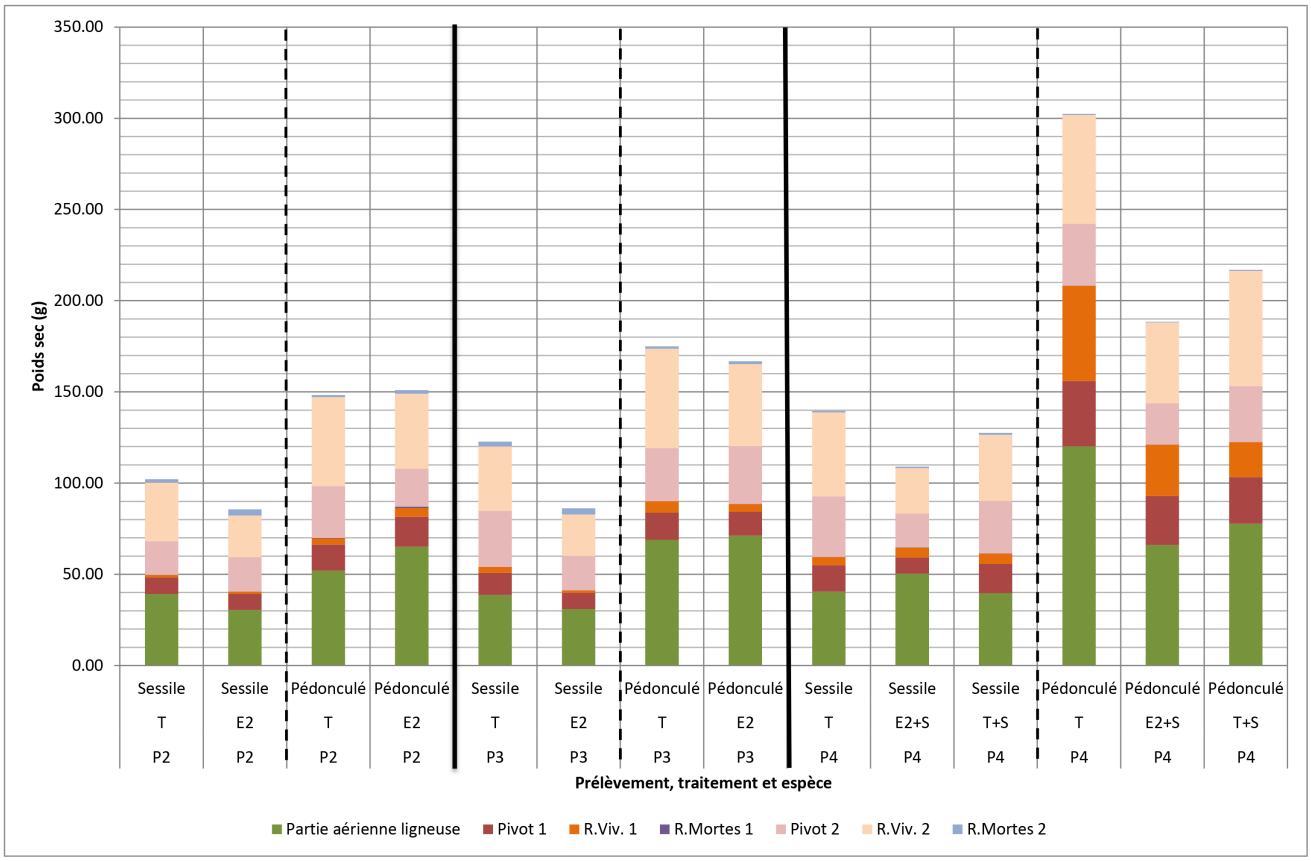
← **Figure 4.** Suivi micrométrique et continu des variations de diamètre de tige de chênes sessiles et pédonculés. Zoom sur 5 journées durant la période d'engorgement.

Ces deux espèces de chênes montrent des variations de diamètres contrastées avec près de 400 microns de croissance apparente pour le chêne pédonculé alors que le sessile ne présente pas de croissance durant cette période. On observe même une perte de diamètre d'environ 100 microns, indiquant que les réserves en eau de la tige ont été mise à contribution. Ces dynamiques de croissance permettent aussi de suivre la contrainte hydrique journalière qui se matérialise par une contraction journalière. Ainsi l'amplitude maximale de contraction chez le pédonculé est très faible, moins de 50 microns de contraction, indiquant un arbre peu contraint par l'engorgement et donc une situation favorable à la croissance. Ce n'est pas le cas du chêne sessile où l'amplitude maximale de contraction est forte (mobilisation importantes des réserves en eau de la tige), en particulier le 11 mai avec plus de 150 microns de contraction traduisant un état hydrique contraint, défavorable à la croissance.



← **Figure 5.** Suivi micrométrique et continu des variations de diamètre de tige de chênes sessiles et pédonculés. Zoom sur 10 journées durant la période de sécheresse édaphique.

Les traitements sécheresse (S) et témoin (T) montrent des variations de diamètres contrastées avec près de 1100 microns de croissance apparente pour le traitement témoin (T) du chêne pédonculé alors que la croissance du sessile sur la même période est de 680 microns. Pour les traitement sécheresse (S), il n'y a pas de croissance durant cette période, seulement une perte de diamètre, qui correspond à la mobilisation des réserves hydriques des cellules de l'écorce. L'irrigation de survie (0,5 litre) le 13 juillet permet de récupérer le diamètre initial et donc de remplir ce « réservoir ». On observe avant cette irrigation, une mobilisation croissante des ces réserves en eau (amplitude maximale de contraction journalière : double flèche bleu clair) avec un diamètre qui déminue de jour en jour (-380 microns pour le pédonculé vs. -210 microns pour le sessile).



↑ **Figure 6.** Evolution de la biomasse des plants de chênes sessiles et pédonculés selon les traitements.

Les histogrammes cumulés de la biomasse sèche pour les différents organes (cf. schéma de prélèvement, figure 2) sont présentés pour les 2 espèces de chêne (sessile et pédonculé). Les numéros (P2, P3 et P4) correspondent aux dates de prélèvement de la figure 1.

Les différents traitements sont indiqués : témoins (T) ; engorgement printanier de 2 mois (E2), suivi d'une sécheresse estivale (E2+S) ou ne subissant que la sécheresse estivale (T+S) et pas l'engorgement printanier. La légende reprend la segmentation des différents organes pesés selon le schéma de prélèvement avec Pivot 1 = partie dans le tiers supérieur du pot ; Pivot 2 = partie du pivot dans les deux tiers inférieurs ; R. Viv. 1 = racines vivantes dans le tiers supérieurs ; R. Viv. 2 = racines vivantes dans les deux tiers inférieurs ; R. Mortes 1 = racines mortes dans le tiers supérieurs ; R.Mortes 2=racines mortes dans les 2 tiers inférieurs.

