

Le chêne rouge d'Amérique (*Quercus rubra* L.) en Languedoc-Roussillon : bilan des introductions passées et perspectives



Dominante d'approfondissement Gestion Forestière

Présenté par : JOURDE Maxime

Stage effectué du 06/03/2017 au 30/08/2017
Au centre régional de la propriété forestière
378 rue de la Galéra
34090 MONTPELLIER

Maître de stage : LAGACHERIE Michèle
Enseignant référent : LACOMBE Eric
Soutenu le 26/09/2017

Année 2016/2017

Illustration en première de couverture :

Peuplement de chênes rouges d'Amérique.

Groupement Forestier de Roquedur (30)

Source : Maxime JOURDE

**Le chêne rouge d'Amérique (*Quercus rubra* L.) en
Languedoc-Roussillon : bilan des introductions
passées et perspectives**

**Dominante d'approfondissement
Gestion Forestière**

Présenté par : JOURDE Maxime

Stage effectué du 06/03/2017 au 30/08/2017
Au centre régional de la propriété forestière
378 rue de la Galéra
34090 MONTPELLIER

Maître de stage : LAGACHERIE Michèle
Enseignant référent : LACOMBE Eric
Soutenu le 26/09/2017

Année 2016/2017

Fiche signalétique du mémoire de l'élève AgroParisTech

Formation des ingénieurs d'AgroParisTech-Nancy

TITRE :

Le chêne rouge d'Amérique (*Quercus rubra* L.) en Languedoc-Roussillon : bilan des introductions passées et perspectives

AUTEUR :

Maxime JOURDE

Mots clés :

Chêne rouge d'Amérique, Languedoc-Roussillon, Fertilité, Arbre de décision

Collation : 1 volume ; 76 pages ; 11 figures ; 10 annexes ; bibliographie.

Résumé français :

Depuis quelques années, les variations du climat engendrent des dépérissements importants sur plusieurs peuplements forestiers en ex-région Languedoc-Roussillon. Ce changement climatique inquiète les propriétaires et gestionnaires forestiers qui s'interrogent sur la nature des essences à utiliser en reboisement afin de conserver une forêt pérenne. Une adaptation rapide des pratiques sylvicoles est indispensable et les prises de décisions sont urgentes. Dans cette optique, le centre national de la propriété forestière (CNPF) a lancé un recensement des essences « atypiques » présentes sur le territoire et souhaite, avec ses partenaires, effectuer un bilan de leur comportement dans ces introductions. L'objectif est d'identifier celles qui pourraient constituer les essences à privilégier, tester et développer sur des stations où les essences en place sont aujourd'hui menacées par l'évolution du climat.

Pour cette étude, le CNPF a décidé d'engager sa prospection sur une essence encore peu répandue dans la région, mais qui connaît de bons résultats dans d'autres territoires français : le chêne rouge d'Amérique (*Quercus rubra* L.). Cet arbre peut-il représenter une essence d'avenir en Languedoc-Roussillon ?

Le travail présenté dans ce rapport, analyse le comportement de l'essence sur ses sites d'introduction en Languedoc-Roussillon et soulève des hypothèses quant à son comportement dans un climat futur. Les principaux résultats sont la détermination des conditions écologiques et climatiques les plus propices à l'essence sur ces sites, les effets des facteurs compensatoires au climat sur la croissance en hauteur et la création d'un arbre d'aide à la décision issu de ces résultats, destiné aux gestionnaires forestiers pour arbitrer sur le choix du chêne rouge en reboisement.

CADRE DU TRAVAIL

ORGANISME PILOTE OU CONTRACTANT :

Centre Régional de la Propriété Forestière – Montpellier

Nom du responsable : Michèle LAGACHERIE

Fonction : Ingénieure CNPF Occitanie

Nom du correspondant AgroParisTech : Eric LACOMBE

Option

D. d'approfondissement

CEI

Stage fin d'études

Date de remise : 12/09/2017

Autre

Résumé

Depuis quelques années, les variations du climat engendrent des dépérissements importants sur plusieurs peuplements forestiers en ex-région Languedoc-Roussillon. Ce changement climatique inquiète les propriétaires et gestionnaires forestiers qui s'interrogent sur la nature des essences à utiliser en reboisement afin de conserver une forêt pérenne. Une adaptation rapide des pratiques sylvicoles est indispensable et les prises de décisions sont urgentes. Dans cette optique, le centre national de la propriété forestière (CNPFF) a lancé un recensement des essences « atypiques » présentes sur le territoire et souhaite, avec ses partenaires, effectuer un bilan de leur comportement dans ces introductions. L'objectif est d'identifier celles qui pourraient constituer les essences à privilégier, tester et développer sur des stations où les essences en place sont aujourd'hui menacées par l'évolution du climat.

Pour cette étude, le CNPFF a décidé d'engager sa prospection sur une essence encore peu répandue dans la région, mais qui connaît de bons résultats dans d'autres territoires français : le chêne rouge d'Amérique (*Quercus rubra* L.). Cet arbre peut-il représenter une essence d'avenir en Languedoc-Roussillon ?

Le travail présenté dans ce rapport, analyse le comportement de l'essence sur ses sites d'introduction en Languedoc-Roussillon et soulève des hypothèses quant à son comportement dans un climat futur. Les principaux résultats sont la détermination des conditions écologiques et climatiques les plus propices à l'essence sur ces sites, les effets des facteurs compensatoires au climat sur la croissance en hauteur et la création d'un arbre d'aide à la décision issu de ces résultats, destiné aux gestionnaires forestiers pour arbitrer sur le choix du chêne rouge en reboisement.

Abstract

Over the past few years, climate variations have led to an important decline in many forests of the region formerly called Languedoc-Roussillon. This climate change is a source of deep concern for forest owners and forest managers who need to think about which tree species to use in order to ensure the forest's sustainability. Silvicultural practices need to change and adapt urgently.

To do so, the CNPFF have started a census of a rarer tree species located on the territory in order to report on the tree's adaptation after planting. The aim is to identify the species that could be tested and used in areas where trees are today threatened by climate change. For this study, the CNPFF decided to include in its survey on species which is uncommon in the area yet, but whose properties in other French regions are encouraging: the Northern red oak (*Quercus rubra* L.). Is this species an interesting prospect in Languedoc-Roussillon?

This report is about the way the red oak has reacted in the areas where it was introduced and brings up hypothesis about its adaptation to the future climate change. The main results of this work deal with the establishment of the ecological and climate situations which are more appropriate to red oaks, the effects of compensatory factors on tree growth, and finally, the construction of a model which aims at helping forest managers to decide whether they should use the red oak for reforestation.

Engagement de non plagiat

① Principes

- Le plagiat se définit comme l'action d'un individu qui présente comme sien ce qu'il a pris à autrui.
- Le plagiat de tout ou parties de documents existants constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée
- Le plagiat concerne entre autres : des phrases, une partie d'un document, des données, des tableaux, des graphiques, des images et illustrations.
- Le plagiat se situe plus particulièrement à deux niveaux : Ne pas citer la provenance du texte que l'on utilise, ce qui revient à le faire passer pour sien de manière passive. Recopier quasi intégralement un texte ou une partie de texte, sans véritable contribution personnelle, même si la source est citée.

② Consignes

- Il est rappelé que la rédaction fait partie du travail de création d'un rapport ou d'un mémoire, en conséquence lorsque l'auteur s'appuie sur un document existant, il ne doit pas recopier les parties l'intéressant mais il doit les synthétiser, les rédiger à sa façon dans son propre texte.
- Vous devez systématiquement et correctement citer les sources des textes, parties de textes, images et autres informations reprises sur d'autres documents, trouvés sur quelque support que ce soit, papier ou numérique en particulier sur internet.
- Vous êtes autorisés à reprendre d'un autre document de très courts passages in extenso, mais à la stricte condition de les faire figurer entièrement entre guillemets et bien sur d'en citer la source.

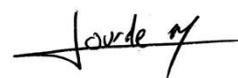
③ **Sanction** : En cas de manquement à ces consignes, la DEVE/le correcteur se réservent le droit d'exiger la réécriture du document sans préjuger d'éventuelles sanctions disciplinaires.

④ Engagement :

Je soussigné Maxime JOURDE
Reconnait avoir lu et m'engage à respecter les consignes de non plagiat

A Montpellier le 30 août 2017

Signature :



Remerciements

A Michèle LAGACHERIE, ingénieure CRPF, qui m'a permis de réaliser ce stage de fin d'études. Elle a su construire et organiser ce travail qui m'a permis de gérer les différentes phases d'une étude, de la mise en place du protocole à l'analyse de données, en passant par la phase de terrain. Merci pour la confiance et l'autonomie qu'elle m'a accordées. Je la remercie enfin pour sa disponibilité et ses conseils tout au long de l'étude.

A l'équipe pédagogique d'AgroParisTech-Nancy pour avoir accepté mon transfert dans cette filière qui a pleinement répondu à mes aspirations intellectuelles et professionnelles.

A Eric LACOMBE, enseignant-chercheur à AgroParisTech Nancy, pour avoir accepté d'encadrer ce stage, pour m'avoir aidé à faire émerger les problématiques de cette étude et m'avoir orienté vers des personnes clés pour mener à bien ce travail.

A Christine BOYER, Jean-Christophe CHABALIER et Jean-Michel d'ORAZIO, respectivement techniciens CRPF du Gard, de l'Aude et de l'Hérault, pour les connaissances de terrain qu'ils m'ont fournies et le temps qu'ils m'ont accordé pour répondre à mes interrogations souvent nombreuses.

A Johann HOUSSET et Carole FONTAINE, ingénieurs au Parc régional du Haut Languedoc, pour leurs conseils avisés et leur aide précieuse lors de ma phase de terrain dans l'Hérault.

A Florian PRUDHOMME, technicien CRPF, pour son aide cruciale lors de la relecture de tous les PSG, son aide sur le terrain et les sorties sportives que nous avons pu partager.

A Jean LEMAIRE, ingénieur IDF, qui a pris le temps de me conseiller et de m'apporter sa technicité pour l'analyse.

A Christian PIEDALLU et Vincent PEREZ, personnels au LERFoB, d'avoir pris le temps de répondre à mes questions, aiguiller ma phase d'analyse et de m'avoir transmis les données SIG nécessaires à mon analyse.

A tout le personnel du CRPF Montpellier qui a animé cette période de stage et a toujours été présent pour m'aider dans mes démarches. Je vous remercie Alban, Anne, Benoit, Céline, Céline, Elise, Isabelle, Jean-Marc, Olivier, et Patricia.

Table des matières

Introduction	7
I/ Contexte de l'étude.....	7
II/ Questions posées par le commanditaire	8
III/ Démarches adoptées pour l'étude	9
PARTIE I : Proposition d'une méthodologie à travers l'exemple du chêne rouge d'Amérique....	10
I/ Le Languedoc-Roussillon, une région inégalement boisée	10
II/ Etat de l'art	12
II.1/ Positionnement dans la classification systématique	12
II.2/ Caractères biologiques	12
II.3/ Aire de répartition	13
II.3.1/ Dans son aire naturelle	13
II.3.2/ Son introduction en France	13
II.3.3/ Son introduction dans le Languedoc-Roussillon.....	13
II.4/ Autécologie	14
II.4.1/ Les facteurs climatiques	14
II.4.2/ Les facteurs édaphiques et hydriques.....	14
II.5/ Bilan des études dans d'autres régions Françaises	15
III/ Matériels et méthodes	16
III.1/ Provenance des données	16
III.2/ Nouvel échantillonnage et complément de la base de données	18
III.3/ Mesures effectuées sur le terrain.....	18
III.3.1/ Mesures dendrométriques effectuées	19
III.3.2/ Acquisition des données pédologiques et géologiques.....	20
III.3.3/ Détermination des pathologies :	20
III.3.4/ Jugement du dépérissement :	20
III.4/ Les modèles climatiques exploités.....	21
III.5/ Validation des informations stationnelles prises sur le terrain	21
III.6/ Schéma récapitulatif de la démarche globale.....	23
III.7/ Création de classes de fertilité	23
III.8/ Les analyses statistiques sollicitées.....	24
PARTIE II : Résultats sur le chêne rouge d'Amérique	25
I/ Observations générales sur les sites étudiés	25
II/ Analyses statistiques et arbre de décision	29
II.1/ Création de l'arbre de décision.....	29
II.2/ Analyse complémentaire : Comment se positionnent les peuplements par rapport au module BioClimSol ?.....	34
III/ Discussions et perspectives	37
Conclusion.....	42
Références bibliographiques	44
Liste des contacts.....	47
Tables des annexes	50

Table des figures

Figure 1 : Taux de boisement dans le Languedoc-Roussillon	10
Figure 2 : Répartition de la forêt privée et de la forêt publique en Languedoc-Roussillon	11
Figure 3 : Exploitation du chêne rouge d'Amérique	11
Figure 4 : Aire naturelle de répartition du chêne rouge d'Amérique aux Etats-Unis	13
Figure 5 : Localisation des placettes de chênes rouges d'Amérique visitées dans le Languedoc-Roussillon	18
Figure 6 : Schéma récapitulatif de la démarche globale	23
Figure 7 : Représentation de la hauteur dominante en fonction de l'âge des placettes étudiées	26
Figure 8 : Arbre de décision présentant les valeurs seuils des variables explicatives de la fertilité pour le chêne rouge d'Amérique et définition des 4 types	30
Figure 9 : Localisation des placettes (régions IFN) en fonction des 4 types définis par l'arbre de décision	31
Figure 10 : Altitude en fonction des 4 types définis par l'arbre de décision	32
Figure 11 : Visuel du module boisement de l'outil BioClimSol	35

Table des tableaux

Tableau 1 : Bilan des études faites sur les conditions pédoclimatiques du chêne rouge dans d'autres régions françaises	15
Tableau 2 : Nombre et localisation des placettes issues des différentes études	17
Tableau 3 : Détermination de la microtopographie et du régime hydrique en fonction de la valeur du TPI	22
Tableau 4 : Principales variables climatiques analysées pour les types 2 et 3	33
Tableau 5 : Variables climatiques prises en compte dans le module boisement de l'outil BioClimSol et les valeurs seuils associées.	35
Tableau 6: Nombre de placettes par classe de vigilance selon l'outils BioClimSol	36

Table des annexes

- Annexe 1 : Localisation des placettes en chêne rouge dans le Languedoc-Roussillon
- Annexe 2 : Protocole de mesures sur le terrain
- Annexe 3 : Fiche de relevé de terrain pour l'étude du chêne rouge d'Amérique
- Annexe 4 : Notice d'utilisation de la fiche de relevé de terrain
- Annexe 5 : Descriptions des variables utilisées
- Annexe 6 : Courbes de croissance du chêne rouge et modélisation de la courbe limite des deux classes de fertilité.
- Annexe 7 : Principales pathologies mise en évidence sur le territoire d'étude
- Annexe 8 : Adaptation des essences au contexte méditerranéen, exemple d'un l'arboretum dans le Gard
- Annexe 9 : Principales essences utilisées en reboisement dans la propriété de Mme Bourrely
- Annexe 10 : Photographies des essences de l'arboretum

Sigles et acronymes

ACP : Analyse en composantes principales
AgroParisTech : Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (nom officiel)
AURELHY : Analyse utilisant le relief pour l'hydrométéorologie
BRGM : Bureau de recherches géologiques et minières
CBPS : Code des bonnes pratiques sylvicoles
CNPF : Centre national de la propriété forestière
CRPF : Centre régional de la propriété forestière
DDTM : Direction Départementale des Territoires et de la Mer
De : Déficit d'évaporation
DEPEUFEU : dépérissement des feuillus
DSF : Département de la santé des forêts
Engref : Ecole nationale du génie rural, des eaux et des forêts
ETP : évapotranspiration potentielle
ETR : évapotranspiration réelle
FFN : Fond forestier national
G : surface terrière du peuplement
GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GPS : global positioning system
H_o : Hauteur dominante
IDF : Institut pour le développement forestier
IFN : Inventaire forestier national
IGN : Institut géographique national
INRA : Institut national de la recherche agronomique
LERFoB : Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois
LISAH : Laboratoire d'Etude des Interactions entre Sol-Agrosystème- Hydrosystème
MNT : modèle numérique de terrain
N : densité des tiges (nombre tiges/hectare)
ONF : Office national des forêts
P : précipitations
pH : potentiel hydrogène
PSG : plan simple de gestion
RU : réserve utile
SAFRAN : Système d'analyse fournissant des renseignements atmosphérique à la neige
SIG : système d'information géographique
SRGS : schéma régional de gestion sylvicole
TPI : Topographic position index
UMR : unité mixte de recherche
USDA : United states department of Agriculture

Introduction

I/ Contexte de l'étude

L'ensemble de la classe scientifique s'accorde à dire que le climat de notre planète est en évolution notable. La courbe de température moyenne annuelle à la surface du globe en fonction du temps ne cesse de s'accroître. Aussi, les mesures effectuées dans des carottes glaciaires démontrent que l'augmentation de températures actuelles dépasse la simple variabilité naturelle. Dans son rapport de synthèse, le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) indique que le climat de la Terre deviendra plus instable, avec une augmentation de la fréquence, de l'intensité et de la durée des phénomènes climatiques extrêmes (sécheresses, tempêtes, tsunamis, etc.). Les différentes simulations effectuées par le DRIAS (portail internet de projections climatiques régionalisées par les climatologues de Météo-France) prédisent une hausse moyenne de 1,20° degrés d'ici 2050 et jusqu'à 4° degrés d'ici 2100 pour le pourtour méditerranéen.

La forêt, comme tout milieu naturel, est en première ligne sur la question du changement climatique. Partout en France, les forestiers observent des modifications immédiates sur les cycles de la végétation au fil des saisons. La sécheresse semble être le principal facteur causant la mort des individus. En effet, un taux de mortalité anormalement élevé a été mis en évidence suite à la sécheresse de 2003 et plus particulièrement sur les feuillus (Bréda et Badeau, 2008).

Ainsi, ce bouleversement sur les écosystèmes forestiers remet en cause les références des gestionnaires tant vis-à-vis de la gestion des peuplements en place que pour le choix des essences à installer pour les décennies futures. Ils doivent dès à présent adapter leurs pratiques pour limiter les risques de dépérissement et mettre en place de nouvelles stratégies en terme de choix d'essence pour les reboisements futurs. Les références techniques et recommandations antérieures nécessitent d'être repositionnées vis-à-vis des observations et études actuelles sur le dépérissement et les prévisions d'évolutions climatiques.

