



HAL
open science

Dépérissement des chênaies et changements climatiques en Sologne Bourbonnaise, Auvergne, Allier.

Breysse Bernard

► **To cite this version:**

Breysse Bernard. Dépérissement des chênaies et changements climatiques en Sologne Bourbonnaise, Auvergne, Allier.. Biodiversité et Ecologie. 2017. hal-01645086

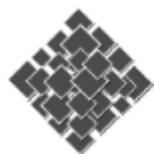
HAL Id: hal-01645086

<https://ephe.hal.science/hal-01645086>

Submitted on 23 Nov 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



École Pratique
des Hautes Études

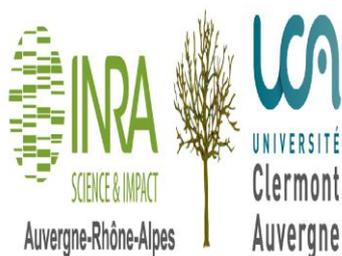


ÉCOLE PRATIQUE DES HAUTES ÉTUDES
Sciences de la Vie et de la Terre

BREYSSE Bernard

TITRE :

**Dépérissement des chênaies et changements climatiques en Sologne
Bourbonnaise, Auvergne, Allier.**

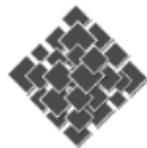


U.M.R. PIAF



Institut national de recherche
en sciences et technologies
pour l'environnement et l'agriculture





École Pratique
des Hautes Études



**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE**

ÉCOLE PRATIQUE DES HAUTES ÉTUDES

Sciences de la Vie et de la Terre

MÉMOIRE

Présenté

Par

BREYSSE Bernard

Pour l'obtention du Diplôme de l'École Pratique des Hautes Études

TITRE :

**Dépérissement des chênaies et changements climatiques en Sologne
Bourbonnaise, Auvergne, Allier.**

**Soutenu le 26 septembre 2017 Salle Gachon UMR-PIAF Clermont Ferrand
devant le jury suivant :**

M. Delesalle Bruno, EPHE - Président

M. Améglio Thierry, INRA - Tuteur scientifique

M. Balandier Philippe, IRSTEA - Tuteur scientifique

M. Carcaillet Christopher, EPHE - Tuteur pédagogique

M. Caraglio Yves, CIRAD - Rapporteur

M. Richard Franck, CEFÉ - Examineur

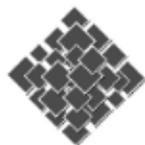
Mémoire préparé sous la direction de :

***Améglio Thierry, Physique et physiologie Intégratives de l'Arbre dans un
environnement Fluctuant (UMR 547) INRA, U. Clermont-Ferrand***

***et Balandier Philippe, Unité de Recherche sur les Ecosystèmes Forestiers,
IRSTEA, Nogent sur Vernisson.***

Et de

***Carcaillet Christopher, Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et
Anthropisés (UMR5023) CNRS-U. Lyon***



École Pratique
des Hautes Études



ÉCOLE PRATIQUE DES HAUTES ÉTUDES SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE

Dépérissement des chênaies et changements climatiques en Sologne Bourbonnaise, Auvergne, Allier.

BREYSSE Bernard

RÉSUMÉ

L'Auvergne comporte une importante surface forestière (700 000 ha) majoritairement composée d'espèces feuillues, les chênes sessile et pédonculé étant prépondérants. Cette surface forestière est détenue à 85% par des propriétaires forestiers privés. Certaines chênaies du département de l'Allier font l'objet d'une notoriété internationale pour la qualité de leurs bois (forêt domaniale de Tronçais). Ces bois étant destinés à la fabrication de tonneaux pour d'élevage de grands crus. Depuis plusieurs décennies des phénomènes de dépérissements ont été observés dans ces peuplements de chênes, en forêt publique et en forêt privée. Notre étude se concentre sur la partie Allier de la Sologne Bourbonnaise, région naturelle caractérisée par un relief de plateau et des sols à nappe d'eau perchée temporaire. Notre hypothèse initiale est que les signes de dépérissements sont liés à la double contrainte hydrique (ennoyage-déficit) que subissent les arbres sur ce type de sol. Les déficits hydriques en saison de végétation risquent de devenir de plus en plus importants dans le contexte de changements climatiques. Sur deux sites géographiquement proches et deux peuplements de chênes d'aspect régulier en forêt privée, nous avons réalisé un inventaire des espèces, avec mesure des circonférences à 1,30 m du sol, sur la base de quatre placettes par hectare pour une surface d'environ 1200 m² ha⁻¹. En même temps, nous avons noté l'abondance-dominance de la molinie bleue et de la fougère aigle avec les coefficients de Braun-Blanquet. Nous avons évalué l'importance des dépérissements dans ces peuplements avec le protocole DEPEFEU, en saison de végétation, et le protocole ARCHI, en période hivernale. A partir des résultats de cet inventaire, un échantillon d'arbres représentatifs de la distribution des circonférences et des notes DEPEFEU a été choisi. Sur les individus sélectionnés nous avons prélevé des biopsies au pied des arbres qui nous ont permis de mesurer les accroissements annuels radiaux depuis 2000. Les paramètres édaphiques ont également été appréciés (profondeur du plafond de la nappe d'eau perchée temporaire, réservoir utile). Nous avons aussi intégré les variables climatiques à partir des relevés de la station météorologique d'Yzeure (03). Nos investigations concluent que les protocoles utilisés sont pertinents pour évaluer le dépérissement des chênes et que les individus les plus affectés aujourd'hui ont manifesté des baisses significatives d'accroissement radial depuis le milieu des années 2000.

MOTS-CLÉS : *Auvergne, Allier, Chêne, Dépérissement, Ennoyage, Sècheresse, Accroissements*

Remerciements :

Je tiens tout d'abord à remercier Thierry Améglio de l'Unité Mixte de Recherche (Institut National de Recherche Agronomique – Université Clermont Auvergne), Physique et physiologie Intégratives de l'Arbre dans un environnement Fluctuant (PIAF) qui a bien voulu m'accueillir sur le site INRA de Crouël (Clermont Ferrand) au sein du projet « Evaluation de la vulnérabilité des chênaies aux contraintes hydriques dans un contexte de changement climatique » pour réaliser mon étude. Mes remerciements s'adressent aussi à Philippe Balandier Institut National de Recherche en Science et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA) qui a, avec Thierry Améglio, suivi ce travail de bout en bout et apporter son aide précieuse. Un grand merci à tous les personnels du PIAF qui ont contribué de près ou de loin à ce travail, notamment André Lacointe, André Marquier, Antoine Vernay, Pierre Conchon, Christophe Serre, Jérôme N'Gao, etc. sans oublier Dominique Tiziani, Sylvie Vayssié, Nbert Frizot et tous les autres. Un grand merci à Christopher Carcaillet de l'Ecole Pratique des Hautes Etudes (EPHE), qui fut mon tuteur pédagogique, pour ses corrections et son exigence. Enfin, merci à mes amis Sylvie et Bruno sans qui je n'aurais sans doute pas tenté l'aventure. Je dédie ce mémoire à mon épouse et à mes fils qui ont supporté l'exigence et l'investissement nécessaire à l'aboutissement de mon travail.

Table des matières :

Liste des figures.

Liste des tableaux.

1) Introduction.	P1
2) Contexte général de l'étude.	P4
21) Changements climatiques et arbres.	P4
22) L'eau, le végétal, la forêt.	P5
221) Excès d'eau et ennoyages.	P6
222) Déficit hydrique.	P8
23) Les chênes (<i>Quercus</i> L.)	P9
231) Critères morphologiques.	P10
232) Critères autoécologiques.	P12
24) Chêne et dépérissement.	P14
25) Cadre contractuel de l'étude.	P15
3) Matériels et méthodes.	P18
31) Présentation des sites.	P18
311) Situation géographique.	P18
312) Climat.	P19
313) Géologie.	P20
314) Pédologie.	P20
315) Gestion sylvicole.	P24
32) Protocole et mesures réalisés.	P25
33) Analyse des données.	P35
4) Résultats.	P36
41) Ensemble des arbres.	P36
411) Aspects dendrométriques.	P36
412) Relevé de végétation.	P37
413) Plafond de la nappe d'eau perchée temporaire.	P38
414) Appréciation des dépérissements.	P39
42) Analyse des biopsies de bois.	P45
421) Variabilité interannuelle des accroissements radiaux.	P45
422) Variabilité climatique.	P47

423) Variabilité des accroissements radiaux en lien avec le climat.	P51
424) Variabilité spécifique des accroissements radiaux.	P52
425) Variabilité des accroissements radiaux en fonction de la circonférence des arbres.	P54
426) Modélisation des accroissements radiaux en fonction du climat.	P57
427) Autres facteurs explicatifs.	P65
428) Influence de l'état de dépérissement.	P68
Discussion.	P78
Conclusion.	P86
Bibliographie.	P87

Liste des figures :

Figure 1 : Schéma résumant les contraintes hydriques sur sols à nappe temporaire (d'après Lefèvre *et al* 2006).

Figure 2 : Illustration extraite de www.crfp.fr, rameau feuillé fertile de chêne sessile et de chêne pédonculé.

Figure 3 : Ecogramme pH/humidité du chêne sessile et du chêne pédonculé.

Figure 4 : Diagramme ombrothermique de la station météorologique d'Yzeure, calculé sur une période de 30 ans (1986-2015).

Figure 5 : Profil racinaire observé sur le site de Chézy (extrait d'Améglio 2013).

Figure 6 : Profil racinaire observé sur le site de Paray le Frésil (extrait d'Améglio 2013).

Figure 7 : Niveau de la nappe d'eau perchée temporaire sur les sites de Chézy et de Paray le Frésil.

Figure 8 : Rayonnement (rapport entre le rayonnement sous couvert forestier enregistré sur les dispositifs et le rayonnement mesuré par la station météorologique UMR-PIAF installée hors-couvert, spectre radiatif entre 300 et 1100 nm) sur les sites de Chézy et de Paray le Frésil.

Figure 9 : Délimitation de la parcelle étudiée et indication des points d'inventaire sur une maille de 50*50 m site de Paray le Frésil.

Figure 10 : Délimitation de la parcelle étudiée et indication des points d'inventaire sur une maille de 50*50 m site de Chézy.

Figure 11 : Protocole simplifié DEPEFEU (DSF-Nagelseisen 2013).

Figure 12 : Clé du protocole ARCHI (IDF-2013).

Figure 13 : Distribution de la circonférence des troncs (cm) à 1m30 du sol, par espèce sur le site de Chézy.

Figure 14 : Distribution de la circonférence des troncs (cm) à 1m30 du sol, par espèce sur le site de Paray le Frésil.

Figure 15 : Distribution des profondeurs de plafond mesurés depuis la surface du sol de nappe d'eau perchée temporaire en fonction des sites.

Figure 16 : Histogramme de fréquence des notes DEPEFEU.

Figure 17 : Distribution des circonférences (cm) du tronc à 1m30 du sol en fonction de la notation DEPEFEU, des chênes de Paray le Frésil (gauche) et de Chézy (droite) et résultats du test non paramétrique de Kruskal-Wallis.

Figure 18 : Histogramme de fréquence des notes ARCHI.

Figure 19 : Distribution des circonférences (cm) du tronc à 1m30 du sol (boîtes à moustaches) en fonction de la notation ARCHI des chênes de Paray le Frésil et de Chézy et résultats du test non paramétrique de Kruskal-Wallis..

Figure 20 : Distribution des notations DEPEFEU et ARCHI en fonction de la profondeur du plafond de la nappe d'eau perchée temporaire, site de Paray le Frésil.

Figure 21 : Distribution des notations DEPEFEU et ARCHI en fonction de la profondeur du plafond de la nappe d'eau perchée temporaire, site de Chézy.

Figure 22 : Accroissements (mm) radiaux annuels moyens (\pm écart type) mesurés par la largeur des cernes sur les biopsies prélevées sur les sites de Chézy et de Paray le Frésil.

Figure 23 : Accroissements annuels (mm) moyens (\pm écart type) du bois initial (bois de printemps) et du bois final (bois d'été) mesurés sur les cernes des biopsies prélevées sur les sites de Chézy et de Paray le Frésil

Figure 24 : Part relative du bois final (en pourcentage) dans l'accroissement annuel moyen sur les sites de Chézy et Paray le Frésil.

Figure 25 : Distribution interannuelle des précipitations (mm) pendant la saison de végétation (basée sur les précipitations enregistrées à la station météorologique d'Yzeure).

Figure 26 : Précipitations annuelles sur la période 2000-2015 et répartition des précipitations printanières (Avril-Mai-Juin) et estivales (Juillet-Août-Septembre) de la même période.

Figure 27 : Diagrammes ombrothermiques des années présentant des mois secs ($P < 2 * T$) à partir des données météorologiques de la station d'Yzeure.

Figure 28 : Valeurs annuelles des ETP Turc et résultats de la balance précipitations (P)-ETP à partir des données de la station météorologique d'Yzeure.

Figure 29 : Valeurs de (P) - ETP Turc sur la saison de végétation (15/04 au 10/11).

Figure 30 : Répartition des accroissements annuels moyens mesurés (mm) en fonction des températures et des précipitations moyennes annuelles (années 2000-2015) et en fonction de la balance climatique des précipitations (P) - ETP sur la saison de végétation.

Figure 31 : Distribution des accroissements radiaux annuels (mm) présentée en boîte à moustaches des chênes pédonculés, à Paray le Frésil et à Chézy.

Figure 32 : Distribution des accroissements radiaux annuels (mm) présentée en boîte à moustaches des chênes sessiles de Chézy.

Figure 33a: Distribution des accroissements annuels radiaux (mm) des chênes pédonculés à Paray le Frésil, présentée en boîte à moustache en fonction de la circonférence et résultats du test non paramétrique de Kruskal-Wallis.

Figure 33b : Distribution des accroissements annuels radiaux (mm) des chênes pédonculés à Chézy, présentée en boîte à moustache en fonction de la circonférence et résultats du test non paramétrique de Kruskal-Wallis.

Figure 34 : Distribution des accroissements annuels radiaux (mm) présentée en boîte à moustache en fonction de la circonférence et résultats du test non paramétrique de Kruskal-Wallis, des chênes sessiles de Chézy.

Figure 35 : Accroissements modélisés par rapport aux accroissements mesurés de chaque cerne pour les chênes pédonculés, modèle sans l'accroissement moyen sur les trois dernières années.

Figure 36 : Accroissements modélisés par rapport aux accroissements mesurés de chaque cerne pour les chênes pédonculés, modèle avec l'accroissement moyen sur les trois dernières années.

Figure 37 : Accroissements modélisés par rapport aux accroissements mesurés de chaque cerne pour les chênes sessiles, modèle sans l'accroissement moyen sur les trois dernières années.

Figure 38 : Accroissements modélisés par rapport aux accroissements mesurés de chaque cerne pour les chênes sessiles, modèle avec l'accroissement moyen sur les trois dernières années.

Figure 39a : Distribution des accroissements annuels radiaux (mm) présentée en boîte à moustache, en fonction des plafonds de nappe d'eau pour les chênes pédonculés, à Paray le Frésil (haut), et résultats du test non paramétrique de Kruskal-Wallis.

Figure 39b : Distribution des accroissements annuels radiaux (mm) présentée en boîte à moustache, en fonction des plafonds de nappe d'eau pour les chênes pédonculés, à Chézy, et résultats du test non paramétrique de Kruskal-Wallis.

Figure 40 : Distribution des accroissements annuels radiaux (mm) présentée en boîte à moustache, en fonction des plafonds de nappe d'eau pour les chênes sessiles de Chézy et résultats du test non paramétrique de Kruskal-Wallis.

Figure 41 : Distribution des accroissements annuels radiaux (mm) présentée en boîte à moustache en fonction de la notation DEPEFEU des chênes pédonculés de Paray le Frésil et de Chézy.

Figure 42 : Distribution des accroissements annuels radiaux (mm) présentée en boîte à moustache en fonction de la notation DEPEFEU des chênes sessiles de Chézy.

Figure 43 : Distribution des accroissements annuels radiaux (mm) en boîte à moustache en fonction de la notation ARCHI des chênes pédonculés de Paray le Frésil (haut) et de Chézy (bas) et résultats du test non paramétrique de Kruskal-Wallis.

Figure 44 : Distribution des accroissements annuels radiaux (mm) présentée en boîte à moustache en fonction de la notation ARCHI des chênes sessiles de Chézy et résultats du test non paramétrique de Kruskal-Wallis.

Figure 45 : Evolution tendancielle des accroissements annuels moyens (mm) en fonction des notations DEPEFEU actuelles des chênes pédonculés de Paray le Frésil.

Figure 46 : Evolution tendancielle des accroissements annuels moyens (mm) en fonction des notations DEPEFEU actuelles des chênes pédonculés de Chézy.

Figure 47 : Evolution tendancielle des accroissements annuels moyens (mm) en fonction des notations DEPEFEU des chênes sessiles.

Figure 48 : Evolution tendancielle des accroissements annuels moyens (mm) en fonction des notations ARCHI des chênes pédonculés de Paray le Frésil.

Figure 49 : Evolution tendancielle des accroissements annuels moyens (mm) en fonction des notations ARCHI des chênes pédonculés de Chézy.

Figure 50 : Evolution tendancielle des accroissements annuels moyens (mm) en fonction des notations ARCHI pour les chênes sessiles.

Liste des tableaux :

Tableau I. Données granulométriques des sols de Chézy en %.

Tableau II : Données granulométriques des sols de Paray le Frésil en %

Tableau III : Coefficients de Braun-Blanquet utilisés, les classes de recouvrement correspondent à la surface de sol occupée par les espèces.

Tableau IV : Valeurs et significations des coefficients de corrélation (Spearman) entre le plafond de la nappe d'eau perchée temporaire et les notations DEPEFEU et ARCHI.

Tableau V : Répartition des arbres par classe de circonférence et de notation à Chézy.

Tableau VI : Répartition des arbres par classe de circonférence et de notation à Paray le Frésil.

Tableau VII : Répartition des mois secs (mois où $P < 2 * T$) en saison de végétation sur la période 2000-2015.

Tableau VIII : Résultats du test de corrélation (Spearman) entre l'accroissement radial annuel et les variables climatiques et dendrométriques sur l'ensemble des chênes des deux sites. Seules les variables ayant un coefficient de corrélation significatif sont présentées.

Tableau IX : Résultats du test de corrélation (Spearman) entre l'accroissement radial moyen annuel par espèces et les résultats de (P) - ETP de printemps, d'été et de Mai, Juin, Juillet.

Tableau X : Résultats du test de corrélation (Spearman) entre l'accroissement radial annuel et les variables climatiques et dendrométriques (seules les valeurs significatives ont été conservées) pour le chêne pédonculé sur le site de Paray le Frésil.

Tableau XI : Résultats du test de corrélation (Spearman) entre l'accroissement radial annuel et les variables climatiques et dendrométriques (seules les valeurs significatives ont été conservées) pour le chêne pédonculé sur le site de Chézy.

Tableau XII : Résultats du test de corrélation (Spearman) entre l'accroissement radial annuel et les variables climatiques et dendrométriques (seules les valeurs significatives ont été conservées) pour le chêne sessile sur le site de Chézy.

Tableau XIII : Résultats du test de corrélation (Spearman) seules les valeurs significatives ont été conservées à partir du fichier complet (tous les arbres).

Tableau XIV : Paramètre du modèle de régression pour le chêne pédonculé sans l'accroissement moyen sur les trois dernières années.

Tableau XV : Paramètre du modèle de régression pour le chêne pédonculé avec l'accroissement moyen sur les trois dernières années.

Tableau XVI : Paramètre du modèle de régression pour le chêne sessile sans l'accroissement moyen sur les trois dernières années.

Tableau XVII : Paramètre du modèle de régression pour le chêne sessile avec l'accroissement moyen sur les trois dernières années.

Tableau XVIII : Résultats du test de Kruskal-Wallis pour les chênes pédonculés de Paray le Frésil.

Tableau XIX : Résultats du test de Kruskal-Wallis pour les chênes sessiles de Chézy.

Tableau XX : Résultats du test de Kruskal-Wallis pour les chênes pédonculés de Paray le Frésil.

Tableau XXI : Résultats du test de Kruskal-Wallis pour les chênes pédonculés de Chézy.

Tableau XXII : Résultats du test de Kruskal-Wallis pour les chênes sessiles de Chézy.

1 Introduction

Le changement climatique planétaire est un fait aujourd'hui indiscutable (IPCC 2014). Son impact sur l'avenir des espèces forestières interroge les gestionnaires de tous horizons (Riou-Nivert 2005). Au cours des 2500 dernières années et avant le début de l'ère industrielle, les températures moyennes ont moins varié que depuis le début de cet ère industrielle (Büntgen *et al* 2011). Depuis 1850 une nette tendance à l'augmentation des températures se dessine avec une forte accélération dès le début du XX^{ème} siècle (IPCC 2014).

Plusieurs scénarii de changements plus ou moins rapides des variables du climat sont envisagés par l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)¹. Ces simulations climatiques, fondées sur des modèles mathématiques prenant en compte le cycle des gaz à effet de serre, prévoient un réchauffement planétaire généralisé, des changements des régimes de précipitations, et un nombre croissant d'évènements climatiques extrêmes. Pour les ressources en eau, il s'en suivrait une augmentation des précipitations en hiver et au printemps sur l'Europe du nord et des diminutions en période estivale en zone méditerranéenne et sur l'Europe de l'ouest pouvant conduire à des épisodes de sécheresse plus intenses et plus fréquents succédant à des périodes d'engorgement en eau des sols (Gao & Giorgi 2008 ; Giorgi & Lionello 2008).

Au cours du siècle dernier, la chênaie Européenne a subi plusieurs vagues de dépérissements (Nageleisen 1994). Ces états de dépérissement constituent une détérioration prolongée de l'apparence et de la croissance des arbres. Plusieurs facteurs abiotiques (climat, sol, usages) ou biotiques (insectes, champignons) ont pu se combiner et accélérer le processus entraînant dans certains cas la mort de l'arbre. Le terme «dépérissement» se rapporte à des phénomènes de nature complexe. Le poids de chaque facteur incident est variable et certains peuvent être assez anciens.

Trois natures de facteurs de dépérissement sont distinguées (Landmann 1994) :

- Les facteurs prédisposants : stations à forte variation saisonnière du régime hydrique, traitements sylvicoles à effet négatif (densité trop forte, âge trop avancé) ...

¹ En français : GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat)

- Les facteurs déclenchants : des perturbations telles que des périodes de sécheresse, des attaques sévères d'invertébrés défoliateurs ou de pathogènes microbiens foliaires (oïdium, etc.), les effets déstabilisateurs d'une tempête ...

- Les facteurs aggravants souvent appelés parasites secondaires, car intervenants sur des individus affaiblis, comme les champignons agriles ou armillaire ...

Selon Manion (1981), « *un dépérissement comporte au moins un facteur dans chacun des trois groupes de facteur (prédisposant, déclenchant, aggravant)* ».

Les chênes sont des espèces emblématiques de la forêt française, ils occupent environ 4 millions d'hectares, soit près du tiers de la surface productive totale (IGN 2014). Les surfaces sont réparties entre deux espèces très largement majoritaires que sont *Quercus robur* (chêne pédonculé) pour 2,1 millions d'hectares dont la majorité en forêts privées, et *Quercus petraea* (chêne sessile) pour 1,6 millions d'hectares.

De par l'importance spatiale de ces deux espèces dans notre pays, elles ne sont pas épargnées par le changement climatique (Lebourgeois 2006) et ce d'autant que le chêne pédonculé présente des caractères pionniers et tend à se développer sur des milieux qui ne correspondent pas à ses exigences hydriques. La conduite sylvicole des peuplements pendant des temps séculaires sous le régime du taillis sous futaie (TSF) comprenant l'exploitation par coupe rase du taillis à chaque révolution lui a permis de s'installer dans les parcelles concernées à la faveur de son gradient plus héliophile (Lemaire 2011) au détriment de ses besoins en eau.

Les dépérissements observés sur cette espèce sont nombreux ; citons notamment ceux observés en France dans la forêt de Tronçais dans les années 1980 (Becker & Lévy 1983), ceux de Vierzon au début des années 2000 (Douzon 2006), ceux des forêts du plateau Lorrain en 2003 ou encore ceux de la façade atlantique en 2010. Dans tous les cas, le **chêne pédonculé est l'espèce très majoritairement concernée** par ces phénomènes, en particulier sur les sols à engorgement temporaire (Lefèvre *et al* 2006) où il est souvent l'espèce prépondérante et sur lesquels les déficits hydriques estivaux peuvent être sévères. Ces sols à nappe d'eau temporaire sont des sols qui présentent à une profondeur variable un horizon relativement imperméable, couramment appelé plancher (Lefèvre *et al* 2006).

Face à ces situations de dépérissement, les scientifiques et sylviculteurs ont mutualisé leurs compétences et moyens pour essayer de comprendre les mécanismes en jeu et tenter de

mettre au point des outils pour assister les gestionnaires dans leurs choix sylvicoles afin de les enrayer. De nombreuses études ont été réalisées sur l'ensemble du territoire (Lemaire *et al* 2010 ; Lemaire & Maréchal 2011) et notamment en Auvergne. Cependant peu d'entre elles ont été menées sur l'impact de la succession temporelle des contraintes hydriques (ennoyage suivi de sécheresse) sur le développement et les phénomènes de dépérissement des chênes sessile et pédonculé. L'hypothèse de travail que nous voulions tester s'appuyait sur l'effet additionnel de contraintes alternées, hydriques édaphiques et climatiques (ennoyage/sécheresse), comme origine du dépérissement des chênes.

Pour vérifier cette dernière, un certain nombre d'indicateurs tels que, l'état de foliation des houppiers (protocole DEPEFEU), la résilience des individus (protocole ARCHI), la croissance radiale, les fluctuations du niveau de la nappe d'eau, sans oublier l'analyse des données climatiques ont été utilisés. Ces éléments doivent nous permettre de répondre aux questions suivantes :

- La défoliation est-elle un indicateur des contraintes hydriques ?
- La croissance radiale est-elle un indicateur des contraintes hydriques ?
- Les fluctuations de la nappe d'eau peuvent-elles expliquer les dépérissements ?

Notre étude est mise en œuvre dans le département de l'Allier et plus précisément en Sologne Bourbonnaise, région naturelle à dominante de chênes implantés sur des sols à engorgement temporaire et présentant des symptômes de dépérissement.

2 Contexte général de l'étude

Ce chapitre concerne les changements climatiques, l'importance de l'eau pour les végétaux en particulier pour les arbres, une présentation botanique et écologique des deux principales espèces de chênes et aborde les problématiques de dépérissement.

21 Changements climatiques et arbres

Le climat terrestre fluctue sur des échelles temporelles larges. Cependant les activités anthropiques modifient artificiellement la composition chimique de l'atmosphère, sur des échelles de temps beaucoup plus rapides, conduisant à un réchauffement climatique (André & Royer 1999). Le principal gaz à effet de serre est la vapeur d'eau qui, associée à d'autres gaz (CO₂, CH₄, N₂O, CFC), présente des effets de serre additionnels (Garrec 2000). L'augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂, issue principalement de la combustion des combustibles fossiles (Abrams 2011), tend à accroître cet effet de serre (Guehl *et al.* 1999) ; elle est aujourd'hui plus élevée qu'elle ne l'a jamais été au cours des 23 millions d'années passées (Pearson & Palmer 2000), passant de 280 ppmv avant la révolution industrielle (1750) à 400 ppmv en 2016, soit une hausse de près de 120 ppmv en moins de deux siècles, soit une augmentation de 42% (Riou-Nivert 2005). Pour les températures, les trois dernières décennies ont été successivement les plus chaudes à la surface de la terre. Cette hausse des températures génère une accélération du cycle hydrologique d'où une évaporation accrue au-dessus des zones océaniques. (Choisnel 1997). Les prévisions du GIEC pour les décades à venir, envisagent une augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses dans certaines régions du monde et notamment en Europe du sud (Merlin *et al.* 2015). Parce que températures et précipitations affectent la physiologie des végétaux notamment, cela devrait altérer la répartition des espèces dans les prochaines décennies (Lafferty 2009 ; Cheaib *et al.* 2012). Les variations du climat ponctuées d'aléas météorologiques sont donc les nouveaux ingrédients d'un cocktail auquel les forestiers vont être confrontés (Picard 2015).

En France, le réchauffement est bien un signal fort, les températures minimales et maximales sont en hausse significative partout, l'amplitude diurne (différence entre température maximale et minimale quotidienne) est en baisse et les contrastes pluviométriques saisonniers se sont accentués (Moisselein *et al.* 2002). Ce réchauffement tend à réduire le nombre annuel de jours de gelées avec une réduction des épisodes froids (Lebourgeois *et al.* 2001). La tendance des précipitations annuelles est globalement en

hausse (Moisselin & Dubuisson 2006) mais irrégulière sur l'année ; le nombre de jours sans pluie tend à diminuer au printemps et en automne, et à augmenter en été (Lebourgeois *et al.* 2001). Certains scénarii climatiques montrent une augmentation du nombre annuel de jours de fortes précipitations hivernales, une augmentation des épisodes secs en été et du nombre annuel de jours de canicule (Déqué 2007). La plupart des simulations issues de modèle s'accordent sur une augmentation du déficit hydrique climatique (Roman-Amat 2007).

Pour les arbres, l'augmentation de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone a pour effet une réduction de la conductance stomatique et donc des pertes en eau par transpiration et une stimulation de la capacité d'assimilation photosynthétique du CO₂, ce qui *in fine* se traduit par une augmentation de la croissance et biomasse produite (Guehl *et al.* 1999). L'augmentation du CO₂ favoriserait aussi la distribution du carbone vers les parties souterraines (Marçais *et al.* 2000). Le changement climatique a déjà induit, pour les espèces forestières, une augmentation d'une dizaine de jours de la saison de végétation, allongement correspondant à un jaunissement plus tardif du feuillage (Lebourgeois *et al.* 2010). D'ici la fin du XXI^e siècle l'allongement de la saison de végétation pourrait atteindre 20 jours (Lebourgeois *et al.* 2010). La montée des températures en automne pourrait raccourcir la phase d'endurcissement au froid des arbres et augmenter ainsi les dégâts liés aux froids hivernaux (Lacointe *et al.* 1995 ; Améglio *et al.* 1999 ; Morin *et al.* 2007). Sous l'impact de l'augmentation de l'évapotranspiration due à la hausse des températures, et des baisses de précipitations estivales, les déficits hydriques peuvent s'accroître (Choisnel 1997) au travers d'une réduction de la teneur en eau des sols influençant le fonctionnement optimal des arbres. Ces effets de déficit hydrique peuvent être directs (ex. brunissement et chute de feuilles) ou différés (ex. dépérissement) (Landmann *et al.* 2003).

22 L'eau, le végétal, la forêt

L'eau est le constituant majeur de toute matière vivante. Chez les végétaux elle représente environ 60% de leur poids frais et jusqu'à 90% des jeunes tissus en croissance. Élément de la photosynthèse, elle est impliquée dans de nombreux processus physiologiques. Les végétaux puisent l'eau dans le réservoir-sol pour assurer cette photosynthèse et compenser leurs pertes en eau liées à la transpiration (Cruziat 1997). Le réservoir sol est alimenté par les précipitations, sa capacité de stockage dépend de sa profondeur et de ses caractéristiques physiques (Hallaire 1964). Lors d'une pluie, une partie de l'eau atteint directement le sol, une partie s'écoule le long du tronc avant d'arriver au sol, enfin une fraction est interceptée

par le feuillage et les branches (Aussenac 1968). L'interception dépend notamment de la saison, de la quantité de précipitations (interception totale si $P < 2$ mm, (Granier *et al* 1999)), de la vitesse du vent, et de l'indice de surface foliaire (LAI). D'une manière générale les résineux interceptent mieux l'eau que les feuillus (ONF 1999). La structure du peuplement influence la quantité d'eau arrivant directement au sol, l'écoulement quant à lui est tributaire du type de rhytidome (Aussenac 1980). L'eau est ensuite absorbée par les racines fines (moins de 3 mm de diamètre) souvent associées à des champignons mycorhiziens (Zapater *et al* 2008). Elle circule dans le végétal sous forme de sève jusqu'aux stomates où elle sera presque totalement évaporée dans l'atmosphère, le moteur de cette circulation étant la transpiration. Les stomates permettent de réguler les pertes en eau (Cruziat *et al* 2002), cette adaptation stomatique induit une régulation de la pénétration du CO_2 et donc aussi de la photosynthèse et, *in fine*, un contrôle de la production de matière sèche (Charnet 2002).

A l'intérieur du végétal, la sève brute est sous tension et non sous pression. C'est cet état de tension qui est à l'origine de l'ascension de la sève jusqu'au sommet des plus grands arbres. Cependant cette tension peut aussi induire l'apparition de microbulles d'air dans la colonne de sève, liée au mécanisme de cavitation et à l'origine de l'embolie gazeuse des vaisseaux du bois (remplissage par l'air d'un vaisseau qui devient impropre à conduire la sève, Cruziat & Tyree 1990). On distingue l'embolie estivale (due à la sécheresse), de l'embolie hivernale (due au gel).

221 Excès d'eau et ennoyages

Les sols forestiers à nappe d'eau temporaire représentent une surface d'environ 2 millions d'hectares en France (Lebourgeois *et al* 2008), surface fréquemment couverte de chênes (sessile et pédonculé, notamment) traités pendant des siècles en taillis sous futaie (Becker *et al* 1997). Un sol à nappe temporaire est un sol qui comporte à une certaine profondeur un horizon relativement imperméable que l'on nomme le « plancher ». Une nappe d'eau peut alors se former sur cet horizon et remonter plus ou moins près de la surface, fluctuer et disparaître (Lévy *et al* 1999). Ces sols sont pour partie pauvres chimiquement et parfois très acides (Becker & Lévy 1986).