À l'opposé, la contrainte hydrique édaphique d'une durée d'un mois appliquée fin juin stoppe plus rapidement la croissance en diamètre chez le chêne pédonculé (Fig. 3), avec de très fortes amplitudes maximales de contraction (jusqu'à 5 % du diamètre initial), traduisant une utilisation importante des réserves en eau de la tige (Fig. 5). Cette forte contrainte hydrique n'induit néanmoins pas de perte irréversible du diamètre, mais stoppe la croissance qui ne redémarre pas ou peu après le retour de l'irrigation (Fig. 3), alors qu'elle est encore bien présente pour le traitement témoin de cette espèce (gain de 10 % sur cette même période). Cette contrainte hydrique s'installe plus lentement chez le chêne sessile et semble permettre un redémarrage de la croissance secondaire, une semaine après le retour de l'irrigation, contrairement au chêne pédonculé (Fig. 3).

Nos résultats montrent enfin que la succession des deux contraintes hydriques (E2+S) ne semble pas amplifier le stress hydrique ressenti par les deux espèces et sa répercussion sur la croissance en diamètre, en comparaison des arbres n'ayant subi qu'une sécheresse édaphique (T+S, Fig. 3).

Résultats sur la biomasse

Les réponses globales obtenues sur les variations de diamètre s'observent également sur les biomasses des plants (Fig. 6) et peuvent essentiellement s'expliquer par l'impact des traitements au niveau racinaire et par leurs répercussions sur le développement foliaire. En premier lieu, des mortalités de racines sont observées dans le compartiment inférieur du pot soumis à l'engorgement ; elles sont plus importantes pour le chêne sessile (racines mortes 2, Fig. 6). Ainsi, le système racinaire plus fasciculé pour le chêne pédonculé, avec des racines dans le compartiment supérieur (racines vivantes 1, Fig. 6), permet dans nos conditions (quart supérieur du pot non engorgé) un développement significatif de la partie aérienne au printemps et du diamètre de la tige (+10 %). Paradoxalement, cette meilleure croissance printanière, avec une surface foliaire bien développée, devient problématique en été, face au manque d'eau (plus grande surface de transpiration). Pour le chêne sessile, au système racinaire plus pivotant et peu développé dans le quart supérieur du pot au moment du

débourrement dans nos conditions (racines vivantes 1, Fig. 6), la contrainte d'engorgement freine la croissance aérienne au printemps, en faisant subir une réelle contrainte hydrique à l'arbre, visible par l'amplitude de contraction journalière et la non récupération des réserves en eau des cellules de l'écorce, mais aussi par le faible développement de sa biomasse aérienne et souterraine (Fig. 6). Ainsi, la plus faible surface foliaire s'avère moins pénalisante en période de sécheresse édaphique (moins de surface transpirante), avec une contrainte *in fine* plus courte et une reprise de croissance plus dynamique une semaine après la réhydratation du sol. Au final on peut toutefois observer que c'est pour la combinaison des traitements engorgement puis sécheresse (E2 + S) que la biomasse totale des plants (sessile et pédonculé) est la plus faible à la fin de la saison (prélèvement P4, Fig. 6). Cela est sans doute la conséquence d'un système racinaire plus affecté, comme le montre par exemple le ratio des biomasses racine/tige du sessile, le plus bas (1,2) pour le traitement E2+S en P4 contre 2,5 pour le témoin T.

Conclusions

Cette étude présente l'avantage d'illustrer clairement des comportements bien connus de la littérature concernant ces deux espèces de chêne. Elle permet également de démontrer le rôle du développement racinaire et de son architecture (ex. fasciculé *vs*. pivotant) dans le développement de la biomasse aérienne en situation d'engorgement majeur (ex. trois quart du volume de terre dans notre étude) puis celui de la biomasse aérienne vis-à-vis des contraintes hydriques de sécheresse. En ce sens, elle rejoint les résultats de Balandier et Améglio (dans ce même numéro) sur les chênes adultes se développant sur des nappes d'eau temporaires plus ou moins proches de la surface du sol. Enfin elle démontre la puissance d'un suivi en continu des variations du diamètre de tige ou de branche pour comprendre la physiologie et les réponses aux contraintes abiotiques des arbres (Améglio et Cruiziat, 1992 ; Daudet *et al*. 2004). Le développement de ces outils dendrométriques précis, autonomes et connectés, utilisables aujourd'hui en routine sur le terrain, va nous permettre de suivre en temps réel et à distance des arbres dans leurs milieux (forêt de plaine ou de montagne, foresterie urbaine…) et nous faire progresser rapidement dans la compréhension du fonctionnement des arbres en environnement fluctuant.

Thierry Améglio, Estelle Noyer et Philippe Balandier
UMR PIAF (Université Clermont Auvergne – INRAE), Clermont-Ferrand

RÉFÉRENCES

- Améglio T, Cruiziat P., 1992. Daily variations of stem and branch diameter: Short overview from a developed example. In: Karalis T.K. ed. Mechanics of swelling, NATO ASI Series, Vol. H.64. Springer Verlag, Berlin, (DEU), 193-204.
- Améglio T., Dusotoit-Coucaud A., Coste D., Adam B., 2010. PepiPIAF: A new generation of biosensors for stress detections in perennial plants. ISHS 2010 - S15: ClimWater 2010. Lisboa (Portugal), 22-27 août 2010.
- Daudet F.A., Améglio T., Cochard H., Archilla O., Lacointe A., 2005. Experimental analysis of the role of water and carbon in tree stem diameter variations. Journal of Experimental Botany vol. 56(409) pp. 135-144
- Noyer E., 2012. Réponses morphologiques et physiologiques de *Quercus robur* et de *Quercus petraea* à la sécheresse précédée ou non d'une période d'ennoyage. Rapport de Master 1-EGPV, UBP Clermont-Ferrand, 54 p.

Interpréter la dynamique des nappes temporaires dans un diagnostic stationnel sur sols hydromorphes : cas de la forêt de Chaux

La forêt de Chaux, entre Dole et Besançon, occupe quelque 20000 ha sur sols à nappe temporaire. Le contexte géologique et la topographie sont à l'origine d'une large gamme de sols hydromorphes avec des modalités d'engorgement diversifiées, et par conséquent des contraintes variables pour les peuplements, de chênes notamment. L'observation des traces d'hydromorphie permet de préciser le régime de nappe et consolider diagnostic stationnel.