Sollicité pour les besoins de prises de décision rapides des propriétaires et gestionnaires forestiers, le CNPF¹ s'implique dans ces études au travers de plusieurs programmes conduits par le RMT AFORCE (REINFFORCE, NOMADE, etc.) et des projets Life tel que FORECCAST. En région Occitanie, le CRPF suit les dépérissements d'essences majeures et répertorie les essences de reboisement alternatives.

Le chêne rouge d'Amérique fait partie des feuillus précieux ayant connu une volonté de développement il y a 30 ans et pose aujourd'hui la question de son enjeu dans le contexte climatique actuel. Des essais d'introduction ont été réalisés dans plusieurs régions françaises et les premières conclusions sont encourageantes. La réaction de cette essence sous influence méditerranéenne mérite toutefois un regard spécifique, engagé dans ce travail sur les massifs du Languedoc.

Depuis la dernière guerre, il y a eu plus de 400.000 ha de plantations de chênes rouges en France (Ducousso & al., 2006). Aujourd'hui, subsistent environ 30.000 ha. Cette diminution drastique de surface boisée est due à plusieurs facteurs dont le principal est la connaissance incomplète de l'autécologie de l'essence. Ainsi, cet arbre a souvent été implanté sur tout type de terrain avec comme

¹ Le CNPF est un établissement public à caractère administratif, créé en 1963. Placé sous la tutelle du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, sa fonction consiste à assurer la gestion et la production des forêts privées. Afin de répondre à ses objectifs, le CNPF assure trois grandes missions : orienter la gestion sylvicoles des propriétaires forestiers, apporter des connaissances techniques lors de journée de formation et regrouper les différents acteurs du secteur forestier afin de faciliter la gestion des forêts, la vente des produits, la réalisation de travaux sylvicoles et l'amélioration des structures foncières. En 2017, les centres régionaux ont fusionné en un établissement unique national : le CNPF. Le contrat d'objectifs et de performance en cours énonce deux grands enjeux : la mobilisation de davantage de bois et l'adaptation des forêts au changement climatique. C'est dans ce contexte que ce travail a été entrepris.

préconçu que sa croissance rapide permettrait d'obtenir une production satisfaisante là où les essences autochtones avaient échoué. Ces échecs ont contribué à freiner son utilisation et c'est actuellement une essence très peu plantée. Dans le Languedoc-Roussillon, le chêne rouge d'Amérique est relativement peu présent en terme de peuplement, mais possède néanmoins de nombreux intérêts. Ils concernent sa qualité de production de bois d'œuvre, sa fonction paysagère et sa fonction environnementale. L'ensemble de ces atouts a justifié le choix de centrer cette étude sur ce feuillu précieux, peu répandu sous nos latitudes. Ils seront développés dans une partie ultérieure de ce travail.

Pour ces différentes raisons, le CRPF Languedoc-Roussillon a engagé en 2005 un projet de synthèse sur les introductions de chênes rouges dans sa région sans trouver les moyens de mener à bien cette étude jusqu'à son terme. Ce stage était donc l'opportunité de dégager les premières conclusions, avec la prise en compte d'un paramètre supplémentaire : le changement climatique. Il s'inscrit dans un questionnement global sur l'adaptation d'autres essences peu utilisées en reboisement sur ces mêmes massifs forestiers, et complète l'analyse en Occitanie avec l'étude réalisée en 2016 en ex-région Midi-Pyrénées.

II/ Questions posées par le commanditaire

L'objectif de cette étude est de déterminer les paramètres principaux qui conditionnent la réussite et l'intérêt de l'essence chêne rouge d'Amérique pour les reboisements forestiers de la région. Le travail s'appuie sur un ensemble de sites où l'essence a été introduite à partir de 1950, en analysant son comportement au regard des caractéristiques des stations. Il comprend également l'étude de plusieurs variables climatiques impactant potentiellement l'évolution de ces résultats.

L'étude devra notamment indiquer quels usages sont à escompter pour cette essence en fonction des conditions pédoclimatiques :

- Peut-il être un producteur de bois de qualité ?
- Doit-on privilégier pour lui une fonction d'accompagnement pour d'autres essences ?

Les hypothèses dégagées de ce travail permettront au CNPF d'orienter le choix des gestionnaires et propriétaires forestiers quant à l'installation ou non du chêne rouge d'Amérique.

Les missions confiées par le commanditaire sont multiples :

- Le premier enjeu est de valoriser un travail de prospection effectué en 2005 et 2006 sur le chêne rouge d'Amérique dans l'ex-région Languedoc-Roussillon. Cette étude mise en place par le CRPF à l'échelle nationale avait pour objectif de dresser un état des lieux des plantations de chênes rouges sur le territoire français et son adaptation régionale. Environ soixante-dix placettes temporaires ont ainsi été prospectées dans toute la région. Faute de temps et de financement, cette étude n'a pas été achevée et les données sont restées non exploitées jusqu'à ce jour.
- Pour valoriser ce travail, il est demandé de vérifier les informations contenues dans les archives, de les compléter si elles sont fragmentaires et de les enrichir avec des observations de terrain. Un enrichissement de la base de données est également attendu avec l'intégration de variables climatiques extraites de modèles existants.
- Suite à la conception d'une base de données complète, la mission est d'homogénéiser, de traiter ces informations et d'effectuer les analyses statistiques appropriées.
- La rédaction d'une note de synthèse des résultats ainsi obtenus est commandée, afin de pouvoir la diffuser auprès des équipes techniques et des gestionnaires forestiers.

III/ Démarches adoptées pour l'étude

Différentes phases se sont succédées pendant ce stage. Certaines d'entre elles ont été légèrement modifiées par rapport aux phases prévisionnelles afin de pouvoir approfondir des réflexions et des pistes qui se sont dessinées au fil de l'étude et qui semblaient pertinentes.

La phase initiale a été un travail de bibliographie. Ces recherches ont porté sur trois axes principaux : l'essence étudiée, l'adaptation des essences forestières au changement climatique et l'expérimentation scientifique en milieu forestier. Le chêne rouge d'Amérique n'est pas une essence que l'on rencontre fréquemment sur le territoire français, ni que l'on étudie lors de notre formation. Ce travail de documentation a donc été une étape cruciale permettant d'apprendre à découvrir l'arbre, son histoire, ses caractéristiques et ses besoins. Afin de mieux appréhender la problématique, il était aussi nécessaire de se renseigner sur des études menées dans d'autres régions de France, sous d'autres climats. Cette notion de climat étant indissociable du sujet de ce stage, un travail bibliographique a également été nécessaire afin de se renseigner sur les études conduites ou en cours sur l'adaptation des essences à la variation du climat.

Suite à cette étape de bibliographie, mon temps s'est consacré à la familiarisation avec le jeu de données de 2005-2006, fourni par le commanditaire. Après avoir analysé et ordonné les différentes variables, j'ai entrepris la géolocalisation sur logiciel SIG de chacune des placettes. Mais, très souvent, aucune indication n'était donnée sur l'emplacement précis de la placette. Dans ce cas de figure, une recherche dans le PSG (Plan simple de gestion) associé était nécessaire pour repérer le contour du peuplement. Ce travail m'a permis de créer une première couche vectorielle avec la localisation de l'ensemble des placettes de l'étude.

J'ai ensuite complété la table de données avec une expérimentation menée dans le Gard en 2016 et avec les placettes de références suivies par le CNPF. Une géolocalisation des peuplements m'a permis d'obtenir une seconde couche vectorielle actualisée avec l'emplacement des chênes rouges dans la zone d'étude.

Enfin, une phase de prospection sur le terrain a permis de compléter la base de données avec les placettes temporaires mesurées selon le protocole conçu pour cette étude.

La dernière phase a consisté à analyser les informations collectées afin de les confronter aux connaissances issues de la bibliographie dans le but de dégager des hypothèses adaptées au contexte régional.

PARTIE I : Proposition d'une méthodologie à travers l'exemple du chêne rouge d'Amérique

I/ Le Languedoc-Roussillon, une région inégalement boisée

La genèse de cette étude datant d'avant la mise en place des nouvelles régions administratives, le territoire d'étude de ce travail est circonscrit à l'ancienne région Languedoc-Roussillon.

La forêt couvre plus du tiers de la région (1 million d'hectares, soit 36 % du territoire). Cependant, cette valeur élevée cache en réalité une grande disparité quant à la répartition régionale de la forêt.

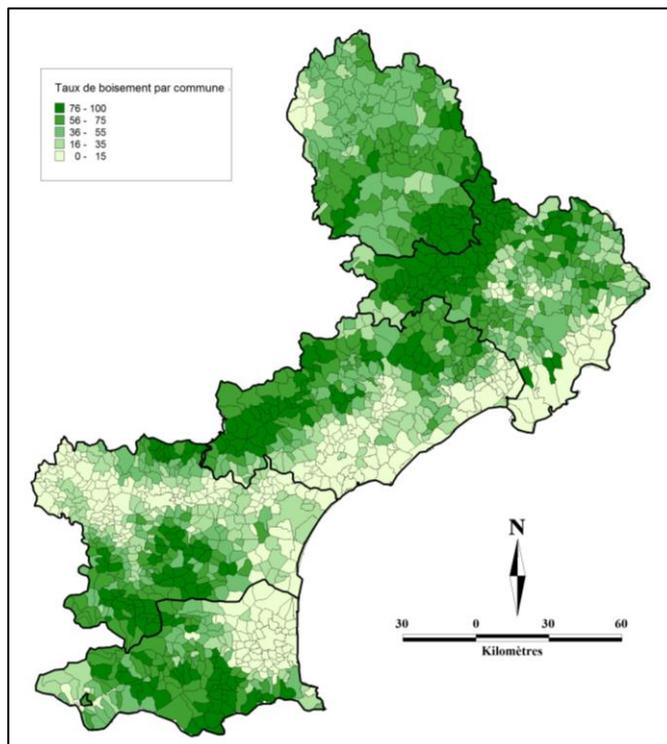


Figure 1 : Taux de boisement dans le Languedoc-Roussillon

Source : CNPF

Auteur : Céline Forissier

Les conditions climatiques, topographiques et anthropiques sont telles que la surface boisée se localise principalement dans la partie pyrénéenne de la région, le nord de l'Hérault, la partie cévenole du Gard et la grande majorité de la Lozère.

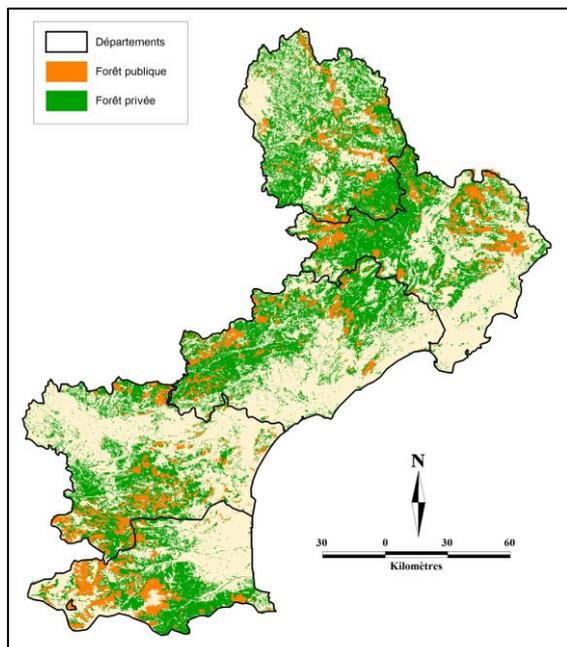


Figure 2 : Répartition de la forêt privée et de la forêt publique en Languedoc-Roussillon

Source : CNPF

Auteur : Céline Forissier

Il est à noter également que la région a une forte domination de la forêt privée. En effet, plus de 74 % de la surface boisée appartient à des propriétaires forestiers particuliers. 13,5 % appartiennent à l'Etat et 12,5 % appartiennent aux collectivités locales.

Si la forêt du Languedoc-Roussillon est en partie méditerranéenne, elle est essentiellement collinéenne et montagnarde. De ce fait, les essences des étages supraméditerranéen et montagnard couvrent la plus grande surface. Les feuillus y sont majoritaires en surface, 54 % contre 46 % pour les résineux, mais minoritaires en volume, 47 % pour les feuillus contre 53 % pour les résineux. (IFN, 2010)

Concernant la filière forêt-bois, la répartition des utilisations du bois est la suivante :
(site internet Coop. de France LR)

- La grande majorité du bois est exploitée en bois d'œuvre de résineux (60 %)
- 20 % sont utilisés en bois de trituration
- 18 % servent de bois énergie
- 1 % est utilisé pour les autres bois d'industrie
- 1 % est utilisé en bois d'œuvre de feuillus

La filière bois-énergie est encore peu développée avec seulement 10 % de l'exploitation forestière, mais ce pourcentage semble s'accroître tant sous la forme de bois bûches, que sous la forme de plaquettes (Chambres d'agriculture LR)



Figure 3 : Exploitation du chêne rouge d'Amérique (Aude)

Source : Maxime JOURDE

II/ Etat de l'art

Très longtemps, le chêne rouge d'Amérique a été considéré comme une essence secondaire, dénuée d'intérêt pour les reboisements sur le territoire français. Les gestionnaires entretenaient des préjugés sur la mauvaise qualité de son bois. C'est pourquoi, compte tenu de ces *a priori*, l'adaptation et le rendement des chênes indigènes étaient pour eux parfaitement suffisants et satisfaisants. Dans les années 1980, la tendance s'est inversée et de nombreux forestiers et scientifiques ont commencé à s'intéresser au chêne rouge, le percevant comme une essence d'avenir à fort potentiel. Des chercheurs ont notamment montré qu'au-delà de sa très forte croissance initiale et de sa plasticité, à l'âge adulte, la qualité de son bois est semblable à celle du chêne pédonculé (Timbal & al., 1994). De nombreuses études s'en sont suivies et permettent aujourd'hui de définir son autécologie.

II.1/ Positionnement dans la classification systématique

Les chênes rouges se positionnent comme suit dans la classification systématique :

Ordre : Fagale
Famille : Fagacées
Genre : *Quercus*
Sous-genre : *Erythrobalanus*.

Le sous-genre *Erythrobalanus* regroupe plusieurs espèces :

- *Quercus coccinea* Muenchh
- *Quercus ilicifolia* Wangh
- *Quercus palustris* Muenchh
- *Quercus rubra* L. (syn. *Quercus borealis* F.Michx)

Dans ce document, le terme de chêne rouge se rapporte au *Quercus rubra* L. Il s'agit en effet de l'espèce la plus utilisée en reboisement en France.

II.2/ Caractères biologiques

Le chêne rouge est un feuillu qui peut atteindre 30 à 35 mètres. Sa longévité, plus faible que les chênes indigènes, est comprise entre 150 et 200 ans.

Il présente un houppier développé avec de grosses branches redressées.

Sa feuille, caduque, simple alternée est de grande taille, 12 à 20 centimètres. Elle est composée de 7 à 9 lobes, chacun terminé par une ou trois pointes. Les sinus sont peu profonds et obliques par rapport à la nervure principale. Elles prennent une couleur rouge vif à l'automne.

La floraison du chêne rouge a lieu généralement en mai. Les bourgeons sont glabres et ovoïdes.

Les fleurs sont unisexuées. Les mâles sont en chatons pendants, fixés à la base des pousses de l'année.

Les femelles, minuscules et sessiles sont situées sur la pousse de l'année.

Le début de la fructification se fait avant l'âge de quinze ans. La maturation des glands se produit sur deux ans.

Le système racinaire du chêne rouge est comparable à celui des chênes indigènes avec quelques particularités. Avec l'âge, le système racinaire perd un peu de son caractère pivotant pour prendre une forme plus traçante-pivotante. Une des particularités de son système racinaire réside dans son aptitude à émettre des ramifications latérales se développant en direction de la surface du sol. (Lyford, 1980)

II.3/ Aire de répartition

II.3.1/ Dans son aire naturelle

Le chêne rouge d'Amérique possède une aire naturelle très vaste s'étendant dans la moitié est des Etats-Unis, du 32^{ème} au 47^{ème} degré de latitude nord et du 60^{ème} au 96^{ème} degré de longitude ouest.

C'est le chêne qui remonte le plus au nord du continent et c'est également celui qui monte le plus en altitude. En effet, on le retrouve jusqu'à 1600 mètres dans les chaînes des Alleghanys et des Appalaches au Sud. (Timbal, 1990).

Sa présence sur une superficie aussi grande indique son aptitude à s'acclimater à de grandes amplitudes climatiques.

Dans son aire de répartition naturelle, le chêne rouge est rarement en plantation pure. Il est la plupart du temps accompagné d'essences feuillues comme des chênes, des tilleuls, des ormes et des érables ou bien d'essences résineuses comme le Pin de Weymouth.



Figure 4 : Aire naturelle de répartition du chêne rouge d'Amérique aux Etats-Unis

Auteur : Wallonie environnement SPW

II.3.2/ Son introduction en France

Les premiers écrits relatant du chêne rouge sur le territoire français datent du XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècle. A l'époque, ce chêne a été introduit dans les parcs et les jardins botaniques pour son caractère ornemental.

Les premiers reboisements utilisant le chêne rouge à des fins sylvicoles remontent à la fin du XIX^{ème} siècle. Il fut introduit suite au dépérissement de certaines forêts touchées par des maladies (encrage, chancre, oïdium). Il est fort probable que ces plantations furent réalisées à l'aide des semences prélevées sur les arbres plantés dans les parcs. (Ducouso & al., 2006). Le chêne rouge a très rapidement séduit les forestiers par son fort potentiel sylvicole alliant une productivité forte et une qualité de bois élevée. Si bien qu'en 1990, l'essence représentait 4,6 % des plants installés en France. A l'époque, les régions avec les plus grandes surfaces en chênes rouges d'Amérique sont : le sud aquitain, la Bourgogne, la Franche-Comté, l'Alsace et la Lorraine.

Dans ses écrits de 1994, Timbal explique que son aire potentielle recouvre la majeure partie du pays à l'exception de la région méditerranéenne (trop sèche en été) et des zones montagneuses au dessus de 900 mètres d'altitude. Il affirme que le climat océanique se rapproche le plus de son optimum climatique aux Etats-Unis. Des introductions ont pourtant été réalisées en Languedoc-Roussillon sous influence méditerranéenne et l'étude menée durant ce stage analyse l'adaptation de l'essence sur ces sites.

II.3.3/ Son introduction dans le Languedoc-Roussillon

L'inventaire réalisé identifie clairement deux grandes périodes de reboisement en chênes rouges. Une première dans les années 1950 et une seconde dans les années 1980. Cette répartition temporelle s'explique principalement par le fait qu'en 1978, le chêne rouge d'Amérique a été admis sur la liste des essences éligibles aux aides du FFN (Fond forestier national).