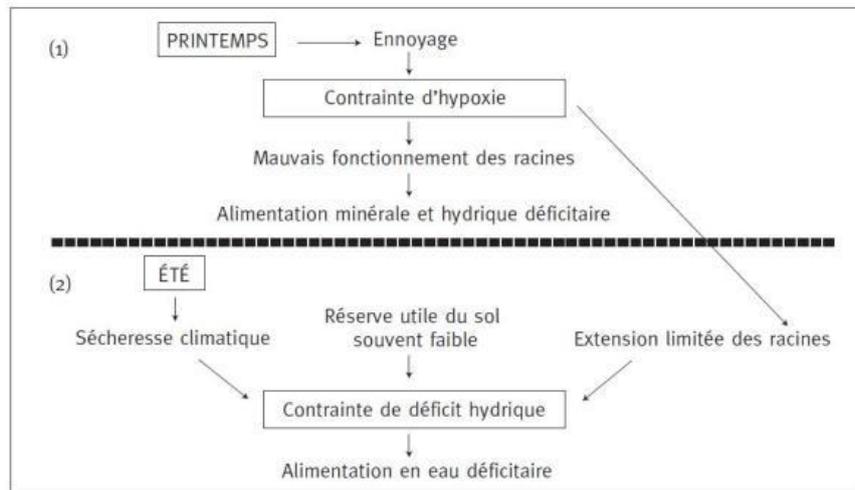
La circulation des fluides dans un sol dépend de sa porosité définie comme « l'ensemble des vides » dont l'origine peut être texturale ou structurale. La macroporosité correspond aux espaces dont le diamètre est supérieur à 6-10 microns, remplie d'eau de gravité lors de précipitations, ou d'air après ressuyage. La microporosité « stocke », dans des espaces de faible diamètre, l'eau disponible pour les végétaux. Enfin, on peut distinguer une porosité matricielle retenant de l'eau non utilisable par les végétaux (De Paul-Bailly 2005).

En période « humide », de l'automne au printemps, le système racinaire des arbres peut être ennoyé par ces nappes perchées pendant une durée variable. Cet ennoyage correspond à un excès d'eau qui sature les pores du sol excluant l'air (Gérard 2008) et limitant la disponibilité en oxygène pour les racines. Cette hypoxie est à l'origine de nécroses racinaires (Lévy & Lefèvre 2001). Au printemps, la présence de la nappe d'eau peut réduire significativement la croissance en hauteur. Le chêne pédonculé serait plus résistant à ces situations d'asphyxie que le chêne sessile (Lévy *et al* 1999). Au niveau du sol, la manifestation morphologique de l'engorgement est visible et se traduit sous forme de colorations résultant de la réduction du fer. On parle ainsi « d'hydromorphie » (Duchauffour 2004).

Cet engorgement provoque des dégradations du volume racinaire, perturbant l'absorption et la nutrition minérale (Gérard 2008), des retards phénologiques, des réductions de croissance, des problèmes de stabilité (Lévy & Lefèvre 2001). Elle induit aussi une déstructuration des agrégats au profit d'une structure massive du sol (Lebourgeois & Jabiol 2002) et une accélération de la dénitrification (Germon 1999). Dans de telles conditions, les arbres forment des racines adventives et présentent des lenticelles hypertrophiées (Colin-Belgrand *et al* 1991).

Du fait de la déstructuration des agrégats du sol, les réserves en eau utile sont souvent faibles sur ce type de sols, phénomène amplifié par l'extension limitée du système racinaire à cause de l'ennoyage, ce qui accentue le « déficit hydrique estival » (Lévy & Lefèvre 2001). Les arbres sur de tels sites présentent une sensibilité plus grande à la sécheresse estivale (Rozas 2015). En présence d'une nappe d'eau temporaire, les chênes présents, subissent alors deux contraintes successives au cours de l'année : hypoxie puis déficit hydrique (Lévy *et al* 1999). La Figure 1 résume cette situation. Au regard du changement climatique, annonçant davantage de précipitations en hiver (Dequé 2007 ; Améglio 2013), cette situation pourrait donc être accentuée.

**SUCCESION DES CONTRAINTES AUXQUELLES SONT SOUMIS LES ARBRES
SUR SOL À NAPPE TEMPORAIRE**
(d'après Lévy et Lefèvre, 2001)



(1) En période d'engorgement, le système racinaire se trouve en tout ou partie ennoyé pendant une durée variable. Le déficit en oxygène (hypoxie) limite la respiration des racines, réduit l'absorption hydrique et minérale (azotée en particulier) par les racines. La nutrition azotée est perturbée en raison de la dénitrification qui s'opère en condition anoxique et de la mauvaise nitrification de l'ammonium provenant de la minéralisation de la matière organique, par suite de la perturbation de la plupart des activités biologiques. Ces perturbations marquent l'humus, d'autant plus que le milieu est acide. La contrainte excès d'eau peut être caractérisée par les variations temporelles, au cours de la saison de végétation, de la hauteur de la nappe, de l'humidité et de l'oxygénation du sol.

(2) Le déficit hydrique estival est lié aux conséquences différées de l'hypoxie : celle-ci provoque la nécrose d'une partie du système racinaire préexistant et limite la prospection en profondeur. La colonisation des horizons profonds ne reprend que lorsque le sol est bien ressuyé. De plus, les propriétés intrinsèques des sols à nappe temporaire sont défavorables à une réserve utile élevée (faible porosité, densité apparente et compacité fortes du plancher ; faible épaisseur, structure instable, texture grossière des horizons superficiels). Ces propriétés amplifient la fréquence et l'intensité des épisodes de sécheresse. Cette contrainte est toutefois diminuée par certains facteurs compensateurs : humidité plus élevée à l'entrée de la période sèche, écoulement rapide des précipitations jusqu'au plancher où se forme un réservoir d'eau très facilement utilisable, accès possible à de l'eau du plancher argileux.

Figure 1 : Schéma résumant les contraintes hydriques sur sols à nappe temporaire
(d'après Lefèvre et al 2006).

222 Déficit hydrique

L'eau constitue le facteur climatique le plus important pour la production forestière (Aussenac 1985) et les forestiers français le savent bien : « *les années sèches, les arbres poussent moins et, les années très sèches, les arbres meurent* » (Cochard & Granier 1999). Pour les climatologues, la sécheresse peut être absolue (aucune pluie pendant la période considérée), hydrologique avec altération du niveau des nappes et du débit des cours d'eau, ou édaphique à l'origine de perturbations physiologiques. Pour les forestiers c'est cette dernière qui est importante car elle joue un rôle prépondérant dans le fonctionnement des

écosystèmes forestiers (Lebourgeois & Piedallu 2005). Pour les végétaux, qui ne disposent que de peu de réserves en eau, les déficits hydriques affectent tout d'abord la turgescence cellulaire. Cette première étape conduit à l'arrêt de toute croissance, que ce soit celle des méristèmes apicaux ou celle de l'activité cambiale (Van Der Werf *et al* 2007) ; puis à l'inhibition du développement des racines fines (Joslin *et al* 2000). La photosynthèse et la production de photosynthétats (Aussenac *et al* 1995) sont ensuite affectées puis l'intégrité fonctionnelle des vaisseaux du xylème à cause de la cavitation des colonnes de sève et la formation d'embolie gazeuse (Aussenac 1985 ; Cruziat *et al.* 2002 ; Breda *et al* 2006). Une sécheresse édaphique débute lorsque la quantité d'eau dans le sol, disponible pour les arbres, n'est plus suffisante pour compenser les pertes par évapotranspiration. Les stomates commencent alors à se fermer (Hinckley *et al* 1981 ; Saugier 2002), dès que la quantité d'eau disponible pour les arbres est inférieure à 40% de la réserve utile (Landmann *et al* 2003). Les espèces peuvent se comporter différemment dans ce cas, on distingue : l'évitement qui consiste à réduire très rapidement les pertes en eau en fermant très tôt les stomates, la tolérance et la fermeture progressive et plus tardive de ces derniers, enfin elles peuvent être incapables de réguler les pertes en eau, ce qui conduit au développement plus rapide de l'embolie. Il existe des adaptations à la sécheresse telles que la diminution de la surface foliaire, la pubescence, l'épaississement des cuticules, l'augmentation de la biomasse souterraine au détriment de la biomasse aérienne, etc. (ONF 1999). Les arbres qui ont un système racinaire profond et ramifié peuvent mobiliser une plus grande quantité d'eau et de nutriments (Breda *et al* 2006), à l'inverse ceux qui colonisent un faible volume de sol, ont des difficultés à s'adapter à la sécheresse (Lucot *et al* 1995).

23 Les chênes (*Quercus* L.)

Le genre *Quercus* couvre l'ensemble de l'hémisphère nord et colonise des habitats allant des forêts tempérées et tropicales aux formations arbustives et semi-désertiques (Nixon 1993). Depuis la dernière glaciation qui s'est achevée voici -18000 ans, les forêts de chênes ont réinvesti le continent européen abritant une vingtaine d'espèces. D'eux de ces espèces, le chêne sessile (*Quercus petraea* [Matt.] Liebl.) et le pédonculé (*Q. robur* L.), poussent jusqu'au sud de la Scandinavie (Kremer *et al.* 2002) et constituent la majorité des chênaies de par leurs qualités technologiques et la valeur quasi-sentimentale qui leur est attribuée par certaines sociétés (Grandjean & Sigaud 1987). La forêt française est recouverte de chêne sur le tiers de sa surface (Becker & Lévy 1990), elle est ainsi au premier rang Européen pour la production de bois de chêne (Drenou *et al* 2011). L'importance actuelle des chênes

dans et hors des forêts est due à leur grande plasticité et à la volonté des hommes (Ningre & Doussot 1993). Jules César soulignait déjà le statut prépondérant « du chêne » dans la forêt gauloise. (Kremer & Petit 2001). Pendant des siècles, ces espèces ont été considérées comme les espèces forestières par excellence, celle qu'il fallait maintenir ou réinstaller à tout prix (Cochet 1958). La chênaie française reste un enjeu économique de première importance et son équilibre à long terme mérite une attention soutenue (Delatour 1990).

Mais les pratiques forestières ont longtemps ignoré la notion d'espèce proposant des recommandations sylvicoles pour le traitement « du chêne ». La distinction entre sessile et pédonculé s'est heurtée pendant longtemps à la difficulté d'identification claire et à l'existence de peuplements mélangés (Breda 1994).

231 Critères morphologiques

Concernant le port de l'arbre, le chêne pédonculé présente de grosses branches noueuses à ramifications irrégulières, alors que la cime du chêne sessile comporte des branches plutôt droites ne laissant passer que peu de lumière. Chez le chêne pédonculé, l'architecture du houppier semble fortement influencée par l'âge et la vigueur de l'arbre (Rust & Roloff 2004).

L'écorce des deux espèces est d'abord lisse verdâtre pour le sessile et grisâtre pour le pédonculé. Le rhytidome est constitué de fines lanières pour le sessile et est plus grossier avec un aspect de plaque pour le pédonculé (Sevrin 1997). En l'absence de fruit, la morphologie de la feuille est l'un des critères discriminant entre les deux espèces (Ponton *et al* 2004).

Les feuilles de ces deux chênes ont fréquemment été décrites. Ainsi dès 1895, l'Abbé Félix Charles Hy écrivait : « *les feuilles de Quercus pedunculata ont des nervures principales moins nombreuses et, par suite, plus écartées, subitement décroissantes à partir du tiers supérieur du limbe, et séparées par de grandes veines intercalaires ayant une direction sensiblement parallèle à la leur* »

« *les feuilles de Quercus sessiliflora peuvent être aisément définies par leurs nervures principales assez nombreuses, rapprochées et parallèles, régulièrement décroissantes à partir du tiers supérieur, sans nervures secondaires et n'admettant entre elles que des veines commissurales* ».

Les feuilles de pédonculé sont courtement pétiolées, en moyenne 7,5 mm (Becker 1972), avec deux oreillettes à la base du limbe. La largeur maximale du limbe est située dans la partie supérieure. Les lobes, (10 selon Becker), sont irrigués de nervures intercalaires. Les poils sont absents (Dupouey & Badeau 1993). Pour le sessile, le limbe, dispose d'un long pétiole, 16 mm (Becker 1972) et d'un nombre de lobe plus important que le pédonculé (Sevrin 1997). La plus grande largeur du limbe se situe au milieu de la feuille (Figure 2). A noter d'après Becker (1972), que le critère « oreillette à la base » est loin d'être absolu, car pratiquement constant chez le chêne pédonculé, il peut être présent sur la moitié des sessiles.



Figure 2 : *Illustration extraite de www.crfp.fr; rameau feuillé fertile de chêne sessile (gauche) et de chêne pédonculé (droite).*

Les fleurs sont unisexuées régulières. Pour le pédonculé, les fleurs mâles se présentent en longs chatons pendants à la base des jeunes pousses, alors que les fleurs femelles sont presque invisibles, terminales en petits bourgeons. Pour le sessile, les fleurs mâles sont en longs chatons pendants à la base des pousses de l'année et les femelles minuscules par 2-5 à l'aisselle des pousses de l'année (Rameau *et al* 1989).

Les glands sont pédonculés, plus longs et plus gros en diamètre (Dupouey & Le Boulu 1989) chez le chêne du même nom, et sessiles et globalement plus petits chez le chêne sessile. Les longueurs de pédoncule varient de moins de 8 mm pour le sessile à plus de 17 mm pour le pédonculé (Grandjean & Sigaud 1987).

Même si l'hybridation à l'intérieur du genre *Quercus* est largement répandue, les hybrides décrits entre chêne sessile et chêne pédonculé sont soit des arbres isolés soit des arbres en petit nombre dans les peuplements (Rushton 1993) ; ils représentent moins de 5% des individus (Dupouey 1983). Kremer *et al* (2002) considèrent que l'existence d'une troisième espèce n'est pas significativement établie. Cependant certains auteurs signalent l'existence de « forme de passage » entre les deux espèces particulièrement dans les peuplements mélangés pied à pied (Becker 1972). D'autres ont décrit *Quercus rosacea* Bechst. comme un hybride de *Q. robur* x *Q. petraea* diffus en Europe Centrale (Bussotti & Grossoni 1998).

Les chênes font partie des espèces présentant un bois à zone poreuse, avec pour un même cerne, un bois initial comportant des vaisseaux de gros diamètre et un bois final de vaisseaux uniquement de diamètre plus petit. Les deux espèces majeures ne peuvent être discriminées par la seule anatomie du bois (Cufar *et al* 2014). Les propriétés du bois de chêne sont corrélées à l'épaisseur du cerne (Gricar *et al* 2013) ; par exemple, la densité augmente avec la largeur des accroissements (Polge, Keller 1973 ; Nepveu 1990), les individus à bois tendres sont les plus recherchés, ils sont aussi ceux dont les accroissements sont les plus fins (Deret-Varcin 1983). Les vaisseaux de bois initial sont formés avant et pendant le débourrement (Merlin *et al* 2015) afin de restaurer la conductivité hydraulique (Cochard & Tyree 1990 ; Cochard *et al.* 1992 ; Toïgo *et al* 2015) remplaçant ainsi ceux qui ont subi une embolie pendant l'hiver (Cochard & Granier 1999). Généralement 43% de la croissance secondaire annuelle aurait lieu avant le développement des feuilles chez le chêne (Hinckley & Lassoie 1981). A noter que le chêne pédonculé semble plus sensible à la cavitation et à l'embolie que les autres chênes indigènes en France (Cochard *et al.* 1992 ; Higgs & Wood 1995 ; Timbal & Aussenac 1996).

232 Critères autoécologiques

La présence et la dominance d'une espèce dans un milieu est la résultante d'une logique écologique ou stationnelle et d'une logique dynamique d'ordre temporelle (Rameau 1990). Le chêne pédonculé est présent dans presque tous les milieux de plaine (Figure 3) ; cette ubiquité en France a une origine anthropique, mais elle est aussi due à ses fruits de grosse taille résistant à la pourriture, à une excellente dissémination par le geai en particulier, et à un taux de germination élevé par rapport au chêne sessile (Grandjean & Sigaud 1987). Enfin les deux principaux chênes sont considérés comme des espèces post-pionnières (Barbier *et al* 2009). En termes de richesse minérale, les analyses de feuilles ne montrent pas de différences significatives de composition entre le chêne pédonculé et le chêne sessile

(Bonneau *et al* 1985). On peut résumer ainsi le schéma différentiel de niche entre ces deux espèces :

Chêne pédonculé : espèce exigeante sur le plan de la nutrition minérale et en eau, considéré comme le plus résistant des chênes aux engorgements (Gricar *et al* 2013), sensible à la sécheresse, résiste aux gelées printanières (Nebout & Macaire 1993), très héliophile et supportant mal la concurrence tout en restant une espèce sociale.

Chêne sessile : espèce plus rustique, s'accommodant de sols plus pauvres, tolérant moins bien l'engorgement du sol, résistant beaucoup mieux à la sécheresse, moins exigeante en lumière et supportant mieux la concurrence (Becker & Lévy 1990) et un certain couvert à l'état de semis (Nebout & Macaire 1993).

Le chêne pédonculé semble plus sensible à des déficits hydriques que le sessile, ce dernier est affecté par la présence d'une nappe d'eau proche de la surface (Breda 1994). L'architecture racinaire des chênes comporte un ou plusieurs pivots ramifiés au contact de l'horizon induré (Guillaumin *et al* 1985) qui explorent le sol en profondeur mais peu de manière latérale (Thomas & Hartmann 1998). Chez le chêne pédonculé, 80 à 85% de la densité racinaire totale est située dans le premier mètre depuis la surface du sol en conditions non contraignantes (Lucot & Bruckert 1992).

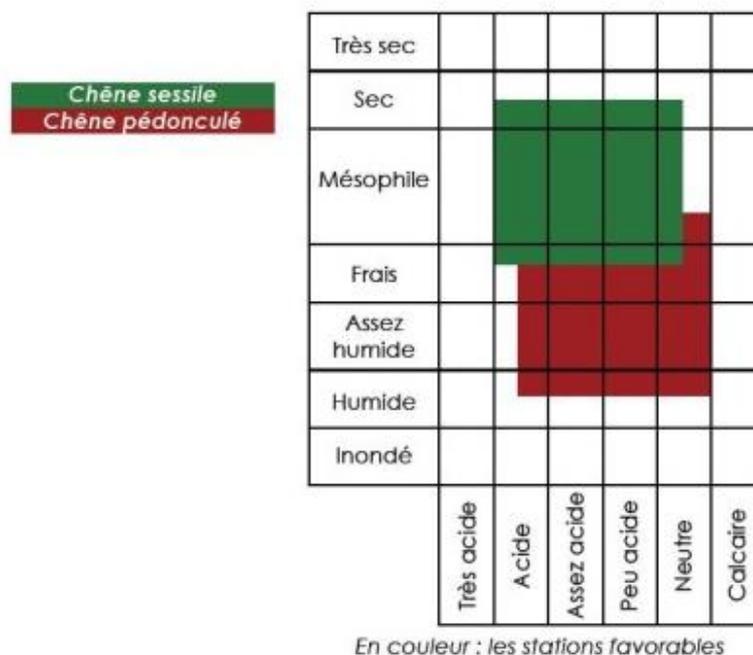


Figure 3 : Ecogramme pH/humidité du chêne sessile (vert) et du chêne pédonculé (rouge) ; source www.crfp-poitou-charente.fr.

En termes de gestion sylvicole, il est préconisé de réserver le chêne pédonculé aux sols constamment alimentés en eau ou ayant une réserve utile suffisante, aux terrains lourds et compacts. Le chêne sessile est à favoriser partout où une période de sécheresse peut être préjudiciable au chêne pédonculé (Sigaud 1986).

24 Chêne et dépérissement

Selon Manion (1981), les dépérissements sont définis comme des phénomènes causés par un ensemble de facteurs interagissant, se succédant d'une façon particulière, et entraînant une détérioration générale et graduelle, se terminant par la mort de l'arbre (Landmann 1994). Ils se traduisent essentiellement par une perte importante de feuillage et la mort de nombreux rameaux. (Berger 2013). Dès 1963, Heptig énonçait l'hypothèse selon laquelle les changements climatiques pourraient être la cause immédiate de dépérissement lorsqu'aucun pathogène n'est associé (Cook *et al* 1987).

Aux Etats Unis, dans les forêts de chênes, défoliation, sécheresse (Bendixsen *et al* 2015) et gel ont été les principaux initiateurs des dépérissements des arbres (Wargo 1996). En Europe, plusieurs épisodes de dépérissements ont été signalés, particulièrement sur le chêne pédonculé au XX^{ème} siècle : en Allemagne, Grande-Bretagne, Pologne, Roumanie, ... Ces dépérissements brusques (quelques semaines), rapides (un à deux ans) ou lents (plusieurs années voire décennies) ont presque toujours été précédés d'évènements climatiques plus ou moins marqués (sécheresse, gelées tardives) ayant altéré l'état physiologique des arbres (Durand *et al* 1983) et les rendant plus sensibles aux attaques parasitaires fongiques comme *microspora* sp. (oïdium), *armillaria* sp. (armillaire)... (Delatour 1983). Les défoliations entomologiques sévères et successives associées aux extrêmes climatiques constituent les causes les plus significatives dans l'apparition du dépérissement (Thomas *et al* 2002).

La France a aussi connu plusieurs vagues de dépérissements de chênes au cours du XX^{ème} siècle, et les forestiers ont été les premiers témoins des dégradations de l'état sanitaire et de la mortalité associée après les sécheresses de 1976 et de 2003 (Merlin *et al.* 2015). Citons notamment les dépérissements des années 1920 (Vierzon, Compiègne, ...), des années 1940 (Val de Loire, Charente-Maritime, ...), des années 1960 (Pyrénées Atlantiques), des années 1980 (Tronçais) et ceux enregistrés depuis le début du XXI^{ème} siècle (Vierzon, plateau Lorrain). L'évaluation de ces dépérissements est réalisée en France, grâce à des protocoles simples permettant d'appréhender, par les gestionnaires de terrain sans nécessiter un appareillage et des mesures fastidieuses, l'état des houppiers (DEPEFEU-Département de

Santé des Forêts) ou d'envisager l'avenir des arbres (ARCHI-Centre National de la Propriété Forestière / Institut pour le Développement Forestier).

Le dépérissement touche plutôt des peuplements denses, purs et vieillissants (Bastien *et al* 2000), des arbres de l'étage dominant (Buffet 1983) et sont précédés ou coïncident avec des périodes de déficit pluviométrique (Delatour 1990). Le chêne pédonculé, plus sensible aux déficits hydriques, aux pathologies racinaires (Desprez-Loustau *et al* 2006) et fréquent sur sols à nappe d'eau perchée temporaire (Camy *et al* 2003) a été davantage touché que le chêne sessile. L'intensité du dépérissement semble fortement corrélée au type de station (Lévy *et al* 1994), les attaques pathologiques étant plus graves en zones non engorgées par exemple (Guillaumin *et al* 1983).

25 Cadre contractuel de l'étude

L'étude s'inscrit en continuité d'un programme intitulé « Evaluation de la vulnérabilité des chênaies aux contraintes hydriques dans un contexte de changement climatique, conséquences sur la gestion de peuplements » financé par la DRAAF² et les programmes Européen LEADER³ sur le territoire du GAL (Groupe d'Action Locale) Sologne et Bocage Bourbonnais. Elle fut initiée en 2010 par l'UMR-PIAF⁴ (INRA) en partenariat avec l'IRSTEA⁵ et le CRPF⁶ Auvergne. Les deux axes principaux du projet initial étaient de :

- Etudier au niveau de l'individu, puis dans un contexte sylvicole les facteurs de sensibilité aux changements climatiques des chênes sessile et pédonculé.
- Obtenir des indicateurs permettant de caractériser les risques de dépérissement en fonction de la station et de la gestion sylvicole.

² Direction régionale de l'alimentation, de l'agriculture, et de la forêt

³ Programme de développement territorial économique et social : <http://www.grande-sologne.com/leaderplus.php>

⁴ UMR-PIAF : Unité Mixte de Recherche, Physique et Physiologie Intégrative de l'Arbre Fruitier et Forestier.

⁵ IRSTEA : Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

⁶ CRPF : Centre Régional de la Propriété Forestière.

Mon travail a donc consisté à :

- Analyser les conditions climatiques locales.
- Caractériser la sensibilité des chênes aux principales contraintes abiotiques liées aux changements climatiques ;
- Caractériser la réserve utile et le régime hydrique des sols développés sur les sables et argiles du Bourbonnais ;
- Mesurer et analyser la croissance radiale des chênes sur la période 2000-2015 ;
- Evaluer l'état sanitaire des chênes grâce aux protocoles de notation de dépérissement.

Et après croisement des informations récoltées, tenter d'établir un ou des indicateur(s) exprimant la relation entre stress hydrique et dépérissement à destination des gestionnaires pour leurs conduites sylvicoles futures.

Pour mener à bien ce projet de recherche, plusieurs sites en forêt privée ont été sélectionnés dans le département de l'Allier grâce à la connaissance de terrain du CRPF Auvergne représenté par de Jean-Paul Nebout (Ingénieur Principal, Responsable de l'antenne de l'Allier). Les parcelles devaient comporter un peuplement de chênes adultes traités en futaie régulière, présenter une homogénéité stationnelle, un gradient d'engorgement et être proches géographiquement. Les sites de Chézy et Paray le Frésil ont été choisis et équipés, en accord avec les propriétaires, d'un dispositif clos de 100 m² (Photographies 1 à 3).



Photographie 1 : Site de Paray le Frésil, éclaircie réalisée en 2015 par le propriétaire. Cette éclaircie vise à tester les phénomènes de concurrence entre la molinie bleue et les jeunes plants de chênes.



Photographie 2 : *Contexte du dispositif UMR-PIAF site de Paray le Frésil, comprenant un pluviomètre, une sonde de température, un chêne appareillé avec des capteurs de flux de sève.*



Photographie 3 : *Contexte du dispositif UMR-PIAF site de Chézy.*

3 Matériels et méthodes

31 Présentation des sites

311 Situation géographique

Les forêts étudiées sont situées dans le département de l'Allier en Auvergne. La forêt Auvergnate couvre 700000 ha (5% de la surface forestière française), le taux de boisement régional de 28% est conforme à la moyenne nationale (IGN 2010). On dénombre 210000 propriétaires qui possèdent environ 86% de la forêt auvergnate (SRGS 2005). Les espèces feuillues représentent 46% de cette surface avec notamment des chênes de haute qualité valorisés en merrain (fabrication de tonneaux) et tranchage (placage d'ébénisterie).

Le département de l'Allier se situe au nord de la région avec une surface forestière de 123000 ha (17% du territoire régional) essentiellement composée d'espèces feuillues sur 98000 ha (dont 83% de chênes). On dénombre dans le département six régions naturelles au sens de l'Inventaire Forestier National. Les sites étudiés sont situés en Sologne Bourbonnaise.

La Sologne Bourbonnaise est à cheval sur quatre départements (Allier, Loire, Nièvre, Saône et Loire) ; sur l'Allier elle représente 148 000 hectares (taux de boisement 16,5%). Il s'agit d'un plateau au relief mollement vallonné d'altitude comprise entre 200 et 300 m (moyenne 240 m) dont le réseau hydrographique est peu dense. La forêt, à 82% feuillue, est majoritairement privée avec de grandes unités de gestion (50 hectares et plus) à vocation sylvicole de production de chênes (sessile et pédonculé) et cynégétique. Les peuplements rencontrés sont majoritairement issus de taillis avec réserves (ancien taillis sous futaie avec un taillis simple à structure régulière sous une futaie irrégulière graduée constituée d'arbres de franc-pieds), qui en l'absence de gestion se sont plus ou moins régularisés (Beaufils 1989). Le taillis a vieilli, les brins sont « montés » dans l'étage dominant et le diamètre des individus de franc pied s'est homogénéisé (régularisé), les peuplements ont ainsi l'aspect d'une « futaie régulière ». D'un point de vue autoécologique, le chêne pédonculé n'est pas au cœur de sa niche écologique en Sologne-Bourbonnaise car les sols ont des pH relativement bas et sont pauvres d'un point de vue trophique (Lamure 2007).

312 Climat

Les données climatiques ont été collectées sur la station météorologique d'Yzeure (alt. 242 m, 46°35'N 3°21'E). Le climat est de type océanique, avec une moyenne annuelle des précipitations (P) de 802 ±122 mm réparties tout au long de l'année. Le mois de mai est le plus arrosé (90 mm) et les précipitations orageuses sont fréquentes en août (Figure 4). Dans le détail, 21% des précipitations arrivent en hiver (DJF), 26% au printemps (MAM), 26% en été (JJA) et 27% en automne (SON). La saison de végétation reçoit plus de 50% des précipitations annuelles. La température moyenne annuelle est de 11,5° ± 0,6°C, et de 4,1° ± 1,4°C en hiver, 10,9° ± 1,1°C au printemps, 19,5° ± 1,2°C en été et 11,9° ± 1,0°C en automne. Sur la période 2000-2015, les valeurs d'ETP annuelles ont été calculées par la somme des ETP mensuelles issues de la formule de Turc :

$$EPT = (N * 0.013) * (RG + 50) * (T / (T + 15)).$$

Avec N= nombre de jour du mois, RG = rayonnement global, T = température moyenne mensuelle (Lebourgeois & Piedallu 2005). Elles varient de 667 à 761 mm On dénombre environ 100 jours de gel par an (octobre à avril).

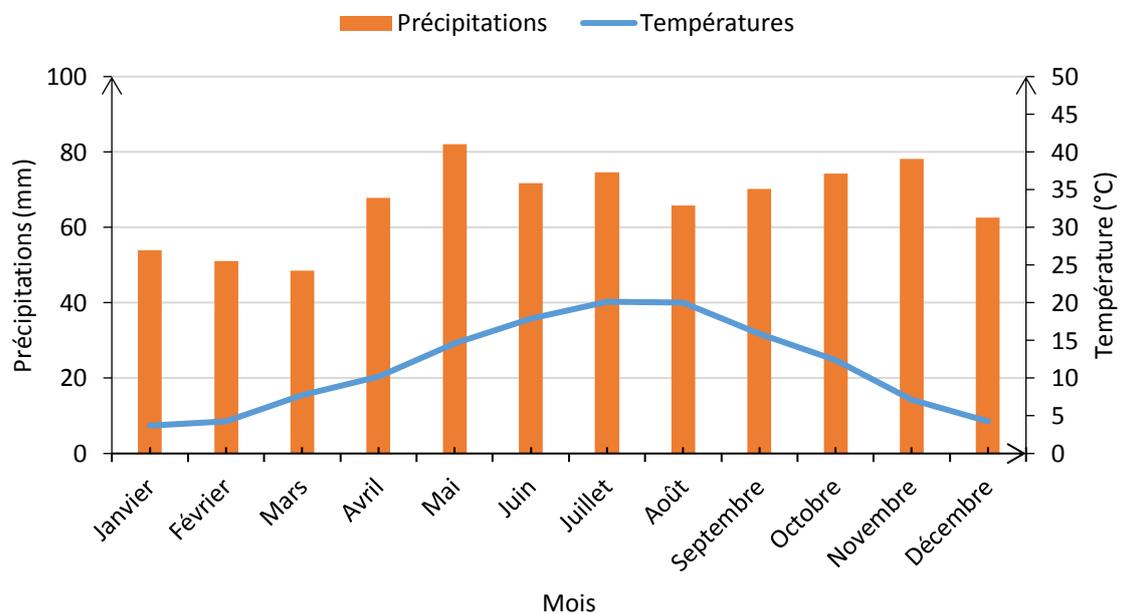


Figure 4. Diagramme ombrothermique de la station météorologique d'Yzeure, calculé sur une période de 30 ans (1986-2015).

L'indice d'aridité de Martonne :

$$I=P/(T+10)$$

est de 38 ce qui caractérise un climat « humide » et aucun mois sec au sens de Bagnouls et Gaussen (1953) ou $P < 2T$ n'est jamais observé (Figure 4). Les vents dominants sont de secteur ouest.

313 Géologie

Le site de Chézy est situé sur les sables et argiles du Bourbonnais (dit 'Plio-Pléistocène'), plus précisément à la limite entre les ensembles fluvio-lacustres d'argiles, sables, galets et matériaux alluviaux et les colluvions dérivées de ces formations (CFL). Le site de Paray le Frésil est localisé sur des colluvions à dominante sableuse, dérivées des formations des sables et argiles du Bourbonnais. Cette formation des sables et argiles du Bourbonnais est étroitement liée aux mouvements tectoniques qui ont affecté le Massif Central au Pliocène (Le Griel 1980).

314 Pédologie

Les analyses pédologiques des sites ont été réalisées pour l'UMR-PIAF par M^{me} Pelletier de VetAgroSup-Clermont Ferrand (Pelletier 2011).

D'après le référentiel pédologique de 2008, les sols de Chézy sont des luvisols typique-rédoxisol à pseudogley de nappe perchée dès la surface, oligosaturés (taux de saturation par horizon 32%, 28%, 69%), sablo-limoneux sur 75 cm puis argileux sur pente nulle. A partir de l'analyse granulométrique (Tableau I), les classes texturales ont été déterminées par horizon avec le triangle de texture de Jamagne. Grâce à ces classes texturales, nous pouvons calculer le réservoir utile du sol en utilisant un coefficient multiplicateur indiquant la quantité d'eau pouvant être retenue par cm de sol (mm.cm^{-1}) :

- Horizon Aeg : Limon sableux sur 20 cm soit $20 \times 1,45 = 29,0$ mm.
- Horizon BT1gcn : Limon Argilo-sableux sur 55 cm soit $55 \times 1,75 = 87,5$ mm.
- Horizon BT2 : Argile Sableuse sur 85 cm soit $85 \times 1,70 = 144,5$ mm.

Le réservoir en eau utile du sol sur 160 cm de profondeur, calculé selon Baize et Jabiol (1995) est de 260 mm.

Tableau I. Données granulométriques des sols de Chézy en %.