Les sols qui présentent des traces d'hydromorphie dues à un engorgement temporaire sont réputés contraignants pour les peuplements forestiers. En effet, ces traces témoignent de périodes de faible concentration en oxygène qui entravent le fonctionnement racinaire (voir Balandier et Améglio, ce numéro). Seules certaines essences sont adaptées à des conditions d'ennoyage plus ou moins asphyxiantes et prolongées, éventuellement combinées à des sécheresses estivales (Levy et Lefèvre 2001 ; Lebourgeois *et al.*, ce numéro). Néanmoins, l'accès à des horizons plus humides suite à l'engorgement peut être un avantage pour le maintien de l'alimentation en eau en été. Ces sols sont aussi contraignants pour l'exploitation forestière, car la présence de la nappe à faible profondeur une partie de l'année diminue très fortement la portance des sols.

Il est donc important de réaliser des diagnostics pédologiques qui permettent d'évaluer l'intensité et la durée de l'engorgement dans les sols hydromorphes, de façon à pouvoir réfléchir au mieux les choix d'essences et de mode d'exploitation.

L'hydromorphie est la manifestation morphologique de l'engorgement, qui provoque la formation de taches colorées et qui favorise l'accumulation de la matière organique dans le sol (Vizier 1971, Duchaufour 1995 et Baize et Jabiol 2011). L'observation des caractéristiques des taches d'hydromorphie (types, profondeur, abondance) constitue un outil de diagnostic de la présence de la nappe et de l'intensité du manque d'oxygène. Cependant, il peut arriver que les caractéristiques des taches ne soient pas en adéquation avec la durée de l'engorgement et avec l'intensité du manque d'oxygène. C'est par exemple le cas des zones alluviales où l'oxygène se renouvelle grâce à la circulation rapide de l'eau ou bien celui des sols très riches en matière organique où les taches sont peu visibles. Inversement, les traces d'engorgement temporaire peuvent ne pas être fonctionnelles et correspondre à une hydromorphie fossile en lien avec les climats passés.

Il est donc essentiel de comprendre le lien entre les traces d'hydromorphie observées lors du diagnostic stationnel et le régime temporel et spatial de la nappe. La forêt de Chaux, dans le département du Jura, est un cas d'étude intéressant pour cette problématique de par :

- la relative homogénéité d'un contexte géologique peu perméable sur une grande surface (20 000 ha),
- un relief peu marqué de plateaux et vallons (à ruisseaux intermittents), les altitudes s'étageant de 210 à 280 m, pour une moyenne d'environ 250 m ;
- et la présence d'une forêt de production sur des sols à engorgement temporaire ; 13000 ha de forêt domaniale au centre du massif et près de 7000 ha de forêts communales en bordures.

Malgré l'homogénéité du contexte géologique, la topographie du massif est à l'origine d'une gamme étendue de sols hydromorphes avec des modalités d'engorgement diversifiées. Un dispositif de suivi à long terme des battements des nappes d'eau y a été installé dans des sols représentatifs de cette diversité pédologique. L'un des objectifs est de préciser les liens entre le régime d'engorgement, le contexte topographique et l'hydromorphie afin de consolider les diagnostics stationnels. Cet article présente les principaux résultats.

Un substrat géologique imperméable à l'origine de l'engorgement

La forêt de Chaux constitue un massif forestier situé entre Dole et Besançon délimité par la vallée du Doubs au nord et par celle de la Loue au sud (Fig. 1). Le fonctionnement de ses sols et de ses cours d'eau est lié à son substrat géologique et à son histoire.

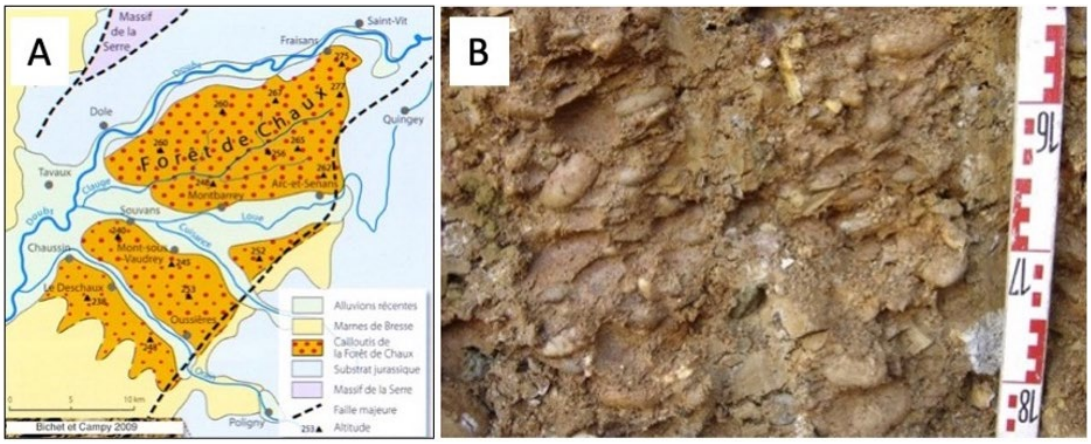
↑ **Figure 1.** Localisation de la forêt de Chaux, bordée au nord par la vallée du Doubs et au sud par la vallée de la Loue.

L'histoire géologique du massif de Chaux commence il y a 3,2 millions d'années, pendant l'époque Pliocène (Bichet et Campy 2009). L'ancien Rhin, appelé aussi Aar-Doubs, coulait alors en direction du sud en occupant en partie la vallée actuelle du Doubs et se jetait dans le lac Bressan en formant un delta où se déposaient les alluvions. Alluvions provenant principalement des Alpes suisses et constituées de galets de roches silicatées de tailles variables et de sables, d'où l'appellation de cailloutis. Le fonctionnement de cet ancien Rhin a duré 600 000 ans, soit jusqu'au début du Pléistocène. La forêt de Chaux occupe la partie nord du delta (Fig. 2, A).

L'épaisseur totale des cailloutis est variable : 60 m au nord-est du massif (secteur de Fraisans), 90 m au sud-ouest (Mont-sous-Vaudrey) et 35 m au centre du massif. Le cailloutis inférieur, qui correspond aux dépôts les plus anciens, est constitué de galets et de sables, alors que le cailloutis supérieur contient en outre une forte proportion d'argiles (Fig. 2, B). Ce cailloutis supérieur est donc très peu perméable et ne comporte pas d'aquifère significatif ; son épaisseur atteint 20 m au centre du massif.