II.4/ Autécologie

II.4.1/ Les facteurs climatiques

- La lumière

Dans son jeune âge, le plant tolère un certain ombrage, qui facilite la régénération naturelle sous couvert (USDA, 2003). Cependant, cette tolérance semble diminuer drastiquement avec l'âge. Il devient un héliophile strict supportant mal la concurrence des houppiers voisins. Au-delà de la concurrence pour la lumière à l'âge adulte, nous pouvons nous questionner sur l'effet d'une trop grande quantité de lumière reçue par les jeunes plants et les houppiers. En effet, d'après les rapports de Météo France, la zone d'étude est une des régions françaises avec le plus de jours d'ensoleillement par an et des valeurs de radiations solaires élevées. Cette intensité lumineuse permanente ne peut-elle pas endommager les cellules végétales et créer des coups de soleil affectant les écorces ?

- La température

Les observations du comportement du chêne rouge en région non méditerranéenne montrent que les grandes variations thermiques l'affectent peu (Timbal & al., 1994). Il ne craint pas les grands froids d'hiver, mais reste néanmoins sensible aux gelées tardives (Forêt Wallone). Il résiste toutefois mieux que le chêne pédonculé (*Quercus robur*) et chêne sessile (*Quercus petrae*). Selon cette étude belge, on observe une productivité plus importante avec l'augmentation actuelle de la température moyenne. Il apparaît que cette augmentation s'avère bénéfique pour l'espèce. Cependant, cette hypothèse reste à nuancer car l'augmentation de température n'a pas été quantifiée et n'a pas fait l'objet d'étude approfondie. Aussi les pics de chaleur estivaux belges sont nettement inférieurs à ceux ressentis dans le contexte méditerranéen.

- La pluviométrie

Le chêne rouge se développe bien dans les régions arrosées. En effet, l'essence est relativement exigeante en apport d'eau. Dans sa niche écologique, l'optimum de précipitation est généralement donné à 1000 mm/an (USDA, 2003), mais cette valeur est à moduler selon la texture du sol et la capacité de prospection racinaire de l'essence.

En Languedoc-Roussillon, cette valeur de précipitation peut être atteinte sur de nombreuses stations, mais l'irrégularité de répartition de cette pluviométrie sous influence méditerranéenne amène plusieurs questions :

- Est-ce que le chêne rouge peut supporter les sécheresses estivales parfois longues qui affectent aussi les zones de piémont et de montagne de l'arrière-pays du Languedoc-Roussillon ?
- Est-ce que les pluviométries de printemps et d'automne permettent à l'essence d'accomplir sa croissance à des niveaux satisfaisants ? Et ce, compte-tenu des variations interannuelles parfois très contrastées ?

L'étude menée par la direction des ressources forestière en forêt Wallone, indique que l'essence a une très bonne résistance à la sécheresse, hormis lors de la phase d'installation. Cette tolérance est due à une capacité à réguler sa transpiration précocement, et à un développement de racines secondaires permettant l'exploitation d'un grand volume de sol. En outre, le chêne rouge est plus tolérant à la sécheresse que les chênes indigènes. Ces informations sont issues d'études réalisées sous des climats très différents de celui méditerranéen. Nous pouvons par conséquent nous interroger sur l'adaptation réelle de l'essence aux variations climatiques très marquées et aux fortes sécheresses prolongées du contexte méditerranéen.

II.4.2/ Les facteurs édaphiques et hydriques

Le chêne rouge possède un système racinaire de type traçant-pivotant, et nécessite une profondeur de sol au moins supérieure à 40 centimètres (Ducouso & al., 2006).

Dans les régions du nord de la France, il redoute les sols compacts et préfère les sols légers avec une bonne aération. Son optimum se situe sur des terrains limoneux ou limono-sableux. Il accepte les sols chimiquement pauvres à pH acide (entre 5 et 6). Au-delà de ces deux seuils, des problèmes de croissance s'observent (Timbal, 1994).

Il apprécie un sol relativement « lié » permettant une rétention d'eau, mais est très sensible à l'hydromorphie dans les premiers centimètres de sol. Il l'est, par exemple, beaucoup plus que le chêne sessile, et ne supporte pas les sols engorgés, même temporairement.

De plus, c'est un calcifuge strict. Il craint la présence de carbonate de calcium dès la surface. Cette sensibilité se manifeste par un faible développement racinaire, une faible croissance aérienne et surtout un fort taux de mortalité dans la première année (Gelpe, 1986). Néanmoins, au delà de 40 cm de profondeur, le calcaire ne semble plus être un facteur limitant à sa croissance.

Nous souhaitons donc, à travers les plantations étudiées, essayer d'identifier les paramètres stationnels qui semblent déterminants ou défavorables pour le développement du chêne rouge dans ces conditions méditerranéennes.

II.5/ Bilan des études dans d'autres régions Françaises

En France, la ressource chêne rouge est essentiellement localisée dans le nord-est, dans le centre et dans le pourtour nord-ouest du Massif Central (IFN, 2014), régions dans lesquelles les premières introductions ont été effectuées.

L'abondance relative des peuplements de chênes rouges a permis la réalisation d'études, menées par les forestiers de l'INRA ou du CNPF, sur les relations entre les caractéristiques stationnelles et la croissance de l'essence.

Les différentes hypothèses et constats mentionnés dans les divers rapports sont résumés et ordonnés par thématique dans le tableau suivant.

Tableau 1 : Bilan des études faites sur les conditions pédoclimatiques du chêne rouge dans d'autres régions françaises
Auteur : Maxime JOURDE

	Morbihan	Limousin	Bourgogne	Poitou-Charentes
Sol	- Profondeur > 60 cm - Texture : LS, S, ou L - Sol acide avec un pH optimum de 5	- Profondeur > 50 cm - Texture : SL ou L	- Profondeur > 50 cm - Craint l'argile compacte dans les 50 premiers cm	- Profondeur > 30 cm - Texture : LS, S, ou A - Résiste aux sols très acides.
Hydromorphie	- Craint l'hydromorphie dans les 60 premiers cm	- Craint l'hydromorphie	- Peu sensible à l'hydromorphie	- Aime les sols bien alimentés en eau. - Craint l'hydromorphie dans les 50 premiers cm
Pluviométrie	< 700 mm	= 1000m	<i>Non renseigné</i>	Entre 800 et 900 mm
Topographie	<i>Non renseigné</i>	<i>Non renseigné</i>	- Milieu et bas de versant favorable. - Craint l'exposition sud.	<i>Non renseigné</i>
Altitude	<i>Non renseigné</i>	< 700 m	<i>Non renseigné</i>	<i>Non renseigné</i>
Densité de plantation	1100 à 2500 tiges/ha	600 à 1500 tiges/ha	<i>Non renseigné</i>	1600 tiges/ha

* SL = sablo-limoneux ; L = limoneux ; A = argileux ; LS : limono-sableux

Ces résultats sont obtenus sous d'autres climats et interrogent sur les stations à potentiel en Languedoc-Roussillon où les variations climatiques (températures, pluviométrie, vent, pédologie) sont très particulières et exigeantes pour les arbres. A ce jour, aucune étude complète n'a permis de réaliser ce travail en zone méditerranéenne. Des travaux à une échelle plus locale ont été mis en place il y a une dizaine d'années en Montagne Noire et dans les Cévennes.

Le travail réalisé dans les Cévennes, indique que les plantations exposées au nord et au nord-est et localisées en milieu de pente ont des croissances en hauteur supérieures aux autres peuplements. L'étude menée en Montagne noire par Jason Smither en 2005, rejoint cette hypothèse en affirmant que les positions de haut de versant ou de crêtes sont néfastes à la croissance en hauteur du chêne rouge. Aussi, les analyses statistiques montrent que les placettes situées en dessous de 500 m d'altitude ont un accroissement en hauteur significativement supérieur aux autres plantations. En Cévennes et en Montagne noire, la limite de profondeur de sol nécessaire à une croissance optimale est la même que celle prescrite dans le Limousin et en Bourgogne, avec une profondeur minimale de 50 cm. L'étude indique de plus, que la pluviométrie, la texture du sol et la pente n'ont pas d'influence sur la fertilité de la station pour le chêne rouge (Garnier, 2005).

Toutes ces hypothèses concernant les conditions pédoclimatiques optimales à la croissance en hauteur du chêne rouge permettent d'alimenter la connaissance sur l'autécologie de l'essence et permettent d'effectuer des comparaisons avec les résultats obtenus au cours de ce stage.

III/ Matériels et méthodes

L'objectif de ce travail étant de mettre en évidence les conditions pédoclimatiques favorables ou défavorables au chêne rouge d'Amérique, il a été nécessaire de récolter et de mettre en relation des données pédologiques, géologiques, climatiques et forestières. La première étape de ce travail consistait à repérer la distribution spatiale de l'essence au niveau régional. Sur les plantations existantes, les informations propres à la station, à la dendrométrie et à l'état sanitaire ont été récoltées. Enfin, des analyses statistiques ont porté sur les données collectées sur le terrain et sur les données climatiques issues de modèles. Elles ont pour objectif de proposer un arbre décisionnel permettant au gestionnaire de juger de la fertilité ou non de la station pour le chêne rouge.

Une limite importante à ce travail est le fait que l'ensemble des placettes échantillonnées sont une première génération de plantations et qu'il n'y a aucun peuplement issu de régénération naturelle. Sur ce type d'analyse visant à définir les caractéristiques propices à l'installation d'une essence forestière, l'étude des zones où l'essence se développe spontanément est primordiale. Pour l'essence étudiée ici, le premier travail de sélection des stations a été opéré durant la phase de reboisement par les gestionnaires. La littérature scientifique nous informe que, par manque de connaissance, le chêne rouge a été introduit sur tout type d'environnement forestier, mais aujourd'hui, l'historique de ces échecs de plantations a disparu (Ducouso & al., 2006). Cet obstacle a été contourné en collectant des données sur un large gradient de variables stationnelles, permettant ainsi de décrire un panel important de stations présentes dans la région.

Par ailleurs, la sylviculture conduite sur les différents peuplements et la provenance des plants sont deux facteurs absents des données disponibles dans les archives et ont donc dû être sciemment écartés de l'analyse. Concernant la provenance des plants, nous pouvons faire l'hypothèse que les reboisements des années 1950 ont été réalisés à l'aide de plants provenant de semences prélevées sur les arbres plantés dans les parcs lors de l'introduction de l'essence en France et que le matériel génétique de ceux des années 1980-1990 provient des premières plantations faites dans les régions limitrophes.

III.1/ Provenance des données

Les informations utilisées pour cette étude ont été collectées en plusieurs temps. En effet, le jeu de données final est le regroupement de plusieurs études faites sur le chêne rouge dans le Languedoc-Roussillon.

- **Etude CRPF 2005-2006** : Une première étude a été menée par Mr Benoît Lecomte, ingénieur CRPF, et des stagiaires, au cours des années 2005 et 2006. Cette étude entraine dans un programme national mis en place par le CRPF, dans l'objectif de dresser un état des lieux des plantations de chênes rouges sur le territoire français et son adaptation régionale. Ce travail a permis de collecter des informations sur 69 placettes dans l'ensemble des cinq départements qui composent le Languedoc-Roussillon. Ces placettes étaient majoritairement localisées chez des propriétaires forestiers privés, mais certaines se situaient en forêts communales et départementales. Par manque de temps et de financement, cette étude n'a pas été achevée et les données sont restées non exploitées.
- **Placettes de référence CRPF** : Ensuite, 6 placettes proviennent du réseau de suivi CRPF. Ces informations ont été extraites d'une base de données régionale regroupant les placettes CRPF sur diverses essences. Les plantations de chênes rouges suivies par le CRPF sont situées exclusivement dans le Gard. Ces peuplements font l'objet d'un suivi et de mesures régulières.
- **Etude CRPF 2016** : Au cours de l'année 2016, une autre étude a été conduite à une échelle plus locale dans le nord du Gard. A la vue du dépérissement du châtaignier dans les Hautes-Cévennes, un inventaire des essences « remarquables » a été mis en place. Mme Christine Boyer, technicienne CRPF, a effectué une campagne de mesures sur l'ensemble des peuplements recensés dans les PSG de la zone. Sur l'ensemble des placettes inventoriées, 9 ont été isolées et ajoutées à la base de données analysée dans ce rapport.
- **Etude stage 2017** : Enfin, 28 nouvelles placettes ont été créées au cours de ce stage pour compléter le tableau de données avec des informations actualisées. Ces peuplements se localisent aussi bien dans des forêts privées que publiques.

Au total, 112 placettes temporaires d'échantillonnage ont été inventoriées dans les cinq départements.

Tableau 2 : Nombre et localisation des placettes issues des différentes études.

Auteur : Maxime JOURDE

	Aude	Gard	Hérault	Lozère	Pyrénées-Orientales	TOTAL
Etude CRPF 2005-2006	38	15	10	1	5	69
Placettes référence CRPF	0	6	0	0	0	6
Etude CRPF 2016	0	9	0	0	0	9
Etude stage 2017	8	0	20	0	0	28
TOTAL	46	30	30	1	5	112

Ces placettes sont réparties de façon à couvrir tous les types de peuplements et toute la diversité des milieux biogéographiques dans lequel le chêne rouge d'Amérique existe à l'état de plantation. Chaque placette a fait l'objet d'une étude dendrométrique détaillée et une caractérisation situationnelle. La localisation des placettes est représentée en Figure 5 et en Annexe 1.

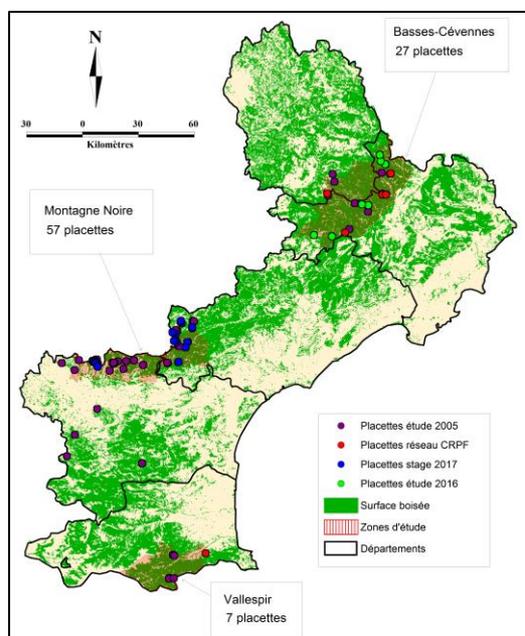


Figure 5: Localisation des placettes de chênes rouges d'Amérique visitées dans le Languedoc-Roussillon

Source : Personnelle Auteur : Céline Forissier

III.2/ Nouvel échantillonnage et complément de la base de données

Concernant les 28 placettes temporaires mises en place au cours de ce stage, un protocole spécifique a été conçu afin de pouvoir les ajouter à la base de données déjà existante, en y ajoutant une thématique décrivant l'état sanitaire des plantations.

Tout d'abord, les prises de mesure sur le terrain ont été précédées d'un recensement méticuleux des peuplements au niveau régional. Dans cette optique, tous les PSG ont été passés en revue un à un pour identifier ceux indiquant l'existence de chêne rouge. Pour compléter ce recensement, j'ai pris contact avec les techniciens CRPF de chaque département, des agents de l'ONF et le personnel de la DDTM qui m'ont indiqué des peuplements n'apparaissant pas dans les PSG. La géolocalisation sur le logiciel QGIS de ces plantations a ensuite permis de distinguer les différents ensembles stationnels sur lesquels étaient installés les chênes rouges. Au final, cette saisie cartographique a permis de sélectionner uniquement les placettes n'ayant pas fait l'objet d'un inventaire préalable. Aussi, le choix de visiter uniquement des plantations âgées de plus de 10 ans a été fait. Cette décision a été prise car il ne semblait pas fiable de tirer des conclusions quant à l'adaptation des trop jeunes arbres, d'autant plus que le chêne rouge est sensible à la crise de transplantation.

Enfin, une fois la localisation des placettes à inventorier déterminée, l'accord des propriétaires a été sollicité par contact téléphonique direct ou via l'intermédiaire des techniciens CRPF ou ONF. Aucun refus n'est à souligner. Au contraire, les propriétaires se sont déclarés tous très intéressés par l'étude et par le résultat.

Une première limite à cette étude est le fait que l'analyse se base quasiment exclusivement sur des informations que je n'ai pas personnellement collectées. Comme mentionné précédemment, les données ont été recueillies à des périodes différentes et par des opérateurs différents. Cette grande hétérogénéité engendre une multiplication des incertitudes lors des mesures. Si une seule et même personne avait effectué la phase de terrain, elle aurait défini ses propres normes et les aurait appliquées de manière identique à chaque placette. Pour tenter de pallier ce phénomène, certaines placettes déjà inventoriées au cours des campagnes précédentes ont fait l'objet d'une nouvelle visite afin de compléter les informations manquantes, notamment sur l'aspect sanitaire ou sur la pédologie.

III.3/ Mesures effectuées sur le terrain

La fiche de relevés sur le terrain (Annexe 3) a été élaborée en s'inspirant de protocoles existants et par la lecture du livre édité par l'IDF *Guide de l'expérimentation forestière* (Rosa & al., 2011). Au terme de ce travail de lecture, le protocole expérimental utilisé à l'échelle nationale par l'IDF a été remanié et adapté au travail de prise de mesures effectué par l'opérateur. Il permet de gagner en

efficacité et d'optimiser la saisie d'informations spécifiques à l'étude. Il est accompagné de sa notice (Annexe 4) qui guide l'opérateur pour le renseignement de la fiche.

Pour chaque peuplement, il prévoit d'isoler une placette rectangulaire au cœur de la plantation pour éviter les effets de bordure. Afin d'avoir une validité statistique des résultats, il a été nécessaire de déterminer un nombre d'arbres précis à relever sur chaque placette. Ce nombre ne devait être ni trop important à la vue de la quantité de placettes à visiter, ni trop faible. En concertation avec mon tuteur de stage, nous nous sommes arrêtés sur un choix de 20 arbres. Le protocole est développé en Annexe 2.

Afin de valider ce protocole et de me familiariser avec les éléments de terrain, les premières sorties ont été menées avec l'aide d'ingénieurs forestiers et d'un pédologue. Ils m'ont ainsi aidé à définir les différentes modalités des variables.

Les principales thématiques mesurées sur le terrain sont les suivantes:

- La station :

- Environnement de la plantation : Type de peuplement, proximité avec la desserte.
- Situation topographique : Altitude, pente, exposition, microtopographie.
- Pédologie : Relevé pédologique avec une fosse creusée à la pioche et à la tarière, détermination de la nature de l'humus.