Horizons	Profondeur (cm)	Argile %	Limons Fins %	Limons Grossiers %	Sables Fins %	Sables Grossiers %	pH eau
Aeg	0-20	12,4	19,9	11,3	10,9	45,5	5,1
BT1gcn	20-75	27,1	19,3	9,0	9,0	35,6	4,8
BT2g	75-160	35,6	14,4	7,6	8,0	34,4	5,1

A Paray le Frésil, il s'agit également de luvisols typique-rédoxisol à pseudogley de nappe perchée à 30 cm, oligosaturés (taux de saturation par horizon 62%, 21%, 22%, 31%), sablo-limoneux sur 50 cm puis limon sablo-argileux.

A partir de l'analyse granulométrique (Tableau II), les classes texturales ont été déterminées par horizon grâce au triangle de texture de Jamagne et le réservoir utile calculé :

- Horizon Ae1 : Limon sableux sur 10 cm soit $10 \times 1,45 = 14,5$ mm.
- Horizon Ae2 : Limon sableux sur 20 cm soit $20 \times 1,45 = 29,0$ mm.
- Horizon Eg : Limon sableux sur 20 cm soit $20 \times 1,45 = 29,0$ mm.
- Horizon BTg : Limon argilo-sableux sur 120 cm soit $120 \times 1,75 = 210$ mm.

Le réservoir en eau utile du sol sur 170 cm de profondeur, calculé selon Baize et Jabiol (1995) est de 282 mm.

Tableau II : Données granulométriques des sols de Paray le Frésil en %

Horizons	Profondeur (cm)	Argile %	Limons Fins %	Limons Grossiers %	Sables Fins %	Sables Grossiers %	pH eau
Ae1	0-10	12,0	21,0	12,5	10,5	44,0	4,8
Ae2	10-30	11,2	20,8	13,2	11,5	43,3	4,8
Eg	30-50	11,1	19,0	12,9	11,0	46,0	4,8
BTg	50-170	28,6	1,3	10,7	9,9	33,5	4,8

Les réservoirs utiles maximums calculés sur chaque site sont très importants, respectivement 260 et 282 mm ; cependant la répartition racinaire observée à l'ouverture

des fosses pédologiques montre une diminution très rapide de la densité de racines fines dès 100 cm de profondeur pour les deux sites (Figures 5 et 6). Si l'on intègre cette distribution racinaire (Photographie 4), les réservoirs utiles maximums sont alors calculés sur 100 cm de profondeur et sont de 160 mm pour les deux sites.

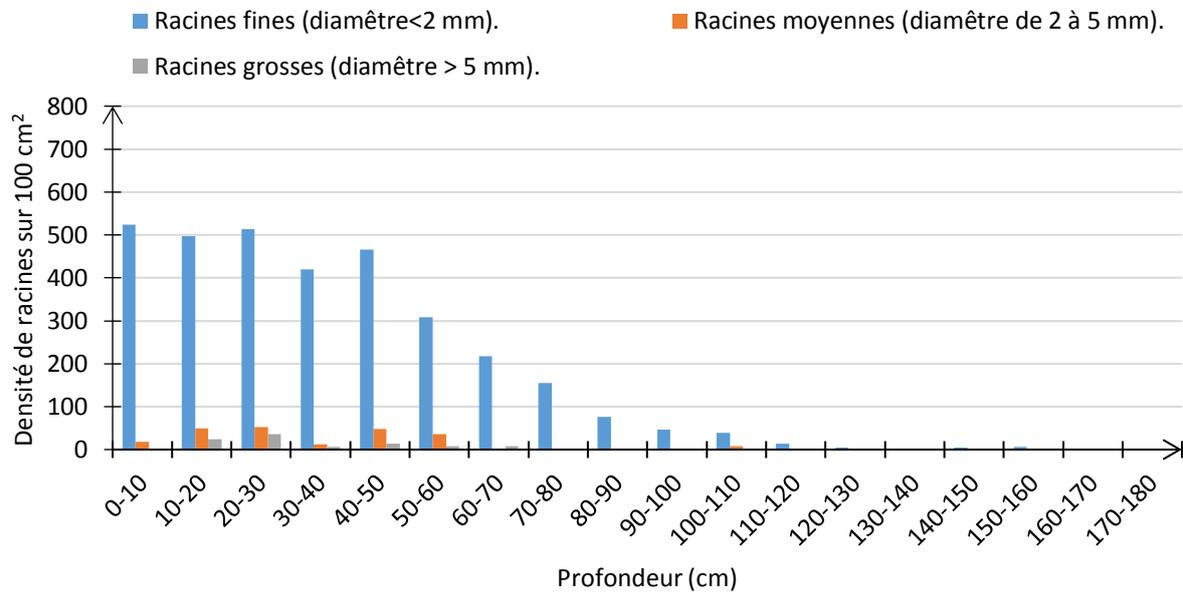


Figure 5 : Profil racinaire observé sur le site de Chézy (extrait d'Améglio 2013).

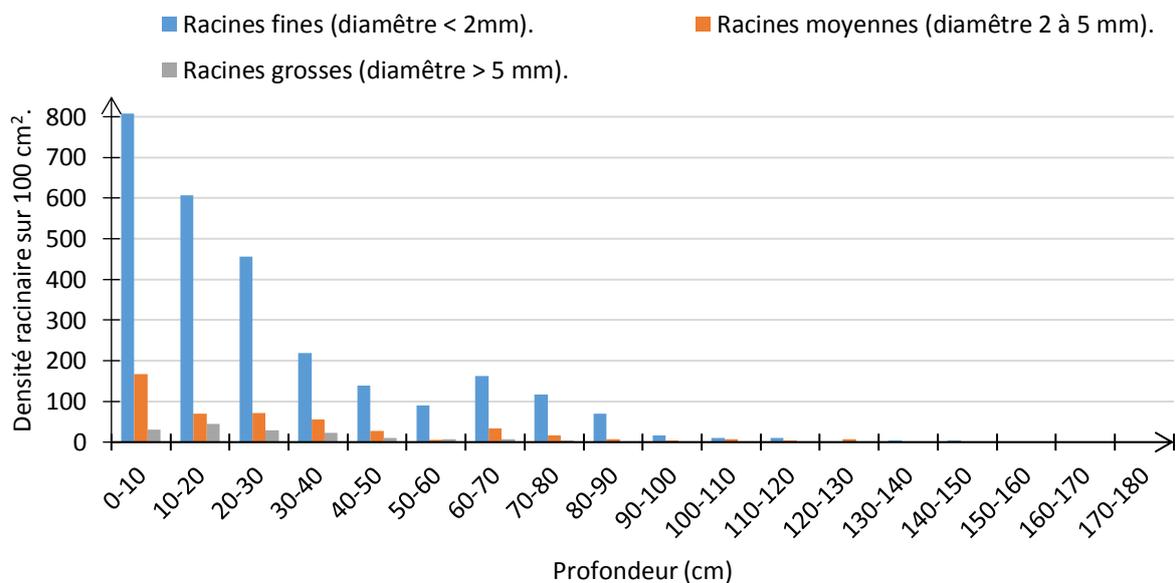


Figure 6 : Profil racinaire observé sur le site de Paray le Frésil (extrait d'Améglio 2013).



Photographie 4 : Répartition des racines sur fosse profonde, site de Chézy.

L'absence de relief sur les deux sites et la présence d'un horizon argileux plus ou moins proche de la surface génèrent l'existence d'une nappe d'eau perchée temporaire hiverno-printanière dont les fluctuations ont été relevées (depuis septembre 2011) grâce aux piézomètres installés dans les dispositifs (Figure 7). L'ennoyage racinaire peut persister après le début de la saison de végétation, cette dernière ayant été évaluée grâce au rayonnement transmis (Figure 8) du 15 avril au 10 novembre environ.

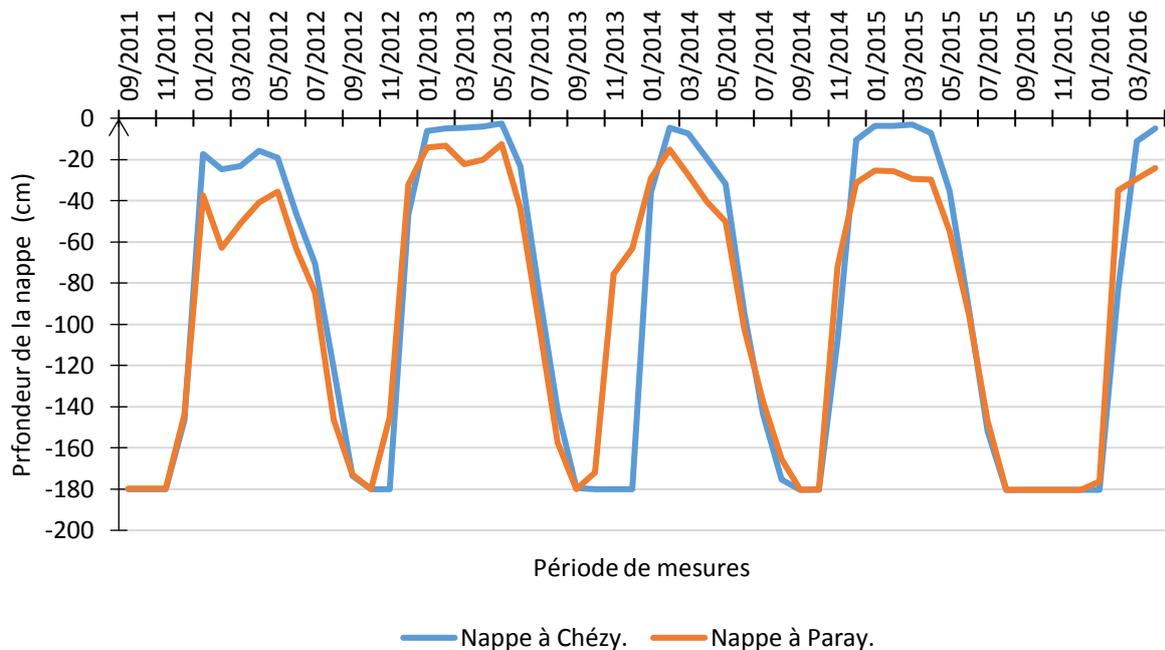


Figure 7 : Niveau de la nappe d'eau perchée temporaire sur les sites de Chézy et de Paray le Frésil (0 = nappe d'eau affleurante).

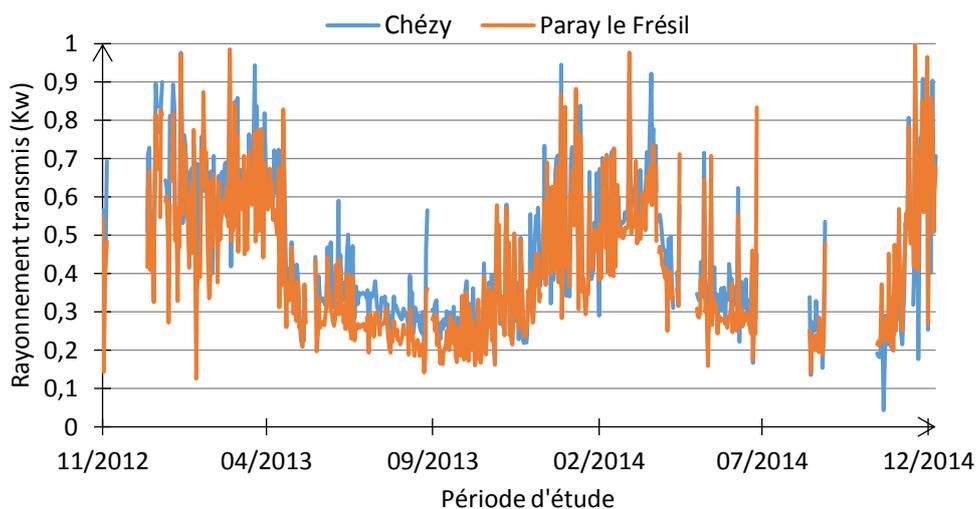


Figure 8 : Rayonnement (rapport entre le rayonnement sous couvert forestier enregistré sur les dispositifs et le rayonnement mesuré par la station météorologique UMR-PIAF installée hors-couvert, spectre radiatif entre 300 et 1100 nm) sur les sites de Chézy et de Paray le Frésil.

315 Gestion sylvicole

Forêt de Chézy

La forêt dans laquelle se trouve la parcelle étudiée couvre environ 372 ha. Ce massif est constitué en groupement forestier (Groupement Forestier des Harcholins) propriété du Crédit Agricole (Crédit Agricole Asset Management Real Estate). L'objectif assigné à la forêt est la production de bois d'œuvre de chêne de qualité et sa gestion est confiée au cabinet d'expertise forestière Demetz-Costaz à Paris. Le document de gestion durable (Plan Simple de Gestion) prévoit la poursuite de la conversion des peuplements de taillis avec réserve en futaie irrégulière par parcelle entière.

Le chêne sessile est l'espèce principale de la forêt, suivie du chêne pédonculé, accompagnés de charme (*Carpinus betulus* L.), bouleaux (*Betula pendula* Roth.) et peuplier tremble (*Populus tremula* L.). Parmi les conifères – espèces plantées, certaines introduites - le pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) est majoritaire accompagné de pin de Weymouth (*Pinus strobus* L.) et de quelques pins maritimes (*Pinus pinaster* Ait.).

La parcelle instrumentée et support de cette étude est la parcelle cadastrale 000F38 La Grande Coupe, commune de Chézy, d'une contenance de 29,5 ha environ, elle comporte du chêne sessile et pédonculé traités en futaie régulière (Photographie 5) avec une densité actuelle de 135 tiges.ha⁻¹ dont 103 chênes ; les autres espèces présentes en très faible

quantité sont : tilleul à petites feuilles (*Tilia cordata* Mill.), pin de Weymouth et sapin pectiné (*Abies alba* Mill.). L'âge estimé du peuplement à partir de sondage à la tarière de Pressler effectués à cœur à 1,30 m du sol est de 115 ans environ.

Forêt de Paray le Frésil

La forêt appartient à l'Indivision Charrier, elle est entièrement close sur environ 239 ha répartis sur trois communes (La Chapelle aux Chasses, Paray le Frésil, Chevagnes). Sa gestion est assurée par la coopérative forestière UNISYLVA à Moulins. Le document de gestion durable (Plan Simple de Gestion) prévoit la production de bois d'œuvre de chêne de qualité et la gestion cynégétique du parc. Les espèces rencontrées sont sensiblement les mêmes qu'à Chézy, à noter cependant la présence de douglas (*Pseudotsuga menziesii* F) ainsi qu'une plus forte proportion de chêne pédonculé.

La parcelle étudiée est la parcelle cadastrale 000AM43 Bois Boulot, commune de la Chapelle aux Chasses, de 13,6 ha environ composée majoritairement de chêne pédonculé traité en futaie régulière (Photographie 6) et d'une densité actuelle de 361 tiges.ha⁻¹ dont 282 chênes ; les autres espèces présentes en faible quantité sont le bouleau verruqueux, le tremble, le charme et le pin sylvestre. Le peuplement daté grâce au sondage à cœur effectué à la tarière de Pressler à 1,30 m du sol à 85 ans environ.

32 Protocole et mesures réalisés

Les sites de Chézy et de Paray le Frésil ont été équipés d'un dispositif clos d'environ 100 m² en 2011 avec les éléments suivants :

- Trois fosses pédologiques profondes équipées de vitres (rhizotrons), de thermocouples, de sondes TDR (capteurs d'humidité).
- Trois pluviomètres, un pyranomètre, un piézomètre, une sonde de température et une de mesure de l'humidité de l'air sous abri.
- Des capteurs de flux de sève sur les chênes de l'enclos.
- L'ensemble des capteurs reliés à une centrale d'acquisition enregistrant les données toutes les 15 minutes.

Parallèlement aux installations en forêt, une station météorologique installée hors couvert enregistre les valeurs de température, humidité de l'air et la pluviométrie au même pas de temps.

Nous avons effectué une reconnaissance des parcelles afin de repérer les limites physiques et appréhender les peuplements en place. Cette reconnaissance a permis de délimiter une zone d'environ 10 ha sur chaque site (Figures 9 et 10). Chaque zone a été dotée d'un quadrillage au pas de 50 mètres soit 4 points de sondage par hectare à l'aide du logiciel de SIG Qgis 2.6. Les données ont ensuite été exportées via le logiciel Garfile dans un gps Garmin de terrain. La densité de 4 points de sondage par hectare est habituellement utilisée en foresterie (Rosa *et al* 2011), notamment en phase d'inventaire typologique, par exemple selon la norme « Typologie Chêne Avenir ». Initialement établie pour la région Centre, elle est aujourd'hui utilisée dans d'autres régions où l'on rencontre des peuplements de chênes issus d'anciens taillis avec réserves.



Photographie 5 : *Peuplement forestier de Chézy.*



Photographie 6 : *Peuplement forestier de Paray le Frésil*

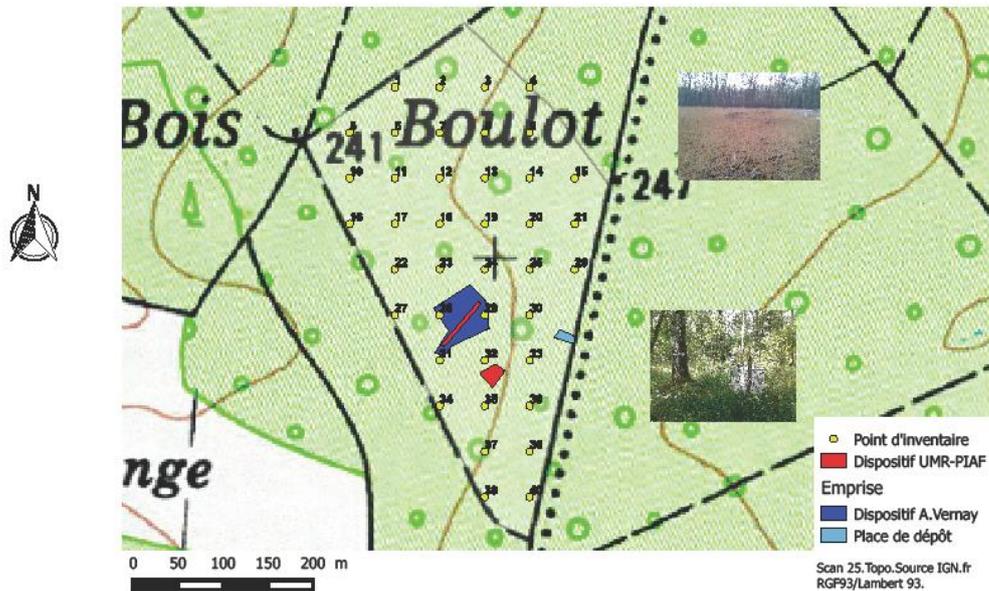


Figure 9 : Délimitation de la parcelle étudiée et indication des points d'inventaire (points noir) sur une maille de 50*50 m site de Paray le Frésil.

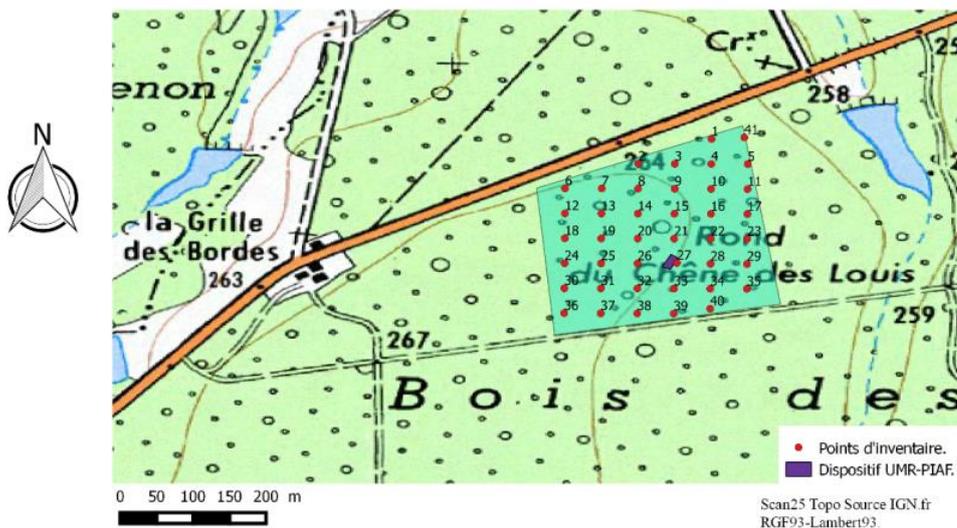


Figure 10 : Délimitation de la parcelle étudiée et indication des points d'inventaire (points rouge) sur une maille de 50*50 m site de Chézy.

L'inventaire des arbres par espèce et les mesures de la circonférence du tronc au ruban forestier à 1,30 m du sol ont été réalisés dans un rayon de 10 m autour du centre de chaque point de sondage sur une surface d'environ 314 m². L'abondance-dominance de la fougère aigle (*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn) et de la molinie bleue (*Molinia caerulea* (L.) Moench), espèces les plus présentes, a été noté grâce au coefficient de Braun-Blanquet (1952) sur chaque placette (Tableau III).

Tableau III : Coefficients de Braun-Blanquet utilisés, les classes de recouvrement correspondent à la surface de sol occupée par les espèces.

Abondance-dominance	Classe de recouvrement
5	75-100%
4	50-75%
3	25-50%
2	5-25%
1	1-5%
+	<1%

Tous les chênes ont fait l'objet d'une notation à partir du protocole simplifié DEPEFEU (DSF-Nageleisen 2013) au cours de l'été 2015, puis hors feuille avec le protocole ARCHI (CNPF / IDF 2013) en janvier 2016. Le protocole DEPEFEU (Figure 11), utilisable sur des individus en feuilles, prend en compte la transparence du houppier, la mortalité d'organes pérennes (rameau, branche), la répartition de la masse foliaire et des ramifications (Nageleisen 2013 ; Petroff 2014). Les notes attribuées s'étalent sur une échelle de 0 à 4 de la manière suivante :

- 0 arbre sain, absence de symptômes
- 1 arbre légèrement dépérissant
- 2 arbre modérément dépérissant
- 3 arbre fortement dépérissant
- 3+ arbre très fortement dépérissant
- 4 arbre mort ou moribond

Classes	Dénomination globale	Critères descriptifs
0	Sain	Absence de symptômes Ramifications fines très abondantes Houppier à l'état feuillé ne laissant quasiment pas voir le ciel à travers
1	Légèrement dépérissant	Rameaux fins desséchés dans la périphérie du houppier et/ou quelques branches mortes et/ou transparence légère à modérée liée à une perte de ramifications fines légères et/ou présence de fenêtres disjointes et/ou rameaux en fouet. Squelette de l'arbre invisible à l'état feuillé.
2	Modérément dépérissant	Branches desséchées dans la moitié supérieure du houppier mais moins de 50% et/ou transparence moyenne à forte liée à une perte assez forte de ramifications fines (<50%) et/ou échancrures nettes dans le houppier et/ou feuilles apparaissant réparties en paquet. Visualisation partielle du squelette de l'arbre à l'état feuillé
3	Fortement dépérissant	Branches mortes composant plus de 50% du houppier et/ou disparition de plus de 50% de la ramification. Visualisation totale du squelette de l'arbre.
3+	Très fortement dépérissant	Branches mortes composant plus de 75% du houppier et/ou disparition de plus de 75% de la ramification. Visualisation totale du squelette du houppier.
4	Mort	Houppier mort : Arbre mort ou moribond

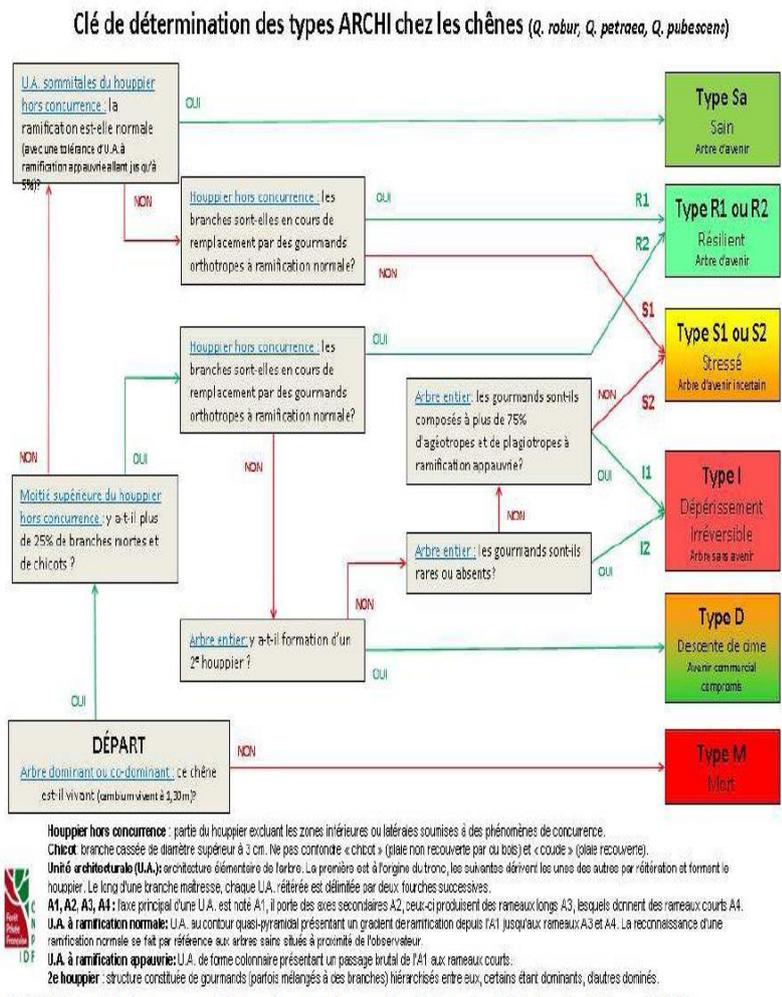
Figure 11 : *Protocole simplifié DEPEFEU (DSF-Nagelseisen 2013).*

En préalable à l'utilisation du protocole DEPEFEU, le notateur doit déterminer dans la parcelle l'arbre de référence (note attribuée 0) pour pouvoir étalonner le reste de la notation. Il peut ainsi exister des différences d'appréciation d'un arbre « sain » d'un site à l'autre. En saison de végétation et en fonction de la stratification du peuplement, il peut aussi être délicat d'avoir une vision d'ensemble de l'état de feuillaison.

Le protocole ARCHI (Figure 12) est un outil permettant d'évaluer la réaction des arbres au stress à partir de descripteurs architecturaux des branches sommitales et de l'orientation des gourmands (orthotropes, plagiotropes ou agéotropes). Il s'utilise hors saison de végétation

et permet de classer les arbres en « type ARCHI » » à l'aide d'une clé de détermination d'avenir probable des individus (Drenou *et al* 2011 ; Petroff 2014). Les types déterminés sont les suivants :

- Type Sa, sain
- Type S, stressé
- Type R, résilient
- Type I, irréversible
- Type D, descente de cime
- Type M, mort



CNPF-IDF – C Dréno en complément du protocole complet (M Bouvier / C Dréno) – IDF – avril 2013

Figure 12 : Clé du protocole ARCHI (IDF-2013).

Pour ARCHI contrairement à DEPEFEU, la phase d'étalonnage n'existe pas et l'état défeuillé permet une meilleure visualisation de l'architecture de l'arbre, enfin la clé permet directement d'obtenir le type. A chaque notation, nous avons été assistés par le correspondant observateur local du Département de Santé des Forêts (Monsieur Adrien Bazin, CRPF de l'Allier).

A partir des résultats d'inventaire, 110 arbres ont été choisis pour constituer un échantillon représentatif de la variabilité des circonférences et des notations DEPEFEU. Les classes de circonférence sont 40-90cm, 90-120cm et 120 cm et + pour Paray le Frésil ; 40-120cm, 120-160 cm et 160cm et + sur Chézy. Les classes de notation DEPEFEU représentatives sont les classes 0 à 3+ pour Chézy et 1 à 4 pour Paray le Frésil.

Ces arbres ont été sondés en hiver à la tarière de Pressler à 20-30 cm du sol, côté nord sur 10-15 cm de profondeur. Le sondage à la tarière consiste à prélever une petite « carotte » de bois (biopsie) pour évaluer à posteriori la croissance des arbres. A l'issue du prélèvement, les trous de sondage ont été rebouchés avec une cheville de bois et recouverts de cicatrisant. Les biopsies ont été identifiées par le numéro de placette, la circonférence de l'arbre et sa note DEPEFEU (Photographies 7 à 9).



Photographie 7 : *Prélèvement de biopsie au pied d'un chêne à la tarière de Pressler.*



Photographie 8 : *Insertion d'une cheville bois.*

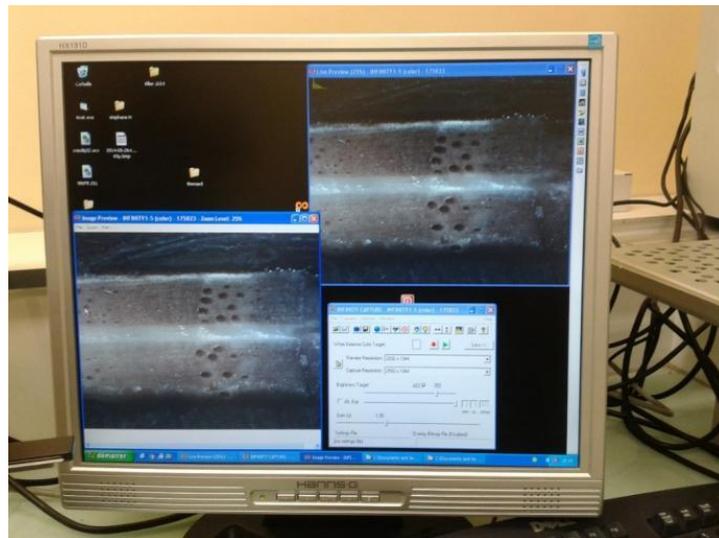


Photographie 9 : *Recouvrement avec cicatrisant.*

Les prélèvements ont été photographiés sous loupe binoculaire focale de 35 mm avec le logiciel Infinity Capture, numérisés à la résolution de 2592×1944 pixels et enregistrés au format TIFF (Photographie 10). Chaque prélèvement a fait l'objet d'un nombre variable de clichés afin d'être intégralement numérisé. Les biopsies ont ensuite été reconstituées avec le logiciel Panorama Factory V5 (Photographies 11). Les accroissements annuels correspondant à chaque cerne et distinguant bois initial et bois final ont été mesurés, après étalonnage grâce à un papier millimétré, avec le logiciel Image J. La distinction bois initial et bois final a été évaluée visuellement à partir de la taille des vaisseaux du bois, le bois initial comportant des vaisseaux de gros diamètres par rapport à ceux du bois final (Photographie 12).



Photographie 10 : *Photographie des biopsies sous la loupe binoculaire.*



Photographie 11 : *Numérisation des biopsies. On peut observer la distinction bois initial (vaisseaux de gros diamètre) bois final (vaisseaux de faible diamètre), correspondant à une année de croissance radiale.*



Photographie 12 : *Biopsie reconstituée avec Panorama Factory V5.*

Nous avons tenté de déterminer la profondeur du plancher argileux sur chaque point d'inventaire à la tarière pédologique de Jamagne, malheureusement les conditions très sèches de 2015 et début 2016 nous ont contraint à limiter nos prospections aux premières traces de marmorisation (Photographies 13 à 15). Ces traces correspondent au niveau maximum atteint par la nappe d'eau perchée temporaire et à la dynamique de réduction du fer lors de son retrait. Nous caractériserons cette profondeur par la suite comme étant le plafond de la nappe.



Photographie 13 et 14 : *Sondage à la tarière de Jamagne jusqu'aux premières traces de marmorisation.*



Photographie 15 : *Niveau d'eau fin janvier 2016 dans une fosse profonde (environ 2 mètres) sur le site de Chézy.*

33 Analyse des données :

Sur les 110 prélèvements dendrochronologiques effectués (biopsies), 102 ont été analysés. Les difficultés de lecture et/ou les ruptures des biopsies nous ont conduits à écarter 8 individus du site de Paray le Frésil. Pour analyser les accroissements annuels, nous avons constitué une base de données comprenant les 102 arbres et les 16 années considérées (2000-2015) incluant les notations DEPEFEU et ARCHI, la profondeur du plafond de la nappe d'eau perchée temporaire, la circonférence des arbres, les variables climatiques de l'année n (températures et précipitations mensuelles), la moyenne des températures minimales d'août et septembre de l'année n-1, les moyennes saisonnières de température, la somme saisonnière des précipitations (hiver = DJF ; printemps = MAM ; été = JJA ; automne = SON), enfin nous avons ajouté les valeurs moyennes d'accroissement sur les trois dernières années et la somme des précipitations de mai, juin, juillet (Michelot et al 2012). Les deux espèces de chênes ont été distinguées. Nous avons également exploré les corrélations entre l'accroissement mesuré sur chaque cerne de l'année n et les moyennes des accroissements sur 4 ou 5 ans, avec les variables climatiques saisonnières, globalement et par espèces. Les accroissements pouvant être influencés par les données climatiques de l'année n-1 (Aussenac & Parde 1985, Gonzalez *et al* 2003, Kniesel *et al* 2015), nous avons testé cette possibilité en ajoutant la moyenne annuelle de température, la somme des précipitations et les paramètres saisonniers, en général et par espèce. Dans un deuxième temps nous avons tenté de modéliser l'accroissement mesuré, par régression linéaire multiple en distinguant les deux espèces, avec les variables climatiques les plus significatives de l'année n. Pour ce faire nous avons écarté les valeurs mesurées du bois initial et du bois final très fortement corrélées à l'accroissement total de chaque cerne, forte corrélation déjà observées par Lebourgeois *et al* (2004). Enfin, pour tester le niveau de signification des différences observées, nous avons effectué des tests non paramétriques de Kruskal-Wallis, la distribution des données ne répondant pas à une loi normale. Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel XLSTAT 2013.