Le cailloutis supérieur est recouvert, principalement à l'ouest et au sud du massif, par une formation argileuse de 1 à 3 mètres d'épaisseur (complexe des argiles supérieures) surmontée d'une couche d'altération de ces argiles. L'ensemble est lui-même recouvert d'un dépôt limoneux d'origine éolienne datant de la glaciation du Würm (-30 000 à -11 500 ans), dont l'épaisseur varie de 0,5 à 3 m (formations limoneuses complexes) (Fig. 3). Les formations argileuses renforcent l'imperméabilité du substrat géologique et expliquent la formation de nappes d'eau dans la partie supérieure des matériaux, où se développent les sols.

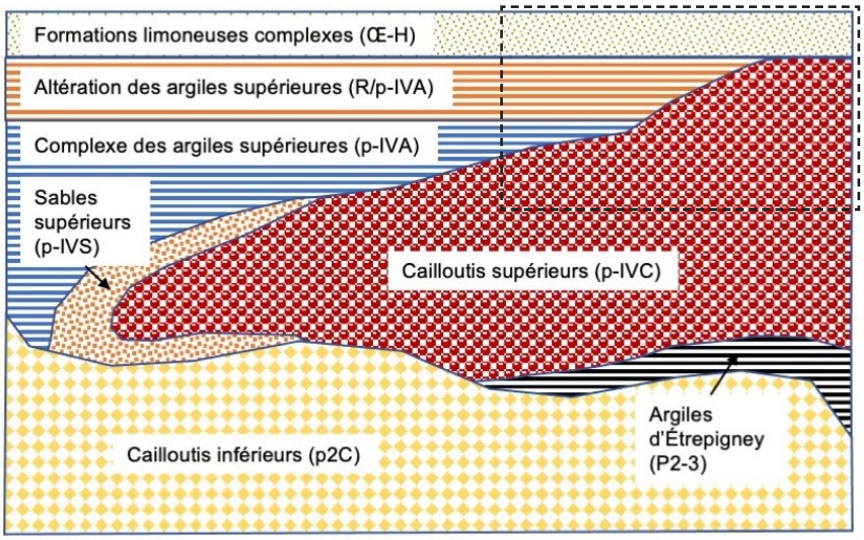
Le relief actuel du massif (Fig. 4), un plateau entaillé de nombreux vallons, vient probablement du soulèvement progressif des dépôts de l'ancien Rhin depuis 2,4 millions d'années, lié à un plissement des calcaires sous-jacents (Molliex *et al.* 2011). L'eau qui sature les sols des plateaux s'évacue latéralement et rejoint un vaste réseau de ruisseaux temporaires qui alimentent plusieurs rivières. Le massif de Chaux est ainsi parcouru par un réseau de 460 km de cours d'eau intermittents ou permanents (Augé 2007). Les deux principaux cours d'eau permanents sur une partie de leur longueur sont la Clauge et l'un de ses affluents, la Tanche.



← **Figure 2.** Formation et extension du substrat géologique du massif de Chaux et principales formations de type cailloutis.

A : Extension actuelle des cailloutis de la forêt de Chaux (Bichet et Campy 2009)

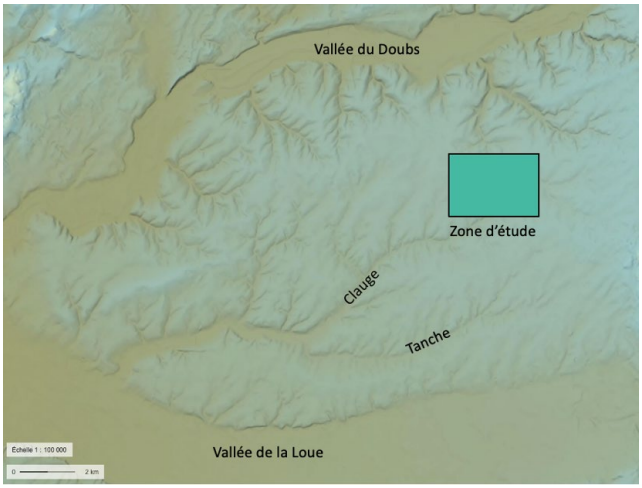
B : Cailloutis supérieur imperméable.



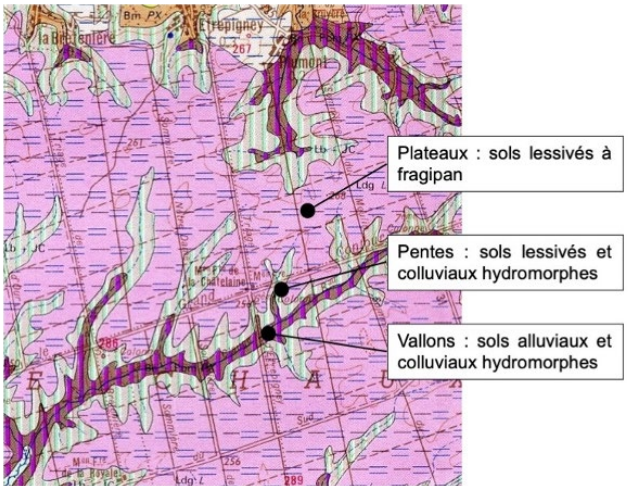
← **Figure 3.** Coupe verticale schématique de l'organisation des formations géologiques en forêt de Chaux selon un axe approximatif sud-nord (adapté de Bailly 1989).

Le nord est à droite.

Cadre pointillé : contexte géologique de la zone d'étude.



↑ **Figure 4.** Relief de la forêt de Chaux (IGN) et localisation de la zone d'étude.



↑ **Figure 5.** Extrait de la carte des sols au 1/100 000, feuille de Dijon (Chrétien 1976) dans la partie centrale de la forêt de Chaux.

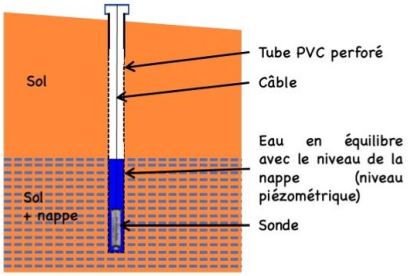
Dispositif d'étude : caractérisation des sols et suivi piézométrique

Les sols de la forêt de Chaux sont connus par les études anciennes et très détaillées de Plaisance (1965), la feuille de Dijon au 1/100 000 (Chrétien 1976) et le catalogue des stations forestières du massif (Bailly 1989). Ils sont acides à très acides et très humides, caillouteux dans les pentes et en fond de vallon, et se répartissent en trois principaux grands types (Fig. 5) :

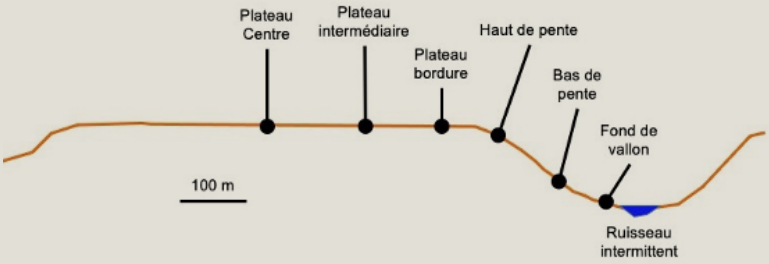
- sur les plateaux, des sols lessivés très hydromorphes (à fragipan) ;
- dans les pentes, des sols lessivés hydromorphes, plus ou moins colluviaux ;
- dans les vallons, des sols alluviaux et colluviaux plus ou moins hydromorphes.