- La dendrométrie : Diamètre moyen des 20 arbres de l'étage dominant ou co-dominant, la rectitude, la hauteur dominante, la surface terrière, la densité.

- L'état sanitaire : Présence de gélivures, de tâches foliaires, de traces d'encre, de champignons, de gourmands. Notation de la qualité du feuillage.

III.3.1/ Mesures dendrométriques effectuées

Ce paragraphe vise à apporter un complément sur les différentes mesures dendrométriques effectuées, leurs justifications et les instruments employés.

Le diamètre moyen est pris à 1,30 m au compas sur les 20 arbres dominants ou co-dominant de la placette. Sa mesure est faite dans un plan perpendiculaire à l'axe de la tige et permet de connaître l'accroissement moyen individuel des arbres. Elle sert également à des variables indicatrices de la croissance et de la production du peuplement, telles que la circonférence de l'arbre moyen ou la surface terrière. (Guide de l'expérimentation forestière, 2011)

Pour déterminer la hauteur dominante (Pardé, 1956 ; Pardé & Bouchon, 1988) de la placette, sa définition a été appliquée : Elle correspond à la moyenne des hauteurs des 100 plus gros arbres pour un hectare. Dans notre cas, la hauteur était mesurée sur 3 à 5 tiges de plus gros diamètres en fonction des dimensions de la placette. Cette hauteur peut servir au suivi sylvicole des peuplements réguliers ou au cubage des arbres sur pied. Dans notre étude, elle est utilisée pour préciser l'indice de fertilité permettant de comparer les croissances en fonction des stations (Franc & Houllier, 1989).

La particularité de cette étude étant le nombre important d'opérateurs ayant pris les mesures, il a été indispensable de vérifier la conformité des résultats obtenus pour les hauteurs en fonction des instruments de mesures différents. En effet, certaines valeurs saisies dans la base de données étaient surprenantes et pouvaient laisser supposer une erreur durant la prise de mesure. Comme deux instruments de mesures ont été utilisés au cours des campagnes de terrain (le dendromètre Vertex et le TruPulse 200), il a été nécessaire de vérifier que le biais ne provenait pas des appareils. Dans leur article paru dans la revue forestière française, Gaudin et Richard indiquent que quel que soit l'un des deux appareils de mesure sélectionnés, les résultats seront sensiblement identiques. Cependant, leur

obtention fiable passe par une bonne connaissance du modèle utilisé et par une prise minutieuse des mesures (Gaudin & Richard, 2014). Pour certaines placettes du jeu de données, un nouveau calcul de cet indice a été nécessaire afin de s'assurer que la même formule soit utilisée pour chaque échantillon.

III.3.2/ Acquisition des données pédologiques et géologiques.

L'ensemble des données pédologiques a été déterminé par la création d'une fosse creusée à la pioche et à la tarière. Cette fosse permet de déterminer les caractéristiques du sol de la station. Lors des relevés sur le terrain, l'épaisseur, la texture, la structure, la charge en éléments grossiers et la présence de racines ont été collectés pour chaque horizon. Une sortie préliminaire avec Jean-Baptiste Algayer, ingénieur d'étude à l'INRA de Montpellier, a permis de distinguer les différentes étapes à respecter lors de l'étude pédologique d'une station forestière et de calibrer les observations. Aussi, une entrevue avec Guillaume Coulouma, également ingénieur d'étude à l'INRA de Montpellier, a permis de s'assurer de la véracité des textures décrites sur le terrain.

Les informations ainsi récoltées permettent de calculer la réserve utile maximale des sols (RUM). La RUM représente la quantité maximale d'eau qu'un sol peut contenir. Afin de conserver une homogénéité dans le jeu de données final, une formule unique a permis de calculer la RUM de l'ensemble des placettes.

La détermination de la nature de l'humus et du pH a également été réalisée en un point sur chacune des placettes.

Concernant la détermination de la nature géologique de la roche mère, deux sources ont été utilisées. Tout d'abord, les documents SRGS spécifiques à chaque grande région naturelle a permis de donner une information à grande échelle de la nature du substrat. Une étude plus détaillée de la carte géologique vectorisée du BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) a ensuite permis d'affiner la détermination.

III.3.3/ Détermination des pathologies :

Afin d'estimer l'état sanitaire du peuplement, des indications sur la présence de pathogènes sont indiquées pour chacun des 20 arbres inventoriés. Les anomalies relevées sont les suivantes : présence de gélivures, de tâches foliaires, de traces d'encre ou de champignons. Un pourcentage par placette est ensuite calculé et ajouté dans la base de données.

Une photographie de chaque pathologie est également prise sur le terrain. Un signalement de la localisation et un envoi des clichés aux correspondants-observateurs et aux membres du DSF (Département de la santé des forêts) est alors effectué. Ces échanges ont alors permis de déterminer la nature des pathogènes et leurs niches écologiques.

III.3.4/ Jugement du dépérissement :

Le DSF a mis au point un protocole spécifiquement adapté à l'observation des dépérissements feuillus, appelé DEPEUFEU (acronyme de DEPErissement FEUillus). Ce protocole fonde son analyse sur trois critères principaux : la transparence du houppier, la mortalité des organes pérennes et la répartition de la masse foliaire (homogène ou non). Ces critères sont eux-mêmes divisés en sous-catégories qui permettent d'évaluer et de noter l'aspect général du houppier. La note finale indique si l'arbre est dépérisant ou non (Nageleisen, 2005). Le protocole définit un peuplement comme dépérisant si plus de 20 % de ses arbres sont dépérisants.

Dans l'étude présentée, le choix a été fait de ne pas suivre exactement le protocole du DSF mais de s'en inspirer pour définir l'aspect dépérisant ou non d'un peuplement. Les observations qui ont été menées concernaient principalement la qualité du feuillage (correcte, fenêtré, transparence) et la répartition des feuilles dans le houppier. Par soucis de simplification et d'efficacité sur le terrain, je me suis affranchi du système de notation initial.

III.4/ Les modèles climatiques exploités

La dernière phase du protocole consiste à prélever les données climatiques associées à chaque point d'échantillonnage. Afin d'extraire ces informations sur logiciel SIG, quatre modèles sont disponibles :

- **Modèle SAFRAN** : Produit par Météo-France. Fournit des données horaires couvrant la France à une résolution spatiale de 8 km sur une projection Lambert-II étendue. Elles couvrent la période de 1958 à nos jours. Une des particularités de ce modèle est qu'il fournit l'évapotranspiration potentielle (ETP) calculée à partir de la formule de Penman-Monteith et tenant compte de la température, du rayonnement, de l'humidité atmosphérique et de la vitesse du vent.
- **Modèle AURELHY** : Produit également par Météo-France. Fournit des données climatiques pour la période 1981-2010 à la résolution kilométrique sur une projection Lambert-II étendue. Ces valeurs sont obtenues à partir des normales de référence aux postes de mesures (3400 stations), par une méthode d'interpolation qui prend en compte l'influence du relief. Elles sont disponibles aux pas de temps mensuel et annuel pour les précipitations, les températures, le nombre de jours avec précipitations et le nombre de jours de gel. (Canellas & al., 2014). Son principal inconvénient est qu'il ne fournit pas de données d'évapotranspiration potentielle.
- **Modèle DIGITALIS** : Développé par AgroParisTech-LERFoB dans les années 2000. Ce modèle fournit des informations sur les précipitations, les températures et le rayonnement atmosphérique. Il utilise ces différentes variables, couplées à un modèle numérique de terrain (MNT) pour calculer l'ETP avec la formule de Turc. La période de couverture est 1961-2010. Deux modèles DIGITALIS ont en réalité été créés : la version 1 avec une résolution spatiale fine de 50 mètres mais moins fine dans le temps (moyenne trentenaire) ; la version 2 plus fine dans le temps, mais moins fine spatialement.
- **Modèle AURITALIS** : Modèle hybride des modèles AURELHY et DIGITALIS, produit par Jean Lemaire. Les données de températures et de précipitation proviennent du modèle AURELHY au pas du kilomètre pour la moyenne trentenaire et de SAFRAN pour les données journalières. Le modèle recalcule également les valeurs d'ETP en utilisant la formule de Turc en exploitant les températures AURELHY, le rayonnement et le MNT DIGITALIS. Ce protocole permet d'obtenir une valeur de l'ETP prenant en compte le topoclimat au pas de 50m.

Pour cette étude, les données de deux modèles climatiques ont été sollicitées : le modèle AURITALIS et le modèle DIGITALISv1, partagé par le LERFoB. Les données exploitées sont la température moyenne, la température maximale durant la période estivale, la température minimale durant la période hivernale, les précipitations, les ETP, les P-ETP et la radiation solaire. Ces données ont été calculées mensuellement. Cependant, afin de réduire la colinéarité entre variables, seuls les pas de temps par saison et annuelles ont été conservés. Les variables par saison sont obtenues en calculant la moyenne pour l'hiver (hi : déc., janv., fév.), le printemps (pr : mars, avril, mai), l'été (et : juin, juil., août) et l'automne (au : sept., oct., nov.). (Piedallu & al., 2016).

Les variables étudiées sont présentées en Annexe 5.

III.5/ Validation des informations stationnelles prises sur le terrain

Lors de la phase de terrain, les informations relatives à la topographie, à l'orientation ou au bilan hydrique de la placette ont été notées. Une validation de ces données est réalisable via le calcul de certains indicateurs sur logiciel SIG à partir du MNT. Dans cette étude, un MNT au pas de 25 m est utilisé.

- **Pente et exposition :** Des algorithmes de base du logiciel QGIS permettent de calculer la pente et l'orientation de chaque placette. La pente est donnée en pourcentage. L'exposition est exprimée par une valeur numérique comprise entre 0 et 360 degrés. Les valeurs comprises entre 0 et 45 et entre 315 et 360 correspondent à une orientation nord. Les valeurs entre 45 et 135 renvoient à l'est. Les valeurs entre 135 et 225 correspondent au sud. L'ouest est défini par des orientations comprises entre 225 et 315.
- **La position topographique** peut également être déterminée par le calcul d'un indicateur : le TPI (Topographic position index) (Jenness, 2006). C'est un indice topographique qui exprime la position relative d'un point par rapport à ses voisins dans un rayon donné. Pour chaque dalle du MNT, le TPI donne une valeur calculée par la différence entre le nombre de dalles voisines dont l'altitude est plus basse que le point d'intérêt et celles dont l'altitude est plus élevée. Cette valeur permet également de prédire le comportement des arrivées et des départs d'eau sur le point échantillonné. Pour cette étude, les seuils présentés dans le tableau 3 ont été adoptés.

Tableau 3 : Détermination de la microtopographie et du régime hydrique en fonction de la valeur du TPI (rayon fixé de 100m) et de la pente.
Auteur : Maxime JOURDE

Conditions	Position topographique	Régime hydrique
- 0,7 < TPI	Bas de versant	Arrivée > Départ
TPI = 0 et pente > 5%	Milieu de versant	Arrivée = Départ
TPI = 0 et pente < 5%	Plateau	Arrivée = Départ
TPI > 0,7	Haut de versant	Arrivée < Départ

Afin de pallier certains manques d'informations relatifs à ces trois variables, dans les jeux de données initiaux, il a été fait le choix d'utiliser cette méthode de détermination pour l'ensemble des placettes échantillonnées. Conscient que cette technique est susceptible d'apporter une légère erreur due à un lissage du MNT, cette méthode permet néanmoins d'avoir une origine commune de l'information pour toutes les plantations. Le MNT employé étant défini au pas de 25 mètres, nous pouvons supposer que le taux d'erreur est négligeable. La vérification des valeurs ainsi obtenues avec nos relevés de terrain s'est avérée exacte sur tous les sites visités. Il est cependant évident qu'une visite de contrôle sur le terrain est nécessaire avant toute opération ou proposition de reboisement.

III.6/ Schéma récapitulatif de la démarche globale

La hiérarchisation des traitements appliqués sur chaque jeu de données initial est développée en Figure 6.

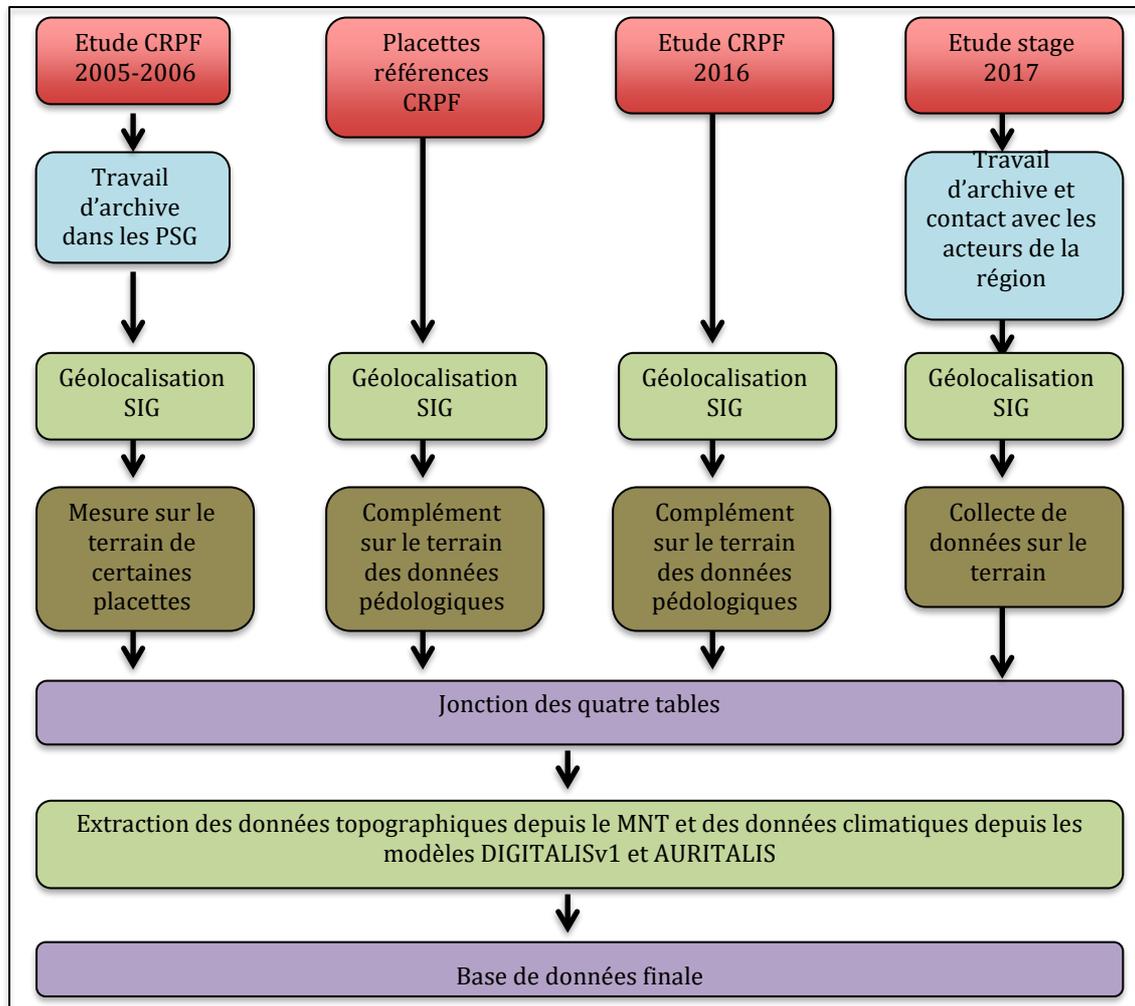


Figure 6 : Schéma récapitulatif de la démarche globale
Auteur : Maxime JOURDE

Après la saisie informatique des données collectées sur le logiciel Excel, la phase d'analyse statistique s'est amorcée.

III.7/ Création de classes de fertilité

Dans l'objectif d'étudier l'influence des variables pédoclimatiques sur la fertilité des stations pour le chêne rouge d'Amérique, la création de classes de fertilité a été une étape indispensable. Elles ont été définies à partir de la valeur de hauteur dominante à 50 ans de chacune des placettes. Cette valeur à 50 ans a été attribuée en se basant sur les courbes de croissance des tables hollandaises. Après confirmation par des chercheurs de l'IDF et de l'INRA, ces tables sont les seules utilisées pour n'importe quel contexte géographique. Une superposition de ces courbes de croissance et du nuage de points représentant nos placettes d'étude permet de constater que la grande majorité des points se situe dans la zone couverte par l'éventail des courbes. (Annexe 6)

Pour cette étude, le choix a été fait de retenir deux classes de fertilité : une fertilité bonne et une faible. Ce choix s'était porté sur ces deux classes afin de pouvoir explorer les analyses statistiques par

TANAGRA² qui traitent une variable binaire. Cela permet aussi de former des groupes conséquents nécessaires aux traitements statistiques.

Afin de garder une homogénéité en nombre dans chaque classe de fertilité, le seuil a été déterminé en calculant la médiane des hauteurs dominantes projetées à 50 ans. Il est fixé à 20,3 m à 50 ans.

III.8/ Les analyses statistiques sollicitées

Trois logiciels ont été utilisés pour cette étude afin de traiter les données collectées. La majorité des analyses ont été menées sur le logiciel R, créé par Ross Ihaka & Robert Gentleman. Une partie de l'analyse a également été effectuée sous TANAGRA 1.4, logiciel développé par l'Université Lyon 2. Enfin, des transformations préalables sur les tableaux de données ont été faites avec le logiciel Excel 2011.