4 Résultats

41 Ensemble des arbres

411 Aspects dendrométriques

Les surfaces inventoriées sont de 1,1 ha sur le site de Paray le Frésil et 1,2 ha pour celui de Chézy. Sur ces surfaces, 545 arbres ont été mesurés (377 à Paray le Frésil et 168 à Chézy) dont 427 chênes (296 à Paray le Frésil et 131 à Chézy) (Figures 13 et 14). La circonférence moyenne mesurée est de 93 ± 27 cm à Paray le Frésil (95 ± 27 cm pour le chêne), 129 ± 47 cm à Chézy (146 ± 35 cm pour le chêne). La classe médiane de circonférence est la classe 80-100 cm pour les chênes de Paray le Frésil et la classe 140-160 cm pour ceux de Chézy. Les densités ramenées à l'hectare sont de 361 tiges à Paray le Frésil (dont 282 chênes) et 135 tiges à Chézy (dont 103 chênes). Le site de Paray le Frésil ne comporte que du chêne pédonculé et 32% de chêne sessile sont présents à Chézy. La surface terrière calculée est de $25 \pm 10\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$ dont $20 \pm 10\text{m}^2$ de chêne à Paray le Frésil et $19 \pm 8\text{m}^2$ dont $18 \pm 8\text{m}^2$ de chêne à Chézy.

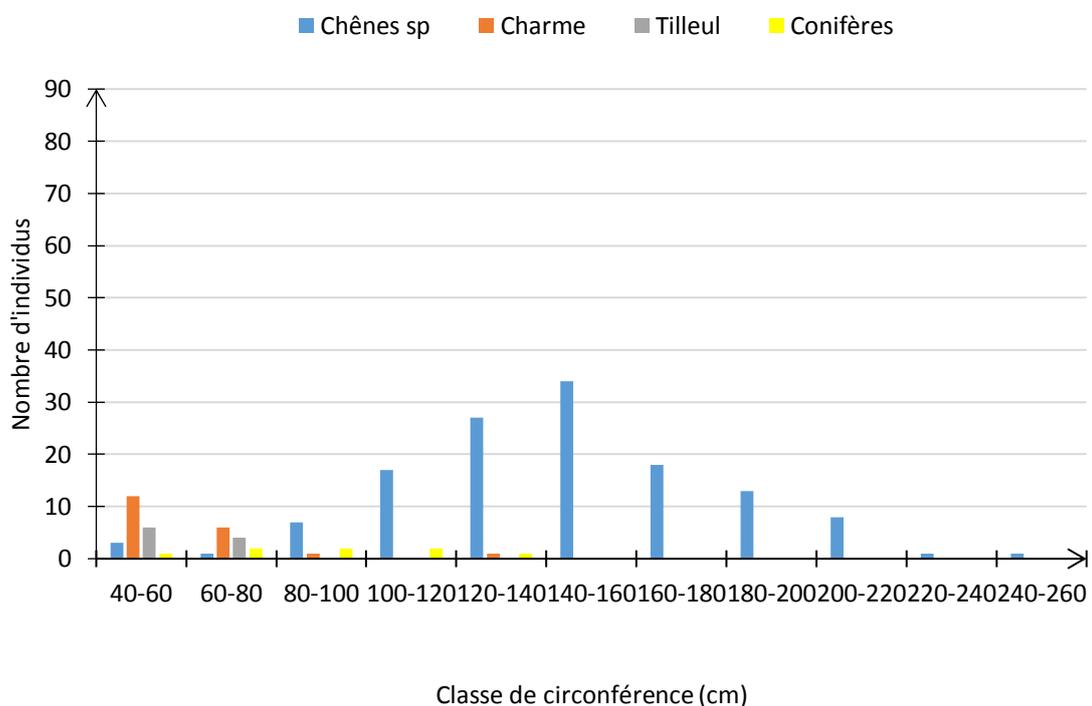


Figure 13 : *Distribution de la circonférence des troncs (cm) à 1m30 du sol, par espèce sur le site de Chézy.*

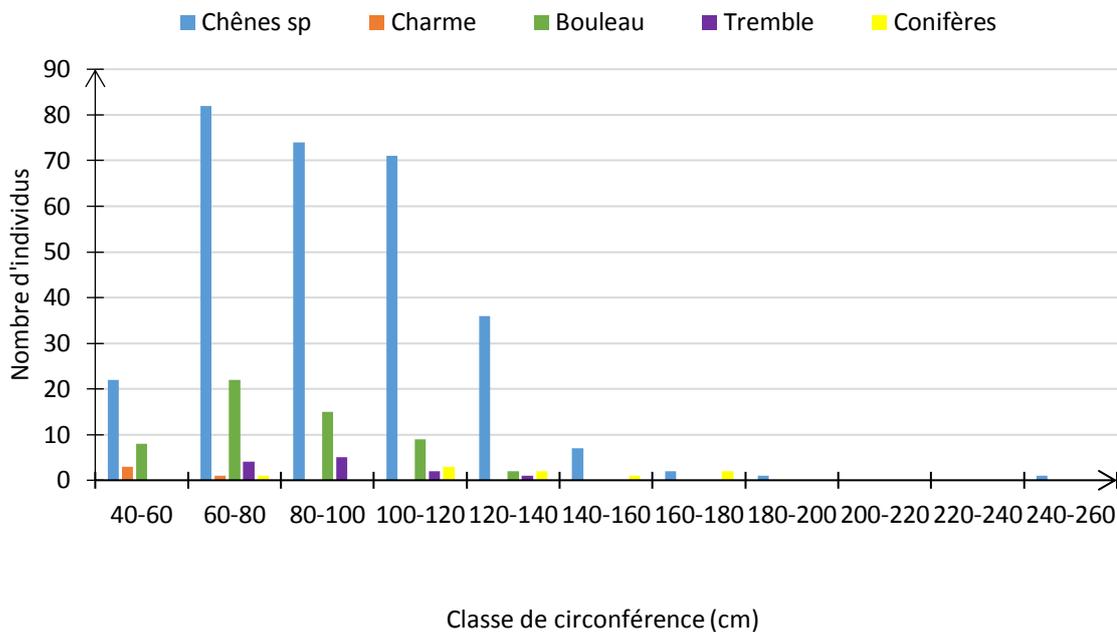


Figure 14 : *Distribution de la circonférence des troncs (cm) à 1m30 du sol, par espèce sur le site de Paray le Frésil.*

La répartition des chênes sur le site de Paray le Frésil montre une forte proportion d'individus entre 60 et 120 cm de circonférence, puis une décroissance du nombre d'individus en fonction des classes de circonférence. Cette distribution correspond d'un point de vue typologique, à un peuplement régularisé en bois moyens avec quelques gros bois épars. Pour Chézy par contre, la distribution « gaussienne » des circonférences montre clairement une structure régulière du peuplement. Le test de normalité (Shapiro-Wilk) montre que la distribution des chênes sur le site de Chézy suit une loi normale contrairement à celle des individus de Paray (p-value = 0,126, p-value = 0,004 respectivement pour les deux sites).

412 Relevés de végétation

Les relevés de végétation font apparaître un très fort recouvrement par la molinie bleue sur le site de Chézy et une zonation molinie bleue/fougère aigle sur Paray le Frésil. Cette délimitation semble liée à l'existence d'un ancien fossé de drainage traversant la parcelle et qui n'est plus entretenu aujourd'hui. Le taux moyen de recouvrement est de 72% (coefficient 4) à Chézy et de 80 % (coefficient 5) à Paray le Frésil.

413 Plafond de la nappe d'eau perchée temporaire :

Il correspond à l'apparition des premières traces de marmorisation (plafond de la nappe et dynamique de réduction du fer). Les profondeurs prospectées varient (Figure 15) de 25 à 50 cm à Chézy (37 ± 7 cm) et de 40 à 80 cm à Paray le Frésil (51 ± 10 cm).

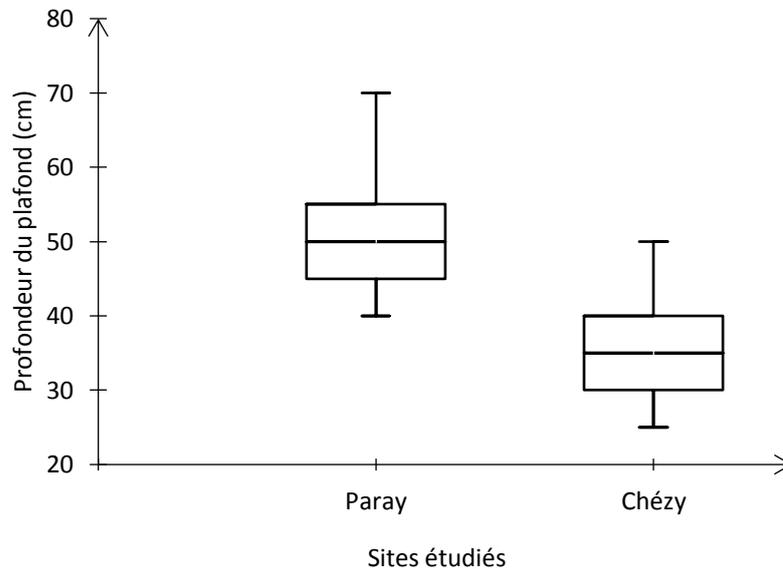


Figure 15 : *Distribution des profondeurs de plafonds mesurés depuis la surface du sol de nappe d'eau perchée temporaire en fonction des sites. La boîte à moustache permet de visualiser les valeurs maximales et minimales, la « boîte » couvre la distance interquartile (25-75%), la barre centrale représente la médiane.*

Les sondages pédologiques ont été en moyenne plus profonds à Paray le Frésil qu'à Chézy pour atteindre les traces de marmorisation comme le montrent les profils pédologiques sur fosses profondes qui situent la nappe à 30 cm à Paray le Frésil et dès la surface à Chézy. Ils sont également confirmés par les niveaux de nappe d'eau perchée temporaire tracés à partir des relevés piézométriques (cf. Figure 7). On constate à Chézy une corrélation (Spearman) négative significative ($r = -0,443$; $p < 0,0001$) entre le coefficient de recouvrement de la végétation herbacée et le plafond de la nappe d'eau temporaire : plus le plafond est proche de la surface plus la molinie bleue est présente.

414 Appréciation des dépérissements

Nous avons travaillé avec la version simplifiée du protocole DEPEFEU sur des individus feuillés en période estivale et la version 2013 d'ARCHI en hiver.

DEPEFEU

Sur le site de Paray le Frésil, 296 chênes ont été notés et 131 individus à Chézy, répartis comme suit (Figure 16) :

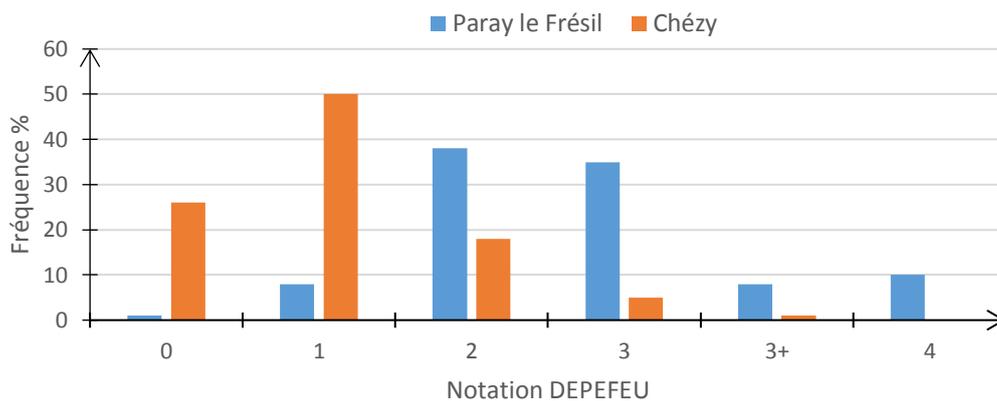
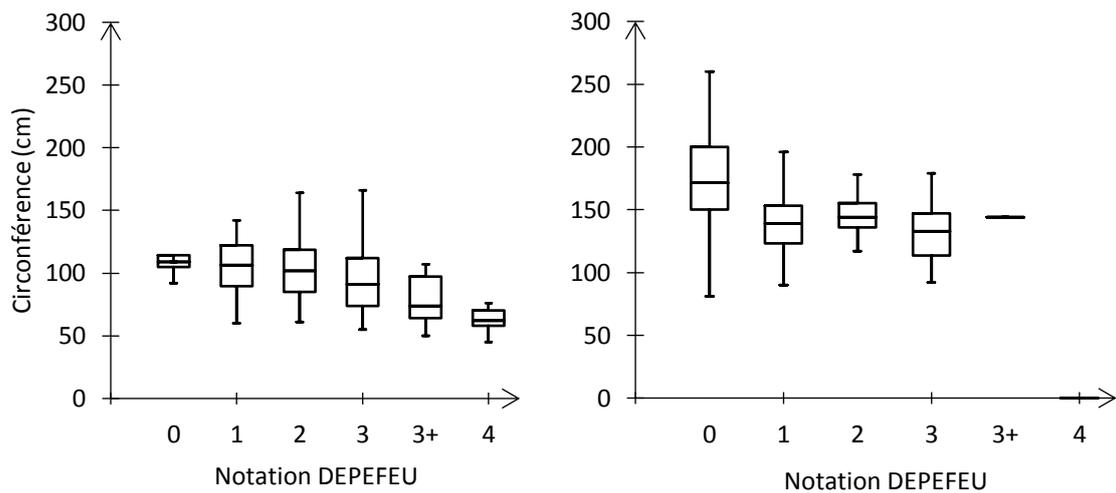


Figure 16 : *Histogramme de fréquence des notes DEPEFEU.*

Pour le site de Paray le Frésil (Figure 17), les arbres notés de 0 à 2 (houppiers sains à modérément dépérissant) ont sensiblement la même circonférence moyenne, même si on observe une variabilité plus importante pour les notations 1 et 2. Cette circonférence diminue pour les valeurs de notations 3 à 4 (houppier fortement dépérissant à houppier moribond). La différence de circonférence entre les notations est à l'issue d'un test non paramétrique de Kruskal-Wallis, significative entre la note 0 et la note 3+ ($p = 0,02$) et entre la note 0 et la note 4 ($p = 0,001$). Les individus de faible circonférence ont les houppiers les plus altérés. On observe une corrélation (Spearman) très significative ($r = -0,41$; $p < 0,0001$) entre circonférence et note DEPEFEU. A noter également, une corrélation négative très significative ($r = -0,289$; $p < 0,0001$) entre le coefficient de recouvrement et la note DEPEFEU indiquant contre-intuitivement, que plus le sol serait couvert en surface, moins les houppiers seraient altérés.

A Chézy (Figure 17), on remarque une relative homogénéité des circonférences pour les différentes notes, avec cependant une circonférence moyenne supérieure pour les arbres notés 0 (houppier sain). Cette différence de circonférence entre les notations 0 et 1 est très significative (test non paramétrique de Kruskal-Wallis : $p < 0,0001$). Elle reste significative

entre la note 0 et la note 2 ($p = 0,009$) ainsi qu'entre la note 0 et la note 3 ($p = 0,006$). La parcelle forestière étudiée a subi une intervention sylvicole de type éclaircie forte en 2014 susceptible d'avoir prélevé les arbres présentant des altérations de forme. La corrélation entre circonférence et note DEPEFEU est là encore négative et significative ($r = -0,29$; $p = 0,001$).



Note Paray	0	1	2	3	3+	4
0	1	0,659	0,449	0,162	0,020	0,01
		1	0,442	0,036	0,000	<0,0001
			1	0,028	0,000	<0,0001
				1	0,015	<0,0001
					1	0,036
						1
Note Chézy	0	1	2	3	3+	4
0	1	<0,0001	0,009	0,006	0,552	0,019
		1	0,308	0,603	0,742	0,151
			1	0,295	0,932	0,0098
				1	0,615	0,246
					1	0,209
						1

Figure 17 : Distribution des circonférences (cm) du tronc à 1m30 du sol (présentée sous la forme de boîtes à moustache) en fonction de la notation DEPEFEU, des chênes de Paray le Frésil le Frésil (gauche) et de Chézy (droite) et résultats du test non paramétrique de Kruskal-Wallis (Niveau de signification corrigé de Bonferroni : 0,0033).

ARCHI

Cette notation a concerné les mêmes individus que la notation DEPEFEU mais hors saison de végétation sur les deux sites ; elle aboutit à la répartition suivante (Figure 18) :

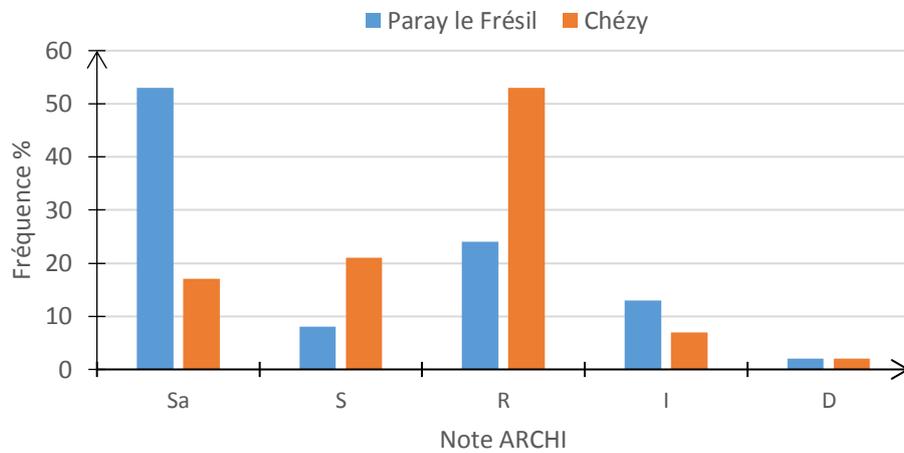
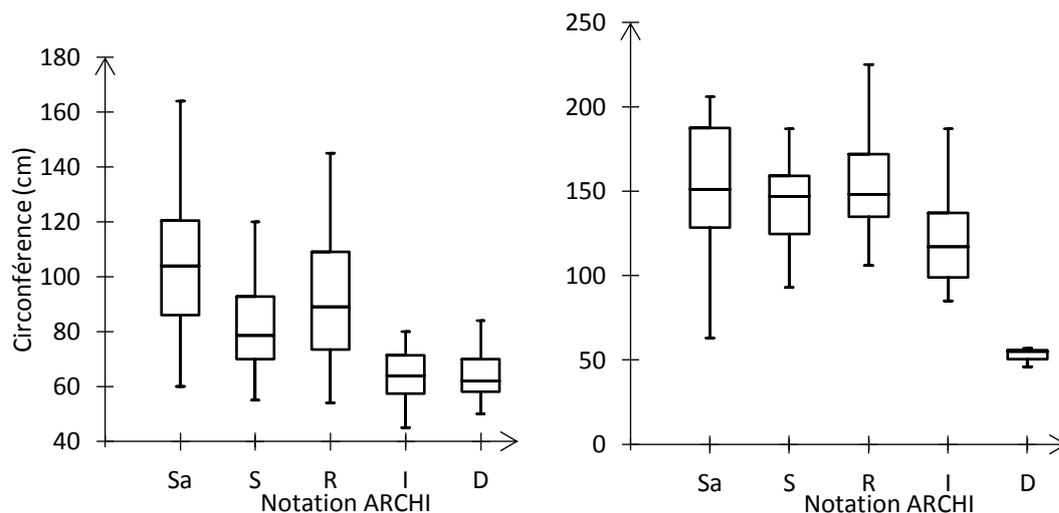


Figure 18 : *Histogramme de fréquence des notes ARCHI.*

Sur le site de Paray le Frésil (Figure 19), on observe une décroissance de circonférence entre les catégories « sains à résilients » (Sa, S et R) et les suivantes (I et D). Les arbres notés comme sains sont les plus gros en circonférence. Les différences de circonférence entre les notations sont à l'issue d'un test non paramétrique de Kruskal-Wallis toutes très significatives entre les individus notés « sains » et ceux des autres catégories de notation.

A Chézy (Figure 19), les arbres classés « sains » (Sa) ont une circonférence moyenne sensiblement égale à celle des catégories S et R, la diminution est très nette pour les catégories I et D « irréversible et descente de cime ». Les différences sont à l'issue d'un test non paramétrique de Kruskal-Wallis, significative entre les individus notés « sains » et ceux notés I et D.



Note Paray	Sa	S	R	I	D
Sa	1	0,000	0,002	<0,0001	0,000
		1	0,104	0,006	0,103
			1	<0,0001	0,010
				1	0,855
					1
Note Chézy	Sa	S	R	I	D
Sa	1	0,388	0,808	0,017	0,003
		1	0,173	0,070	0,010
			1	0,005	0,001
				1	0,191
					1

Figure 19 : Distribution des circonférences (cm) du tronc à 1,30m du sol (boîtes à moustaches) en fonction de la notation ARCHI des chênes de Paray le Frésil (gauche) et de Chézy (droite) et résultats du test non paramétrique de Kruskal-Wallis (Niveau de signification corrigé de Bonferroni : 0,005).

Les résultats que nous avons obtenus avec ces deux outils sont cohérents entre eux et montrent que les arbres les plus affectés sont ceux qui ont la plus faible circonférence. On note une corrélation positive ($r = 0,60$) et très significative ($p < 0,0001$) entre les deux notations DEPEFEU et ARCHI pour le site de Paray le Frésil et une corrélation positive ($r = 0,15$) non significative entre les deux notations à Chézy ($p = 0,38$). La décroissance de circonférence en fonction de la notation est marquée avec les deux protocoles.

Les coefficients de corrélation (Spearman) entre les plafonds de nappe et les notations de déperissement sont positifs mais non significatif, quelques soient la notation et le site (Tableau IV) :

Tableau IV : Valeurs et significations des coefficients de corrélation (Spearman) entre le plafond de la nappe d'eau perchée temporaire et les notations DEPEFEU et ARCHI.

Site	Corrélations testées	Valeurs du coefficient	p-value
Paray le Frésil	Plafond/DEPEFEU	0,07	0,22
Paray le Frésil	Plafond/ARCHI	0,08	0,15
Chézy	Plafond/DEPEFEU	0,30	0,08
Chézy	Plafond/ARCHI	0,17	0,33

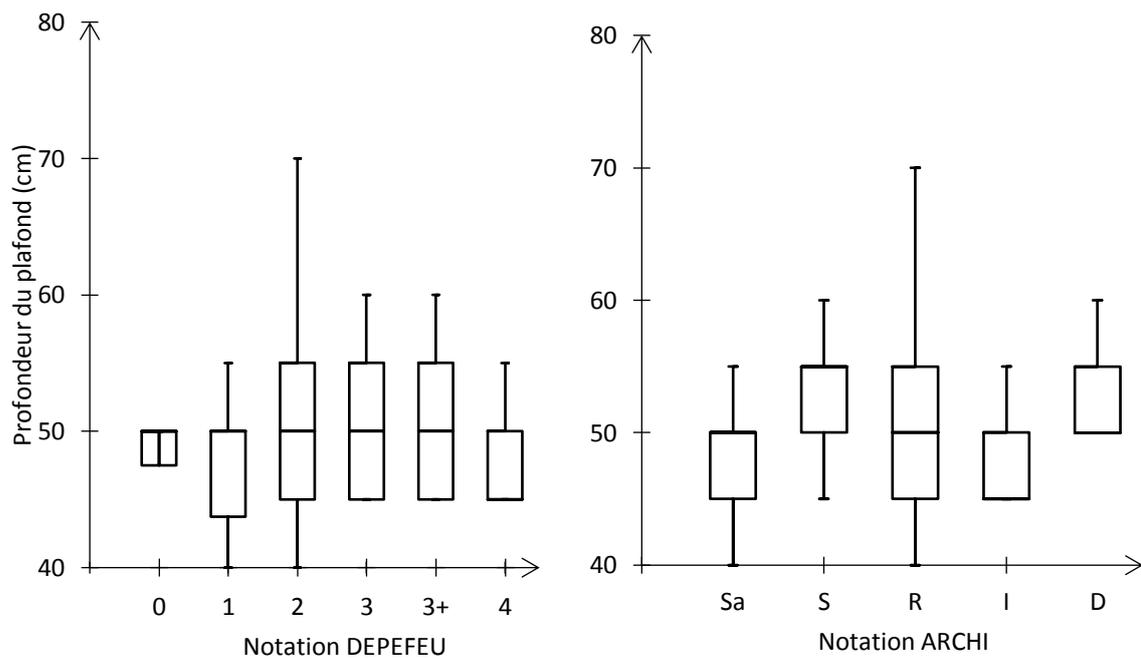


Figure 20 : Distribution des notations DEPEFEU et ARCHI en fonction de la profondeur du plafond de la nappe d'eau perchée temporaire, site de Paray le Frésil.

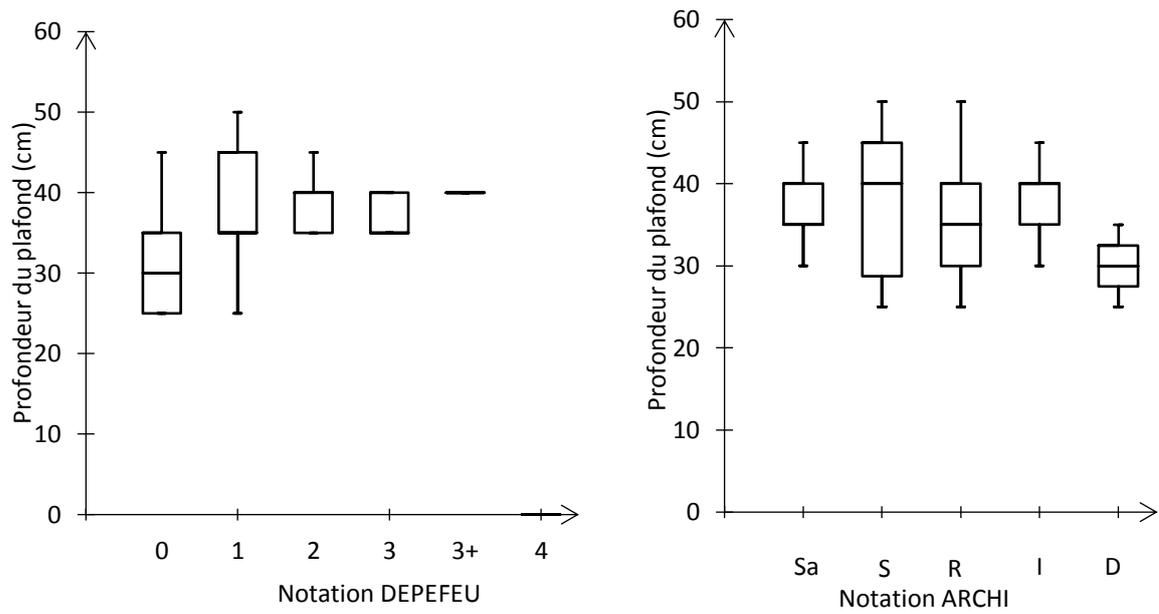


Figure 21 : *Distribution des notations DEPEFEU et ARCHI en fonction de la profondeur du plafond de la nappe d'eau perchée temporaire, site de Chézy.*

La distribution des notations DEPEFEU et ARCHI sur chaque site (Figures 20 et 21) en fonction des profondeurs de plafond prospectées n'est donc pas significative.

42 Analyse des biopsies de bois

Parmi les 427 chênes inventoriés, 110 ont été échantillonnés dans différentes classes de circonférence (avec une répartition équilibrée quand cela était possible) et de notation DEPEFEU (Tableaux V et VI). Le site de Chézy ne présente aucun chêne noté 4, celui de Paray le Frésil ne compte que 4 individus notés 0.

Tableau V : Répartition des arbres par classe de circonférence et de notation à Chézy.

Circ. cm.			
DEPEFEU	40-120	120-160	160 et +
0	5	5	5
1	5	5	5
2	4	5	4
3-3+	3	4	1
Total	17	19	15

Tableau VI : Répartition des arbres par classe de circonférence et de notation à Paray le Frésil.

Circ.cm.			
DEPEFEU	40-90	90-120	120 et +
1	5	5	5
2	5	5	5
3	5	5	4
3+ et 4	5	5	5
Total	20	20	19

421 Variabilité interannuelle des accroissements radiaux

Les valeurs d'accroissement radial annuel (largeur de chaque cerne sur la période 2000-2015, 16 années) mesurées sur les deux sites (Figure 22) montrent des accroissements moyens plus faibles à Paray le Frésil qu'à Chézy (Paray le Frésil $1,77 \pm 0,48 \text{ mm.an}^{-1}$ et Chézy $1,84 \pm 0,34 \text{ mm.an}^{-1}$), cette différence est cependant non significative ($p = 0,49$). On remarque également des valeurs d'accroissement annuel plus faibles sur la période 2000-2006. Sur la période suivante 2007-2010, les accroissements sur les deux sites ont augmenté. De 2011 à 2014, ils sont inférieurs aux valeurs de la période précédente. Enfin en 2015, les valeurs pour les deux sites se situent en dessous de $1,50 \text{ mm.an}^{-1}$. En distinguant les sites sur la période 2000-2006, les valeurs sont plus importantes à Chézy qu'à Paray le

Frésil. De 2009 à 2013, ce sont les valeurs moyennes de Paray le Frésil qui sont plus élevées que celles de Chézy.

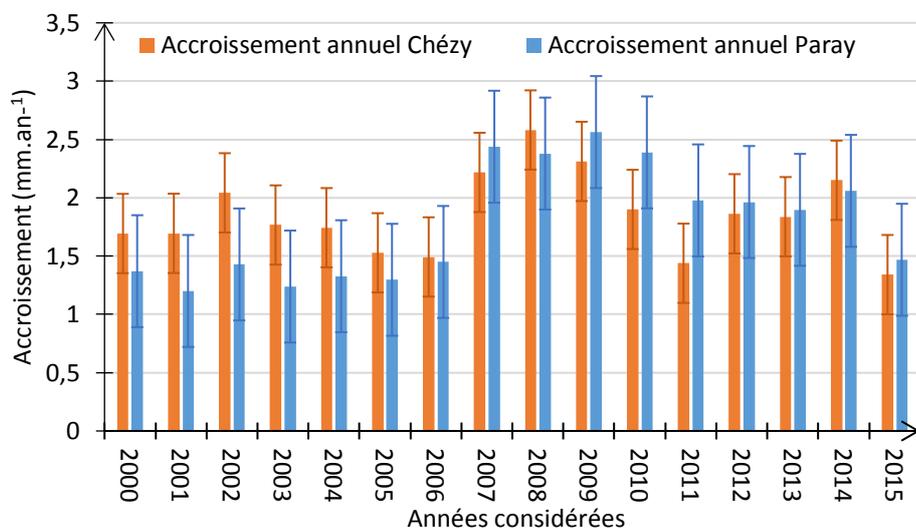


Figure 22 : *Accroissements (mm) radiaux annuels moyens (\pm écart type) mesurés par la largeur des cernes sur les biopsies prélevées sur les sites de Chézy et de Paray le Frésil.*

Les accroissements mesurés (Figure 23) de bois initial (bois de printemps) sur chaque cerne sur les deux sites varient peu ($0,45 \pm 0,06$ mm.an⁻¹ à Paray le Frésil et $0,44 \pm 0,03$ mm.an⁻¹ à Chézy) : l'épaisseur du bois initial est relativement constante sur la période étudiée. Pour le bois final (bois d'été) les accroissements mesurés diffèrent davantage et sont de $1,32 \pm 0,42$ mm.an⁻¹ à Paray le Frésil et $1,40 \pm 0,32$ mm.an⁻¹ à Chézy. Le bois final représente donc de 70 à 80% de l'accroissement annuel (Figure 24).

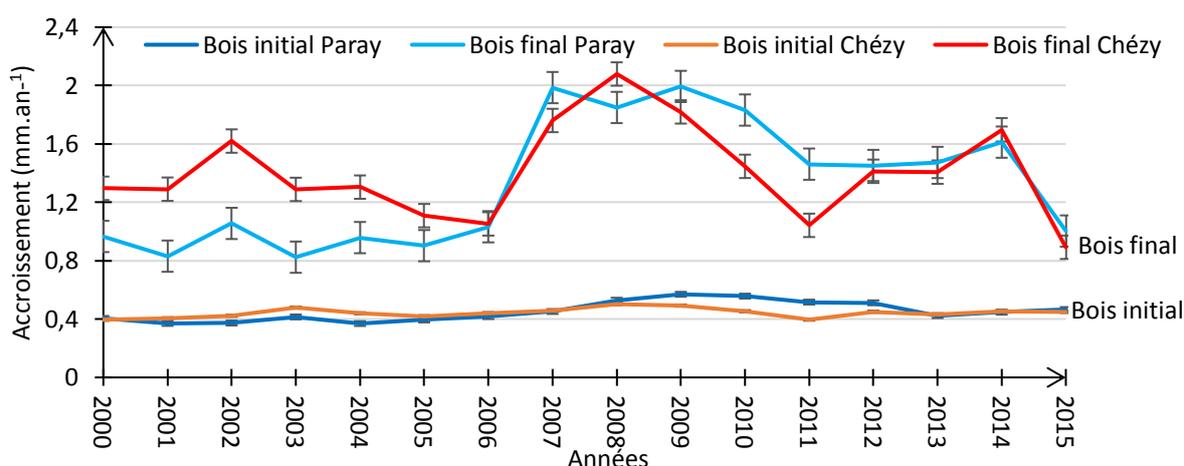


Figure 23 : *Accroissements (mm) annuels moyens (\pm écart type) du bois initial (bois de printemps) et du bois final (bois d'été) mesurés sur les cernes des biopsies prélevées sur les sites de Chézy et de Paray le Frésil.*

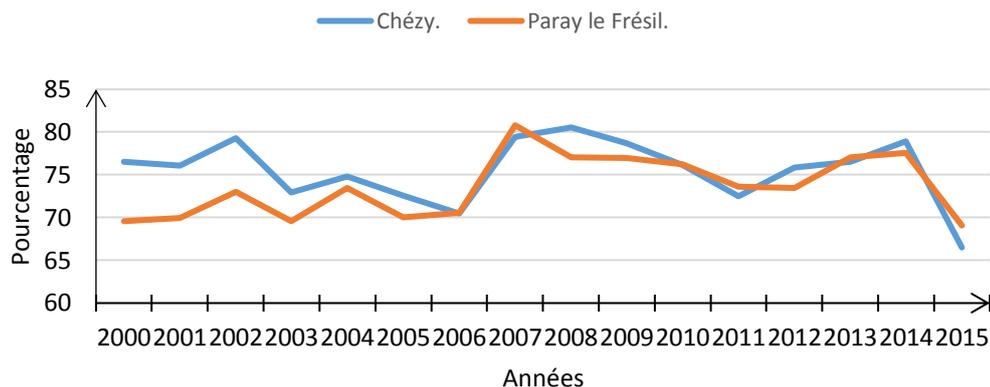


Figure 24 : Part relative du bois final (en pourcentage) dans l'accroissement annuel moyen sur les sites de Chézy et Paray le Frésil.