Les variations du niveau d'eau dans les sols ont été enregistrées grâce à des dispositifs piézométriques. Ils sont constitués d'un tube PVC crépiné (perforé) sur toute sa longueur et recouvert d'un géotextile perméable, placé dans le sol jusqu'à une profondeur comprise entre 90 à 120 cm en fonction des caractéristiques des sols et de la profondeur d'apparition du substrat imperméable (Fig. 6). Une sonde à enregistrement automatique est suspendue au fond du tube pour enregistrer toutes les 12 heures la hauteur de la colonne d'eau qui la recouvre. La précision des mesures de profondeur de nappe (ou niveau piézométrique) est de l'ordre de ± 3 cm.

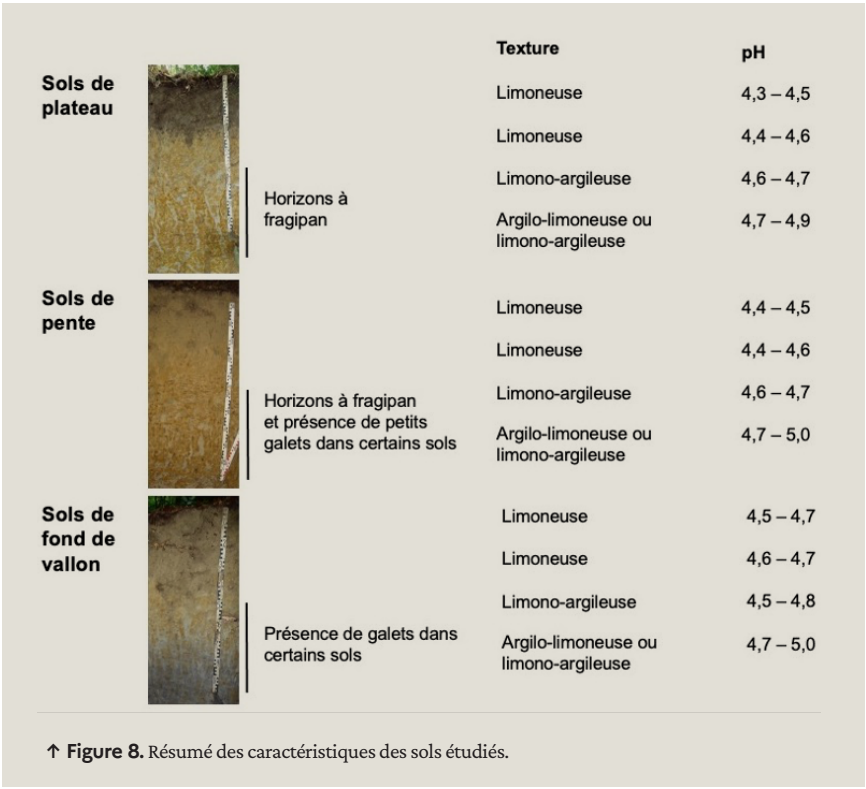
Le dispositif d'étude a été mis en place progressivement entre 2008 et 2015 (Lucot 2020). Les résultats présentés ici concernent 12 sols hydromorphes localisés dans 3 positions topographiques qui se succèdent dans les toposéquences : de plateau, de pente et de fond de vallons avec ruisseau intermittent. Plus précisément, 6 sont localisés sur un plateau, répartis entre le centre, la bordure et une situation intermédiaire, 4 en haut et bas de pentes et 2 en fond de vallon (Fig. 7).



↑ **Figure 6.** Dispositif piézométrique.



↑ **Figure 7.** Positions topographiques des sols étudiés.



↑ **Figure 8.** Résumé des caractéristiques des sols étudiés.

↑ **Figure 9.** Exemple d'horizon à fragipan.

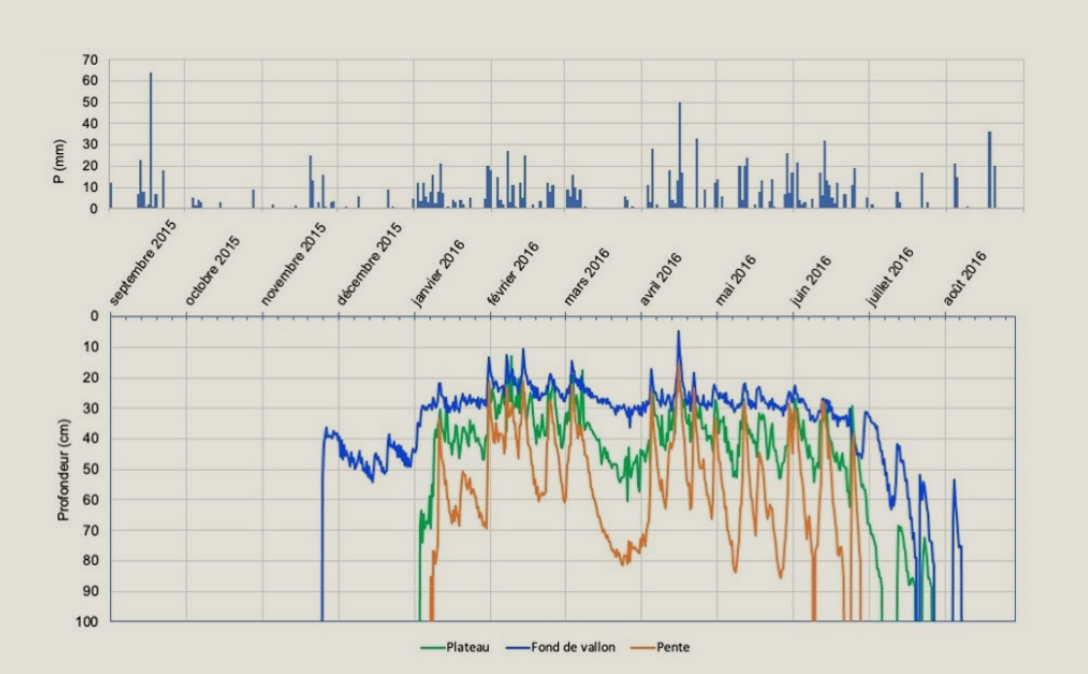
La morphologie des sols de la forêt de Chaux est en lien avec la géologie et le climat passé

Les sols sont globalement acides à très acides (pH compris entre 4,2 et 5,5). Leur texture est limoneuse dans les horizons de surface et enrichie en argiles en profondeur (Fig. 8). Les sols de pente et de fond de vallons peuvent être caillouteux.