Les principaux tests et fonctions utilisés dans cette étude sont décrits ci-après :

- **ACP** : L'analyse en composantes principales est une méthode d'analyse de variables multivariées. Elle permet entre autre d'étudier et de visualiser les corrélations entre des variables quantitatives, afin de limiter le nombre de variables à mesurer par la suite. Elle projette les observations depuis un espace à p dimensions dans un espace à k dimensions ($k < p$) de telle sorte qu'un maximum d'informations soit conservé sur les premières dimensions.
- **Matrice de corrélation (fonction : *cor()*)** : Elle permet d'évaluer la dépendance entre plusieurs variables en même temps. Le résultat est donné sous la forme d'un tableau contenant les coefficients de corrélation entre chaque variable. Plus la valeur de ce coefficient est proche de 1, plus les variables sont corrélées, plus cette valeur est proche de -1, plus elles sont inversement corrélées.
Par défaut, la commande *cor()* du logiciel R utilise la méthode de Pearson qui mesure une dépendance linéaire entre deux variables. D'autres méthodes de calcul de ces coefficients sont possibles en les précisant dans la fonction.
- **Régression linéaire multiple pas à pas (fonction : *stepAIC()*)** : Ce test permet de mettre en relation une variable quantitative dite « à expliquer » et plusieurs variables quantitatives dites « explicatives ». La fonction *stepAIC()* du logiciel R code une régression itérative qui inclut au départ toutes les variables dans le modèle puis les exclut progressivement, en fonction de celles qui diminuent le coefficient de détermination et contribuent donc le moins au modèle.
- **Arbre de décision (fonction : *rpart()*)** : Il permet de répartir par groupes (de taille minimale fixée) un jeu de données, en fonction de variables indiquées par l'opérateur. Des valeurs seuils sont calculées afin de discriminer au mieux la population initiale. La fonction *rpart* du logiciel R, produit une représentation graphique de l'arbre, indiquant pour chaque groupe le pourcentage de la population initiale. La fonction C4-5 permet d'obtenir des résultats similaires avec TANAGRA.
- **Test C-PLS** : Cette fonction du logiciel TANAGRA peut être vue comme une alternative à la régression linéaire multiple, puisqu'elle est mieux régularisée. De ce fait, elle sait gérer les problèmes de colinéarités. Elle permet d'exclure pas à pas les variables les moins explicatives en fonction de la valeur de la VIP (variable importance in projection). Par définition, lorsque la VIP est inférieure à 0,8, la variable associée est retirée du jeu de données, permettant ainsi de diminuer progressivement les variables entrant dans le modèle. Il détermine, à l'issue de PLS répétées, les variables les plus explicatives. Le résultat final de la C-PLS est une classification des placettes en fonction des variables les plus explicatives.

² Outil statistique expliqué ci-après.

PARTIE II : Résultats sur le chêne rouge d'Amérique

I/ Observations générales sur les sites étudiés

En Languedoc-Roussillon, les peuplements de chênes rouges d'Amérique se localisent essentiellement sur trois massifs : la Montagne Noire, les Basses-Cévennes et le Vallespir. (Annexe 1)

La Montagne Noire, située au nord du département de l'Aude et au nord ouest de l'Hérault, s'étend sur un très grand gradient altitudinal oscillant entre 350 et 1100 mètres d'altitude. Dans sa partie occidentale, elle se présente comme une succession de plateaux en légères pentes du nord vers le sud. Dans la région méditerranéenne, cette zone bénéficie d'un climat à forte tendance océanique, caractérisée par des températures assez douces et des précipitations relativement abondantes. Il n'est pas exclu cependant de relever certaines sécheresses en été.

Les Basses-Cévennes sont situées à cheval sur le département du Gard et de la Lozère. Leur altitude est relativement basse avec une moyenne de 750 mètres. Elles sont formées par une succession de vallées encaissées, séparées par des crêtes longues et étroites, d'orientation nord-ouest/sud-est. Cet ensemble géographique se situe au niveau d'une transition climatique. Une très large proportion des Basses-Cévennes bénéficie d'un climat méditerranéen avec des hivers doux et des étés chauds et secs, mais une partie profite également du climat montagnard apporté par les Hautes-Cévennes.

Le Vallespir se situe au sud du département des Pyrénées-Orientales, à la frontière espagnole. C'est une vallée encaissée qui ne s'ouvre qu'en altitude. La zone, marquée par un contraste altitudinal très marqué, s'étend de 160 à 2700 mètres d'altitude. Le Vallespir se définit par un climat de montagne méditerranéenne avec des caractéristiques très liées à l'altitude et à la longitude. C'est un climat de transition entre une zone méditerranéenne à l'est et un climat montagnard humide à l'ouest.

La répartition géographique des chênes rouges présents dans la région correspond à l'autécologie connue de l'essence. Cette espèce, relativement plastique, nécessite des sols profonds et une quantité d'eau disponible tout au long de l'année. Le gradient d'altitude offert par la topographie de ces massifs engendre des climats plus doux et plus arrosés que le littoral méditerranéen. Dans la zone d'étude, le chêne rouge se situe sur un éventail d'altitude très large (entre 200 et 1000 mètres d'altitude). On remarque parmi ces sites une certaine différence de situation géographique selon le temps : les plus anciennes implantations de chênes rouges répertoriées se situent en Montagne Noire, à des altitudes supérieures à 500 m et réalisées entre les années 1950 et 1980. C'est seulement à partir des années 1980 que les reboisements avec cette essence sont répertoriés dans les Basses-Cévennes et le Vallespir. De ce fait, seules les plantations de moins de 35 ans se retrouvent entre 200 et 500 mètres d'altitude. N'ayant pas de données d'archive sur les échecs de plantations, il nous est impossible d'affirmer avec certitude que l'absence de peuplements de chênes rouges à des altitudes comprises entre 200 et 500 mètres avant 1980 est due à une absence de reboisement ou à une mort de toutes les introductions faites à de telles altitudes.

Dans la région, une part importante des plantations de chênes rouges a été réalisée sous forme de bandes coupe-feu. Ces bandes, constituées d'essences estimées peu combustibles au regard des boisements résineux voisins, sont généralement localisées sur la bordure de boisements à fort potentiel économique et ont pour objectif de diminuer le risque incendie. Lors de leur installation, les densités de plantation sont relativement élevées (entre 2500 et 3000 tiges/ha) par rapport aux préconisations (600 à 1500 tiges/ha selon le guide du CRPF Limousin). Les effets d'une telle densité initiale sont une croissance en hauteur juvénile très forte, mais rapidement une compétition pour la lumière. Ce phénomène est accentué du fait d'une absence d'enjeu économique dans la région. Ainsi, peu ou pas de travaux sylvicoles sont réalisés. Ce manque d'entretien participe à la création de certains peuplements stressés, malades, aux arbres sinueux présentant de grosses branches basses. Sur les 28 placettes visitées au



cours de ce stage, 13 étaient disposées en bande coupe-feu. Au sein de ces bandes, formées de 4 ou 5 rangées d'arbres, les hauteurs dominantes à 50 ans des différentes placettes vont de 13 à 29 mètres. Ce mode de plantation ne semble donc pas influencer directement la croissance en hauteurs de l'essence. Des résultats similaires sont mis en évidence sur les plantations par bouquets. Il apparaît donc alors que le chêne rouge d'Amérique a une très grande souplesse d'introduction.

D'autres peuplements visités montrent que le chêne rouge d'Amérique, sur des stations propices et avec un suivi sylvicole régulier, est apte à produire du bois d'œuvre de qualité. Une plantation, réalisée dans les années 1950, et ayant fait l'objet d'une sylviculture adaptée, possède aujourd'hui des arbres de 25 mètres de haut, avec un diamètre moyen de 45cm et des billes de pied parfaitement rectilignes et sans défauts apparents.



La représentation de la hauteur dominante en fonction de l'âge illustrée en Figure 7 montre une grande variabilité des résultats à tous les âges, avec des croissances en hauteur pouvant atteindre des valeurs très intéressantes pour les reboisements locaux. En effet, la superposition de ce nuage de points avec les courbes de fertilité belges, donnée en Annexe 6, indique que nombre de stations en Languedoc-Roussillon sont fertiles et peuvent se prêter, sous les conditions climatiques antérieures, à l'utilisation de l'essence en reboisement. Dans les stations les plus propices, ce chêne peut atteindre une hauteur dominante supérieure à 25 mètres à 50 ans. Ainsi, sous réserve des évolutions futures à étudier, le chêne rouge ne peut pour l'instant pas être exclu du contexte méditerranéen qui, selon la littérature scientifique, s'avèrerait totalement inadapté à l'essence. Les données mesurées indiquent que cette essence peut présenter un réel intérêt dans certaines situations à ce jour. Nous essaierons d'analyser son intérêt pour les reboisements futurs.

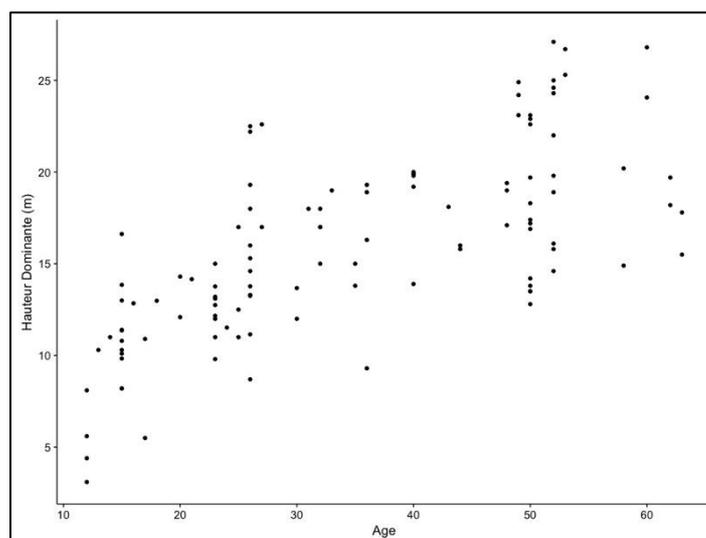


Figure 7 : Représentation de la hauteur dominante en fonction de l'âge des placettes étudiées
Auteur : Maxime JOURDE

Certains propriétaires ont décidé pour leur reboisement, d'installer des plantations de chênes rouges, non pas en bande coupe feu, mais en plein sur d'anciennes terres agricoles. Considérant le chêne rouge comme une essence précieuse, les densités de plantation étaient comprises entre 800 et 1000 tiges/ha et les écartements entre plants étaient importants. Sur le terrain, ces plantations se caractérisent par des diamètres supérieurs aux plantations à forte densité initiale : en moyenne, à 25 ans, les diamètres moyens à 1,30 m sont de 23,5 cm contre 16,5 cm. Cependant, le port de ces arbres est très peu adapté à une exploitation bois d'œuvre car les houppiers sont très bas avec de grosses branches charpentières.



Une autre pratique sylvicole a été observée au cours de cette étude : le peuplement en mélange. La tendance actuelle des forestiers est de favoriser les mélanges feuillus-résineux. De par sa croissance juvénile très forte, le chêne rouge semble parfaitement s'adapter à ce type de pratique. En effet, à l'âge adulte, les chênes rouges ont des hauteurs dominantes semblables à celle des résineux et ne souffrent pas de compétition pour la lumière. Dans la zone d'étude, il est principalement planté avec du douglas ou avec du cèdre. La principale technique mise en évidence est une alternance des plants de feuillus et de résineux sur chaque ligne de reboisement.



Si on s'intéresse strictement à l'aspect production de bois de qualité, il semblerait qu'aujourd'hui le principal frein à l'exploitation du chêne rouge soit le manque de travaux sylvicoles. Comme l'indiquent Alexis Ducouso dans ses publications ou le CRPF dans ses fiches techniques, des travaux d'élagage sont indispensables dans les premières années afin de fournir un tronc droit et réduire la présence de grosses branches. Ces peuplements nécessitent également entre 4 et 5 éclaircies fortes au cours de leur croissance afin d'arriver à une densité à 60 ans d'environ 100 tiges/ha. Le manque de sylviculture se fait clairement ressentir sur la grande majorité des plantations de l'échantillon.

Aussi, la nature de la roche mère est très diversifiée sur la zone d'étude et les reboisements en chênes rouges ont été installés sur tous les types de substrats. En Montagne Noire, le socle est principalement constitué de schistes et de gneiss. Dans le massif des Basses-Cévennes, les substrats sont essentiellement schistes et micaschiste. Dans le Vallespir, les terrains ayant connus de très importants bouleversements tectoniques, la roche mère a une origine très variée. De manière synthétique, on observe une domination des gneiss, des micaschistes et des granites. La dégradation de ces roches donne principalement des textures limono-sableuses, favorables à l'installation des chênes rouges. Aussi, en s'altérant, ces roches riches en silice donnent naissance à des sols naturellement

acides. L'autécologie du chêne rouge nous précise que l'essence accepte les sols chimiquement pauvres à pH acide (entre 5 et 6). D'une manière générale, la nature de la roche mère ne semble pas affecter la croissance et la qualité des arbres de nos sites d'étude.

Les trois ensembles géographiques offrent également des reliefs très variés et des pentes très prononcées. Dans notre échantillon, les placettes se localisent sur des pentes allant de 0 à 55 %. En Montagne Noire, les chênes rouges ont été installés principalement sur des plateaux ou des versants à très faible pente. Les récentes introductions dans les Basses-Cévennes et le Vallespir semblent indiquer une parfaite adaptation de l'essence à des fortes pentes. De plus, contrairement aux préconisations habituelles concernant les expositions à favoriser ou à éviter pour des plantations feuillues, l'essence a été introduite sur toutes les expositions. Dans notre jeu de données, les expositions majoritaires sont l'est (36 %) et le sud (32 %) où la croissance et la qualité des peuplements dans ces conditions sont bonnes. Un croisement des mesures récoltées en terme d'exposition et de RU indique que les valeurs de réserve utile élevées sont principalement attribuées à ces expositions sud et est. Ainsi, il semblerait que dans la région d'étude, le chêne rouge soit adapté à des stations de pleine lumière si la réserve en eau est importante.

D'autre part, les plantations de chênes rouges visitées révèlent un état sanitaire très satisfaisant. Seulement 7 plantations sur les 38 visitées au cours de ce stage présentent des signes de pathologies. Historiquement, le chêne rouge d'Amérique a été introduit en France pour sa résistance à différents pathogènes affectant les essences locales. Dans la zone d'étude, le chêne rouge semble être en effet beaucoup plus résistant que ses cousins du genre *Quercus* ou que les autres feuillus. La maladie de l'encre (*Phytophthora cinnamomi*), commune au chêne rouge et au châtaignier n'a été observée sur aucune placette alors qu'elle engendre le dépérissement de très nombreux peuplements de châtaignier dans la région.

Néanmoins, au sein de certaines parcelles, d'autres pathologies ont été mises en évidence. Des photographies sont présentées en Annexe 6. Les principales pathologies et pathogènes affectant le chêne rouge dans la région sont :

- **Gélivure.** C'est un défaut très fréquent chez les chênes en général. Elle correspond à une fente cicatricielle longitudinale, due au gel, affectant le bois et l'écorce. (CRPF Nouvelle Aquitaine). La gélivure n'entraîne jamais de pourriture ni de coloration importante du bois. Les chênes ont des capacités de réactions très fortes qui se traduisent par une duraminisation très rapide des faces de la fente de gélivure. De plus, ces défauts sont en général limités à la partie de grume affectée par la cicatrice visible extérieurement et peut donc être retirée lors de l'exploitation (Ramon, 1990). Au cours de la phase de prospection, uniquement 3 peuplements sur les 38 visités portés des traces de gélivure. De plus, sur chacune de ces placettes, seulement quelques individus isolés portés des marques de gel. La sensibilité du chêne rouge d'Amérique à la gélivure ne semble donc pas actuellement un problème.
- **Tâches foliaires.** Plusieurs parasites peuvent être responsables de la décoloration des feuilles. Les principales tâches foliaires observées au cours de l'étude correspondent aux maladies de l'érinose et de l'anthracnose. Cette dernière est provoquée par un champignon qui se développe en présence de chaleur et d'une forte humidité. Cette pathologie engendre une défoliation précoce des arbres hôtes. La présence de ces deux pathogènes a été validée par une analyse des correspondants-observateurs du DSF. Mais de nouveau, seulement une faible part des plantations visitées était touchée par cette pathologie.
D'autres tâches foliaires beaucoup plus fréquentes, de forme circulaire, ont été observées. Ces marques sont dues à des insectes piqueurs-suceurs. D'après le DSF, ces tâches n'ont aucune conséquence sur la qualité du feuillage ou la qualité du bois.

- **Champignons.** La présence de champignons le long du tronc de certains arbres encore en vie a été observée sur une placette dans l'Hérault. Inconnus des correspondants-observateurs, des photos et échantillons ont été envoyés au DSF pour être analysés. La détermination du pathogène n'a pas été effectuée avant la fin de mon travail, mais cette découverte identifie une nouvelle sorte de pathogène à considérer et à surveiller lors de futures introductions.
- **Dégâts de cervidés.** C'est une essence très appétente pour le gibier (lapin, chevreuil, cerf). Il est fréquent de noter des dégâts de type frottis ou abrouissement sur les individus juvéniles ou sur de jeunes organes. La totalité des jeunes pousses, le long du tronc ou sur les rejets de souches est systématiquement mangée jusqu'à environ 1,30 m. Les troncs sont peu frottés, mais les jeunes tiges issues des rejets sont très endommagées. La présence de protection semble très efficace, car les dégâts sont considérablement réduits.

II/ Analyses statistiques et arbre de décision

L'analyse des données vise à mettre en évidence les variables les plus explicatives de la croissance en hauteur du chêne rouge et donc de la fertilité de la station. En effet, il est déjà admis que la hauteur d'un peuplement exprime la fertilité de la station (Franc & Houllier, 1989). Pour cette analyse, les deux classes de fertilité mentionnées précédemment sont sollicitées. Les diamètres à 1,30 m, plus dépendants de la sylviculture conduite, et sur laquelle nous n'avons pas d'information précise pour la plupart des placettes, n'a pas été analysée.

II.1/ Création de l'arbre de décision

Les logiciels informatiques R et TANAGRA ont été utilisés pour traiter statistiquement les données et dresser un arbre de décision. Les deux résultats obtenus étant identiques, uniquement la méthodologie sous R sera détaillée. La fonction *step(lm())* du package *{stats}* a été employé afin de déterminer les variables les plus explicatives de la fertilité sur l'ensemble des variables quantitatives du jeu de données. Elle permet d'effectuer une régression linéaire multiple de type backward et de classer les variables en fonction de leur poids dans le modèle. Dans la commande de sortie, les variables présentes en haut de la liste et avec une valeur d'AIC (Akaike information criterion) faible, ont un poids plus fort que les suivantes.

D'après la régression linéaire multiple, la formule retenue est :

$$lm(formula = H50 \sim tmoy_an + tmax_ete + tmoy_au + prec_ete + rad_et + rad_hi + tmoy_hi + etp_ete + etp_au + etp_hi)$$

Multiple R-squared : 0,3279

Adjusted R-squared : 0,2539

Une fois les variables explicatives détectées et l'absence de corrélation entre elles vérifiée, une représentation graphique sous forme d'arbre de décision est dressée avec ces variables en entrée grâce à la fonction *rpart()*. La Figure 8 présente le résultat.