422 Variabilité climatique

Sur la période 2000-2015, à partir des données météorologiques de la station d'Yzeure (03), les précipitations annuelles varient de 589 mm (2005) à 958 mm (2014) avec une moyenne annuelle de 812 ± 127 mm. Les températures moyennes annuelles vont de $9,9^{\circ}\text{C}$ (2010) à $12,6^{\circ}\text{C}$ (2000) avec une moyenne de $11,5 \pm 0,6^{\circ}\text{C}$. Grâce au rayonnement transmis sous couvert calculé, nous avons conclu que la saison de végétation s'étend globalement du 15 avril au 10 novembre (cf. Figure 8). Les précipitations sur cette période sont en moyenne de 499 ± 101 mm. La Figure 25 montre que les années 2003, 2005 et 2015 ont reçu moins de 400 mm de précipitations en saison de végétation, alors que 2002 a reçu près de 600 mm et 2007 presque 620 mm sur la même période.

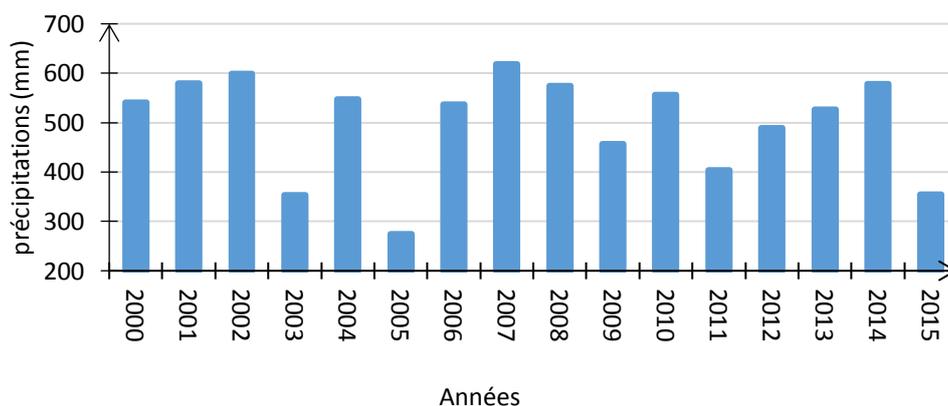


Figure 25 : Distribution interannuelle des précipitations (mm) pendant la saison de végétation (basée sur les précipitations enregistrées à la station météorologique d'Yzeure)

En considérant le rapport entre les précipitations printanières (avril-mai-juin) et estivales (juillet-août-septembre) par rapport aux précipitations annuelles on obtient les courbes suivantes (Figure 26). En 2003, les précipitations estivales ont été plus faibles que les précipitations printanières. Pour 2005 les pluies printanières ont représenté 23% des précipitations annuelles contre 15% pour les précipitations estivales. En 2011, le contraste est très marqué avec 9% au printemps et près de 38% en été. Quant aux années 2001, 2002 et 2007, près de 60% des précipitations annuelles sont tombées au printemps et en été.

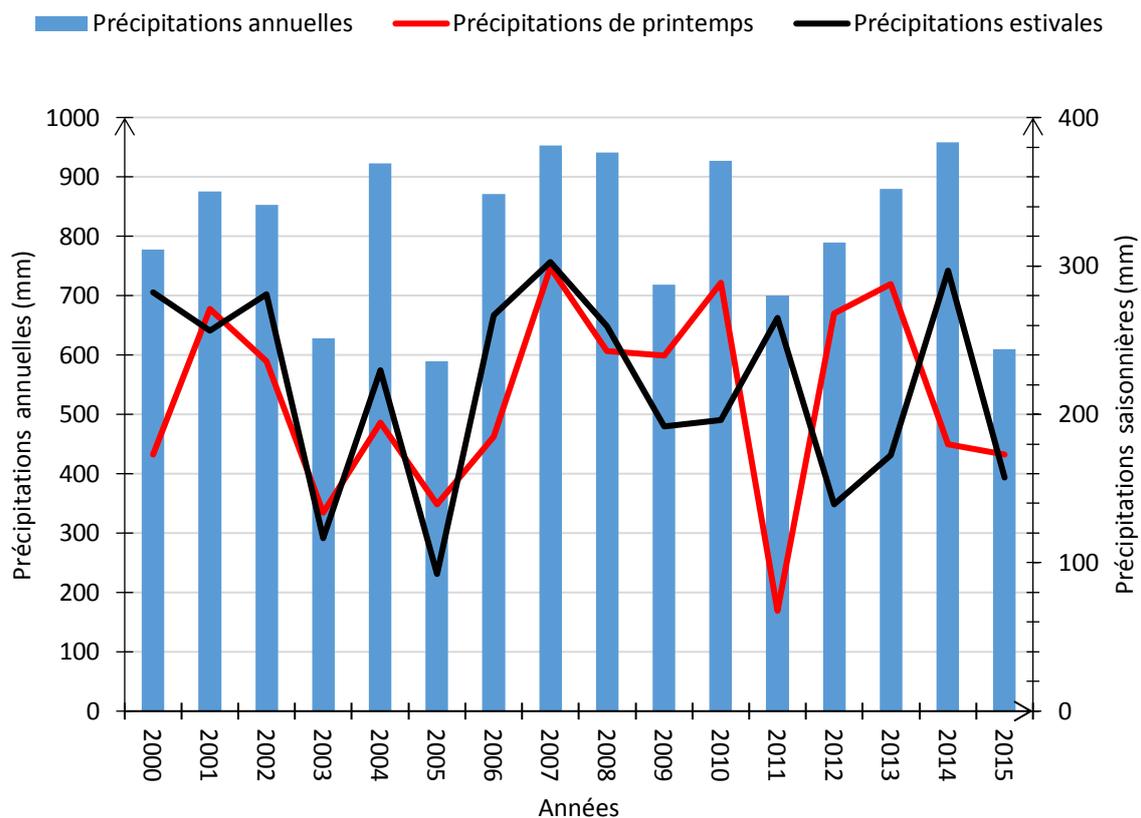


Figure 26 : Précipitations annuelles sur la période 2000-2015 et répartition des précipitations printanières (Avril-Mai-Juin) et estivales (Juillet-Août-Septembre) de la même période.

Les diagrammes ombrothermiques annuels sur les années considérées (2000 à 2015) font apparaître une absence de mois secs (mois où $P < 2 \cdot T$), sur la saison de végétation, pour les années 2000-2001 ; 2007 à 2010 et 2014. Pour les autres années, la répartition des mois secs est la suivante (Tableau VII : Figure 27).



Figure 27 : Diagrammes ombrothermiques des années présentant des mois secs ($P < 2 * T$) à partir des données de la station météorologique d'Yzeure.

Tableau VII : Répartition des mois secs (mois où $P < 2 * T$) en saison de végétation sur la période 2000-2015.

Années	Mois	P en mm	T° moy en °C	Années	Mois	P en mm	T° moy en °C
2002	Avril	17	10,3	2005	Septembre	28,4	17,2
2003	Juin	42,2	23,2	2006	Juillet	35,6	23,8
	Juillet	28,9	22,2	2011	Avril	8,3	13,2
2004	Juin	32,1	18,1		Mai	24,7	16,4
	Septembre	16,7	16,7	2012	Aout	31,1	20,8
2005	Juin	22	20,4	2013	Aout	29,6	19,1
	Aout	19,8	18,9	2015	Juillet	14,1	22,6

En l'absence de données complètes pour calculer des ETP Penman, les ETP annuelles ont été calculées par la formule de Turc, les résultats obtenus ainsi que la balance climatique (P) - ETP sont représentés sur la figure 28 ci-dessous. On remarque des valeurs négatives de (P) - ETP d'environ -140 mm en 2003, 2005 et 2015, des valeurs faiblement négatives en 2009 et 2011 (-12 mm, -47 mm), enfin des valeurs positives pour les autres années.

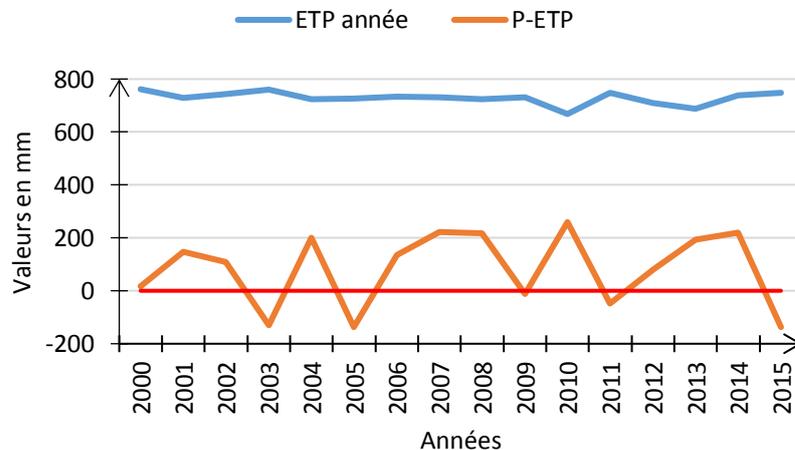


Figure 28 : Valeurs annuelles des ETP Turc et résultats de la balance précipitations(P)-ETP à partir des données de la station météorologique d'Yzeure.

En considérant le bilan (P) - ETP sur la saison de végétation (15/04 au 10/11), on obtient les résultats suivants (Figure 29).



Figure 29 : Valeurs de (P) - ETP Turc sur la saison de végétation (15/04 au 10/11)

Les bilans sont positifs (au maximum +55 mm) en 2001, 2002, 2007, 2008, 2010 et 2014 ; négatifs sur les autres années. Les valeurs les plus fortement négatives sont observées en 2003, 2005, 2011 et 2015 (-247 mm, -306 mm, -169 mm, -226 mm respectivement). Ces déficits sont importants au regard du réservoir utile que nous avons estimé à 160 mm pour chaque site (cf. § 314).

423 Variabilité des accroissements radiaux en lien avec le climat

Les accroissements annuels moyens mesurés ont été corrélés aux moyennes annuelles de température et de précipitation (Figure 30). On observe que ni la température ($r = -0,509$; $p = 0,046$) ni les précipitations ($r = 0,618$; $p = 0,012$) ne montrent une corrélation significative. L'augmentation de la température annuelle moyenne tend à réduire l'épaisseur des accroissements radiaux et les précipitations annuelles à les augmenter.

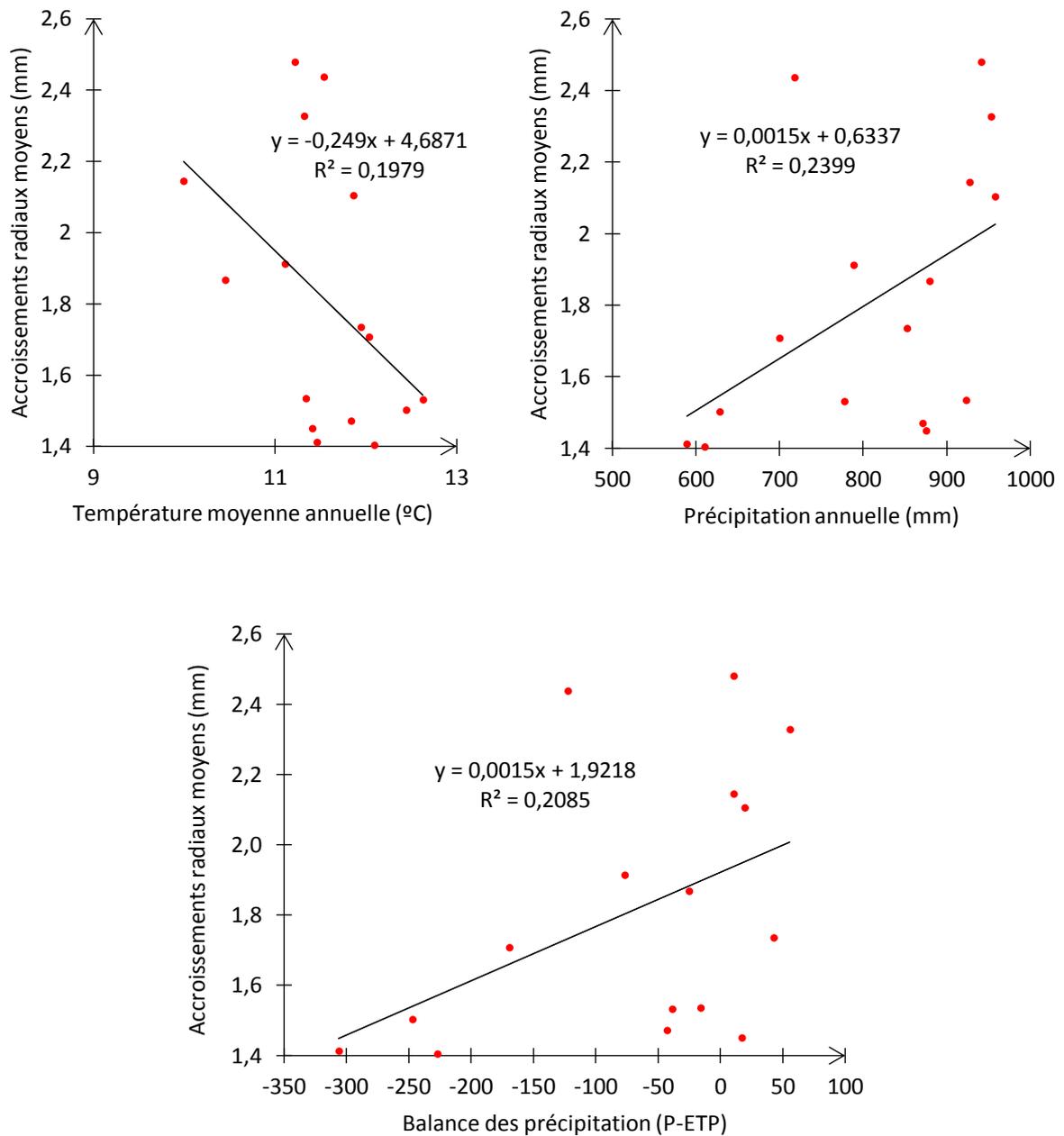


Figure 30 : Répartition des accroissements annuels moyens mesurés (mm) en fonction des températures et des précipitations moyennes annuelles (années 2000-2015), et en fonction de la balance climatique des précipitations ((P) - ETP) sur la saison de végétation.

424 Variabilité spécifique des accroissements radiaux

En distinguant les sites (Figure 31), on observe pour le chêne pédonculé de Paray le Frésil, de faibles accroissements radiaux de 2000 à 2006, puis une augmentation de ceux-ci de 2007 à 2010, une baisse en 2011-2012 et une légère reprise jusqu'en 2014. Les valeurs pour 2015 sont les plus faibles. Pour ceux de Chézy les accroissements fluctuent davantage en

fonction des années, on remarque des valeurs faibles en 2000, 2001, 2003, 2005, 2011 et 2015. Les années 2007 à 2009 présentent comme à Paray le Frésil les valeurs les plus fortes.

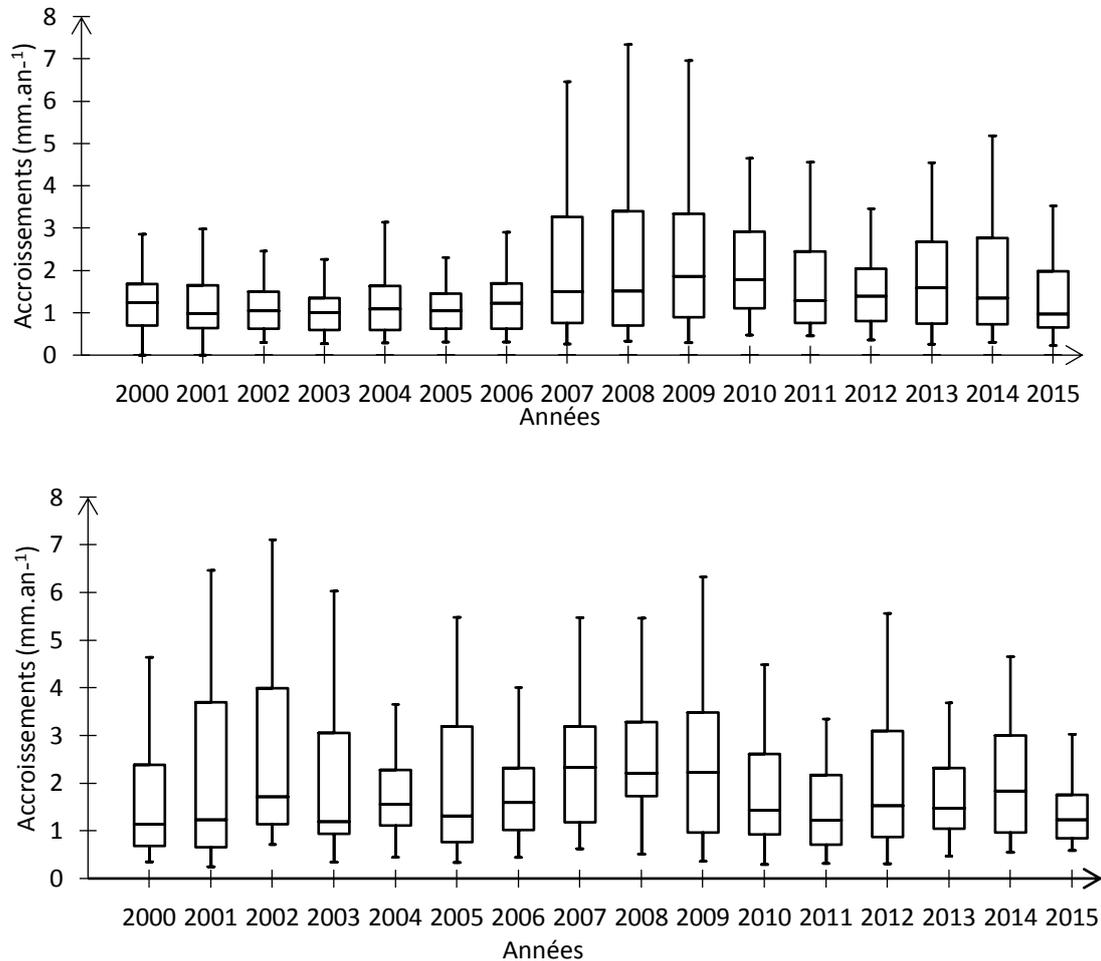


Figure 31 : *Distribution des accroissements radiaux annuels (mm) présentée en boîte à moustaches des chênes pédonculés, à Paray le Frésil (haut) et à Chézy (bas)*

En distinguant les espèces sur le site de Chézy (Figure 31 bas et Figure 32), on constate pour les chênes sessiles des valeurs faibles jusqu'en 2005-2006, puis une hausse de celles-ci en 2007-2008, une diminution jusqu'en 2011 suivie d'une légère reprise jusqu'en 2014. L'année 2005 a les plus faibles valeurs et 2015 se situent dans les valeurs du début des années 2000. La tendance générale est sensiblement équivalente pour les chênes pédonculés de ce site avec cependant des accroissements plus faibles en 2003 et plus forts en valeurs sur les années 2005 (1,3 mm), 2011 (1,22 mm) et 2015 (1,23 mm) ; ces années étant celles qui présentent les déficits hydriques les plus marqués.

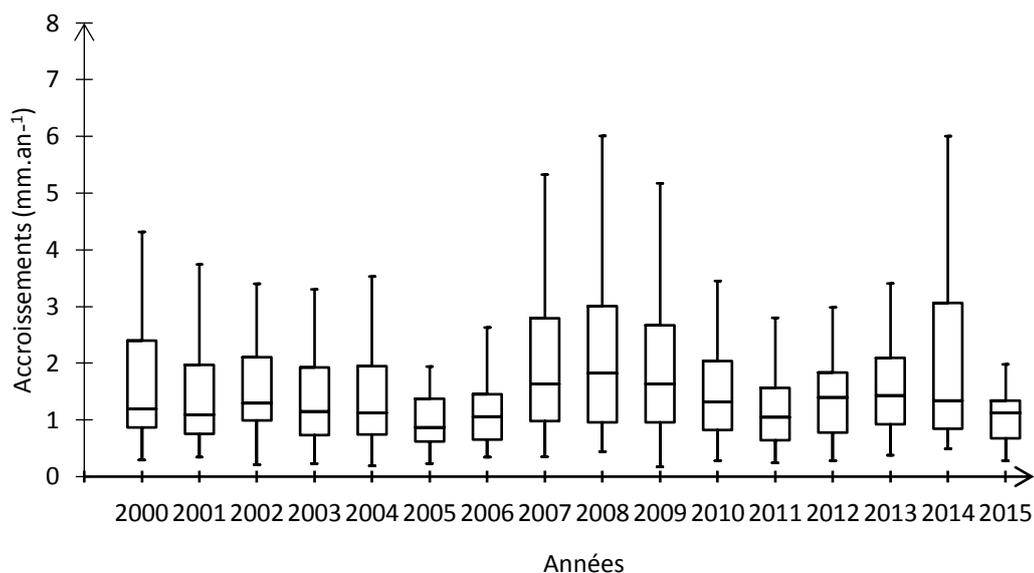
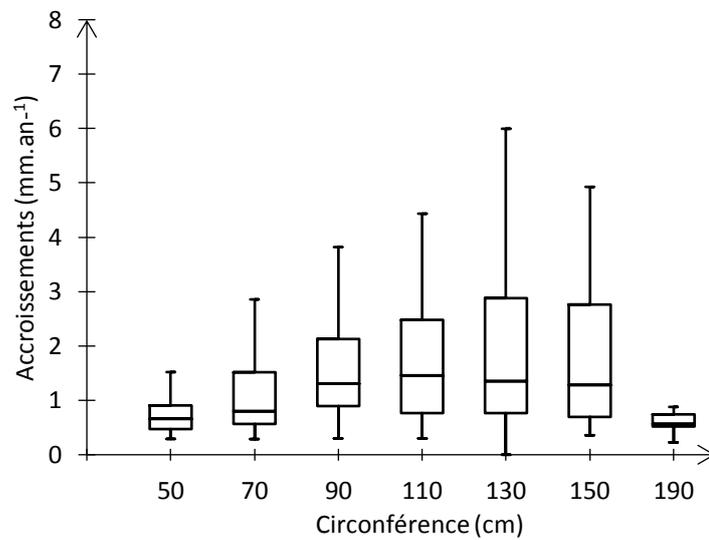


Figure 32 : *Distribution des accroissements radiaux annuels présentée en boîte à moustaches des chênes sessiles de Chézy.*

On observe plus de fluctuations dans les accroissements annuels pour les chênes pédonculés de Chézy que pour ceux de Paray le Frésil. Il semble que les chênes pédonculés de Chézy soient plus « résilients » entre les années de sécheresse en termes de croissance radiale que ceux de Paray le Frésil. Entre sessile et pédonculé à Chézy, on observe la même tendance générale des accroissements annuels avec cependant plus de dispersion pour les sessiles que pour les pédonculés.

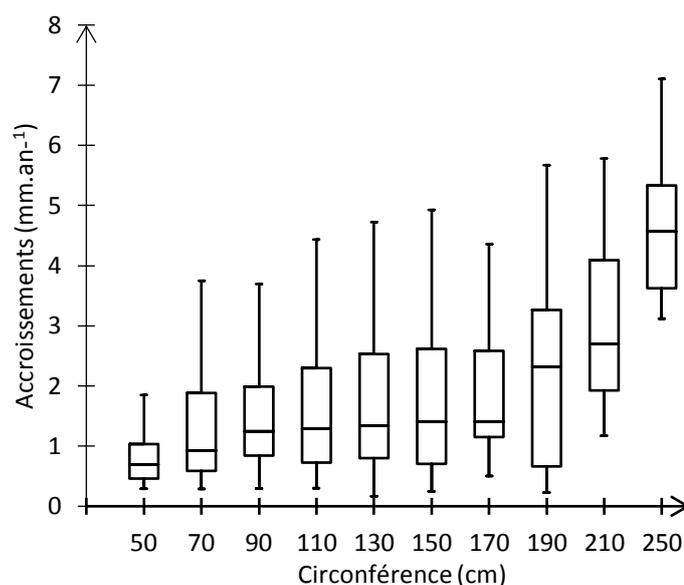
425 Variabilité des accroissements radiaux en fonction de la circonférence des arbres

La Figure 33, montre une augmentation significative des accroissements en fonction de la circonférence du tronc pour les chênes pédonculés du site de Chézy, ce sont les arbres les plus gros qui ont les accroissements les plus forts. Pour ceux de Paray le Frésil, l'augmentation est moins sensible.



Circonférence	C50	C70	C90	C110	C130	C150	C190
C50	1	0,023	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,576
		1	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,001	0,019
			1	0,775	0,929	0,824	< 0,0001
				1	0,828	0,652	< 0,0001
					1	0,764	< 0,0001
						1	< 0,0001
							1

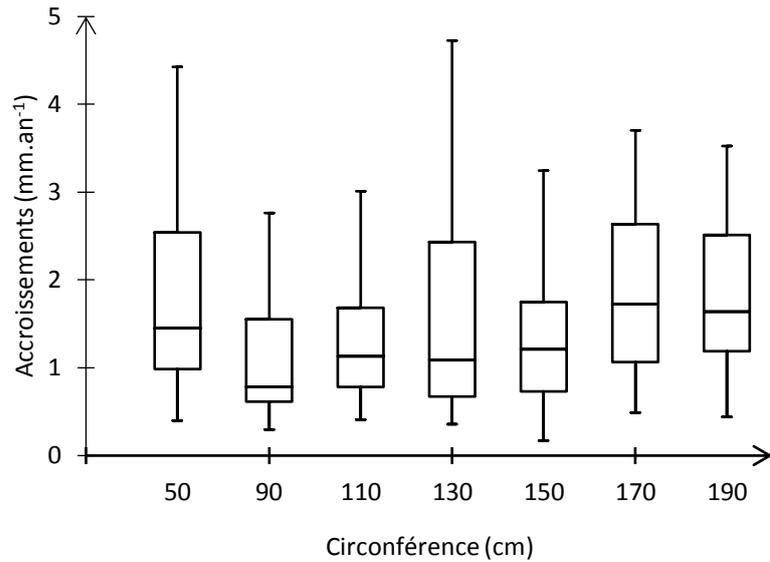
Figure 33a : *Distribution des accroissements annuels radiaux (mm) des chênes pédonculés à Paray le Frésil, présentée en boîte à moustache en fonction de la circonférence et résultats du test non paramétrique de Kruskal-Wallis (Niveau de signification corrigé de Bonferroni : 0,0024).*



Circonférence	C50	C70	C90	C110	C130	C150	C170	C190	C210	C250
C50	1	0,001	< 0,0001							
		1	0,028	0,006	0,000	0,022	< 0,0001	0,008	< 0,0001	< 0,0001
			1	0,766	0,255	0,622	0,017	0,246	0,001	< 0,0001
				1	0,329	0,766	0,019	0,303	0,001	< 0,0001
					1	0,705	0,101	0,638	0,002	< 0,0001
						1	0,099	0,499	0,002	< 0,0001
							1	0,452	0,033	< 0,0001
								1	0,012	< 0,0001
									1	0,129
										1

Figure 33b : *Distribution des accroissements annuels radiaux (mm) des chênes pédonculés à Chézy, présentée en boîte à moustache en fonction de la circonférence et résultats du test non paramétrique de Kruskal-Wallis (Niveau de signification corrigé de Bonferroni : 0,0011),*

La comparaison des espèces sur le site de Chézy (Figure 33b et Figure 34) montre pour les chênes sessiles, des accroissements importants pour les individus de faible circonférence (qui sont probablement plus jeunes) et pour ceux dont les circonférences sont les plus fortes. Globalement on observe pour les sessiles, une progression des valeurs de 90 à 190 cm de circonférence. Pour les pédonculés, les valeurs d'accroissement suivent l'augmentation de la circonférence.



Circonférence	C50	C90	C110	C130	C150	C170	C190
C50	1	0,045	0,224	0,454	0,212	0,284	0,283
		1	0,281	0,081	0,192	0,000	0,001
			1	0,502	0,926	0,004	0,012
				1	0,491	0,017	0,039
					1	0,001	0,008
						1	0,867
							1

Figure 34 : Distribution des accroissements annuels radiaux (mm) présentée en boîte à moustache en fonction de la circonférence et résultats du test non paramétrique de Kruskal-Wallis (Niveau de signification corrigé de Bonferroni : 0,0024), des chênes sessiles de Chézy.

Les accroissements annuels mesurés suivent l'augmentation de la circonférence avec une progression plus nette pour les chênes pédonculés de Chézy que pour ceux de Paray le Frésil. Pour les chênes sessiles, les différences d'épaisseur d'accroissements radiaux en fonction de la circonférence ne sont pas significatives.

426 Modélisation des accroissements radiaux annuels en fonction du climat

Dans un premier temps, nous avons cherché des corrélations entre les valeurs d'accroissement et les variables climatiques pour l'ensemble des individus des deux sites. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau VIII : Résultats du test de corrélation (Spearman) entre l'accroissement radial annuel et les variables climatiques et dendrométriques sur l'ensemble des chênes des deux sites. Seules les variables ayant un coefficient de corrélation significatif sont présentées.

Variables	Coefficient	p-value	Variables	Coefficient	p-value
Année	0,089	0,0003	T.moy Aut.(°)	-0,074	0,003
Acc.moy 3(mm)	0,777	< 0,0001	T.moy Eté (°)	-0,107	< 0,0001
Mars T (°)	-0,094	0,0001	Mai P (mm)	0,115	< 0,0001
Juin T (°)	-0,116	<0,0001	Juin P (mm)	0,126	< 0,0001
Juil T (°)	-0,065	0,009	Juil P (mm)	0,127	< 0,0001
Sep T (°)	-0,059	0,049	Som MJJ(mm)	0,167	< 0,0001
T Min Aout n-1(°)	-0,088	0,0003	Som.P.Ete(mm)	0,100	< 0,0001
T Min Sep n-1(°)	-0,069	0,006	Circonf.(cm)	0,174	< 0,0001

Acc.moy 3 : moyenne des accroissements sur les trois dernières années.

T Min Aout et Sep n-1 : température moyenne minimale d'août et septembre de l'année n-1.

T.moy.Aut/ été : température moyenne de l'été et de l'automne.

Som MJJ : somme des précipitations de Mai, Juin et Juillet.

Pour les deux espèces et les deux sites confondus, l'accroissement total de chaque cerne années montre une corrélation forte et très significative ($r = 0,777$; $p < 0,0001$) avec la moyenne des accroissements sur les trois dernières années. Pour les variables climatiques, les températures de mars, juin, juillet, moyenne minimale d'août et septembre n-1, moyenne de l'automne et moyenne d'été sont significatives avec des coefficients de corrélation négatifs et au maximum de 0,006. L'accroissement annuel mesuré est également positivement corrélés aux précipitations de manière très significative. Cependant ces précipitations sont fortement corrélées entre elles, aussi par la suite nous conserverons uniquement la somme des précipitations de mai, juin, juillet (MJJ) qui a le plus fort coefficient de corrélation.

Nous avons également testé les corrélations entre l'accroissement radial moyen annuel mesuré par espèces et les (P) - ETP (mm d'eau) de printemps, d'été et de mai, juin, juillet (Tableau IX).

On constate pour les deux espèces que les accroissements radiaux moyens annuels sont fortement et significativement corrélés avec le déficit hydrique des mois de mai, juin et juillet. Nous avons utilisé la même approche en séparant les espèces, le chêne pédonculé est présent sur les deux sites, quant au chêne sessile, il n'est présent que sur le site de Chézy

Tableau IX : Résultats du test de corrélation (Spearman) entre l'accroissement radial moyen annuel par espèce et les résultats de (P) - ETP de printemps, d'été et de mai, juin, juillet.

Variables	Chêne Pédonculé		Chêne Sessile	
	Coefficient	p-value	Coefficient	p-value
P-ETP Printemps	0,490	0,055	0,532	0,036
P-ETP Eté	0,286	0,280	0,409	0,116
P-ETP MJJ	0,723	0,002	0,853	<0,0001

Pour les chênes pédonculés de Paray le Frésil, (Tableau X) l'accroissement total de chaque cerne mesuré est fortement corrélé à l'accroissement moyen sur les trois dernières années et de manière très significative ($r = 0,795$; $p < 0,0001$). Pour les variables climatiques, les températures de mars, juin, moyenne minimale d'août et de septembre n-1, sont corrélées négativement et sont significatives. On observe pour les précipitations, des coefficients très significatifs pour la somme des précipitations MJJ, la somme des précipitations d'été ainsi que pour la balance climatique des précipitations (P) - ETP MJJ. L'accroissement est positivement corrélé à la circonférence du tronc.

Tableau X : Résultats du test de corrélation (Spearman) entre l'accroissement radial annuel et les variables climatiques et dendrométriques (seules les valeurs significatives ont été conservées) pour le chêne pédonculé sur le site de Paray le Frésil.