Dans les horizons profonds, les taches de réduction/décoloration présentent souvent des formes allongées, organisées en réseaux réticulés de grandes dimensions, parfois polygonaux. Ce sont des horizons à fragipan qui sont indurés avec une porosité réduite et répartie de manière hétérogène (Fig. 9). La formation des horizons à fragipan résulte des processus de pédogénèse qui se sont succédé à la fin de la dernière glaciation (Van Vliet-Lanoes *et al.* 1992). Les sols de fond de vallon sont relativement jeunes (moins de 20 000 ans).

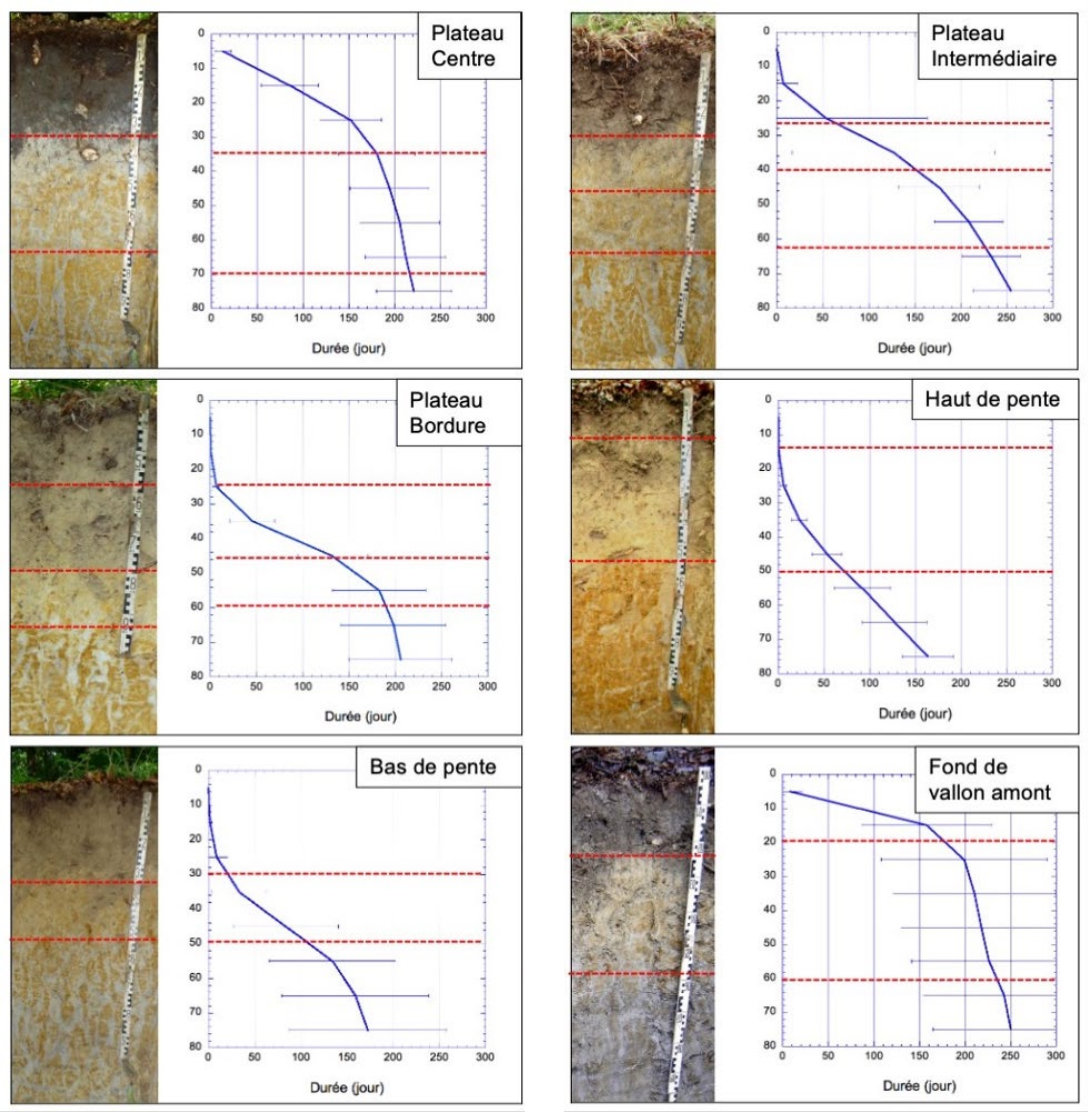
Le régime de la nappe varie selon la position topographique

Quelle que soit la position topographique, les nappes s'installent le plus souvent entre novembre et décembre (Fig. 10), avec de fortes variations interannuelles (octobre au plus tôt, janvier au plus tard). Les nappes tendent à apparaître un peu plus tôt en fond de vallon, mais leur présence n'est durable qu'à partir du moment où les nappes des plateaux s'installent. Sur les plateaux et en fond de vallon amont, les nappes restent présentes de manière permanente dans le premier mètre du sol jusqu'en mars ou avril. Des fluctuations du niveau piézométrique d'une



← **Figure 10.** Exemple de variations de la profondeur d'apparition de la nappe au cours d'une année pour un sol de plateau, un sol de pente et un sol de fond de vallon.

En haut : précipitations quotidiennes.



← **Figure 11.** Durée moyenne annuelle de présence de la nappe d'eau en fonction de la profondeur pour des sols représentatifs des positions topographiques étudiées.

Tirets rouges : limites entre les horizons.

amplitude de 20 à 30 cm sont fréquentes et liées aux intensités des épisodes pluvieux. Dans les pentes, durant l'hiver l'amplitude des fluctuations est beaucoup plus importante et la nappe peut disparaître du premier mètre à certaines périodes.

À partir d'avril, les niveaux des nappes peuvent être aussi élevés qu'en hiver, mais les variations des niveaux piézométriques sont plus importantes et plus fréquentes en raison des pluies moins abondantes et de l'absorption par la végétation. Dans les pentes les amplitudes de battement sont très importantes.