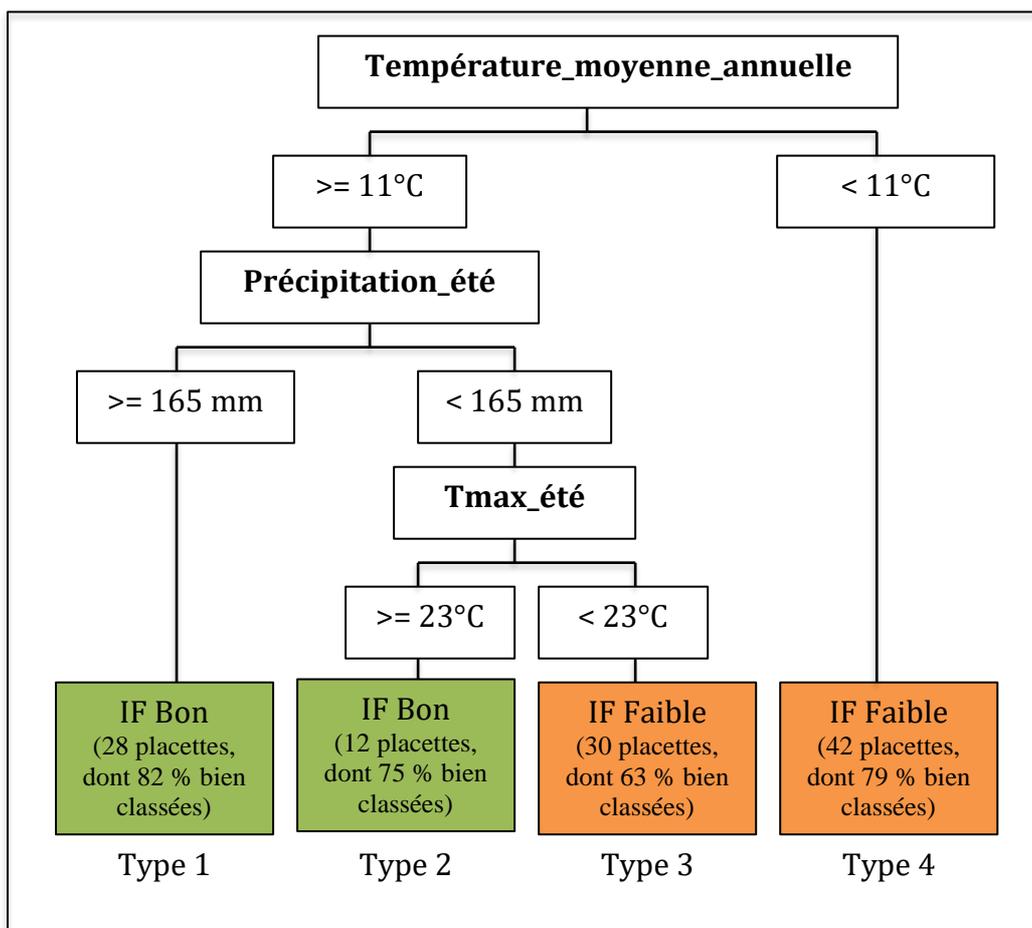


Figure 8 : Arbre de décision présentant les valeurs seuils des variables explicatives de la fertilité pour le chêne rouge d'Amérique et définition des 4 types.
Auteur : Maxime JOURDE

La matrice de confusion est donnée ci-après :

		Modèle prédit		
		IF Bon	IF Faible	SOMME
Modèle réel	IF Bon	32	8	40
	IF Faible	21	51	72
	SOMME	53	59	112

La sensibilité pour la classe de fertilité bonne est de 80 %. Celle pour la fertilité faible est égale à 71%. Le taux d'erreur de ce modèle est lui de 26 %. La valeur de bootstrap est égale à 0,34. D'autres fonctions de création d'arbre de classification ont été testées. La fonction *rpart()* donnant le taux d'erreur le plus faible, a été privilégiée.

Cet arbre de décision indique qu'uniquement des variables climatiques semblent discriminer la fertilité des stations dans notre échantillon de placettes à chêne rouge, avec des facteurs hydriques et énergétiques. La première remarque que l'on peut faire, est le fait que deux des trois variables qui ont le plus de poids dans la discrimination, sont des variables estivales. Ces résultats sont pertinents dans le contexte méditerranéen où la sécheresse estivale et les températures maximales élevées sont des facteurs limitants pour beaucoup d'espèces. En outre, les scénarios météorologiques prédisent une augmentation rapide des températures et interrogent sur les conséquences du changement climatique. D'après ces modèles, la région méditerranéenne sera la première impactée quant à cette augmentation.

Dans le modèle créé, deux groupes se distinguent clairement selon la valeur de la température moyenne annuelle. On y distingue notamment le type 1 qui a une valeur de température moyenne annuelle supérieure à 11°C et des précipitations en été supérieures à 165 mm, et le type 4 qui est défini par une température moyenne inférieure à 11°C. Les types 2 et 3 sont discriminés par un critère supplémentaire. En effet, les 42 placettes définies par ces deux types se localisent sur des stations où la température moyenne annuelle est élevée et où les précipitations en été sont très faibles. La discrimination entre les deux classes de fertilité s'opère au niveau de la température maximale en été. Lorsque cette température est supérieure ou égale à 23°C, alors la fertilité est bonne (type 2). Dans le cas opposé, la fertilité est faible (type 3).

Intéressons-nous au **type 4**, associé à une fertilité pour le chêne rouge faible. La représentation de la localisation géographique des placettes en fonction des quatre types de station définis par l'arbre de décision, indique que sa grande majorité (93 %) est située en Montagne Noire.

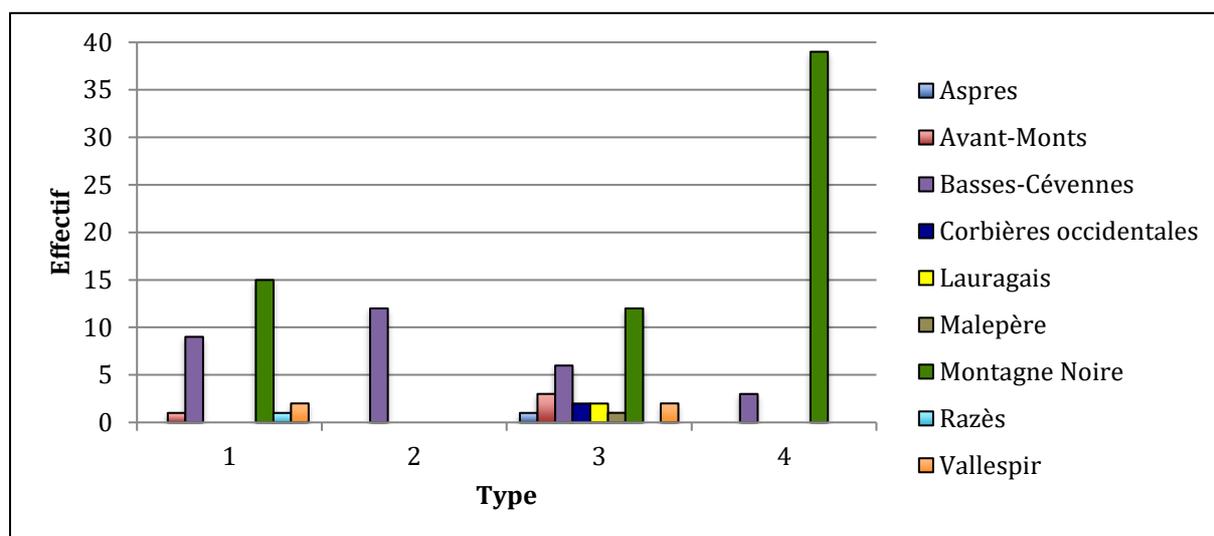


Figure 9 : Localisation des placettes (régions IFN) en fonction des 4 types définis par l'arbre de décision
Auteur : Maxime JOURDE

On suppose par conséquent que cette première discrimination du jeu de données soit définie par le contexte océanique qui règne dans cette zone. Le climat y est frais et humide en hiver et doux en été. Les précipitations sont également plus importantes et mieux réparties tout au long de l'année qu'en contexte méditerranéen. Cependant, la variabilité des hauteurs dominantes à 50 ans (de 13 à 24 mètres) au sein du groupe laisse supposer l'existence d'un autre facteur expliquant la fertilité des stations dans cette région. L'ensemble des variables compensatoires (pente, exposition, topographie, etc..) ont été inspectées, sans présenter de nette différence entre les stations bonnes et les stations faibles. La seule différence notable dans l'échantillon se trouve dans l'étage de végétation. La majorité des bonnes fertilités se situe dans le supraméditerranéen alors que les fertilités moins bonnes se situent dans la partie montagnarde. Cette remarque peut s'expliquer par le besoin de chaleur du chêne rouge tout au long de l'année. Un autre facteur, également à prendre en considération mais dont la nature n'a pas pu être déterminée pour ce stage, est l'origine génétique des plants utilisés en reboisement. En France, trois grandes régions de provenance (décret du 12 juin 2002) proposent des plants de chêne rouge d'Amérique : le nord-ouest, l'est et le sud-ouest. La sensibilité de chaque provenance varie pour les facteurs pédoclimatiques. L'utilisation de plants provenant d'origines différentes pourrait-il expliquer cette variabilité ?

Sur les 28 placettes présentes dans le **type 1**, 20 possèdent des hauteurs dominantes à 50 ans parmi les plus fortes du jeu de données complet. Cette catégorie semble caractériser les stations les plus propices à l'installation de chêne rouge d'Amérique. Géographiquement, ces placettes ne sont pas

regroupées dans une même zone. Au-delà des variables climatiques et géographiques, d'autres facteurs interviennent donc dans la définition de cette fertilité.

Sur cet ensemble de placettes, quatre présentant de très mauvais résultats attirent notre attention et justifient un intérêt particulier pour la poursuite de notre recherche. L'étude de ces stations indique une nette influence de la combinaison de l'exposition et de la position topographique. La croissance en hauteur des chênes rouges semble fortement amoindrie sur les stations exposées au sud, situées en haut de versant ou sur les crêtes. On peut supposer que malgré les précipitations élevées, l'eau ne s'infiltré pas et n'est pas disponible pour l'arbre. Du fait de la position topographique, la profondeur de sol est moindre et représente un handicap pour la prospection racinaire et l'absorption d'eau. Le rayonnement annuel élevé couplé à un déficit en eau peut expliquer une station moins propice à l'essence.

Les critères de détermination des **types 2 et 3** sont étonnants pour le chêne rouge et nous nous sommes intéressés à analyser la présence d'éventuels facteurs compensatoires qui permettent d'expliquer cette distinction.

En effet, selon l'arbre de décision pour le **type 2**, sur une station où les précipitations d'été sont faibles et où la température maximale estivale est élevée ($> 23^{\circ}\text{C}$), la fertilité pour le chêne rouge est bonne. Pour la moitié des placettes comprises dans ce groupe, la hauteur dominante à 50 ans fait même partie des plus fortes mesurées au cours des différentes campagnes de mesures. Selon l'autécologie de l'essence, le chêne rouge craint le manque d'eau dans le sol et les températures estivales trop fortes. Ces conditions climatiques plaçant ces placettes dans la zone limite, nous pouvons nous interroger sur l'origine des facteurs compensatoires qui permettent quand même au chêne de se développer de façon optimale. La Figure 9 indique tout d'abord que la totalité des placettes de ce type sont localisées dans les Basses-Cévennes à pin maritime. Cette première information peut soulever une limite importante. Nous pouvons supposer que ces placettes sont installées spécifiquement sur des stations où les facteurs compensatoires sont très favorables. Cependant, par manque de données, il est impossible d'étudier les particularités de chaque station et donc d'expliquer ces bons résultats dans des conditions climatiques a priori limites.

Ces sites font également partie des plus basses implantations en altitude du chêne rouge dans notre échantillon : La représentation de l'altitude en fonction des quatre types indique que la totalité des placettes du type 2 est comprise entre 250 et 300 mètres d'altitude. La classe 3 au contraire possède un gradient altitudinal beaucoup plus large, avec des valeurs allant de 250 à 1000.

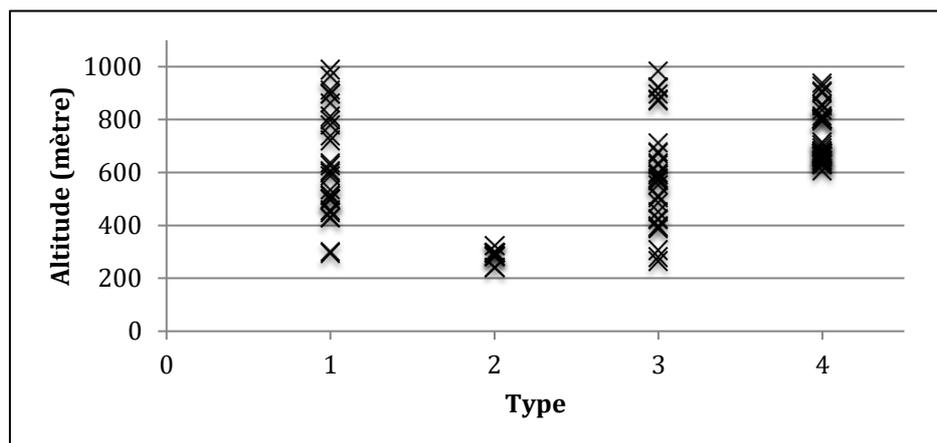


Figure 10 : Altitude en fonction des 4 types définis par l'arbre de décision
Auteur : Maxime JOURDE

Nous pouvons alors nous interroger sur l'influence de ces altitudes sur les variables climatiques locales. Le tableau 4 présente une comparaison des principales variables climatiques entre le type 2 et le type 3.

Tableau 4 : Principales variables climatiques analysées pour les types 2 et 3

Auteur : Maxime JOURDE

Variable	Type 2	Type 3
Altitude	250 – 300 m	250 – 1000 m
Précipitation printemps	290 mm	260 mm
Précipitation automne	550 mm	360 mm
Précipitation hiver	330 mm	290 mm
Température moyenne printemps	12,3°C	10,3°C
Température moyenne été	21,7°C	19,2°C
Température moyenne automne	13,5°C	12,1°C
Température moyenne hiver	5,4°C	4,6°C

Le chêne rouge étant une essence appréciant la chaleur tout au long de l'année, nous pouvons constater que les variables énergétiques sont supérieures dans le type 2. Aussi, d'après les travaux réalisés par Jean Timbal, l'essence redoute les faibles températures en hiver. Le tableau 4 indique que les températures moyennes hivernales sont ainsi plus favorables dans le type 2 que dans le type 3. On remarque également dans ce tableau la supériorité des pluviométries aux trois saisons, notamment à l'automne. Nous pouvons émettre l'hypothèse qu'il s'agit du phénomène permettant au chêne rouge d'avoir des croissances élevées et de supporter le manque de précipitation estivale. Ces bons résultats sont également à rapprocher avec la nature du substrat rocheux. La roche mère étant dans le type 2 composée pour tous les sites de micaschistes et de schistes, nous pouvons supposer que le système racinaire du chêne rouge peut développer ses racines verticalement sans rencontrer de forte résistance. Ainsi, une bonne alimentation en eau du sol avant la période sèche et une bonne prospection du sol par les racines permettrait au chêne rouge de pousser convenablement sur ces stations caractérisées par des conditions climatiques à priori difficiles.

L'exposition semble également expliquer la fertilité des stations. Dans cette catégorie, les meilleures croissances en hauteur se situent au sein des placettes en exposition nord-est et nord-nord-est. Dans la bibliographie, l'USDA indique que dans son aire de répartition naturelle, le chêne rouge préfère en effet ces orientations (USDA, 2003).

En conclusion, dans ce secteur très localisé où les conditions climatiques semblent peu adaptées à la croissance en hauteur du chêne rouge d'Amérique, certains facteurs permettent à l'essence de croître de façon satisfaisante.

Concernant le jeune âge de ces peuplements, une limite est à soulever. En effet, afin de définir les deux classes de fertilité, les hauteurs dominantes ont été rapportées à 50 ans. Ainsi l'incertitude est d'autant plus grande que les placettes sont jeunes. Chez le chêne rouge d'Amérique, la littérature scientifique mentionne une très grande hétérogénéité de croissance entre arbres jeunes et arbres adultes. Cette croissance juvénile étant un des atouts recherchés par les gestionnaires forestiers, il serait intéressant de s'interroger sur la nature des variables expliquant la croissance en hauteur de ces deux classes d'âge. Notre jeu de données ne nous a pas permis de réaliser cette analyse, car leur répartition géographique et les variables de station associées ne sont pas également réparties dans notre échantillon.

La localisation géographique nous amène aussi à nous interroger sur la possibilité d'une explication de ces bons résultats en lien avec l'origine génétique des chênes. Pour cette étude, nous ne disposons pas d'information sur la provenance exacte des plants dans chacun des sites étudiés. La provenance SO, issue de peuplements du sud-ouest de la France était généralement utilisée à cette époque en Languedoc-Roussillon, mais il est possible qu'une pépinière locale, approvisionnant les reboisements du secteur, disposait de graines issues de peuplements particulièrement adaptés à ces conditions.

Une particularité du **type 3** est la grande variabilité de l'indice de fertilité entre les plantations du groupe. En effet, pour les 30 placettes regroupées dans cette catégorie, les hauteurs dominantes à 50 s'étalent de 15 à 25 mètres. La Figure 9 présente des localisations très diverses pour les placettes du type 3. En effet, contrairement aux trois autres classes, ces peuplements se situent aussi bien dans la Montagne Noire, que dans les Cévennes et dans les Pyrénées. La grande hétérogénéité de hauteur peut être causée par les conditions pédoclimatiques locales ou par la provenance génétique des plants utilisés pour les reboisements.

Les meilleurs résultats dans ce groupe s'observent sur des substrats à granite ou grès. Mais le principal facteur affectant la croissance en hauteur des arbres dans les sites appartenant à ce type est la réserve utile. En effet, la totalité des peuplements avec les plus faibles hauteurs dominantes à 50 ans se trouvent sur des stations où la réserve utile est inférieure à 60 mm. Ce facteur est à relier avec les variables climatiques de l'arbre de décision et celles présentées dans le Tableau 4. Sur les placettes de ce groupe, même si les précipitations à l'automne et au printemps sont relativement conséquentes, la faible réserve utile ne permet pas d'optimiser le stockage de l'eau qui pourrait être disponible. Ainsi, dans cette catégorie climatique, les résultats semblent dépendre directement des potentialités des sols (et sous-sols) et de leur capacité à disposer d'une bonne réserve utile. Bien sûr, l'hypothèse développée ici est à prendre avec précaution. Les valeurs de RU ont été calculées à partir de l'analyse d'une fosse pédologique manuelle et ne définissent pas avec précision la réserve en eau du sol. Des analyses de fosses profondes sont nécessaires pour déterminer avec une meilleure précision les caractéristiques pédologiques de la station et leur capacité de compensation d'une pluviométrie insuffisante.

II.2/ Analyse complémentaire : Comment se positionnent les peuplements par rapport au module BioClimSol ?