Variables	Coefficient	p-value	Variables	Coefficient	p-value
Acc.moy 3 (mm)	0,795	< 0,0001	Som MJJ (mm)	0,158	0,0001
Mars T (°)	-0,116	0,001	Som.P.Ete(mm)	0,078	0,010
Juin T (°)	-0,148	<0,0001	P-ETP MJJ	0,166	<0,0001
T Min Aout n-1(°)	-0,110	0,002	Circonf.(cm)	0,118	0,001
T Min Sep n-1(°)	-0,077	0,030			
T.moy Eté (°)	-0,095	0,007			

Acc.moy 3 : moyenne des accroissements sur les trois dernières années en mm.

T Min Aout et Sep n-1 : température moyenne minimale d'août et septembre de l'année n-1.

Som MJJ : somme des précipitations de Mai, Juin et Juillet.

Som P Eté : somme des précipitations d'été Juin, Juillet et Aout.

P-ETP MJJ : balance climatique des précipitations (P) – ETP Mai, Juin, Juillet.

Pour les chênes pédonculés de Chézy (Tableau XI), l'accroissement total de chaque cerne mesuré est fortement corrélé à l'accroissement moyen sur les trois dernières années et de manière très significative ($r = 0,761$; $p < 0,0001$). Au niveau des variables climatiques,

seules la somme des précipitations MJJ, la somme des précipitations d'été et la balance climatique (P) - ETP MJJ sont positivement significatives. Enfin, l'accroissement est très significativement corrélé à la circonférence des individus.

Tableau XI : Résultats du test de corrélation (Spearman) entre l'accroissement radial annuel et les variables climatiques et dendrométriques (seules les valeurs significatives ont été conservées) pour le chêne pédonculé sur le site de Chézy.

Variables	Coefficient	p-value	Variables	Coefficient	p-value
Acc.moy 3(mm)	0,761	< 0,0001	Som.P.Ete (mm)	0,116	0,049
Som MJJ(mm)	0,140	0,017	P-ETP MJJ	0,144	0,014
			Circonf. (cm)	0,44	<0,0001

Acc.moy 3 : moyenne des accroissements sur les trois dernières années en mm.

Som MJJ : somme des précipitations de Mai, Juin et Juillet.

P-ETP MJJ : balance climatique des précipitations (P) – ETP Mai, Juin, Juillet.

Tableau XII : Résultats du test de corrélation (Spearman) entre l'accroissement radial annuel et les variables climatiques et dendrométriques (seules les valeurs significatives ont été conservées) pour le chêne sessile sur le site de Chézy.

Variables	Coefficient	p-value
Acc.moy 3 (mm)	0,748	< 0,0001
Fev T(°)	0,111	0,011
Juin T(°)	-0,101	0,021
Juil T(°)	-0,094	0,032
T.moy A(°)	-0,087	0,047
T.moy E(°)	-0,130	0,003
Som MJJ(mm)	0,190	<0,0001
Som.P.Ete(mm)	0,153	0,0004
P-ETP MJJ	0,189	<0,0001
Circonf(cm).	0,160	0,0002

Acc.moy 3 : moyenne des accroissements sur les trois dernières années en mm.

Som MJJ : somme des précipitations de Mai, Juin et Juillet.

Som P Eté : somme des précipitations d'été Juin, Juillet et Aout.

P-ETP MJJ : balance climatique des précipitations (P) – ETP Mai, Juin, Juillet.

Pour le chêne sessile sur le site de Chézy (Tableau XII), on observe de fortes corrélations entre l'accroissement total mesuré sur chaque cerne et l'accroissement moyen sur les trois dernières années ($r = 0,748$; $p < 0,0001$). Les températures de février sont positivement corrélées à l'accroissement, celles de juin et juillet ainsi que les moyennes d'automne et

d'été présentent des coefficients négatifs et peu significatifs. La somme des précipitations MJJ et d'été apparaissent significatives ainsi que la balance climatique (P) - ETP MJJ. L'accroissement est positivement et significativement corrélé à la circonférence des individus.

Notre exploration à partir des moyennes d'accroissement sur 4 ou 5 ans avant l'année considérée avec les variables climatiques saisonnières donne les résultats du Tableau XIII, sur la base de tous les arbres des deux sites.

Tableau XIII : Résultats du test de corrélation (Spearman) seules les valeurs significatives ont été conservées à partir du fichier complet (tous les arbres).

Variabes	Coefficient	p-value	Variabes	Coefficient	p-value
Acc.moy 3(mm)	0,777	< 0,0001	T.moy A(°)	-0,082	0,001
Acc.moy 4(mm)	0,764	< 0,0001	T.moy E(°)	-0,110	< 0,0001
Acc.moy 5(mm)	0,755	< 0,0001	Som MJJ(mm)	0,169	< 0,0001
T Min Aout n-1(°)	-0,095	0,0001	Som.P.Ete(mm)	0,099	< 0,0001
T min Sep n-1(°)	-0,080	0,001	Circonf.(cm)	0,171	< 0,0001

Acc.moy 3, 4 et 5 : moyenne des accroissements sur les 3, 4 et 5 dernières années en mm.

Les résultats montrent des corrélations très fortes et très significatives entre l'accroissement mesuré de l'année n et les moyennes d'accroissements mesurés à n-3, n-4 et n-5 avec néanmoins le meilleur résultat pour la moyenne sur 3 ans. La température moyenne estivale est corrélée négativement et de manière très significative. Les précipitations sont corrélées positivement et très significativement.

Les explorations réalisées à partir des données climatiques de l'année n-1 ne présentent pas de valeurs très significatives exceptées pour les précipitations d'août et de décembre ainsi que pour les températures d'août et de septembre. On constate donc que les températures sont peu significatives en comparaison des précipitations et en particulier de la somme de celles-ci de mai à juillet sur l'année de constitution du cerne. La balance climatique des précipitations (P) - ETP de mai à juillet est également très significative.

La modélisation de l'accroissement radial annuel par régression linéaire multiple, en distinguant les deux espèces, avec les variables climatiques les plus significatives de l'année n, nous permet d'obtenir, pour le chêne pédonculé un modèle comprenant la température de mars, la somme des précipitations MJJ, la balance climatique (P) – ETP MJJ et la

circonférence de l'arbre. Ce modèle explique 7,5% de la variance ($R^2=0,075$) (Tableau XIV et Figure 35)

Tableau XIV : Paramètres du modèle de régression pour le chêne pédonculé sans l'accroissement moyen sur les trois dernières années.

Source	Valeur	Ecart-type	t	Pr > t	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Constante	-2,759	2,539	-1,087	0,277	-7,740	2,222
Mars T	-0,158	0,047	-3,334	0,001	-0,251	-0,065
Som MJJ	0,016	0,008	1,986	0,047	0,000	0,031
P-ETP MJJ	-0,011	0,007	-1,529	0,126	-0,026	0,003
Circonf.	0,008	0,001	6,559	< 0,0001	0,006	0,011

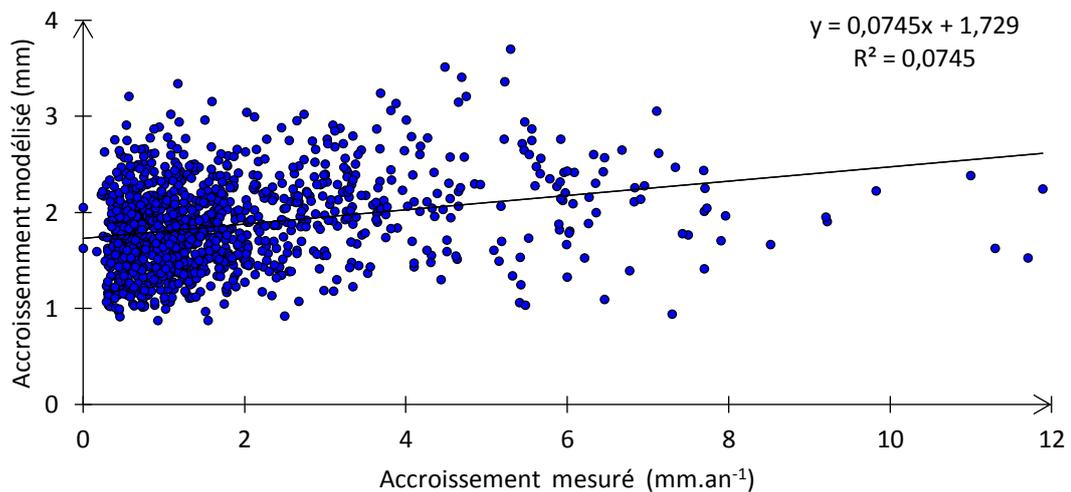


Figure 35 : Accroissements modélisés par rapport aux accroissements mesurés de chaque cerne pour le chêne pédonculé, modèle sans l'accroissement moyen sur les trois dernières années.

Si l'on considère l'accroissement moyen sur les trois dernières années dans l'équation du modèle, le R^2 passe à 0,54, le modèle explique alors 54% de la variance (Tableau XV et Figure 36).

Tableau XV : Paramètres du modèle de régression pour le chêne pédonculé avec l'accroissement moyen sur les trois dernières années.

Source	Valeur	Ecart-type	t	Pr > t	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Constante	-4,890	1,717	-2,848	0,004	-8,259	-1,521
Acc.moy 3	0,8362	0,023	36,645	< 0,0001	0,791	0,880
Som MJJ	0,017	0,005	3,234	0,001	0,007	0,027
P-ETP MJJ	-0,013	0,005	-2,628	0,009	-0,022	-0,003

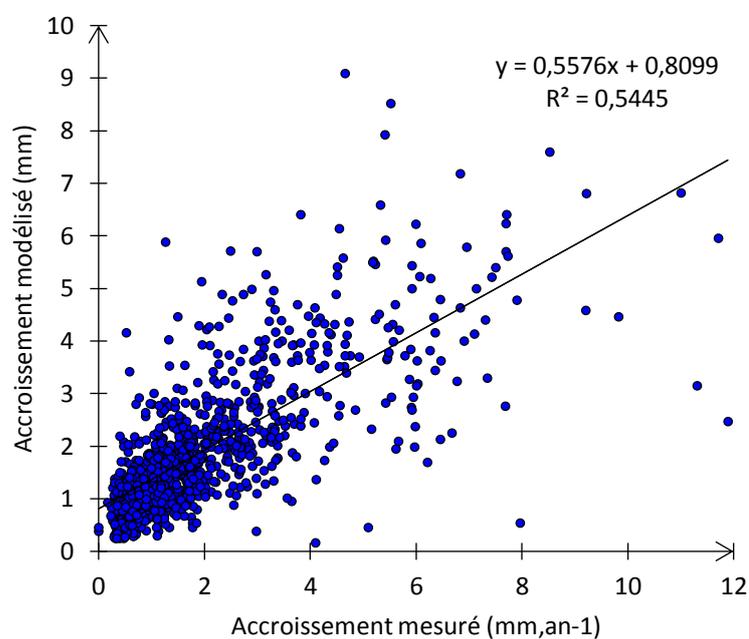


Figure 36 : Accroissement annuels radial modélisé par rapport aux accroissements mesurés de chaque cerne pour le chêne pédonculé, modèle avec l'accroissement moyen sur les trois dernières années.

Pour le chêne sessile, le modèle linéaire ne contient que la somme MJJ, variable qui reste significative dans l'équation du modèle intégrant l'accroissement moyen sur les trois dernières années (Tableaux XVI et XVII Figures 37 et 38).

Tableau XVI : Paramètres du modèle de régression pour le chêne sessile sans l'accroissement moyen sur les trois dernières années.

Source	Valeur	Ecart-type	t	Pr > t	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Constante	0,946	0,203	4,660	< 0,0001	0,547	1,344
Som MJJ	0,003	0,001	3,894	0,000	0,002	0,005

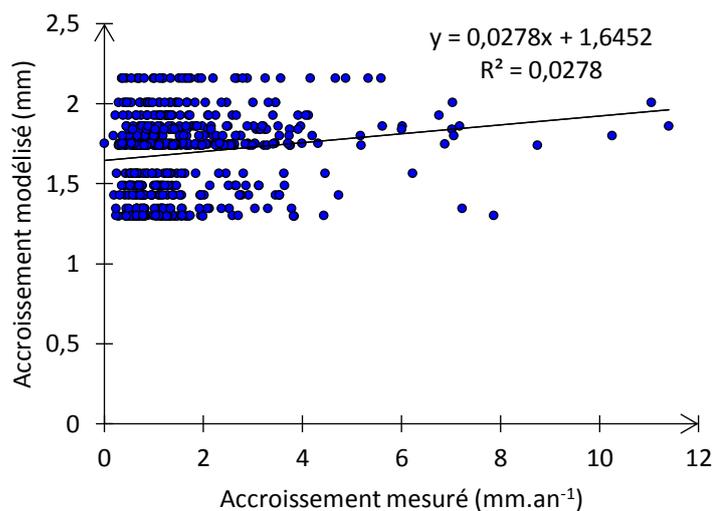


Figure 37 : Accroissements modélisés par rapport aux accroissements mesurés de chaque cerne pour le chêne sessile, modèle sans l'accroissement moyen sur les trois dernières années.

Tableau XVII : Paramètres du modèle de régression pour le chêne sessile avec l'accroissement moyen sur les trois dernières années.

Source	Valeur	Ecart-type	t	Pr > t	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Constante	-0,446	0,144	-3,102	0,002	-0,728	-0,163
Acc.moy 3	0,823	0,031	26,253	< 0,0001	0,762	0,885
Som MJJ	0,003	0,001	5,828	< 0,0001	0,002	0,004

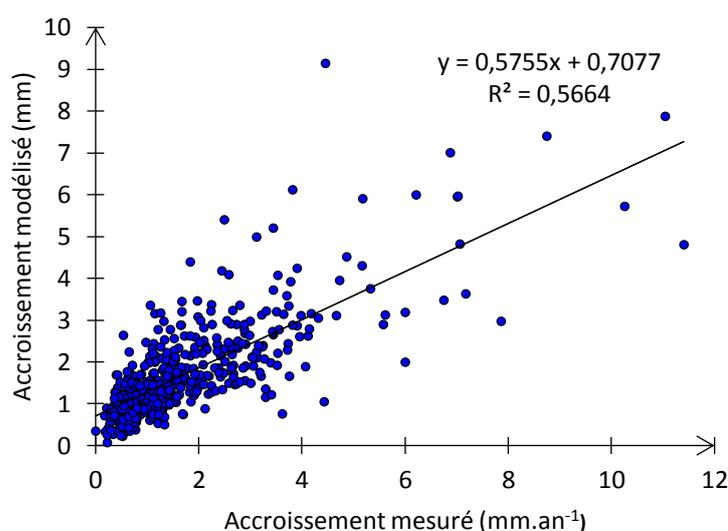
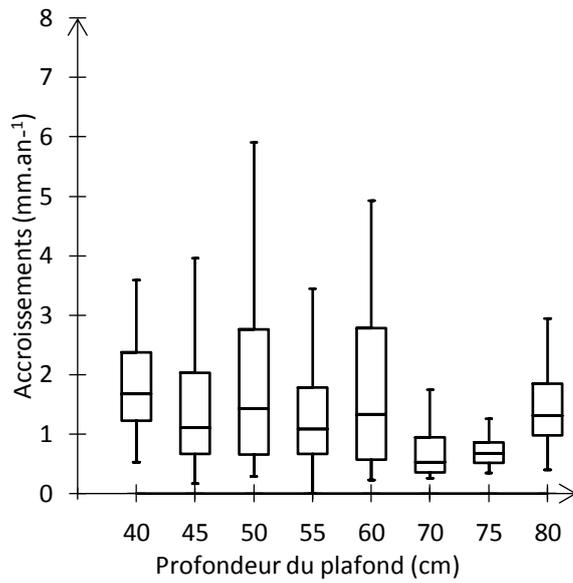


Figure 38 : *Accroissement annuel radial modélisé par rapport aux accroissements mesurés de chaque cerne pour le chêne sessile, modèle avec l'accroissement moyen sur les trois dernières années.*

Les modèles ayant la meilleure valeur prédictive sont pour les deux espèces ceux intégrant l'accroissement moyen sur les trois dernières années et la somme des précipitations de mai à juillet inclus.

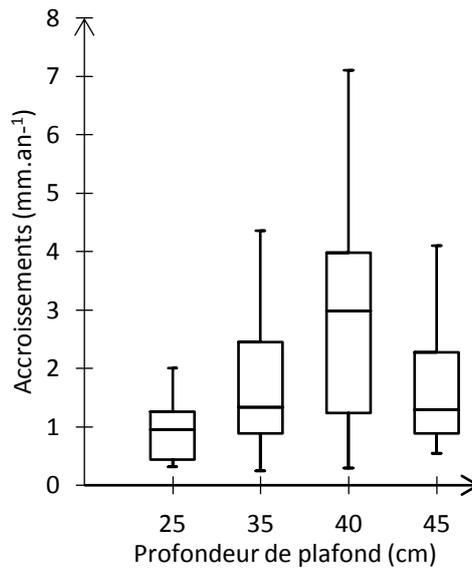
427 Autres facteurs explicatifs

En comparant les accroissements de chaque cerne en fonction de la profondeur du plafond de la nappe d'eau temporaire, on observe pour le pédonculé des fluctuations importantes à Paray le Frésil avec des valeurs d'accroissements significativement différentes en fonction de la profondeur prospectée. Sur le site de Chézy, pour la même espèce, les valeurs augmentent avec la profondeur du plafond de la nappe d'eau temporaire, là aussi de manière significative (Figure 39).



Profondeur	P40	P45	P50	P55	P60	P70	P75	P80
P40	1	< 0,0001	0,004	< 0,0001	0,019	< 0,0001	< 0,0001	0,082
		1	0,077	0,743	0,726	< 0,0001	0,000	0,063
			1	0,061	0,553	< 0,0001	< 0,0001	0,585
				1	0,607	< 0,0001	0,000	0,049
					1	< 0,0001	0,002	0,366
						1	0,458	< 0,0001
							1	< 0,0001
								1

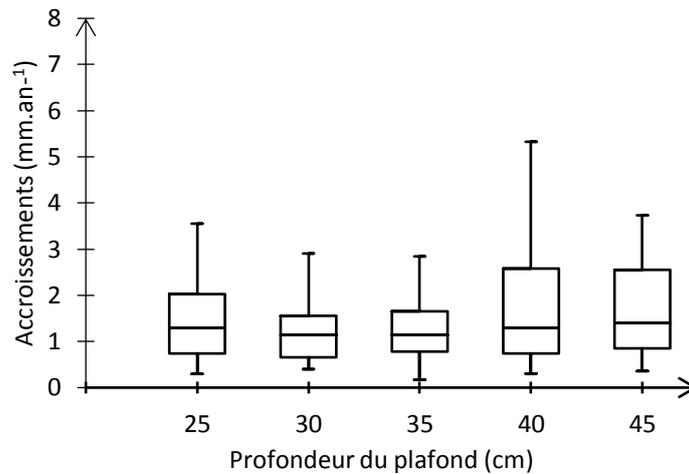
Figure 39a : Distribution des accroissements annuels radiaux (mm) présentée en boîte à moustache, en fonction des plafonds de nappe d'eau pour les chênes pédonculés, à Paray le Frésil (haut), et résultats du test non paramétrique de Kruskal-Wallis (Niveau de signification corrigé de Bonferroni : 0,0018).



Profondeur	P25	P35	P40	P45
P25	1	0,009	< 0,0001	0,006
		1	0,000	0,711
			1	0,001
				1

Figure 39b : *Distribution des accroissements annuels radiaux (mm) présentée en boîte à moustache, en fonction des plafonds de nappe d'eau pour les chênes pédonculés, à Chézy, et résultats du test non paramétrique de Kruskal-Wallis (Niveau de signification corrigé de Bonferroni : 0,0083).*

En comparant les espèces sur le site de Chézy (Figure 39b et 40), on observe peu de variations des valeurs d'accroissement en fonction de la profondeur du plafond pour les chênes sessiles contrairement aux pédonculés qui présentent une augmentation jusqu'à 40 cm.



Profondeur	P25	P30	P35	P40	P45
P25	1	0,415	0,671	0,242	0,227
		1	0,561	0,121	0,109
			1	0,089	0,119
				1	0,709
					1

Figure 40 : Distribution des accroissements annuels radiaux (mm) présentée en boîte à moustache, en fonction des plafonds de nappe d'eau pour les chênes sessiles de Chézy et résultats du test non paramétrique de Kruskal-Wallis (Niveau de signification corrigé de Bonferroni : 0,005).

Les accroissements mesurés sur les chênes sessiles semblent peu influencés par la profondeur du plafond de nappe d'eau, les différences sont non significatives. Pour les pédonculés, les valeurs maximales d'accroissement sont relevées à 40 cm de profondeur. On n'observe pas d'augmentation significative des accroissements sur les sols les plus profonds.

428 Influence de l'état de dépérissement

DEPEFEU

Les notations effectuées sur les chênes pédonculés (Figure 41), montrent des valeurs décroissantes d'accroissements radiaux à Paray le Frésil et peu d'amplitude à Chézy. Pour Paray le Frésil, les valeurs suivent la notation : plus les houppiers sont altérés plus faibles sont les valeurs. Pour discriminer les différences significatives, nous avons effectué un test

non paramétrique de Kruskal-Wallis pour les chênes pédonculés de Paray le Frésil et Chézy. Pour le chêne pédonculé de Chézy, le test conclue qu'il n'y a pas de différence d'accroissement entre les notations DEPEFEU 0 et 1 ($p = 0.963$). Pour les chênes pédonculés de Paray et les chênes sessiles de Chézy, le test conclue que les échantillons proviennent de population différentes ($p < 0,0001$). Les résultats du test pour les chênes pédonculés de Paray le Frésil (Tableau XVIII) montrent qu'il n'y a pas de différence significative d'accroissement entre les arbres notés 1 et ceux notés 2. Les accroissements des arbres notés 1 et 2 sont significativement supérieurs à ceux des arbres notés 3, 3+ et 4. Les arbres notés en 3 ont des accroissements plus élevés que les arbres notés 3+ et 4. Enfin, les différences entre les arbres notés 3+ et 4 ne sont pas significatives. A Chézy, la parcelle a récemment subi une forte éclaircie et les individus les plus dépérissants ont très certainement été retirés.

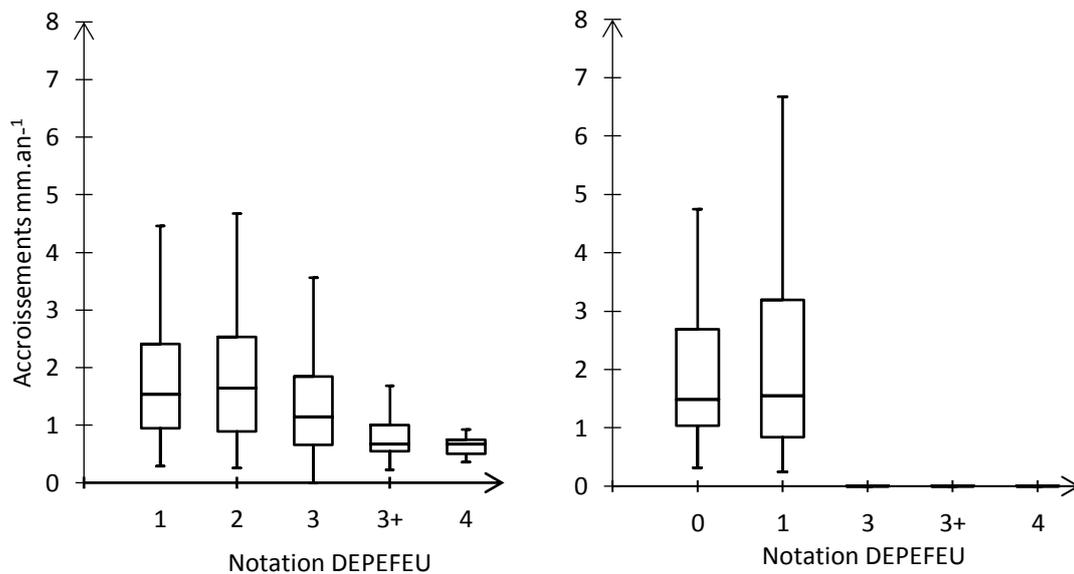


Figure 41 : Distribution des accroissements annuels radiaux (mm) présentée en boîte à moustache en fonction de la notation DEPEFEU des chênes pédonculés de Paray le Frésil (gauche) et de Chézy (droite).

Tableau XVIII : Résultats du test de Kruskal-Wallis pour les chênes pédonculés de Paray le Frésil (Niveau de signification corrigé de Bonferroni : 0,005).

Note DEPEFEU	1	2	3	3+	4
1	1	0,739	0,007	< 0,0001	< 0,0001
		1	0,003	< 0,0001	< 0,0001
			1	< 0,0001	< 0,0001
				1	0,366
					1

Pour le site de Chézy (Figure 41 (droite) et Figure 42), on observe pour le chêne sessile des fluctuations d'accroissements entre les différentes notations (Tableau XIX). Les arbres notés 0 (sains) présentent les valeurs les plus fortes par rapport aux autres notations. Les arbres notés 1 ont des valeurs inférieures à ceux notés 2 ou 3. Enfin les arbres notés en 2 ont des accroissements supérieurs à ceux notés 3. Pour les chênes pédonculés il y a très peu de variations.

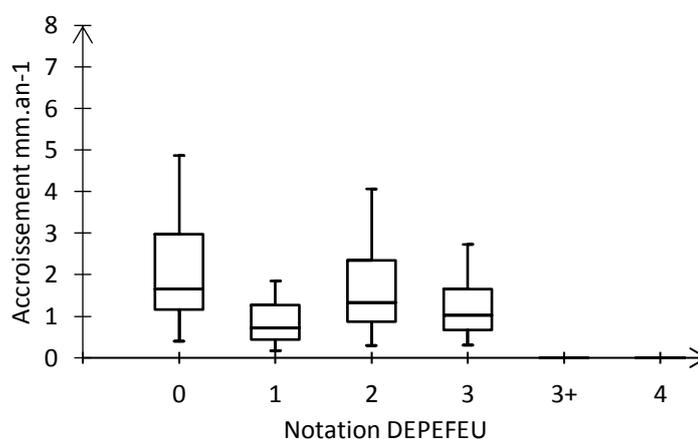


Figure 42 : *Distribution des accroissements annuels radiaux (mm) présentée en boîte à moustache en fonction de la notation DEPEFEU des chênes sessiles de Chézy.*

Tableau XIX : *Résultats du test de Kruskal-Wallis pour les chênes sessiles de Chézy (Niveau de signification corrigé de Bonferroni : 0,0083).*

Note DEPEFEU	0	1	2	3
0	1	< 0,0001	0,019	< 0,0001
		1	< 0,0001	0,001
			1	0,001
				1

Les notations DEPEFEU sont discriminantes pour les chênes sessiles de Chézy et pour les chênes pédonculés de Paray le Frésil. Dans les deux cas les arbres notés avec la notation la plus faible de dépérissement montrent des accroissements radiaux significativement supérieurs à ceux notés avec les notations de dépérissement les plus fortes. Les différences

entre les accroissements et les notations sont plus affirmées pour les chênes pédonculés de Paray le Frésil que pour les chênes sessiles de Chézy.

ARCHI

La Figure 43 et le Tableau XX, montrent pour les chênes pédonculés de Paray le Frésil, que les accroissements des arbres notés Sains (Sa) sont supérieurs à ceux notés S (Stressé), R (Résilient) et I (Irréversible). Les différences d'accroissement entre les individus notés S et R ne sont pas significatives. Les arbres notés S et R ont des accroissements supérieurs à ceux notés I.

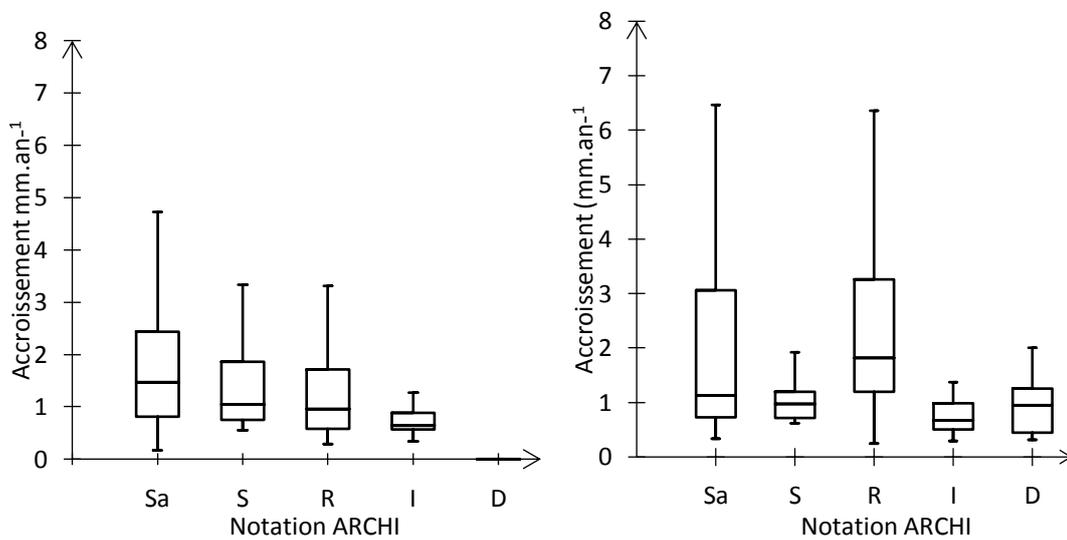


Figure 43 : *Distribution des accroissements annuels radiaux (mm) présentée en boîte à moustache en fonction de la notation ARCHI des chênes pédonculés de Paray le Frésil (gauche) et de Chézy (droite).*

Tableau XX : *Résultats du test de Kruskal-Wallis pour les chênes pédonculés de Paray le Frésil (Niveau de signification corrigé de Bonferroni : 0,0083).*

Type ARCHI	Sa	S	R	I
Sa	1	0,006	< 0,0001	< 0,0001
		1	0,738	0,000
			1	0,000
				1

Tableau XXI : Résultats du test de Kruskal-Wallis pour les chênes pédonculés de Chézy
(Niveau de signification corrigé de Bonferroni : 0,005).

Type ARCHI	Sa	S	R	I	D
Sa	1	0,091	0,006	0,003	0,025
		1	0,000	0,308	0,652
			1	< 0,0001	< 0,0001
				1	0,569

Pour les chênes pédonculés du site de Chézy (Figure 43 et Tableau XXI), les accroissements des arbres notés sains (Sa) diffèrent peu de ceux notés stressés (S), ils sont significativement supérieurs à ceux des individus notés irréversibles (I) et descente de cône (D), inférieurs à ceux des arbres notés résilients (R). Les individus notés stressés (S), ont des accroissements significativement inférieurs à ceux notés résilients (R) et diffèrent peu de ceux notés irréversibles (I) et descente de cône (D). Les arbres notés résilients (R) présentent des accroissements significativement supérieurs à ceux notés irréversibles (I) et descente de cône (D). Enfin les différences entre les individus notés irréversibles (I) et descente de cône (D) ne sont pas significatives.

Les valeurs d'accroissement des chênes sessiles (Figure 44 et Tableau XXII) révèlent la même tendance. Les accroissements des arbres notés sains (Sa) diffèrent peu de ceux notés stressés (S), ils sont significativement inférieurs à ceux notés résilients (R) et supérieurs aux individus notés irréversibles (I) et descente de cône (D). Pour les arbres notés stressés (S), les accroissements sont inférieurs à ceux des individus notés résilients (R), supérieurs à ceux des arbres notés irréversibles (I) et peu différents des individus notés descente de cône (D). Les individus notés résilients (R) présentent des accroissements supérieurs à ceux notés irréversibles (I) et diffèrent peu de ceux des arbres notés en descente de cône (D). Enfin, les accroissements des arbres notés irréversibles (I) sont inférieurs à ceux des individus notés descente de cône (D).

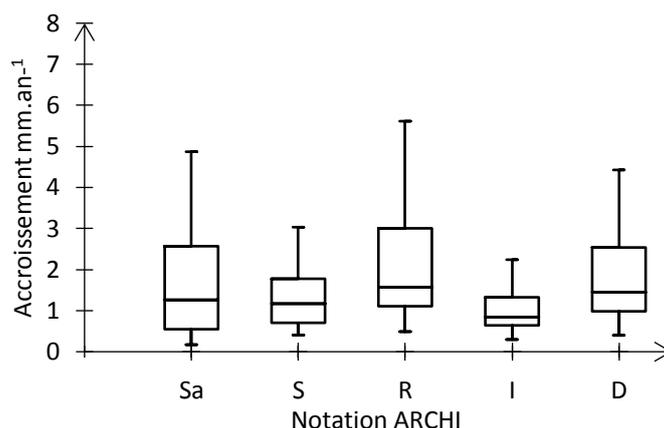


Figure 44 : Distribution des accroissements annuels radiaux (mm) présentée en boîte à moustache en fonction de la notation ARCHI des chênes sessiles de Chézy.

Tableau XXII : Résultats du test de Kruskal-Wallis pour les chênes sessiles de Chézy (Niveau de signification corrigé de Bonferroni : 0,005).

Type ARCHI	Sa	S	R	I	D
Sa	1	0,763	0,002	0,006	0,304
		1	0,000	0,007	0,195
			1	< 0,0001	0,299
				1	0,002
					1

Les types ARCHI sont très significativement discriminants en ce qui concerne les chênes pédonculés de Paray le Frésil, les arbres sains (Sa) présentent des accroissements significativement supérieurs à ceux notés stressés (S), résilients (R) ou irréversibles (I). Sur le site de Chézy, les accroissements des arbres sains (Sa) diffèrent peu de ceux notés stressé (S), par contre et quelle que soit l'espèce, ils sont supérieurs aux individus notés irréversibles (I) et descente de cîme (D) et inférieurs aux résilients (R). Les individus notés résilients (R) présentent, à Chézy, des accroissements significativement supérieurs aux arbres sains (Sa) et stressés (S).