La disparition des nappes est rapide (une dizaine de jours) et elle a lieu entre début juin et la première quinzaine de juillet. Pour le premier mètre des sols, elle intervient d'abord dans les pentes, puis sur les plateaux 10 à 20 jours plus tard, puis en fond de vallon une dizaine de jours plus tard. Pendant les étés pluvieux, les nappes peuvent se réinstaller temporairement en fond de vallon, plus rarement sur les plateaux.

En conséquence, selon les positions topographiques et la profondeur considérée, la durée de présence de la nappe diffère fortement (Fig. 11 et 12). Sur les plateaux, la nappe est présente 6 à 8 mois dans le premier mètre et 5 à 6 mois dans les 50 premiers centimètres. Au centre du plateau, la durée atteint un mois dans les 10 premiers centimètres. Pour les 60 à 70 premiers centimètres, un gradient décroissant de durée de présence de la nappe est observé du centre vers la bordure. Dans les pentes, la durée annuelle moyenne de présence de la nappe dans le premier mètre est comprise entre 5 et 6 mois. L'engorgement est quasiment nul dans les 20 premiers centimètres. À 50 centimètres de profondeur, la durée moyenne d'engorgement est de 2 mois en haut de pente, alors qu'elle est de 4 mois en bas de pente.

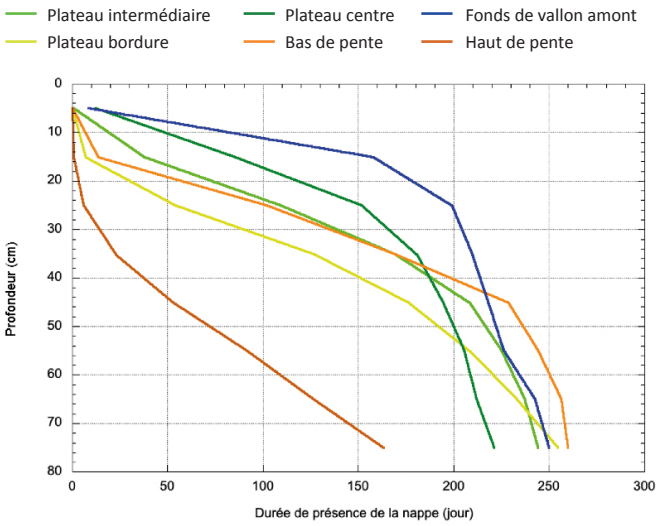
C'est en fond de vallon que les durées d'engorgement sont les plus longues, avec 8 à 9 mois à plus de 80 cm de profondeur. La nappe est présente 2 mois dans les 10 premiers centimètres. Les variations de durée d'engorgement en fonction de la profondeur sont similaires à celles mesurées au centre des plateaux.

Relation entre durée d'engorgement et hydromorphie

Dans le contexte de la forêt de Chaux, sur les plateaux, dans les pentes faibles à moyennes et dans les fonds de vallon amont, l'abondance des taches et les proportions entre les taches d'oxydation et les taches de réduction/décoloration sont globalement proportionnelles à la durée de présence de la nappe. Contrairement à ce qui était supposé dans le catalogue des stations du massif de Chaux (Bailly 1989), ce ne sont pas les horizons à fragipan qui constituent le plancher de la nappe, mais bien le cailloutis imperméable recouvert de niveaux argileux.

Indépendamment de la profondeur, la présence de taches en quantité significative (> 20 à 30 % de recouvrement, principalement taches d'oxydation du fer et du manganèse) correspond à une durée cumulée annuelle d'engorgement de 2 à 4 mois (Fig. 13). Un recouvrement de 100 % de taches contrastées avec la présence de taches de réduction ou dégradation indique une durée d'ennoyage cumulée annuelle comprise entre 5 et 7 mois. Un recouvrement de 100 % de taches contrastées avec la présence de taches de réduction ou dégradation qui sont très dominantes est liée à une durée d'engorgement supérieure à 8 mois. Ces durées ne s'appliquent pas aux sols alluviaux à forte perméabilité, qui sont souvent caillouteux et à texture grossière et où les taches sont peu abondantes malgré des durées d'engorgement longues.

En complément des taches, la prise en compte de la position topographique, plateau, pente ou fond de vallon permet d'affiner l'évaluation de la durée moyenne de l'engorgement (Fig. 11 et 12). Par ailleurs, lorsque le taux de matière organique est élevé dans les 20 premiers centimètres (couleur Munsell avec une valeur < 4), l'observation des taches est rendue difficile. Dans ce cas, l'abondance de la matière organique indique un engorgement d'une durée d'au moins 2 mois par an.



↑ **Figure 12.** Durée d'engorgement annuelle cumulée moyenne calculée sur 3 ou 4 ans pour les positions topographiques étudiées.

2 à 4 mois

5 à 7 mois

> 8 mois

↑ **Figure 13.** Exemples de recouvrement des taches en fonction de la durée d'engorgement en forêt de Chaux.

Liens avec les peuplements

Les types de stations du catalogue (Bailly 1989) sont cohérents avec les régimes d'engorgement étudiés. Nos données confirment que les stations de plateau à peuplements dégradés ou appauvris ont plus pour origine leur histoire sylvicole que des différences d'intensité ou de profondeur d'engorgement.

Les relevés effectués sur les peuplements présents autour des piézomètres et les données du catalogue des stations sont en accord pour établir que le chêne sessile est très peu présent lorsque les taches de réduction/décoloration apparaissent à moins de 40 cm de profondeur. Ce qui correspond à une durée d'engorgement ≥ 5 mois par an.

Le chêne pédonculé est quant à lui présent même si les durées d'engorgement sont supérieures à 7 mois à moins de 40 cm de profondeur. Ses adaptations lui permettent de s'enraciner profondément malgré l'engorgement très long et malgré la diminution de porosité dans les horizons à fragipan (Shahriari 2003). Des racines de chêne pédonculé ont été observées à de nombreuses reprises à une profondeur voisine de 2 mètres, ce qui permet à cette espèce d'accéder à des horizons qui restent humides même en période de sécheresse intense comme celle de 2018.

La présence de taches de réduction/décoloration à moins de 50 cm de profondeur signifie que la nappe est présente de manière quasi permanente à cette profondeur entre décembre et mars, d'où une humidité très élevée jusqu'en surface, ce qui interdit la circulation des engins. Ceci indique aussi qu'au printemps la nappe peut remonter rapidement à moins de 50 cm à la faveur d'un épisode pluvieux, même si elle est initialement absente des 50 premiers centimètres.

Quant aux fossés creusés au milieu du XX^{e} siècle pour favoriser le drainage, sur les plateaux leur effet se limite à une distance d'environ 2 m de part et d'autre du fossé et le rabattement de la nappe se limite aux 30 premiers centimètres du sol. La faible perméabilité des horizons présents à plus de 30 cm de profondeur explique l'inefficacité des fossés.