Dans ce paragraphe, il est question de tester les résultats fournis par le modèle BioClimSol, développé par l'IDF. Cet outil est conçu pour aider les gestionnaires forestiers quant au choix des essences à utiliser en reboisement en tenant compte des incertitudes et aléas climatiques futurs.

« *BIOCLIMSOL est un outil ayant pour objectif de spatialiser des zones de vigilance climatique spécifiques à chaque essence dans un contexte de climat changeant. Cette cartographie des zones de vigilance climatique, couplée à une analyse indispensable de la station et du peuplement, propose in fine des recommandations sylvicoles pour la gestion des peuplements sur pied ou des reboisements en tenant compte du changement du climat.* » (Lemaire, 2014).

Le projet étant toujours en cours de conception, uniquement un des modules de l'application a pu être utilisé. Le module boisement se présente sous la forme d'un tableur Excel qui, en fonction des valeurs prises par six variables climatiques, attribue un niveau de vigilance pour l'utilisation de l'essence en reboisement.

Trente-quatre essences, dont le chêne rouge d'Amérique, ont fait l'objet de recherches pour être intégrées dans l'outil. Pour chacune des essences, les caractéristiques climatiques de l'aire de répartition naturelle sont utilisées afin de déterminer dans quelles limites l'essence est viable. Ces valeurs limites sont alors définies comme seuil pour expliquer la présence ou l'absence de l'essence. Les variables climatiques considérées et les seuils de chacune pour le chêne rouge sont donnés dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Variables climatiques prises en compte dans le module boisement de l’outil BioClimSol et les valeurs seuils associées.

Auteur : Maxime JOURDE

Variables climatiques	Observations	Valeurs seuils
P-ETP_0410	P-ETP entre le mois d’avril et le mois d’octobre inclus	-250 mm
TM_an	Température moyenne annuelle	7 °C
TN_03	Température minimale au mois de mars	-10 °C
P-ETP_0608	P-ETP entre les mois de juin et d’août inclus	-210 mm
TX_0608	Température maximale entre les mois de juin et d’août inclus	26 °C
P-ETP_0509	P-ETP entre les mois d’avril et de septembre inclus	-240 mm

L’opérateur, en saisissant les valeurs des variables climatiques relevées sur la placette, obtient un niveau de vigilance par essence. Les trois niveaux de vigilance indiqués sont : zone de vigilance modérée en vert (essence actuellement dans sa niche climatique naturelle), zone de vigilance élevée en jaune (essence hors de sa niche climatique naturelle dans un contexte de réchauffement climatique de +1°C) et une zone de vigilance maximale en rouge (essence actuellement hors de sa niche climatique naturelle).

DIAGNOSTIC SUR BASE DES MOYENNES TRENTENAIRES 1981-10 +1°C						
Parcelle	P-ETPveg (mm par saison de végétation 04 à 10 inclus)	Température moyenne annuelle (°C)	Moyenne des températures minimales de mars	P-ETP mois les plus chaud (mm de 06 à 08 inclus)	Moyenne des températures maximale de juin à août (°C)	P-ETP mois 0509 (mm de 05 à 09 inclus)
	P_ETP410_81	TMAN	ATN03_81	P_ETP68_81	TX0608	P_ETP59_81
Parcelle	141	9,5	1,7	-220	23	-22
Alisier torminal	-460	8	-2	-290	28	-420
Aulne glutineux		7	-4			
Bouleau vert/peupx	-200	0	-15	-170	24	-210
Gledite de l'Atlas	-500	9	-2	-380	29	-400
Châtaignier commun	-270	9	-1	-220	27	-280
Chêne liège	-500	12	4	-380	33	-500
Chêne pédonculé	-250	7	-7	-210	26	-250
Chêne subcespenc ventid	-340	9	-2	-270	28	-370
Chêne rouge d'Amérique	-250	7	-10	-210	26	-240
Chêne sessile validé	-280	8	-2	-240	27	-280
Chêne vert	11	3				
Cormier	-500	9	0	-350	29	-490
Douglas vert (plantation France)	-250	5	-5	-210	25	-260
Epicéa commun	-130	-9	-28	-140	23	-160
Erable champêtre	-300	7	-6	-260	26	-330
Erable sycamore	-260	7	-3	-210	26	-260
Frêne commun		6	-7		26	
Hêtre commun	-200	6	-3	-180	25	-200
Mérisse d'Europe	-50	2	-7	-60	23	-70
Merisier	-270	7	-3	-210	26	-270
Noyer cendré	-170	7	-7	-170	26	-200
Noyer noir	-280	9	-3	-230	26	-290
Orme lisse		2	-10		27	
Peuplier tremble		2	-12		26	
Pin maritime	-500	10	2	-380	29	-500
Pin noir	-500	7	-3	-370	29	-500
Pin taeda	-290	11	3	-210	26	-280
Poirier sauvage	-330	7	-7	-240	27	-330
Pommier sauvage	-340	6	-7	-250	27	-330
Robinier faux-acacia	-270	9	-2	-210	27	-270
Sapin pectiné	-140	5	-5	-130	24	-160
Thuja géant	-260		-9,1	-260	27	-310
Tilleul à grandes feuilles	-260	7	-2	-210	26	-270
Tilleul à petites feuilles	-280	6	-11	-210	26	-280

Figure 11 : Visuel du module boisement de l’outil BioClimSol

Auteur : Maxime JOURDE

Pour cette analyse, l’ensemble des placettes a été testé selon cet outil. Les niveaux de vigilances obtenus sont recensés dans le Tableau 6. Un traitement sur les valeurs actuelles a été appliqué afin de simuler l’augmentation de température de 1°C. Dans l’objectif de juger de la potentialité des stations de la région, il a été choisi de recenser les placettes selon leurs classes de fertilité. Dans le but de gagner en précision sur la caractérisation des stations, le choix a été fait de diviser le jeu de données non plus en deux, mais en quatre classes de fertilité : Indice de fertilité très bon, bon, faible et très faible. Cette subdivision permet de mieux appréhender la variabilité des hauteurs dominantes à 50 ans. La détermination des seuils entre chaque catégorie a été effectuée en divisant l’ensemble des H50 en quatre groupes.

Tableau 6: Nombre de placettes par classe de vigilance selon l'outil BioClimSol

Auteur : Maxime JOURDE

Classe de fertilité	Nombre de placettes		
	Vigilance Verte (Actuellement dans la niche écologique)	Vigilance Rouge (Actuellement hors de la niche écologique)	Vigilance Jaune (Hors de la niche écologique dans un contexte de +1°C)
IF Très bon	7	25	6
IF Bon	15	13	11
IF Faible	13	17	12
IF Très faible	13	9	6

Les résultats obtenus sont surprenants. En effet, d'après la version actuelle du modèle développé par l'IDF, il semblerait que la grande majorité des stations avec une très bonne fertilité aujourd'hui soient hors de la niche écologique du chêne rouge dans son aire naturelle. Sur les 32 placettes de la classe de fertilité la plus forte, 25 se situent d'ores et déjà dans la classe de vigilance rouge. Mais ce résultat n'est pas surprenant vu les seuils fournis pour chaque variable et les valeurs actuelles très fortes. Pour les autres fertilités, la répartition entre les deux classes de vigilance est homogène et ne fait pas ressortir de tendance générale.

Une remarque intéressante, afin d'étudier l'adaptation de l'essence au changement climatique, concerne les placettes classées en vigilance jaune. On constate que la grande majorité des stations actuellement comprises dans la niche écologique de l'essence (vigilance verte), le restent dans l'hypothèse d'une prévision d'augmentation de température moyenne de 1°C. Dans l'ensemble des cas où la placette sort de la niche écologique, la variable responsable est le déficit hydrique climatique estival (P-ETP_été). Cette variable semble affecter majoritairement les stations à fertilité très faible (7 placettes sortent de la niche climatique naturelle). D'une manière générale, nous pouvons supposer qu'avec des valeurs actuelles déjà très fortes, leur augmentation fait sortir le chêne rouge de sa niche écologique.

Ces résultats sont à considérer avec une très grande vigilance. En effet, de nombreuses approximations ont été faites pour pouvoir mobiliser le travail en cours de conception et il subsiste des incertitudes. Tout d'abord, le modèle utilisé n'a pas encore fait l'objet d'une validation sur le territoire français. Les données manipulées dans ce module proviennent uniquement de données générales extraites d'une base de données américaines. Avant de pouvoir tirer des conclusions sur l'adaptation de l'essence, il est nécessaire de calibrer la donnée à notre contexte géographique. De plus, dans l'analyse précédente, seules des variables climatiques ont été utilisées. Or, pour une étude sur l'adaptation d'une essence à une station, il est primordial de considérer l'ensemble des facteurs aggravateurs ou compensatoires du climat. Les facteurs qui entrent en jeu sont notamment : l'altitude, la topographie, l'exposition, la pente ou encore le confinement. Ces différents facteurs seront pris en compte lors de la mise à jour du module afin d'affiner la prédiction.

De nouveaux outils voient le jour pour aider les gestionnaires à prédire le comportement des essences forestières dans un contexte de changement climatique. Pour toute étude similaire à celle menée au cours de ce stage, le croisement des résultats avec ces modèles sera indispensable pour appréhender la totalité des facteurs intervenant dans l'adaptation des arbres au contexte climatique changeant.

Bilan récapitulatif :

Notre analyse fait ainsi ressortir les résultats suivants :

- Ce sont les variables climatiques qui ressortent en priorité comme discriminantes des résultats de croissance en hauteur (H50) de notre échantillon d'étude.
- La température moyenne annuelle est le 1^{er} paramètre influant dans notre analyse mais elle n'est pas suffisante pour séparer les bonnes et mauvaises performances de croissance en hauteur. Cet indicateur semble marquer une distinction nette entre les stations sous influence océanique et celles sous influence strictement méditerranéenne. Il ressort ainsi que dans l'échantillon étudié, même en station marquée par un climat à caractère méditerranéen, le chêne rouge peut atteindre des croissances en hauteur intéressantes voire très bonnes.
- Dans les stations à influence méditerranéenne, de bons à très bons résultats de croissance peuvent être atteints à partir du moment où le niveau de précipitation durant cette même période estivale dépasse 165 mm.
- L'analyse met également en évidence les bons résultats obtenus dans des stations chaudes (températures maximales d'été > 23 °C), témoignant de la présence de facteurs compensatoires non climatiques (sol et substrat favorables ? matériel génétique différent ? etc.).
- Enfin, elle met également en évidence l'importance pour le chêne rouge, dans un contexte de déficit hydrique estival marqué, des niveaux de pluviométrie au cours des autres saisons. De fortes précipitations à l'automne et au printemps lui permettent d'atteindre de bons niveaux de croissance.

III/ Discussions et perspectives

Les résultats présentés indiquent que dans l'ex-région Languedoc-Roussillon, le chêne rouge a pu trouver sur la période des 4 à 6 décennies précédentes des conditions stationnelles et climatiques adaptées pour croître de façon optimale. En effet, sur les 112 placettes du jeu de données, 33 présentent des hauteurs dominantes à 50 ans supérieures à la meilleure classe de fertilité des tables hollandaises, et 30 % correspondent à des croissances satisfaisantes.

Néanmoins, il apparaît que les conditions climatiques caractéristiques du climat méditerranéen représentent un frein important à la croissance du chêne rouge d'Amérique. En effet, les étés chauds et secs ne permettent pas d'optimiser sa croissance en hauteur. L'arbre de décision de notre analyse statistique indique que les fertilités des stations pour le chêne rouge sont principalement définies par des variables estivales. Une analyse plus détaillée des caractéristiques de chaque groupe de placettes a permis de mettre en évidence le poids très important des facteurs compensatoires ou aggravants du climat. Par exemple, notre jeu de données fait nettement ressortir l'influence de la position topographique et de l'exposition sur la classe de fertilité. Sur un jeu de données plus significatif, et couvrant une gamme plus importante de gradients, il serait pertinent de reproduire l'expérience conduite afin de cerner avec plus de précision l'effet de chaque facteurs compensatoires sur l'accroissement en hauteur.

Ainsi, cette étude montre que le chêne rouge reste une essence envisageable sur certains territoires de l'ex-région Languedoc-Roussillon, et qu'il serait intéressant de prolonger ces analyses pour préciser notamment la nature de caractéristiques stationnelles propices à compenser les difficultés climatiques estivales. Rappelons la nature du jeu de données sur lequel nous avons travaillé et les limites qu'il engendre. Vu ces premiers résultats dans la région, ce réseau de sites pourrait être repris, peut-être élargi, pour un protocole homogène de relevés d'observations, incluant notamment les évaluations de dépérissement, et des analyses de cernes permettant de repérer les signes d'une fragilité ou d'une bonne adaptation aux aléas climatiques récents.

Une limite importante à cette étude est l'absence de renseignements sur la provenance génétique des plants utilisés au cours des différents reboisements, aux différentes périodes et dans les différentes régions. Un travail d'archive a été mené pour tenter de retrouver ces informations, mais en vain.

Des travaux sur la détermination de l'origine génétique des peuplements de chêne rouge en France ont été initiés entre 1980 et 1990. Les premiers résultats concluaient à une grande variabilité de l'origine des peuplements français, sans réellement donner leur provenance géographique. D'autres travaux ont permis de mettre en évidence une adaptation de l'essence en fonction de sa localisation géographique. Dans son expertise, Lanier rapporte que des expérimentations faites en Amérique ont démontré une meilleure résistance à la sécheresse des plants provenant de la partie occidentale de l'aire de répartition (à la frontière du Kansas) et une meilleure résistance au froid des plants provenant de la partie septentrionale (Lanier & al., 1980). Il mentionne aussi le fait que des plants américains installés en Allemagne développent un fort potentiel adaptatif après plusieurs générations. Ces informations, quant à la capacité adaptative du chêne rouge, sont primordiales pour des études sur l'adaptation de l'essence dans un contexte climatique changeant.

Aujourd'hui, dans la liste d'espèces et de matériels forestiers de reproduction éligibles aux aides de l'Etat pour les projets d'investissement forestiers de production, trois provenances sont recommandées : la provenance sud-ouest, l'est et la nord-ouest. Une étude menée par l'INRA a mis en évidence des différences significatives entre ces régions, notamment sur la phénologie (Bennehard, 1997). La proximité de notre zone d'étude avec la région de provenance sud-ouest nous laisse supposer une origine commune entre ces deux territoires. Cependant, nous n'avons aucune confirmation de cette origine, elle-même support d'une variabilité intrinsèque possible. Pour les études futures, nous pouvons espérer que la provenance génétique des plants sera systématiquement consignée dans les archives des boisements, compte-tenu des enseignements qu'il est possible d'en tirer pour le futur.

L'aire naturelle du chêne rouge est extrêmement vaste et permet d'envisager la sélection de matériel génétique plus adapté à certaines de nos conditions de milieu. Un champ de travail pourrait être amplifié dans ce sens pour nos conditions à influence méditerranéenne. Ainsi, un exemple concret très intéressant se dégage de nos données pour illustrer cette proposition. Dans les années 1980, le CRPF a créé une placette de référence visant à étudier le comportement de quatre provenances de chêne rouge d'Amérique dans le département du Gard. Dans des conditions climatiques et stationnelles strictement identiques, des plants venant du nord-est de la France, du sud-est, du département de l'Ain et de Hollande ont été installés sur une ancienne terre agricole. Le site, des Basses-Cévennes à pin maritime, se localise à 300 mètres d'altitude, en milieu de versant, avec une pente de 30 %. Il est orienté au nord-est et le substrat rocheux est composé de micaschiste. Dans l'arbre de décision créé, cette placette appartient au type 2 (Indice de fertilité bon). En effectuant un zoom sur les valeurs de hauteur dominante à 50 ans, on constate qu'il y a de nettes différences. La provenance NE a une hauteur égale à 18,6m ; la provenance SE a une hauteur de 17 mètres ; la provenance de l'Ain a une hauteur égale à 22,9 mètres ; et la provenance hollandaise a une hauteur de 23,7 mètres. Une analyse rapide de ces résultats inciterait à dire que les provenances Hollandaise et de l'Ain sont les plus adaptées au contexte méditerranéen pour développer un bon accroissement en hauteur. Ce critère n'est bien sûr pas le seul à examiner mais il illustre la marge de différence possible et susceptible de servir pour une meilleure adaptation des peuplements. La mise en place et le suivi de plantations expérimentales comme celle-ci permet de faire avancer la connaissance sur les essences et les variétés à préconiser dans les reboisements futurs.

Dans notre région d'étude, le principal constat est le manque d'intérêt actuellement porté au chêne rouge d'Amérique par les gestionnaires forestiers. Très souvent, à cause de l'absence de demande de la part des acheteurs, due à une faible qualité des bois produits, peu ou pas de sylviculture n'est effectuée sur les peuplements. Cette absence de travaux sylvicoles engendre des peuplements composés d'arbres économiquement inintéressants et affecte le potentiel réel de l'essence. Il est donc indispensable d'explorer les autres atouts du chêne rouge d'Amérique afin de valoriser son adaptation dans notre région.

Tout d'abord, l'enjeu bois est indéniable. Sur des stations propices et avec une sylviculture adaptée, le chêne rouge permet d'exploiter des grumes de qualité bois œuvre (Ducouso, 2015). Même si la filière n'est pas très développée en Languedoc-Roussillon, d'autres régions comme le Poitou-

Charentes l'utilisent davantage. Dans une étude sur la qualité de l'essence, le FCBA lui confère de bonnes qualités physiques et mécaniques. Le chêne rouge possède une largeur de cernes élevée et une quantité de fibres importante, qui influent sur la résistance et la durabilité du bois scié. Aussi, il est très peu affecté par la roulure, les nœuds vicieux et la pourriture. Son principal inconvénient est qu'il nécessite un séchage lent et difficile. (FCBA, 2015). Actuellement, le bois de chêne rouge est majoritairement utilisé pour la menuiserie d'intérieur, le placage destiné à l'ameublement et à la décoration d'intérieur. Son usage est déconseillé en extérieur car sa durabilité naturelle reste moyenne (classe de durabilité 4) (Farmer, 1972).

Néanmoins, actuellement, les gestionnaires s'accordent à dire que l'enjeu bois d'œuvre n'est pas la finalité pour cette essence. Sa fonction paysagère et ornementale était la raison première de son introduction en France. L'aspect environnemental semble davantage être la piste à favoriser. En effet, en ajoutant de la diversité, ces reboisements permettent d'améliorer la résistance des peuplements aux parasites et aux maladies, de limiter les risques d'érosion et enfin de modifier la réserve d'eau disponible pour les arbres. Installé fréquemment en bordure de reboisement résineux, son rôle dans la limitation des risques d'incendie n'a pas été prouvé mais ce principe d'hétérogénéité de combustible mérite aussi d'être considéré.