Evolution de l'accroissement annuel moyen en fonction des notations DEPEFEU et ARCHI :

En calculant les moyennes annuelles des accroissements radiaux mesurés par essence en fonction des notations DEPEFEU actuelles, on peut suivre l'évolution tendancielle de l'accroissement sur les 15 dernières années (Figures 45 et 46). Cette représentation permet d'avoir une image rétrospective sur la « vitalité » de l'arbre vu au travers de son

accroissement radial sur les 15 dernières années et sur une notation acquise ponctuellement, en fin de course sur l'architecture de sa couronne. Elle permet donc de répondre à la question suivant : l'appréciation de l'état de dépérissement vu au travers de l'architecture de la couronne d'un arbre est-il lié à un processus récent ou au contraire de lente dégradation de la vitalité de l'arbre ?

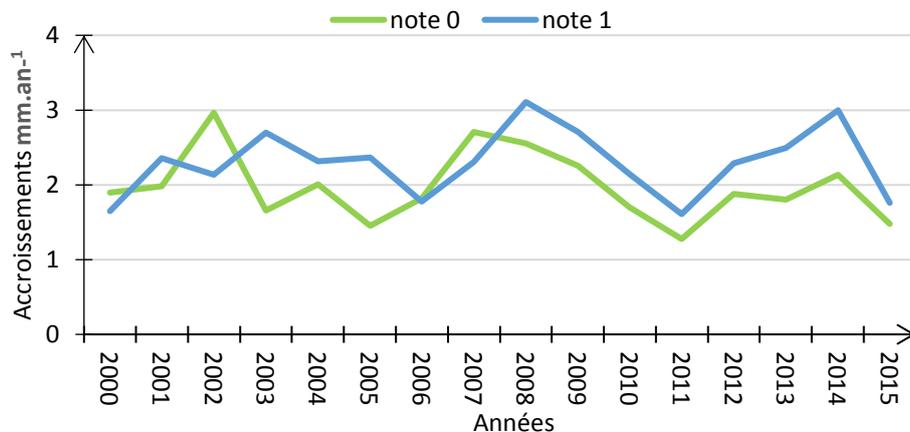
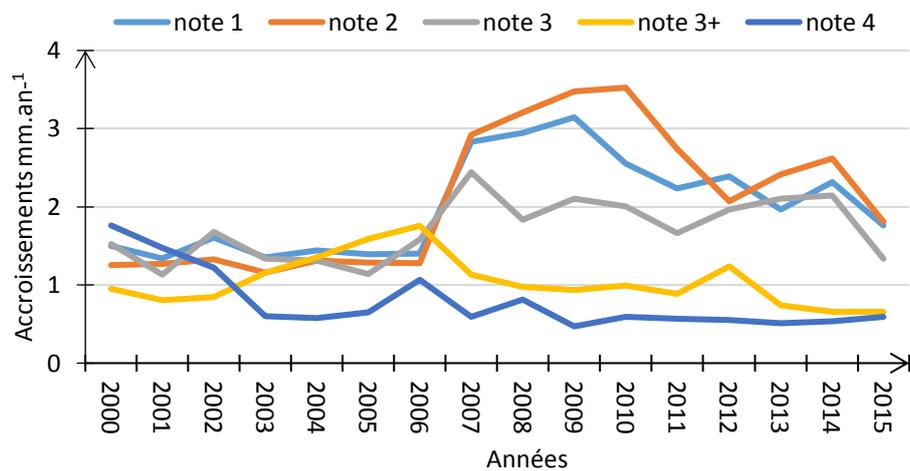


Figure 45 et 46 : Evolution tendancielle des accroissements annuels moyens (mm) en fonction des notations DEPEFEU actuelles des chênes pédonculés de Paray le Frésil (haut) et de Chézy (bas.)

On constate à Paray le Frésil, une partition haute avec les individus notés 1, 2 et 3 et une partition basse avec ceux notés 3+ et 4. Sur la période 2000-2006, les accroissements des arbres notés 1, 2 et 3 en 2015 sont assez regroupés. Les individus en 3+ en 2015 ont connu une augmentation de leurs accroissements sur la même période. Après 2006, les individus notés 1, 2 et 3 ont montré une bonne résilience. Les arbres en 3+ présentent des valeurs décroissantes à partir de 2006, quant à ceux notés 4, leurs accroissements sont les plus

faibles à partir de 2003. Il semble que les individus notés en 3+ ne soient plus en capacité de réagir au niveau de leurs accroissements depuis 2007, quant à ceux notés en 4, ils ont eux aussi perdu cette capacité mais après la sécheresse de 2003. A Chézy, les pédonculés présents ont été notés 0 ou 1. On peut remarquer que sur la période 2000-2005, ces individus ont eu une meilleure croissance que ceux de Paray le Frésil. La dernière intervention sylvicole de 2014 sur la parcelle de Chézy a probablement éliminé les arbres ayant les houppiers les plus altérés.

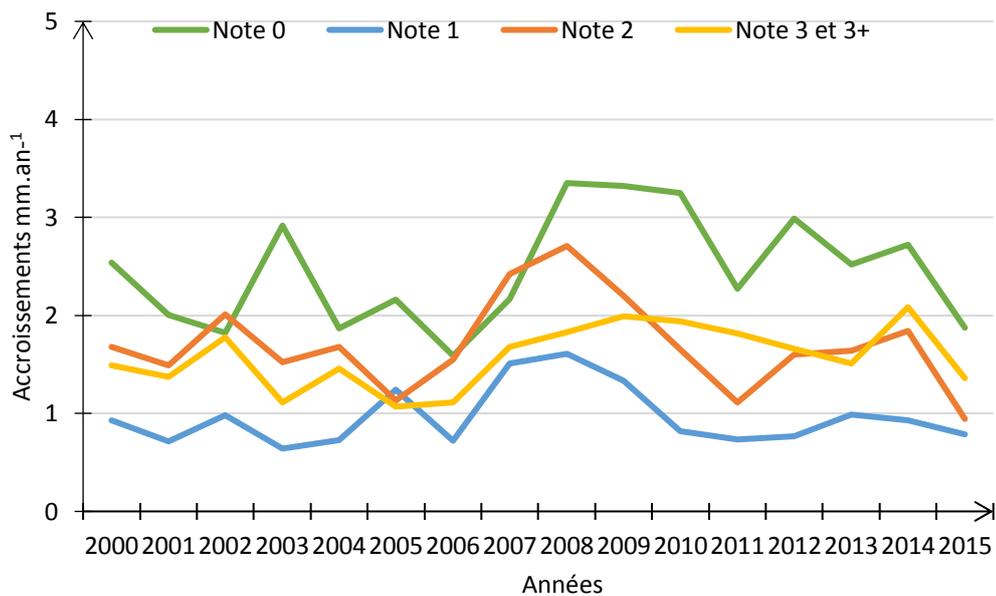


Figure 47 : Evolution tendancielle des accroissements annuels moyens (mm) en fonction des notations DEPEFEU des chênes sessiles.

Les courbes tracées pour les chênes sessiles (Figure 47) montrent que les individus notés 0 en 2015 présentent les accroissements les plus forts en moyenne, et ceux affectés d'une note 1 sont ceux qui sur la période ont présentés les valeurs moyennes les plus faibles. Les arbres notés en 2 et 3-3+ présentent des valeurs intermédiaires.

Les notations effectuées avec DEPEFEU en 2015 pour les chênes pédonculés de Paray le Frésil semblent confirmées rétrospectivement par les valeurs d'accroissements mesurés. En effet plus les notes sont élevées en 2015 moins les accroissements sont forts les années précédentes. Les individus les plus affectés au niveau de leur houppier présentent les valeurs d'accroissement les plus faibles depuis 2007. Cette tendance est moins nette pour les chênes sessiles, avec cependant des valeurs d'accroissement les plus fortes pour les arbres à houppier sains (note 0).

Concernant les notations ARCHI, on obtient à partir des accroissements annuels moyens les courbes suivantes (Figures 48 et 49).

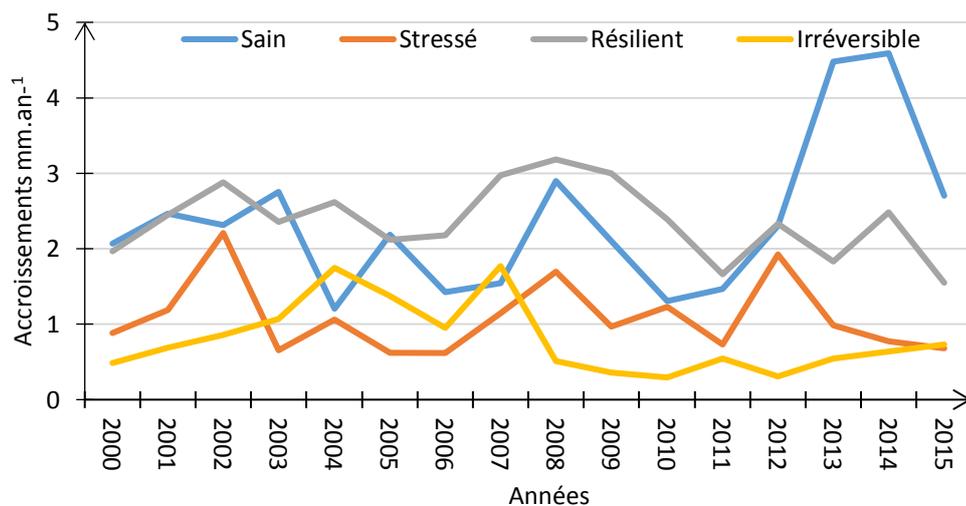
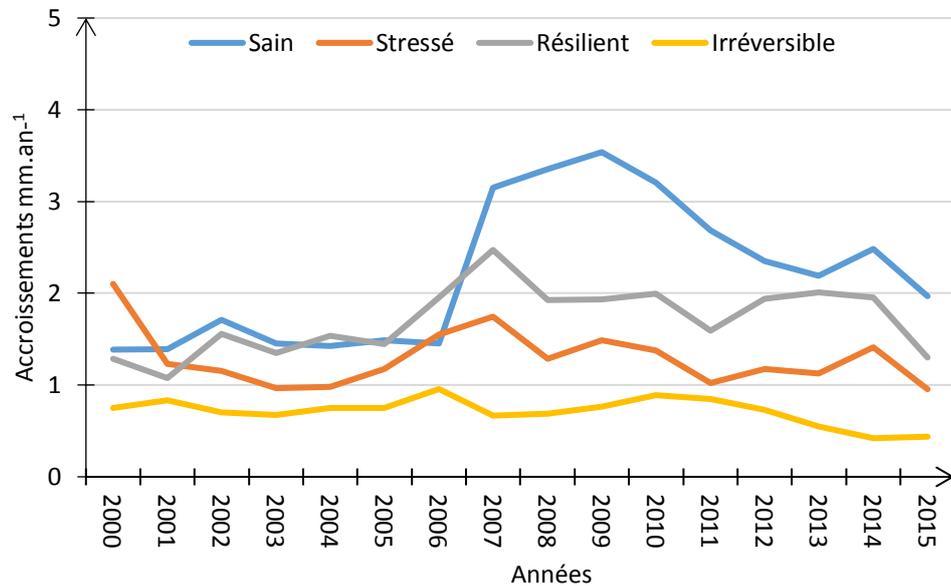


Figure 48 et 49 : Evolution tendancielle des accroissements annuels moyens (mm) en fonction des notations ARCHI des chênes pédonculés de Paray le Frésil (haut) et de Chézy (bas).

A partir de la notation de 2016, les accroissements des chênes pédonculés de Paray le Frésil montrent que les arbres notés sains ont les plus forts accroissements et ce depuis la fin de la période de sécheresse 2000-2005. Les individus stressés ont des valeurs inférieures à celles des résilients, enfin les arbres notés irréversibles ont les valeurs les plus faibles et ce depuis le début de la période considérée. La répartition des valeurs est équivalente pour les

pédunculés de Chézy sur les dernières années de la période (2012-2015). Les arbres irréversibles ont des valeurs faibles et ce depuis 2008.

Quant aux chênes sessiles (Figure 50), on observe la même tendance avec des accroissements plus forts pour les arbres sains, suivis par les individus résilients et ceux notés stressés. Les individus notés irréversibles présentent les accroissements annuels moyens les plus faibles presque tout au long de la période étudiée. Deux arbres sont classés en descente de cime.

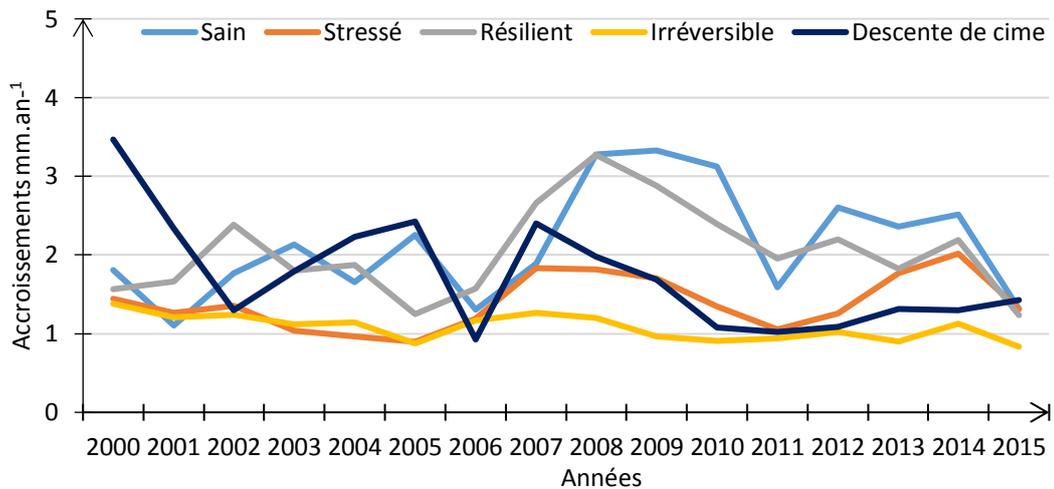


Figure 50 : Evolution tendancielle des accroissements annuels moyens (mm) en fonction des notations ARCHI pour les chênes sessiles.

Les notations effectuées avec le protocole ARCHI en janvier 2016 montrent pour les chênes pédunculés et sessiles une gradation des valeurs d'accroissement en fonction des types déterminés. Les accroissements des arbres sains sont plus forts que ceux des arbres stressés. Ceux des individus résilients sont plus élevés que ceux des stressés, enfin les irréversibles présentent des valeurs faibles depuis plusieurs années voire depuis le début de la période considérée.

Discussion

Notre hypothèse initiale suppose que la succession des contraintes hydriques, engorgements puis sécheresse est à l'origine du dépérissement des chênes dans le contexte de la Sologne Bourbonnaise.

Evaluation du dépérissement :

L'état actuel de dépérissement en feuille des deux peuplements avec le protocole DEPEFEU nous montre que seulement 9% des arbres ont un houppier sain, 52% ont des houppiers légèrement à modérément dépérissants et 39% des individus présentent des houppiers fortement dépérissants à moribonds. Cette notation présente une corrélation négative significative avec la circonférence moyenne des individus. Les arbres les plus gros, qui sont les arbres dominants, présentent des houppiers sains alors que les individus de faibles circonférences ont des houppiers fortement dépérissants ou moribonds. Ces résultats sont cohérents avec ceux du projet Dryade (INRA 2007-2011) qui conclut que les dépérissements concernent les arbres co-dominants et les arbres dominés (Breda & Caquet 2015) et ceux de Rozas (2015) qui précisent que les arbres fortement dépérissants sont plus petits que les arbres sains. Les arbres sains présentent un rythme de croissance plus soutenu que les tiges dépérissantes (Amorini *et al* 1996). Un arbre sain avec un houppier complet, vert et bien développé posséderait un niveau élevé de réserves carbonées lui permettant de maintenir sa croissance radiale (Cailleret 2011).

La résilience des individus hors feuille avec le protocole ARCHI, sur les mêmes arbres, dénombre 42% d'arbres sains, 12% d'individus stressés, 33% de résilients et 13% d'arbres notés irréversibles ou en descente de cime. Cette notation est également corrélée négativement avec la circonférence des arbres. Une corrélation positive très significative est notable entre ces deux protocoles, ce qui suggère que les arbres dont les houppiers sont les plus altérés sont aussi ceux dont la résilience est la plus faible. Les courbes tendanciennes construites à partir des accroissements radiaux annuels moyens et des notes attribuées avec chaque protocole (Figures 45 à 50) montrent que les individus les plus dépérissants (3+ et 4 DEPEFEU ou Irréversible ARCHI) ont les accroissements radiaux les plus faibles et ce depuis le début des années 2000. Cette période fut caractérisée par de forts déficits hydriques en saison de végétation dont les effets cumulatifs ont pu impacter la croissance radiale des arbres de notre étude. Breda et Peiffer (2014) suggèrent que la répétition des épisodes de sécheresse de la période 2003-2006 a généré une baisse de croissance

persistante, une absence de résilience et la mort de quelques individus. Cet effet est plus marqué pour les chênes pédonculés de Paray le Frésil. Il l'est moins à Chézy et pour les chênes sessiles. Ces derniers ayant une plus grande efficacité que les pédonculés quant à l'utilisation de l'eau (Ponton 2002). La gestion sylvicole du site de Chézy est plus dynamique que celle appliquée à Paray le Frésil. La croissance est plus soutenue dans les peuplements éclaircis car les arbres restants disposent de meilleures réserves en eau (Trouve *et al* 2016). Le site de Paray le Frésil présente une texture de sol plus sableuse, donc plus filtrante, des horizons de surface (*cf.* Tableau I et II) ; une distribution des racines fines plus superficielle (*cf.* Figures 5 et 6) ; un niveau maximal de nappe d'eau perchée temporaire plus « profonde » (*cf.* Figure 7) et une charge à l'hectare plus élevée (25 m²) que le site de Chézy.

Rôle la végétation herbacée :

La végétation au sol sur les deux sites est caractérisée par la dominance de la molinie bleue avec toutefois une zone à fougère aigle sur le site de Paray le Frésil. La présence de la molinie bleue sur le site de Chézy est un indicateur de la hauteur de la nappe d'eau perchée temporaire : plus la nappe d'eau perchée temporaire est proche de la surface, plus la molinie bleue est présente. A Paray le Frésil, plus son recouvrement est important, moins les houppiers des arbres sont altérés ($r = -0,28$; $p < 0,0001$). Ce résultat pourrait signifier que les zones à molinie présentent une plus grande disponibilité en eau favorable aux chênes en cas de sécheresse, la nappe d'eau perchée temporaire étant plus proche de la surface. La molinie bleue avec son système racinaire dense dans les dix premiers centimètres du sol peut également réduire la quantité d'eau utilisable dans cet horizon (Pouzerat 2010), en contrepartie en cas de nappe d'eau perchée temporaire proche de la surface, elle permettrait par transpiration d'assainir plus rapidement cet horizon de surface. Fougère et molinie sont considérées comme monopolistes car elles envahissent l'espace au détriment d'autres espèces et leur présence pourrait rendre plus précoce et accentuer la sécheresse pour les arbres (Gobin *et al* 2015). Elles pourraient également avoir des effets allélopathiques sur les jeunes arbres (Timbal *et al* 1990 ; Dumas 2002). Nos résultats ne semblent pas montrer que la présence de ces espèces soit défavorable à l'arbre, en particulier pour les nappes très proches de la surface.

Effets des conditions climatiques sur les accroissements radiaux :

Les conditions climatiques locales analysées à partir des relevés de la station météorologique d'Yzeure, déterminent des conditions favorables à la croissance du chêne (Timbal & Aussenac 1996) avec cependant une température moyenne annuelle inférieure à l'optimum de 13°C pour le chêne pédonculé. Les températures moyennes de mars et de juin de la saison de croissance sont négativement corrélées ($r = -0,11$, $r = -0,14$) aux accroissements radiaux des chênes pédonculés de Paray le Frésil. Ce sont celles de juin et de juillet ($r = -0,1$, $r = -0,09$) pour les chênes sessiles. Ces corrélations négatives de températures ont été évoquées par Leblanc & Stahler (2015), l'augmentation de celles-ci auraient un effet accentuant la sécheresse indépendamment de la quantité de précipitations (Allen 2009). Une corrélation négative significative entre l'accroissement radial et la moyenne des températures minimales d'août et de septembre de l'année n-1 est observée. Les températures chaudes de fin d'été pourraient influencer l'accumulation de réserves qui semblent particulièrement importante chez les espèces à zone initiale poreuse comme les chênes (Grosdidier 2014). Ces derniers doivent reconstituer annuellement tout ou partie de leur système hydraulique embolisé au cours de l'hiver (Cruziat *et al* 2002). Mais au total, les effets de la variable température sur l'accroissement radial ne sont pas très marqués (Cufar *et al* 2014).

La somme des précipitations de mai à juillet est corrélée positivement à l'accroissement radial. Cette observation rejoint celles de Leblanc & Stahler (2015) qui observent une forte corrélation entre les précipitations de juin et l'accroissement radial ou celles de Cufar *et al* (2014) qui notent des corrélations positives entre les précipitations estivales et l'accroissement radial. Ces faibles ou fortes précipitations interviennent sur la disponibilité en eau du sol en début d'été qui est considérée comme le facteur susceptible de limiter la croissance radiale des chênes (Bauwe *et al* 2015). Les températures élevées de mars et le stress hydrique de mai à juillet sont identifiés par Mérian *et al* (2011) comme facteurs limitants la croissance du chêne sessile. Plus globalement, les stress hydriques en saison de végétation conditionneraient l'assimilation carbonée et ainsi la croissance des arbres (Aussenac *et al* 1995).

Les modélisations réalisées dans cette étude montrent que l'accroissement radial est essentiellement expliqué par la somme des précipitations de mai à juillet et l'accroissement radial moyen sur les trois dernières années, ce qui renforce l'idée du rôle des réserves produites une année sur le développement de l'arbre l'année ou les années suivantes en

particulier pour reconstituer le système hydraulique embolisé (Cruziat *et al* 2002 ; Grosdidier 2014). Nos explorations ont également montré de fortes corrélations très significatives entre l'accroissement radial annuel et les accroissements moyens sur les 4 et 5 dernières années. L'accroissement radial d'une année est donc fortement dépendant de ceux des années précédentes, comme nous avons pu le constater à partir des courbes tendanciennes d'évolution de l'accroissement radial annuel moyen en fonction des notes DEPEFEU. Ce point suggère que le dépérissement est progressif sur le long terme, sachant que les arrières effets sur le chêne sont importants (Nieminen 1988). Cet accroissement radial permet de quantifier un certain état de vigueur des arbres (Guillaumin *et al* 1985).

Nous avons calculé les déficits hydriques ((P) - ETP Turc) sur la saison de végétation (avril à novembre), sur le printemps (avril, mai, juin), sur l'été (juillet, août, septembre) et enfin sur mai, juin et juillet. Ces déficits hydriques étant considérés comme un des paramètres climatiques permettant d'expliquer la présence de dépérissements (Lemaire 2015). Nous obtenons au maximum -306 mm en saison de végétation pour l'année 2005, valeur proche des -310 mm identifiés comme seuil critique pour le chêne pédonculé (Lemaire & Maréchal 2011). Les années 2003, 2011 et 2015 sont aussi fortement négatives sur la saison de végétation (-247 mm, -169 mm, -226 mm). On observe une corrélation forte et significative entre l'accroissement radial et (P) - ETP de mai à juillet pour les deux chênes. Le déficit hydrique sur cette même période influence significativement l'épaisseur des accroissements radiaux (Toïgo *et al* 2015). La récurrence des années à fort déficit hydrique pourrait être à l'origine des dépérissements (Lemaire 2015).

Sur les seize années considérées dans cette étude, l'épaisseur du bois initial est relativement constante ce qui est cohérent avec les observations de Lebourgeois *et al* (2004). Cette épaisseur ne semble pas liée aux précipitations de printemps (*cf* la différence non significative d'accroissement printanier entre 2007 et 2011 pour des écarts de précipitations particulièrement forts, Fonti & Garcia-Gonzalez 2008), ni fluctuer en fonction des conditions climatiques (Nabeshima *et al* 2015). L'accroissement radial annuel est fortement corrélé à l'épaisseur du bois final (Lebourgeois *et al* 2004), ce dernier montrant davantage de fluctuations en fonction des années considérées (*cf*. Figure 23). On peut remarquer des valeurs plus faibles sur la période 2000-2006 comportant deux des années présentant les plus forts déficits hydriques en saison de végétation (2003 avec -247 mm et 2005 avec -306 mm).

Rôle de la nappe d'eau perchée temporaire

Les profondeurs du plafond de nappe d'eau perchée temporaire nous montrent que celles-ci sont plus proches de la surface à Chézy qu'à Paray le Frésil, comme l'attestent les profils pédologiques sur fosses profondes qui situent la nappe d'eau perchée temporaire à 30 cm de profondeur à Paray le Frésil et dès la surface à Chézy. Ce que confirment les niveaux de nappe d'eau perchée temporaire tracés à partir des relevés piézométriques. Cette dernière est présente pendant six mois, de décembre à mai puis descend rapidement au cours de l'été pour atteindre son niveau le plus bas en août (*cf.* Figure 7). Cet excès d'eau dans le sol pendant une longue période peut générer un stress à long terme (Rozas & Garcia-Gonzalez 2012) ou être un facteur additionnel de stress (Thomas *et al* 2002) à l'origine des dépérissements. Nos relevés piézométriques ne couvrent que deux à trois années d'étude, mais les forêts étudiées sont situées en Sologne Bourbonnaise considérée par l'IFN comme une zone humide dont près de 80% des sols présentent des traces d'hydromorphie.

La présence de cette nappe d'eau perchée temporaire va dégrader une partie du système racinaire entraînant nécroses et mortalités. Les arbres devront donc reconstituer annuellement une partie de leur système racinaire et recoloniser les horizons ressuyés. Ce développement racinaire peut ne pas être suffisamment profond lors de l'apparition d'une sécheresse (Lévy & Lefèvre 2001). Les profils racinaires tracés (*cf.* Figures 5 et 6) montrent une répartition des racines fines dans les horizons superficiels, en particulier sur le site de Paray le Frésil, avec une décroissance régulière de 0 à 60 cm. A Chézy, la densité de racines fines décroît moins rapidement et une densité importante est observable jusqu'à 80cm. La forêt de Chézy comporte davantage de chênes sessiles, qui sont plus sensibles à l'humidité du sol (Thomas & Hartmann 1998), et dont le système racinaire s'enfonce plus profondément que celui du chêne pédonculé. Cette différence morphologique permettrait au chêne sessile d'être plus résistant à la sécheresse (Breda *et al* 1993). Le chêne pédonculé quant à lui, présente davantage de racines adventives et une quantité de lenticelles plus importante lui permettant d'être plus tolérant à l'engorgement que le chêne sessile (Noyer 2012). Il est par ailleurs réputé pouvoir tolérer près de 100 jours annuels d'inondation (Colin-Belgrand 1991), durée largement dépassée dans notre cas d'étude.

Pour les individus soumis à la double contrainte engorgement puis sécheresse, les chênes sessiles montrent une plus grande sensibilité à l'engorgement mais la croissance des chênes pédonculés est moins affectée par la sécheresse avec un engorgement préalable (Lévy & Lefèvre 2001). Lors d'une sécheresse, les deux espèces réagissent de manière similaire par

un arrêt plus ou moins précoce de la croissance en diamètre (Noyer 2012). L'analyse des accroissements radiaux par rapport à la profondeur du plafond de la nappe d'eau perchée temporaire, montre une augmentation de ceux-ci jusqu'à 40-50 cm de profondeur environ. Au-delà de cette profondeur on peut observer une baisse importante de la densité de racines fines (*cf.* Figures 5 et 6). Cette profondeur pourrait correspondre à la profondeur de recolonisation annuelle potentielle des racines fines atteinte après la période d'engorgement.

Cet engorgement récurrent et les sécheresses répétées peuvent provoquer des dépérissements progressifs sur le long terme. Guillaumin *et al* (1985) précisent que sur les sols engorgés, la sécheresse serait responsable de l'affaiblissement des chênes et l'excès d'eau de leur mort. Breda et Caquet (2015) évoquent des dépérissements en cas de fortes sécheresses avec une sensibilité plus grande dans les zones engorgées. La croissance racinaire est confinée par l'engorgement dans les horizons superficiels. Cette nappe d'eau perchée temporaire descend très rapidement et lors d'une sécheresse précoce, le compromis entre vitesse de descente de la nappe d'eau et possibilité de recolonisation du sol par les racines n'apparaît plus réalisé (Mellisho *et al* 2016). L'approvisionnement en eau des arbres en période de croissance est ainsi contraint, car une partie importante de leur système racinaire est située dans les horizons superficiels. Le réservoir utile de 160 mm que nous avons calculé sur un mètre de profondeur, valeur considérée comme générant une contrainte faible de croissance (Lévy & Lefèvre 2001), n'est alors pas suffisant pour compenser les besoins en cas de sécheresse marquée. Cependant dans les parcelles étudiées, le réservoir utile potentiel d'un mètre de profondeur n'est pas prospecté de manière uniforme par les racines fines, sa taille est alors réduite à la profondeur des racines contraintes par l'engorgement.

Bilan et perspectives :

Les résultats obtenus avec une notation des dépérissements à partir de chaque protocole (DEPEFEU et ARCHI) à un instant t , sont cohérents avec la croissance radiale mesurée des arbres sur une période de seize années. La croissance radiale est considérée comme un indicateur de la santé et des conditions de croissance (Daudet *et al* 2004), car elle intègre l'ensemble des processus de fonctionnement des arbres (Cailleret 2011). Les dépérissements observés dans notre contexte semblent fréquents sur sol à nappe d'eau perchée temporaire (Camy *et al* 2003). Les données climatiques analysées ne montrent pas de schéma marquant au niveau de la température. Pour les précipitations, le déficit hydrique de fin de printemps début d'été (mai à juillet) est fortement corrélé avec les valeurs

d'accroissement radial. Un déficit hydrique en fin de printemps pourrait ralentir la croissance racinaire et aérienne. Cette croissance racinaire est nécessaire à la reconstitution d'un système ennoyé pendant une longue période. Les racines des arbres doivent recoloniser chaque année l'ensemble du profil de sol et ce avant la descente brutale de la nappe d'eau perchée temporaire.

Les précipitations enregistrées ne permettent cependant pas d'expliquer les fluctuations rapides observées du niveau de cette nappe d'eau perchée temporaire, il ne s'agit donc sans doute pas d'une nappe d'origine pluviale. La configuration géographique (surface plane avec peu de départs latéraux) et hydrographique (confluence de l'Allier et de la Loire, présence locale de nombreux étangs) des sites nous amène à envisager une origine profonde (Jabiol 2002) de cette nappe d'eau, ce qui minore l'importance du bilan hydrique climatique.

Les sécheresses estivales impactent l'accumulation de réserves (Bréda *et al* 2006 ; González-González *et al* 2014 ; Merlin *et al* 2015) nécessaires pour les espèces à zone initiale poreuse comme le chêne (Grosdidier 2014). La répétition des stress hydriques sur la période 2000-2006, plus préjudiciable aux arbres que l'intensité de la sécheresse en elle-même (Breda & Peiffer 2014), a probablement affecté la mise en réserve des produits d'assimilation (Ponton 2002). Les arbres présentant aujourd'hui des symptômes de dépérissement et dont la croissance radiale est faible pourraient avoir ajusté cette croissance sur le long terme à une assimilation carbonée réduite (Delaporte 2015). Ces individus seront plus sensibles aux événements biotiques ou abiotiques (Cailleret 2011), d'autant que dans le cas du chêne les arrières effets liés aux stress peuvent être sensibles plusieurs années après ce dernier (Vennetier 2012). La modélisation des accroissements radiaux que nous avons réalisée montre d'ailleurs une forte corrélation entre l'accroissement radial annuel et la moyenne des accroissements radiaux des 3, 4 et 5 dernières années. La plus forte corrélation étant observée avec les accroissements moyens sur les trois dernières années.

Notre échantillonnage de biopsies basé sur les circonférences et les notes DEPEFEU ne nous a pas permis de sonder des individus répartis sur l'intégralité des parcelles. Une prospection plus importante, en nombre d'individu sur chaque site, nous aurait permis de mieux évaluer la vitalité des arbres. Les individus peuvent en effet montrer une acclimatation et modifier leur fonctionnement en fonction des conditions locales (Cailleret 2011). D'autre part nous n'avons sondé les arbres que sur un côté (nord) et de manière superficielle (sans aller à cœur). Deux prélèvements par individu auraient permis de réduire

les effets individuels (Durand *et al* 1983) et le sondage à cœur d'évaluer le comportement des individus sur un pas de temps plus important. L'âge des arbres sondés aurait ainsi été connu précisément et la croissance radiale individuelle ajustée sur des séries temporelles plus longues et ainsi analysée corrélativement avec les données climatiques.

Le travail initié devrait se poursuivre sur un plus grand nombre de site présentant des peuplements à base de chênes et des problématiques d'engorgements récurrents. Le nombre d'individus prélevés par site devrait être plus élevé en tenant compte à la fois de l'état de dépérissement issu de la notation DEPEFEU mais également de la résilience des individus évaluée grâce au protocole ARCHI. L'échantillonnage des arbres devra permettre de spatialiser au mieux les données et les bilans hydriques seront à réaliser à l'échelle de la placette d'inventaire voire à l'échelle individuelle. Le LAI des individus sains et dépérissants devrait également faire l'objet d'un suivi et d'une notation afin d'évaluer si les arbres dépérissants le sont, à cause d'un déficit foliaire impactant leur balance carbonée, ou si les sécheresses répétées entraînent une baisse du LAI. Cette notation permettrait également de définir de manière plus précise la saison de végétation en particulier la fin de celle-ci les chênes présentant fréquemment un caractère marcescent.