Jean-Michel Mourey / ONF

↑ Paysage de chênaie en forêt domaniale de Chaux

Conclusion et perspectives

Malgré le rôle des périodes glaciaires et périglaciaires dans la mise en place des traits d'hydromorphie, les caractéristiques des taches sont cohérentes avec la durée d'engorgement déduite de l'enregistrement des variations du niveau piézométrique. Dans ce contexte, le diagnostic stationnel permet d'appréhender les contraintes pour les peuplements et les travaux forestiers. L'abondance des taches d'oxydation et de réduction/décoloration combinée à la position topographique constitue un critère de diagnostic fiable de la durée d'engorgement.

Les liens établis entre le fonctionnement piézométrique et les positions topographiques permettent aussi de mieux interpréter la topographie dans le cas d'une cartographie des propriétés des sols et les stations.

Le diagnostic stationnel basé sur une analyse fine de l'engorgement permet de choisir les espèces, au plus près de leurs tolérances. Il permet aussi de préciser l'évaluation de la sensibilité au tassement, mais dans ce cas, le diagnostic doit être complété à l'occasion de chaque exploitation par des mesures d'humidité ou de niveau piézométrique pour prendre en compte les conditions météorologiques.

Des études complémentaires sont en cours afin de confirmer les résultats sur le long terme, notamment en lien avec les changements climatiques, étudier les mêmes positions topographiques sur d'autres secteurs du massif et compléter par la caractérisation d'autres types de sols (fonds de vallons en aval, vallons confinés).

Éric Lucot[1], Marc Steinmann[1], François Charnet[2], Pierre-Marie Badot[1]

1. UMR 6249 Chrono-Environnement (Université de Franche-Comté, CNRS), Besançon
2. Institut pour le développement forestier – CNPF, Agence d'Orléans

REMERCIEMENTS

Les auteurs de cette étude remercient Jean-Claude Lambert (UMR Chrono-Environnement) pour sa longue aide technique, ainsi que les personnes de l'ONF de l'unité territoriale de Chaux qui ont grandement facilité la mise en place du dispositif de suivi.

Le dispositif d'étude a reçu le soutien de la zone atelier « Arc jurassien » (LTER France).

RÉFÉRENCES

• Augé V., 2007. Comment réduire l'impact de l'exploitation forestière et des travaux mécanisés sur le réseau hydrographique ? ONF – Rapport LIFE « ruisseaux de têtes de bassin ». 81 p.

• Bailly G., 1989. Catalogue des types de stations forestières du massif de Chaux. Université de Franche-Comté, 233 p.

• Baize D., Jabiol B., 1995. *Guide pour la description des sols*. Ed. INRA, 375 p.

• Bichet V., Campy M., 2009. Montagnes du Jura – Géologie et paysages. Éd. Néo. 303 p.

• Chrétien J., 1976. Carte pédologique de France à 1/100000 – Dijon. Éd. INRA. Carte + notice explicative.

• Duchaufour P., 1995. *Pédologie. Sol, végétation, environnement*. Ed. Masson, 324 p.

• Lozet J., Mathieu C., 1997. *Dictionnaire de Science du sol*. Éd. Lavoisier, 488 p.

• Lucot E., 2020. Suivi piézométrique dans les sols du bassin versant de la Clauge en forêt de Chaux (Jura). Laboratoire Chrono-Environnement. FR-18008901306731-2020-08-28

• Molliex S., Fabbri O., Bichet V., Madritsch H., 2011. Possible Quaternary growth of a hidden anticline at the front of the Jura fold-and-thrust belt: geomorphological constraints from the Forêt de Chaux area, France. *Bull. Soc. géol. France*, 2011, t. 182, no 4, pp. 337-346

• Plaisance G. 1965. Les sols à marbrure de la forêt de Chaux (Jura). Annales des Sciences Forestières vol 22(4), pp. 449-676

• Rabenhorst M.C. (coord), 1998. Quantifying soil hydromorphology. Soil Science Society of America, Books Series, Special Publication n° 54.

• Shahriari A., 2003. *Étude des relations sol-racine et des réponses de croissance et de développement du chêne pédonculé et du chêne sessile aux situations de stress hypoxique ou anoxique liées à l'engorgement temporaire*. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 184 p.

• Van Vliet-Lanoes B., Fagnart J.P., Langohr R., Munaut A., 1992. Importance de la succession des phases écologiques anciennes et actuelles dans la différentiation des sols lessivés de la couverture lœssique d'Europe occidentale : argumentation stratigraphique et archéologique. Sci. Sol, vol. 30 (2) pp. 75-93

• Vizier J.F., 1971. Étude de l'état d'oxydoréduction du sol et de ses conséquences sur la dynamique du fer dans les sols hydromorphes. *Cahiers ORSTOM - série Pédologie* vol.9(4), pp. 373-397

Jean-Michel Mourey / ONF

OURS

La revue *RenDez-Vous techniques* est destinée au personnel technique de l'ONF, quoique ouverte à tous les lecteurs (étudiants, établissements de recherche et autres instances forestières et environnementales, notamment). Revue R&D et de progrès technique, elle vise à étoffer la culture technique au-delà des outils ordinaires de la gestion (guides sylvicoles, outils de diagnostic, etc.). Son esprit est celui de la gestion durable et « multifonctionnelle » qui, face aux défis des changements globaux, doit aussi s'adapter en contexte d'incertitudes. Son contenu : état de l'art et résultats de la recherche dans les domaines de R&D prioritaires, mais aussi porté à connaissance de méthodes et savoir-faire, émergents ou éprouvés, clairement situés vis-à-vis des enjeux de l'établissement ; le progrès technique concerne toutes les activités de l'ONF en milieu naturel et forestier, en relation avec le cadre juridique et les questionnements de la société.

Office National des Forêts

onf.fr

Directeur de publication
Albert Maillet

Rédactrice en chef
Christine Micheneau

Comité éditorial
Xavier Rousset, Dominique de Villebonne, Xavier Bartet, Éric Dubois, Didier Pischedda

Conception graphique
Pollen Studio

Réalisation
Pollen Studio

Crédit photographique page de couverture
F. Lebourgeois / AgroParisTech

—

Périodicité
4 numéros ordinaires par an

Accès en ligne
www.onf.fr
Accès à l'ensemble de la collection : via la notice d'un numéro quelconque (Détails/collection)

Renseignements
ONF - documentation technique et générale, boulevard de Constance, 77300 Fontainebleau
Contact :
documentalistes @onf.fr

Pour soumettre un article
Contacter la rédaction : rdvt@onf.fr

Dépôt légal
Avril 2022