Nous n'avons pas intégré les aspects biotiques dans notre étude. Les pathogènes racinaires tels que l'armillaire peuvent affecter l'état sanitaire des chênes et leur action peut courir sur de nombreuses années avant d'avoir des effets observables. Les défoliations répétées précoces (tordeuse, géométride) ou tardives (processionnaire du chêne) sont également identifiées dans la littérature comme des facteurs aggravant de dépérissement.

Conclusion

Les gestionnaires forestiers auvergnats de la Sologne Bourbonnaise doivent conduire des peuplements mélangés de chênes sur des sols présentant fréquemment des nappes d'eau perchées temporaires. L'objectif sylvicole de production de bois d'œuvre de qualité nécessite des arbres à accroissements fins et réguliers d'un diamètre supérieur ou égal à 60 cm du tronc à la récolte. Cette dimension commerciale ne sera obtenue qu'au bout d'un voire deux siècles pour les chênes. Face aux changements climatiques rapides et à leurs effets visibles sur la végétation forestière, ces gestionnaires cherchent de nouveaux outils pour les assister dans leur prise de décision quant à la gestion sylvicole des peuplements.

Les résultats obtenus montrent que les protocoles DEPEFEU et ARCHI sont pertinents face aux dépérissements constatés et sont confirmés par l'analyse des biopsies de tronc montrant que les individus les plus dépérissants sont aussi ceux dont les accroissements radiaux sont les plus faibles sur l'ensemble de la période considérée, indépendamment des conditions climatiques. Ces outils peuvent donc assister les gestionnaires dans leur choix sylvicole en matière de martelage d'éclaircies. Pour les variables climatiques, la somme des précipitations des mois de mai à juillet et la différence (P) - ETP sur la même période sont les plus significatives des variations d'accroissement radial. Les dépérissements dans notre cas d'étude semblent liés au niveau de la nappe d'eau perchée temporaire, et ses conséquences sur l'intégrité des systèmes racinaires des arbres, couplé aux sécheresses récurrentes depuis le début des années 2000. La croissance des chênes semble en équilibre précaire entre la présence de la nappe d'eau perchée temporaire et l'arrivée d'une sécheresse. Nos prospections ne nous ont cependant pas permis de caractériser précisément le ou les facteur(s) à l'origine des dépérissements observés, mais ont montré que le basculement vers le dépérissement était lent et irréversible à partir d'un stade avancé et quantifiable avec une observation architecturale. Les stations forestières à fortes fluctuations de régime hydrique, la forte charge à l'hectare, les stress hydriques récurrents depuis le début des années 2000, sont autant de facteurs de dépérissement qui peuvent être prédisposants, déclenchants ou aggravants. *In fine*, une gestion sylvicole active, visant à réduire la surface terrière grâce à des éclaircies régulières et assistée de notation architecturale, permettrait de favoriser les arbres encore capables de résilience au détriment de ceux, qui, de par leur notation défavorable sont condamnés à dépérir à plus ou moins long terme et ne produisent que peu de biomasse.

Bibliographie:

- Allen CD. 2009. Climate-induced forest dieback: an escalating global phenomenon? *Unasylva* 231-232: 43-49.
- Abrams MD. 2011. Adaptations of forest ecosystems to air pollution and climate change. *Tree physiology* 31: 258-261.
- Ameglio T, Cochard H, Lacoïnte A, Vandamme M, Bodet C, Cruiziat P, Ewans F, Sauter J & Martignac M. 1999. Adaptation to cold temperature and response to freezing in walnut tree. Fourth international walnut symposium, Bordeaux.
- Ameglio T. 2013. - *Evaluation de la vulnérabilité des chênaies aux contraintes hydriques dans un contexte de changement climatique. Conséquences sur la gestion des peuplements*. Rapport Final – Convention DRAAF-INRA 2010-2013. Convention attributive de subvention FEADER – Dispositif d'aide LEADER/PDRH n°413 323-D. 103 pages.
- Amorini E, Biocca M, Manetti MC & Motta E. 1996. A dendroecological study in a declining oak coppice stand. *Annales des Sciences Forestières* 53 : 731-742.
- Andre JC & Royer JF. 1999. Les fluctuations à court terme du climat et l'interprétation des observations récentes en termes d'effet de serre. *La Météorologie* 28 : 12-22.
- Aussenac G. 1968. L'interception des précipitations par le couvert forestier. *Annales des Sciences Forestières* 25 : 135-156.
- Aussenac G. 1980. Interception des précipitations et évapotranspiration réelle dans les peuplements de feuillus (*Fagus silvatica* L.) et de résineux (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco). *Annales des Sciences Forestières* 37 : 91-107.
- Aussenac G. 1985. Le potentiel hydrique de l'arbre : une donnée essentielle pour la compréhension de l'écophysologie des essences forestières. *Sciences du Sol* : 217-225.
- Aussenac G, Granier A & Breda N. 1995. Effets des modifications de la structure du couvert forestier sur le bilan hydrique, l'état hydrique des arbres et la croissance. *Revue Forestière Française* 1 : 54-62.
- Baize D & Jabiol B. 1995. *Guide pour la description des sols*. INRA Edition 375 pages.
- Barbier S, Balandier P & Gosselin F. 2009. Influence of several tree traits on rainfall partitioning in temperate and boreal forests: a review. *Annales des Sciences Forestières* Volume 66. 11 pages.
- Bastien Y, Aussenac G & Frochot H. 2000. Les changements climatiques : conséquences pour la sylviculture. *Revue Forestière Française* Numéro spécial : 129-138.
- Bauwe A, Jurasinski G, Scharnweber T, Schröder C & Lennartz B. 2015. Impact of climate change on tree-ring growth of scots pine, common beech and pedunculated oak in northeastern Germany. *iForest-Biogeosciences and Forestry* 1118 (9): 1-11.
- Beaufils. 1999. *Catalogue des stations forestières de la Sologne Bourbonnaise*. CETEF Allier 118 pages.
- Becker M. 1972. Quelques observations morphologiques chez le chêne sessile et chez le chêne pédonculé. *Bulletin de la Société Botanique Française* 119 : 231-236.

- Becker M & Lévy G. 1983. Le dépérissement du chêne, les causes écologiques. Exemple de la forêt de Tronçais et premières conclusions. *Revue Forestière Française* 5 : 341-356.
- Becker M & Lévy G. 1986. Croissance radiale comparée de chênes adultes (*Quercus robur* L et *Q. petraea* (Matt.) Liebl.) sur sols hydromorphes acides : effet du drainage. *Acta Oecologica*. Volume 7 : 121-143.
- Becker M & Lévy G. 1990. Le point sur l'écologie comparée du chêne sessile et du chêne pédonculé. *Revue Forestière Française* 2 : 148-152.
- Becker M, Lévy G & Lefèvre Y. 1997. Effet du drainage, de la fertilisation et du désherbage sur la croissance en diamètre de chênes adultes. *Revue Forestière Française* 2 : 103-114.
- Berger C. 2013. *Détermination de la sensibilité au changement climatique du chêne pubescent en Région PACA*. Mémoire de fin d'étude. Ecole Nationale des Sciences Agronomique de Bordeaux Aquitaine. 31 pages.
- Bendixsen DP, Hallgren WS & Frazier AE. 2015. Stress factors associated with forest decline in xeric oak forests of south-central United States. *Forest Ecology and Management* 347 : 40-48.
- Bonneau M, Delmas I, Adrian M & Lefevre Y. 1985. Nutrition minérale comparée du chêne sessile et du chêne pédonculé. *Annales des Sciences Forestières* 42 : 471-474.
- Breda N. 1994. *Analyse du fonctionnement hydrique des chênes sessile (*Quercus robur* L) et du chêne pédonculé (*Quercus petraea*. (Matt.) Liebl.) en conditions naturelles ; effets des facteurs du milieu et de l'éclaircie*. Thèse de Doctorat Université Poincaré Nancy 1. 44 pages.
- Breda N, Huc R, Granier A & Dreyer E. 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecological responses, adaptation processes and long term consequences. *Annales des Sciences Forestières* 63: 625-644.
- Breda N & Peiffer M. 2014. Vulnerability to forest decline in a context of climate changes: new prospects about an old question in forest ecology. *Annales des Sciences Forestières* 71 : 627-631.
- Breda N & Caquet Y. 2015. A quel changement faut-il s'attendre ? Journée INRA-ONF. Juillet 2015.
- Buffet M. 1983. Le dépérissement du chêne en forêt soumise. *Revue Forestière Française* 3 : 199-204.
- Buntgen U, Tegel W, Nicolussi K, McCormick M, Frank D, Trouet VO, Kaplan J, Herzig F, Heussner KU, Wanner H, Luterbacher J & Esper J. 2011. *Science* 331 : 578-582.
- Bussotti F et Grossoni P. 1998. Classification des chênes. Taxonomie en Europe et région méditerranéenne. *Forêt Méditerranéenne* 3 : 267-278.
- Cailleret M. 2011. *Causes fonctionnelles du dépérissement et de la mortalité du sapin pectiné en Provence*. Thèse de doctorat Université Paul-Cezanne Aix-Marseille III. 366 pages.
- Camy C, Delatour C & Marçais B. 2003. Relationship between soil factors, *Quercus robur* health, *Collybia fusipes* root infection and phytophthora presence. *Annales des Sciences Forestières* 60 : 419-426.
- Charnet F. 2002. *Influences des variations spontanées ou provoquées sur l'économie en eau des podzols de la Sologne des Sauldres. Conséquences physiologiques et forestières*. Thèse de Doctorat. INA Paris Grignon.

- Cheib A, Badeau V, Boe J, Chuine I, Delire C, Dufrêne E, Francois C, Gritti ES, Legay M, Pagé C, Thuiller W & Viovy N. 2012. Climate change impacts tree ranges: model intercomparison facilitates understanding and quantification of uncertainty. *Ecology letter* 15 : 533-544.
- Choisnel E. 1997. Changement climatique et ressources en eau pour l'agriculture. *Aménagement et Nature* 126 : 41-46.
- Cochard H & Tyree MT. 1990. Xylem dysfunction in *Quercus* : vessel sizes, tyloses, cavitation and seasonal changes in embolism. *Tree Physiology* 6: 393-407.
- Cochard H, Bréda N, Granier A & Aussenac G. 1992. Vulnerability to air embolism of three european oak species (*Quercus petraea* (Matt) Liebl, *Q. pubescens* Willd, *Q. robur* L). *Annales des Sciences Forestières* 49 : 225-233.
- Cochard H & Granier A. 1999. Fonctionnement hydraulique des arbres forestiers. *Revue Forestière Française* 51 : 121-134.
- Cochet J. 1958. Contribution à l'étude d'une sylviculture du chêne de qualité. *Revue Forestière Française* 5 : 313-326.
- Colin-Belgrand M, Dreyer E & Biron P. 1991. Sensivity of seedlings from different oak species to waterlogging: effects on root growth and mineral nutrition. *Annales des Sciences Forestières* 48 : 193-204.
- Cook ER, Johnson AH & Blasing TJ. 1987. Forest decline : modeling the effects of climate in tree rings. *Tree Physiology* 3 : 27-40.
- Cruziat P & Tyree M. 1990. La montée de sève dans les arbres. *La Recherche* 220 :406-414.
- Cruziat P. 1997. Les relations plante-eau, de la cellule à la plante entière. L'eau dans l'espace rural INRA Editions Paris : 11-40.
- Cruziat P, Cochard H & Ameglio T. 2002. Hydraulic architecture of trees: main concept. *Annales des Sciences Forestières* 59 : 723-752.
- Cufar K, Grabner M, Morgos A, Del Castillo EM, Merela M & De Luis M. 2014. Common climatic signals affecting oak tree-ring growth in SE Central Europe. *Trees* 28: 1267-1277.
- Daudet FA, Améglio T, Cochard H, Achilla O & Lacoïnte A. 2004. Experimental analysis of the role of water and carbon in tree stem diameter variations. *Journal of Experimental Botany* volume 56 N°409 : 135-144.
- Delaporte A. 2015. *Vers une compréhension fonctionnelle des dépérissements forestiers : étude du cas du hêtre (Fagus sylvatica L.) en forêt de Fontainebleau*. Thèse de doctorat Université Paris Sud. 172 pages.
- Delatour C. 1983. Les dépérissements de chênes en Europe. *Revue Forestière Française* 4 : 265-282.
- Delatour C. 1990. Dépérissement des chênes et pathogènes. *Revue Forestière Française* 2 : 182-185.
- De Paul MA & Bailly M. 2005. La compaction des sols forestiers. Définition et principes du phénomène. *Forêt Wallone* 76: 39-47.
- Dequé M. 2007. Frequency of precipitation and temperature extremes over France in a anthropogenic scenario. Model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change* 54: 16-26.

- Deret-Varcin E. 1983. Etude comparative de la qualité du bois de trois types de chênes (rouvre, pedunculés et intermédiaires), en forêt de Morimond. *Annales des Sciences Forestières* 40 : 373-398.
- Desprez-Loustau ML, Marcais B, Nageleisen LM, Piou D & Vannini A. 2006. Interactive effects of drought and pathogens in forest trees. *Annales des Sciences Forestières* 63: 597-612.
- Douzon G. 2006. Le point sur les dépérissements de chênes pedunculés en forêt de Vierzon. *Département de Santé des Forêts* 4 pages.
- Drenou C, Bouvier M & Lemaire J. 2011. La méthode de diagnostic ARCHI. Application aux chênes pedunculés dépérissant. *Forêt Entreprise* 200 : 4-15.
- Duchaffour P. 2004. *Introduction à la science du sol ; sol, végétation, environnement*. Paris Dunod. 331 pages.
- Dumas Y. 2002. Que savons-nous de la fougère aigle. *Revue Forestière Française* 54 (4) : 357-374.
- Dupouey JL. 1983. Analyse multivariable de quelques critères morphologiques de population de chênes (*Quercus robur* L et *Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) du Hurepoix. *Annales des Sciences Forestières* 40 : 265-282.
- Dupouey JL & Le Boulu H. 1989. Discrimination morphologique des glands de chêne sessile (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl) et pedunculé (*Quercus robur* L). *Annales des Sciences Forestières* 46 : 187-194.
- Dupouey JL & Badeau V. 1993. Morphological variability of oaks (*Quercus robur* L, *Quercus petraea* (Matt.) Liebl, *Quercus pubescens* Willd) in northeastern France: preliminary results. *Annales des Sciences Forestières* 50 supplément 1: 35s-40s.
- Durand P, Gelpe J, Lemoine B, Riom J & Timbal J. 1983. Le dépérissement du chêne pedunculé dans les Pyrénées atlantiques. *Revue Forestière Française* 5: 357-368.
- Fonti P & Garcia-Gonzalez I. 2008. Earlywood vessel size of oaks as a potential proxy for spring precipitation in mesic sites. *Journal of Biogeography* 35 (12): 2249-2257.
- Gao, X., & Giorgi, F. 2008. Increased aridity in the Mediterranean region under greenhouse gas forcing estimated from high resolution simulations with a regional climate model. *Global and Planetary Change*, 62(3): 195-209.
- Giorgi, F., & Lionello, P. 2008. Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63(2) : 90-104.
- Garrec JP. 2000. Changement de concentration atmosphérique des gaz à effet de serre. *Revue Forestière Française Spécial Changements Climatiques* : 15-20.
- Gérard B. 2008. *Recherche de marqueurs physiologiques de tolérance à l'ennoyage chez le chêne pedunculé (Quercus robur L) et chez le chêne sessile (Q.petraea [Matt.] Liebl.)*. Thèse de Doctorat Université de Franche-Comté. 233 pages.
- Germon JC, CY. 1999. La dénitrification dans les sols : régulation de son fonctionnement et application à la dépollution. *Courrier de l'Environnement INRA* 38 : 67-74.
- Gobin R, Balandier P, Korboulewski N, Dumas Y & Seigner V. 2015. Une strate herbacée monopoliste : quelle concurrence vis-à-vis de l'eau pour les peuplements adultes ? *Rendez Vous Technique ONF* 48-49 : 17-22.

- González-González, B. D., Rozas, V., & García-González, I. 2014. Earlywood vessels of the sub-Mediterranean oak *Quercus pyrenaica* have greater plasticity and sensitivity than those of the temperate *Q. petraea* at the Atlantic–Mediterranean boundary. *Trees*, 28(1) : 237-252.
- Grandjean G & Sigaud P. 1987. Contribution à la taxonomie et à l'écologie des chênes du Berry. *Annales des Sciences Forestières* 44 : 35-66.
- Granier A, Breda N, Biron P & Vilette S. 1999. A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological modelling* 116: 269-283.
- Gricar J, De Luis M, Hafner P & Levanic P. 2013. Anatomical characteristics and hydrologic signals in tree-ring of oaks (*Quercus robur* L.) *Trees* 27(6): 1669-1680.
- Grosdidier M. 2014. *Modélisation de la croissance saisonnière du chêne et du hêtre*. Master Fage Université de Lorraine. 24 pages.
- Guehl JM, Picon C, Vivin P, Cochard H & Aussenac G. 1999. Forêts et augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂ : effets bénéfiques ou adverses ? *Revue Forestière Française* 2 : 254-265
- Guillaumin JJ, Bernard C, Delatour C & Belgrand M. 1983. Le dépérissement du chêne à Tronçais : pathologie racinaire. *Revue Forestière Française* 6 : 415-424.
- Guillaumin JJ, Bernard C, Delatour C & Belgrand M. 1985. Contribution à l'étude du dépérissement du chêne : pathologie racinaire en forêt de Tronçais. *Annales des Sciences Forestières* 42 : 1-22.
- Hallaire M. 1964. Potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime de dessèchement. *INRA*: 27-62.
- Higgs KH & Wood V. 1995. Drought susceptibility and xylem dysfunction in seedling of four European oak species. *Annales des Sciences Forestières* 52: 507-513.
- Hinckley TM, Teskey RO, Duhme F & Richter H. 1981. Temperate hardwood forests. *Water deficits and plant growth* 6: 153-208.
- Hinckley TM & Lassoie JP. 1981. Radial growth in conifers and deciduous trees a comparison. *Mitteilungen-Vienna, Forstliche, Bundesversuchanstalt*.
- Hy FC. 1895. Sur quelques chênes hybrides observés aux environs d'Angers. *Bulletin de la Société Botanique Française* : 552-560.
- IGN 2010. La forêt française : Les résultats de la région Auvergne. www.ifn.fr.
- Inventaire Forestier National 2014. www.ifn.fr.
- Joslin JD, Wolfe MH & Hanson PJ. 2000. Effects of altered water regime on forest root system. *New Phytologist* 147 : 117-129.
- Kremer A & Petit RJ. 2001. L'épopée des chênes européens. *Dossier de l'Environnement de l'INRA* 21 : 133-138.
- Kremer A, Petit RJ, & Ducouso A. 2002. Biologie évolutive et diversité génétiques des chênes sessile et pédonculé. *Revue Forestière Française* 2 : 111-130.
- Kremer A, Dupouey J, Deans DJ, Cottrell J, Csaikl U, Finkeldey R, EspinelS, Jensen J, Kleinschmit J, Van Dam B, Ducouso A, Forrest I, de Heredia UL, Lowe AJ, Tutkova M, Munro RC, Steinhoff S & Badeau V. 2002. Leaf morphological differentiation between

Quercus robur and *Quercus petraea* is stable accros western European mixed oak stands. *Annales des Sciences Forestières* 59 : 777-787.

Lacointe A, Sauter JJ, Ameglio T, Harms U, Pellicier V & Frossard JJ. 1995. Carbohydrate and protein reserves in trees. Eurosilva. Contribution to Forest Tree Physiology. Edition INRA Paris: 273-296.

Lafferty KD. 2009. The ecology of climate change and infection diseases. *Ecology* 90 : 888-900.

Lamure M. 2007. *Gestion des chênaies privées de Sologne Bourbonnaise et préservation de l'avifaune*. Rapport de fin d'étude AgroParisTech 68 pages.

Landmann G. 1994. Concepts, définitions et caractéristiques générales des dépérissements forestiers. *Revue Forestière Française* 5 : 405-415.

Landmann G, Breda N, Houllier F, Dreyer E & Flot JL. 2003. Sècheresse et canicule de l'été 2003. Quelles conséquences pour la forêt française. *Revue Forestière Française* 4 : 299-308.

Leblanc CD & Stahler DW. 2015. Radial growth responses of four oaks species to climate in eastern and central America. *Canadian Journal of Forest Research* 45: 1-12.

Lebourgeois F, Granier A & Breda N. 2001. Une analyse des changements climatiques régionaux en France entre 1956 et 1997. Réflexion en terme de conséquences pour les écosystèmes forestiers. *Annales des Sciences Forestières* 58 : 733-754.

Lebourgeois F & Jabiol B. 2002. Enracinements comparés du chêne sessile, chêne pédonculé et du hêtre. Réflexion sur l'autécologie des essences. *Revue Forestière Française* 1 : 17-42.

Lebourgeois F, Cousseau G & Ducos Y. 2004. Climate-tree-growth relationship of *Quercus petraea* Mill. Stand in the Forest of Bercé ("Futaie des Clos", Sarthe, France). *Annales des Sciences Forestières* 61(4) : 361-371.

Lebourgeois F & Piedallu C. 2005. Appréhender le niveau de sècheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière à partir d'indices bioclimatiques. *Revue Forestière Française* 4 : 331-356.

Lebourgeois F. 2006. Sensibilité des chênes sessile et pédonculé dans le réseau RENECOFOR. Comparaison avec le hêtre. *Revue Forestière Française* 1 : 29-44.

Lebourgeois F, Spicher F & Lefèvre Y. 2008. Relation croissance du chêne pédonculé et climat sur deux types de sol à nappe temporaire en Lorraine (rédoxisol acide et pélosol différencié). *Revue Forestière Française* 4 : 411-424.

Lebourgeois F, Pierrat, Perez, Piedallu, Cecchini & Ulrich. 2010. Changements des dates de débourrement et de jaunissement des chênaies et des hêtraies françaises au cours du XXI^e siècle. *Revue Forestière Française* 6 : 607-624.

Lefèvre Y, Lebourgeois F & Breda N. 2006. Comportement des essences forestières sur sol à nappe temporaire. *Revue Forestière Française* 4 : 295-304.

Le Griel A. 1980. Age et principales étapes du dépôt des Sables et Argiles du Bourbonnais. *Revue de Géographie dynamique et de géographie physique* 24 : 425-433.

Lemaire J, Lacouture Y, Soleau M, Weben C, Mounier M & Guyon A. 2010. Les chênaies atlantiques face aux changements climatiques globaux : comprendre et agir. *Forêt Entreprise* 191 : 50-53.

Lemaire J & Maréchal N. 2011. Les chênaies atlantiques face aux changements climatiques globaux : comprendre et agir. *Forêt Entreprise* 198 : 48-50.

- Lemaire J. 2011. L'autécologie du chêne pédonculé est mieux cernée. *Forêt Entreprise* 201 : 9-12.
- Lemaire J. 2015. Bioclimsol. *Forêt Entreprise*. Numéro 2018.
- Lévy G, Delatour C & Becker M. 1994. Le dépérissement du chêne des années 1980 dans le Centre de la France point de départ d'une meilleure compréhension de l'équilibre et de la productivité de la chênaie. *Revue Forestière Française* 5 : 495-503.
- Lévy G, Lefevre Y, Becker M, Frochot H, Picard JF & Wagner PA. 1999. Les excès d'eau. Influence sur la croissance des chênes. *Revue Forestière Française* 2 : 151-161.
- Lévy G & Lefevre Y. 2001. *La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire*. ENGREF Nancy. 223 pages.
- Lucot E & Bruckert S. 1992. Organisation du système racinaire du chêne pédonculé (*Quercus robur*) développé en conditions édaphiques non contraignantes (sol brun lessivé colluvial). *Annales des Sciences Forestières* 49 : 465-479.
- Lucot E, BP & Bruckert S. 1995. Influence de l'humidité du sol et de la distribution des racines sur le potentiel hydrique du xylème dans des peuplements de chênes (*Quercus* sp) de basse altitude. *Annales des Sciences Forestières* 52 : 173-182.
- Manion PD. 1981. *Tree disease concepts*. Prentice-Hall, Inc.
- Marçais B, Bouhot-Delduc L & Le Tacon F. 2000. Effets possibles des changements globaux sur les micro-organismes symbiotiques et pathogènes et les insectes ravageurs des forêts. *Revue Forestière Française Spécial Changements Climatiques* : 99-118.
- Mastrandrea, M.D., C.B. Field, T.F. Stocker, O. Edenhofer, K.L. Ebi, D.J. Frame, H. Held, E. Kriegler, K.J. Mach, P.R. Matschoss, G.-K. Plattner, G.W. Yohe & F.W. Zwiers. 2010. Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties. Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), Genève, Suisse, 27 pages.
- Mellisho C, Ngao J, Nebout JP, Ameglio T & Balandier P. 2016. Root growth in a soil submitted to temporary waterlogging and potential role in oak (*Quercus petraea* and *Quercus robur*) decline. *Plant and soil*. 21 pages Non publié.
- Mérian P, Bontemps JD, Bergès L & Lebourgeois F. 2011. Spatial variation and temporal instability in climate growth relationship of sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) under temperate conditions. *Plant Ecology* 212 (11): 1855-1871.
- Merlin M, Perot T, Perret S, Korboulewski N & Vallet P. 2015. Effects of stand composition and tree size on resistance and resilience to drought in sessile oak and Scots pine. *Forest Ecology and Management* 265: 161-171.
- Michelot A, Breda N, Damesin C & Dufrene E. 2012. Differing growth responses to climatic variations and soil water deficits of *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* in a temperate forest. *Forest Ecology and Management* 265 : 161-171.
- Moisselin J, Schneider M, Canellas C & Mestre O. 2002. Les changements climatiques en France au XX^e siècle. *La Météorologie* 38 : 45-46.
- Moisselin J & Dubuisson B. 2006. Evolution des valeurs extrêmes de température et de précipitations au cours du XX^e siècle en France. *La Météorologie* 54 : 16-26.
- Morin X, Ameglio T, Ahas R, Kurz-Besson C, Lanta V, Lebourgeois F, Miglietta F & Chuine I. 2007. Variation in cold hardiness and carbohydrate concentration from dormancy induction to bud burst among provenances of three European oak species. *Tree Physiology* 27: 817-825.

- Nabeshima E, Kubo T, Yasura K, Hiura T & Funada R. 2015. Changes in radial growth of earlywood in *Quercus crispula* between 1970 and 2014 reflect climate change. *Trees* 29 : 1273-1281.
- Nageleisen LM. 1994. Dépérissement actuel des chênes. *Revue Forestière Française* 5 : 504-511.
- Nageleisen LM. 2012. Guide de notation de l'aspect du houppier des arbres feuillus. Dans un contexte de dépérissement (protocole DEPEFEU). *Département de Santé des Forêts* 18 pages.
- Nageleisen LM. 2013. Note synthétique DEPEFEU. *Département de Santé des Forêts* 8 pages.
- Nebout JP & Macaire A. 1994. *Guide du sylviculteur du Bocage Bourbonnais*. CRPF-CETEF-ONF 76 pages
- Nepveu G. 1990. Les facteurs influençant la qualité du bois de chêne (chêne rouvre et chêne pédonculé). *Revue Forestière Française* 2 : 128-133.
- Ningre F & Doussot R. 1993. La ressource forestière française en chênes rouvres et pédonculé. Analyse et explication historique. *Annales des Sciences Forestières* 50 : 593-606.
- Nixon KC. 1993. Infrageneric classification of *Quercus* (Fagaceae) and typification of sectional names. *Annales des Sciences Forestière* 50 Suppl 1 : 25s-34s.
- Noyer E. 2012. *Réponses morphologiques et physiologiques de Quercus robur et Quercus petraea à la sécheresse précédée ou non d'une période d'ennoyage*. Master 1 Biologie et Environnement, Université Blaise Pascal Clermont II. 15 pages.
- ONF - Direction technique et commerciale. — *L'Eau et la forêt*. Synthèse bibliographique réalisée par Christine Fort. — Bulletin technique de l'ONF n° 37. 1999. 240 pages.
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., ... & Dubash, N. K. *Climate Change 2014 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC Geneva, Switzerland, 151 pages.
- Pearson PN & Palmer MR. 2000. Atmospheric carbon dioxide concentrations over the past 60 million years. *Nature* 406 : 695-699.
- Petroff A. 2014. *Dépérissement du chêne en Forêt Domaniale de Tronçais (03). Mise en place d'un protocole d'évaluation et premier inventaire*. Rapport BTSA Gestion Forestière. Ecole Forestière de Meymac 22 pages.
- Picard O. 2015. *L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change*. La Documentation Française. 157 pages.
- Polge H & Keller R. 1973. Qualité du bois et largeur d'accroissements en forêt de Tronçais. *Annales des Sciences Forestières* 30 : 91-125.
- Ponton S. 2002. *Analyse de l'efficience d'utilisation de l'eau des chênes pédonculé (Quercus robur L.) et sessile (Quercus petraea (Matt.) Liebl.). Relation avec les dépérissements des chênaies*. Thèse de doctorat Université Henri Poincaré Nancy 1. 152 pages.
- Ponton S, Dupouey JL & Dreyer E. 2004. Leaf morphology as species indicator in seedling of *Quercus robur* (Matt.) Liebl. And *Quercus petraea* L: modulation by irradiance and growth flush. *Annales des Sciences Forestières* 61 : 73-80.
- Rameau JC, Mansion D & Dumé G. 1989. *Flore Forestière Française. Guide Ecologique Illustré. Tome 1 Plaines et collines*. Institut pour le Développement Forestier. 1785 pages.

- Rameau JC. 1990. Comportement dynamique du chêne pédonculé et du chêne sessile dans la succession forestière. *Revue Forestière Française* 2 : 155-164.
- Riou-Nivert P. 2005. Changements climatiques et sylviculture *Forêt Entreprise* 162 : 49-53.
- Roman-Amat B. 2007. *Préparer les forêts au changement climatique*. Rapport à MM les Ministres de l'Agriculture et de la Pêche et de l'Ecologie et du Développement et de l'Aménagement Durable. Décembre. 125 pages.
- Rosa J, Riou-Nivert P & Paillassa E. 2011. *Guide de l'expérimentation forestière. Principe de base. Prise en compte des changements climatiques*. CNPF/IDF 224 pages.
- Rozas V & Garcia-Gonzalez I. 2012. Too wet for oaks? Inter-tree competition and recent persistent predispose oaks to rainfall induced dieback in atlantic rainy forest. *Global and Planetary Change* 94-95: 62-71.
- Rozas V. 2015. Individual based-approach as a useful tool to disentangle the relative importance of tree age, size and inter-competition in dendroclimatic studies. *IForest-Biogeosciences and Forestry* 8: 187-194.
- Rushton BS. 1993. Natural hybridization within the genus *Quercus* L. *Annales des Sciences Forestières* 50s: 73s-90s.
- Rust S & Roloff A. 2004. Acclimatation of crown structure to drought in *Quercus robur* L intra and inter-annual variation of abscission and traits of shed twigs. *Basic and applied ecology* 5 : 283-291.
- Saugier B. 2002. Comment les forêts contrôlent-elles le cycle de l'eau ? *La Houille Blanche* 3 : 13-17.
- Schéma Régional de Gestion Sylvicole d'Auvergne. 2005. 126 pages.
- Sevrin E. 1997. *Les chênes sessile et pédonculé*. Institut pour le Développement Forestier. 96 pages.
- Sigaud P. 1986. « Ne parlons plus du chêne mais des chênes ». *Revue Forestière Française* 4 : 376-384.
- Thomas FM & Hartmann G. 1998. Tree rooting pattern and soil water relation of healthy and damaged stands of mature oaks (*Quercus robur* L. and *Quercus petraea* [Matt.] Liebl.). *Plant and soil* 203: 145-158.
- Thomas FM, Blank R & Hartmann G. 2002. Abiotic and biotic factors and their interactions as causes of oak decline in Central Europe. *Forest Pathology* 32: 277-307.
- Timbal J, Gelpe J, Garbaye J & Courrier G. 1990. Etude préliminaire sur l'effet dépressif de la molinie (*Molinia caerulea*) sur la croissance et l'état mycorhizien de semis de chêne rouge (*Quercus rubra*). *Annales des Sciences Forestières* 47: 643-649.
- Timbal J & Aussenac G. 1996. An overview of ecology and silviculture of indigenous oaks in France. *Annales des sciences forestières* 53 : 649-661.
- Toïgo M, Vallet P, Tuilleras V, Lebourgeois F, Rozenberg P, Perret S, Combard B & Perot T. 2015. Species mixture increases the effects of drought on tree ring density, but not on ring width, in *Quercus petraea*-*pinus sylvestris* stands. *Forest Ecology and Management* 345: 73-82.
- Trouvé R, Bontemps JD, Collet C, Seynave I & Lebourgeois F. 2016. Radial growth resilience of sessile oak after drought is affected by site water status, stand density, and social status. *Trees*: 1-13.

Van der Werf GW, Saas-Klassen U GW & Mohren GMJ. 2007. The impact of the 2003 summer drought on intra-annual growth pattern of beech (*Fagus sylvatica* L.) and oak (*Quercus robur* L.) on a dry site in Netherlands. *Dendrochronologia* 25 : 103-112.

Vennetier M. 2012. Changement climatique et dépérissements forestiers : causes et conséquences. *CNRS* : 50-60.

VetAgroSup. 2011. Description pédologique des trois sites forestiers du département de l'Allier dans le cadre de la thèse de Fanette Chevallier. 35 pages.

Wargo. 1996. Consequences of environmental stress on oak: predisposition to pathogens. *Annales des Sciences Forestières* 53 : 359-368.

Zapater M, Barlet C, Lefèvre Y, Granier A & Breda N. 2008. Une pompe biologique performante : contribution des racines fines d'arbres forestiers dans le dessèchement des couches argileuses de sol lors d'épisodes de sécheresse. Symposium International Sécheresse et Construction. LCPC Editions Paris : 103-111.