Une autre proposition est d'utiliser le chêne rouge en peuplement mélangé. Dans son aire de répartition naturelle, l'essence est très fréquemment plantée avec des chênes rouges de variété différente ou avec des pins (USDA, 2003). La tendance actuelle des forestiers français est de favoriser les mélanges feuillus-résineux. Le chêne rouge semble parfaitement s'adapter à ce type de pratique. La diversification apportée par ce type de sylviculture possède de nombreux avantages. Elle permet tout d'abord de diminuer les risques sanitaires. Le mélange réduit aussi les risques de perte totale du peuplement à une période où les aléas climatiques sont accentués. Aussi, les forêts en mélange se reconstituent mieux après un sinistre. En effet, il a été prouvé que la résilience des peuplements mélangés est meilleure après une tempête ou un incendie par exemple. Enfin, ces forêts s'adaptent mieux aux fluctuations économiques. Elles permettent de répondre aux opportunités de marché selon le cours des essences. (Les peuplements forestiers mélangés, CRPF Pays de la Loire). Le chêne rouge, avec sa croissance vigoureuse dans le jeune âge, pourrait remplir cette fonction en étant capable d'accompagner le développement de plants résineux.

Ainsi, des projets de reboisement à visée expérimentale ont été mis en place sur le territoire français. Les premières conclusions indiquent que le mélange avec du pin laricio est une combinaison pertinente car les deux essences ont un âge d'exploitabilité voisin. Il permet ainsi de pouvoir récolter chaque essence lorsqu'elle a atteint son optimum de croissance et de valeur sans risquer d'endommager les autres arbres du peuplement (CRPF Pays de Loire). Dans le département du Gers, des mélanges avec le chêne rouge ont été effectués en plantant du pin noir d'Autriche, du cèdre de l'Atlas et du pin laricio de Corse. La croissance juvénile très forte du chêne rouge lui permet de suivre celle des résineux dans les premières années et s'installer rapidement dans l'étage dominant. Les deux essences co-dominantes n'entrent en compétition ni pour la lumière, ni pour les éléments puisés dans le sol. La nature de l'humus et du sol est également modifiée par cette diversité d'essence. La décomposition du mélange d'aiguilles et de feuilles mortes tombées au sol crée un humus plus riche et favorable à la régénération naturelle. L'infiltration d'eau est également favorisée localement, ce qui représente un atout dans une région où les précipitations sont très fortes mais courtes. Le feuillu permet également d'assurer un gainage pour les autres tiges de la plantation.

Les peuplements en mélange visités au cours de ce stage, laissaient supposer une parfaite adaptation de l'essence à ce type de conduite. Les essences associées au chêne rouge étaient le douglas et le cèdre de l'Atlas. Ces peuplements, relativement jeunes, nécessitent un suivi dans le temps afin de s'assurer de la pérennité et de la plus-value de cette combinaison.

Dans la région, le mélange châtaignier - chêne rouge est à proscrire. Le pathogène responsable de la maladie de l'encre (*Phytophthora cinnamomi*) commun aux deux essences, se développerait de manière exponentielle et affecterait l'ensemble de la plantation.

Les principaux inconvénients d'une telle pratique sylvicole sont son installation plus complexe et onéreuse qu'une plantation mono-spécifique, la nécessité d'une surveillance régulière et la difficulté de sortir les bois sans abîmer des tiges encore en cours de croissance.

Un sujet de controverse émerge rapidement lorsque la proposition d'insérer une essence allochtone et invasive est faite. Le chêne rouge d'Amérique a en effet un potentiel colonisateur important. En dépit de ses capacités de dispersion réduites, ce dernier peut localement s'étendre de proche en proche, former des peuplements denses et concurrencer la végétation indigène (Forêt Wallone, 2002). Cependant, de nombreux gestionnaires forestiers affirment qu'un suivi régulier et une sylviculture adaptée permettent de contenir cet aspect invasif. Pour les propriétaires de peuplements déperissants, cette caractéristique est un atout. En effet, ces essences relativement plastiques peuvent se disséminer et se régénérer spontanément à la place des arbres en fin de vie. Vouloir reboiser, plant par plant, un peuplement de plusieurs dizaines d'hectares seraient beaucoup trop onéreux. Si cette essence se révèle adaptée à l'influence méditerranéenne, elle représente alors pour eux une alternative intéressante. La présence d'une régénération naturelle vigoureuse a été vérifiée sur l'ensemble des placettes visitées. Cette régénération est issue aussi bien des rejets de souche que de la germination des graines tombées au sol. Il est extrêmement fréquent de voir le sol recouvert de très jeunes pousses. La plupart d'entre elles, très appétentes, sont mangées par le gibier. Cependant, la présence de tiges de différentes tailles dans le sous-étage indique une survie convenable de ces pousses et un renouvellement probable de la plantation.

Le chêne rouge d'Amérique n'est pas la seule essence « atypique » qui a été utilisée en reboisement dans le Languedoc-Roussillon au cours du siècle dernier. D'autres essences allochtones ont fait leur apparition dans les peuplements régionaux. Dans la plupart des cas, ces introductions ont été réalisées sous l'impulsion de propriétaires forestiers conscients des conditions climatiques difficiles pour leurs peuplements. Souvent, ces essences ont été plantées à titre expérimental, sous forme d'îlots ou de placeaux, et ne couvrent pas des surfaces importantes. Ces reboisements sont récents ; certains d'entre eux font l'objet de suivis scientifiques (INRA, FCBA, IDF, CNPF), mais ils n'ont encore fait l'objet d'aucune étude globale approfondie concernant l'adaptation de ces essences aux conditions pédoclimatiques de la région. Dans l'objectif de prendre connaissance de la nature et de la diversité des essences utilisées en reboisement dans la région des Basses-Cévennes, une visite de l'arboretum de la propriété de Bannières (30) a été effectuée. Le rapport de cette sortie est présenté en Annexe 8. L'objectif de ce travail, parallèle à mon étude sur le chêne rouge d'Amérique, permet de mettre en évidence l'existence d'une grande diversité d'essences qui semblent adaptées au contexte méditerranéen et qui pourraient faire l'objet de travaux identiques à celui réalisé au cours de ce stage.

Conclusion

Depuis son introduction en France, au titre d'arbre de reboisement forestier, le chêne rouge d'Amérique a fait l'objet d'expérimentations très ponctuelles. Malgré une bonne adaptation au contexte climatique français et les bons résultats de croissance, mis en évidence par de nombreuses recherches dans les années 1990, cette essence semble avoir peu à peu été mise de côté. Face aux interrogations des propriétaires et gestionnaires forestiers quant aux essences à utiliser dans leurs reboisements compte-tenu du changement climatique actuel, le CNPF a souhaité faire le bilan des introductions de chêne rouge d'Amérique dans l'ex-région Languedoc-Roussillon. L'étude de ces plantations montre que le chêne rouge est une essence relativement plastique, apte à produire des tiges de bonne hauteur dans un environnement méditerranéen. Malgré les conditions climatiques difficiles propres à cette région du sud de la France, notre jeu de donnée indique que le chêne rouge peut être employé comme essence de reboisement. Le déficit hydrique estival peut ne pas être un facteur limitant pour lui si les autres saisons disposent de pluviométries conséquentes. Des études de terrain sont néanmoins indispensables pour juger de la fertilité potentielle de la station pour le chêne rouge. Nos résultats confirment que l'essence recherche préférentiellement des sols profonds, aérés avec une bonne alimentation en eau durant la période estivale. Cependant, il a également été mis en évidence que l'essence peut accepter des conditions climatiques arides (précipitations d'été faibles couplées à une température maximale d'été élevée) en présence de facteurs compensatoires (exposition, substrat rocheux).

Néanmoins, les analyses proposées au cours de cette étude sont à considérer avec précaution. En effet, plusieurs limites sont à signaler. Tout d'abord, l'acquisition des données n'a pas été effectuée par un unique opérateur et suivant un même protocole. Quatre campagnes de mesures ont été mises en place, à des périodes différentes, par des équipes différentes et avec des enjeux différents. La multiplication des opérateurs est très certainement à l'origine de biais lors des prises de mesures, difficiles à détecter à la lecture du tableur final. Cependant, le travail sollicité par le commanditaire de ce stage était de rassembler et de valoriser ces travaux qui n'avaient fait l'objet d'aucune analyse. Mon travail a par conséquent consisté à utiliser la matière fournie pour dégager les premières hypothèses.

Les principaux leviers d'améliorations sur cette étude peuvent être résumés en deux points. D'abord, pour une recherche de grande ampleur géographique comme celle-ci, il est indispensable de définir rapidement les objectifs afin de construire un protocole homogène et rigoureux qui sera scrupuleusement suivi par l'ensemble des investigateurs. Puis, afin d'avoir une vision complète des plantations, d'autres renseignements sont primordiaux. Nous pouvons par exemple citer : la provenance génétique, le type de peuplement, les modalités d'installation, les densités initiales ou encore les travaux sylvicoles effectués. L'étude de ces informations peut en effet permettre d'expliquer les résultats obtenus. Dans cette thématique de changement climatique et d'adaptation des essences à une modification, il serait également intéressant de visiter de nouveau les plantations de ce réseau et d'axer l'analyse sur l'étude des dépérissements et des pathologies. Les stations d'installation en Languedoc-Roussillon peuvent éclairer sur les seuils au-delà desquels l'essence peut être envisagée pour les reboisements futurs. Elles ouvrent également un champ de réflexion sur la plasticité de l'essence, et le champ des possibilités génétiques à explorer.

Les plantations analysées témoignent des enjeux divers pour lesquels son introduction était réalisée (objectif « feuillus précieux » pour bois de qualité, boisement de terre agricole, bande coupe-feu dans les reboisements résineux). Aujourd'hui, le chêne rouge demeure toujours une essence à bois de qualité qui pourrait trouver sa place dans la filière bois d'œuvre. Elle a également très probablement un rôle à jouer dans l'atténuation des risques liés au changement climatique en intervenant en mélange dans les reboisements, tant avec d'autres feuillus qu'avec des résineux. L'essence est enfin particulièrement adaptée au mode de gestion irrégulier. Les résultats de cette étude nous permettent de conseiller de ne pas oublier cette essence dans les essais de reboisement à venir sur les stations susceptibles de lui convenir.

Comme mentionné précédemment, le chêne rouge d'Amérique n'est pas la seule essence « atypique » utilisée en reboisement dans la région. Des initiatives locales tentent de mettre en évidence le potentiel adaptatif d'autres arbres pour reboiser les peuplements déperissants. Des campagnes de mesures sont actuellement conduites par le CNPF ou des organismes de recherche. Ces expérimentations tendent d'ores et déjà à montrer la grande diversité d'essences présentes sur le territoire et la vigueur de certaines. Les résultats positifs sur les sapins méditerranéens ou sur l'utilisation de l'aulne de Corse en mélange laissent espérer d'autres perspectives pour les reboisements futurs. Ces initiatives très localisées ne se suffisent pas en soi pour envisager de mettre en place la méthodologie réalisée sur le chêne rouge d'Amérique. Le nombre très faible de placettes par essence est le principal frein à ces études. Cependant, ce recensement s'est focalisé sur l'ex-région Languedoc-Roussillon. Avec la récente fusion des anciennes régions, on peut aisément imaginer que le nombre de placettes par essences grandisse fortement si l'étude est menée à l'échelle de la région Occitanie. Tout en conservant un climat méditerranéen, les gradients étudiés seront d'autant plus importants que la zone d'étude sera vaste. La méthodologie d'analyse développée dans ce rapport couplée à un protocole de terrain rigoureux tel que proposé plus haut semble donc transposable sur ces essences.

Références bibliographiques

BENNEHARD (H.). 1997 - Etude de la structuration géographique et des paramètres de l'héritabilité du chêne rouge d'Amérique (*Quercus rubra* L.). INRA Bordeaux Cestas. Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur des techniques agricoles. 50 p.

BELLIOT (Cédric). 2011 – *Les peuplements forestiers mélangés* – CRPF Pays de la Loire – Consulté le 19 juillet 2017.
<http://crpf-paysdelaloire.fr/content/les-peuplements-forestiers-m%C3%A9lang%C3%A9s>

BREDA (Nathalie), BADEAU (Vincent). 2008 - *Forest tree responses to extreme drought and some biotic events : Towards a selection according to hazard tolerance?*- Comptes Rendus Geoscience 340 - p. 651-662.

CABANNES (Bernard). 1995 – *Compte rendu groupe de travail chêne rouge d'Amérique*.

CABANETTES (Alain), AUCLAIR (Daniel), et IMAM (W.). 1999 - Diameter and height growth curves for widely-spaced trees in European agroforestry – Dans *Agroforestry Systems* – Kluwer Academic Edition – p. 169-181.

CANELLAS (Claire), GIBELIN (Anne-Laure), LASSEGUES (Pierre), KERDONCUFF (Maryvonne), DANDIN (Philippe) et SIMON (Pascal). 2014 - Les normales climatiques spatialisées^[1] Aurelhy 1981-2010 : températures et précipitations - *La Météorologie*, n° 85 - p. 47-55.

CHAMBRE REGIONAL D'AGRICULTURE LANGUEDOC ROUSSILLON – Le Languedoc-Roussillon et la forêt – Consulté le 18 juillet 2017.
<http://www.languedocroussillon.chambagri.fr/languedoc-roussillon/lagriculture-lr/le-contexte-forestier.html>

DELATOUR (C.). 1990 – Dépérissement des chênes et pathogènes – *Revue forestière française*, n°42, p. 182-185.

DEY (Daniel) et PARKER (William). 1996 – *Regeneration of red oak (Quercus rubra L.) using shelterwood systems : Ecophysiology, silviculture and management recommendations* – Ontario : Ministry of Natural Resources – 65 p.

DUCOUSSO (Alexis), LOUVET (Jean-Marc), BATTLE (Marjorie), LE PORT (Samuel). 2006 – *Le chêne rouge d'Amérique en Morbihan (Quercus Rubra L.)* – INRA – Fascicule – 7 p.

FARMER (R.H.). 1975 – *Handbook of hardwoods*. 2nd edition – Her Majesty's Stationery Office – London, UK - 243 p.

FORET ENTREPRISE n° 218 – Numéro Spécial BioClimSol – Septembre 2014 – 64 p.

FORET INVESTISSEMENT - 2017 – Chêne rouge d'Amérique – Consulté le 1^{er} juin –
<http://www.foret-investissement.com/essence/chene-rouge-damerique>

FORET WALLONE – Fiche essence : Le chêne rouge d'Amérique - Consulté le 3 août –
<https://fichierecologique.be/#!/#!%2F>

FRANC (A.) et HOUILLER (F.) 1989 – Etude des relations entre milieu et production : quelques critères de choix de méthodes. Dans: *Station forestière, production et qualité du bois : éléments méthodologique* / M. Buffet, D.Girault (éd.) – Nogent-sur-Vernisson – p. 13-49.

GAUDIN (Sylvain) et RICHARD (Jean-Baptiste). 2014 – Comparaison des dendromètres vertex III et TruPulse 200B pour la mesure de la hauteur totale des arbres. - *Revue forestière française*, vol. LXVI, n° 2, p. 163-181.

GELPE (Jacques), TIMBAL (Jean), COURRIER (G.), ROSSETTO (Philippe). Action du calcaire sur la germination et la croissance du chêne rouge d'Amérique (*Q. rubra* L.). *Annales des sciences forestières*, INRA/EDP Sciences, 1986, 43 (3), p. 397-402.

INSTITUT NATIONAL DE L'INFORMATION GEOGRAPHIQUE ET FORESTIERE. 2016 – La forêt en chiffres et en cartes – Le mémento inventaire forestier – 30 p.

INSTITUT TECHNOLOGIQUE FCBA. 2015 – *Le chêne rouge d'Amérique* – Cormaranche en Bugey – 31 diapositives.

JENNESS (Jeff). 2006 – *Topographic Position Index (tpi_jen.avx) extension for ArcView 3.x, v.1.3a* - Jenness Entreprises.

LA BASTIDE (J.G.A.) et FABER (P.J.). 1972 – *Revised yield tables for six tree species in the Netherlands* – Stichting Bosbouwproefstation « De Dorschkamp » - Wageningen – 64 p.

LANIER (Louis), KELLER (René) et KREMER (Antoine). 1980 – Le chêne rouge (*Quercus rubra* L.) en France – *Revue forestière française*, vol. XXXII, n° 5, p. 419-451.

LE GOFF (Noël), COLIN-BELGRAND (Micheline), MULLER (G.). 1994. Croissance et productivité du chêne rouge dans le Nord-Est de la France. In: *Le chêne rouge d'Amérique* (p. 158-176). Paris, FRA : INRA Editions.

LEMAIRE (Jean). 2014 – BioClimSol : acquis, apports, limites – *Forêt entreprise* n° 218 – p. 7-13.

LYFORD (Walter). 1980 – *Development of the root system of northern red oak (Quercus rubra L.)* – Harvard : Harvard University – 32 p.

NAGELEISEN (Louis-Michel). 2005 - Dépérissement du Hêtre : présentation d'une méthode symptomatologique de suivi - *Revue Forestière Française* vol. LVII, n° 2, p. 255-262.

NAGELEISEN (Louis-Michel) et GOUDET (Morgane). 2011 – *Manuel de notation des dommages forestiers (symptômes, causes, état des cimes)* – Département de la santé des forêts – 49 p.

PARDE (J.) 1956 – Une notion pleine d'intérêt : La hauteur dominante des peuplements forestiers – *Revue forestière française* – Nancy : Ecole nationale du génie rural, des eaux et des forêts – p. 850-856.

PARDE (J.) et BOUCHON (J.). 1988 – *Dendrométrie – Deuxième Edition* – Nancy : Ecole nationale du génie rural, des eaux et des forêts – 328 p.

PIEDALLU (Christian). 2012 - Spatialisation du bilan hydrique des sols pour caractériser la distribution et la croissance des espèces forestières dans un contexte de changement climatique. *Biologie végétale*. AgroParisTech – 281 p.

PIEDALLU (Christian), GEGOUT (Jean-Claude), LEBOURGEOIS (François), SEYNAVE (Ingrid). 2016 - *Soil aeration, water deficit, nitrogen availability, acidity and temperature all contribute to shaping tree species distribution in temperate forests* - *Journal of Vegetation Science* n° 27 – p. 387-399

RAMOND (R.). 1990 – La gélivure des chênes – p. 140-144.

ROSA (Jérôme), RIOU-NIERT (Philippe) et PAILLASSA (Eric). 2011 – *Guide de l'expérimentation forestière. Principe de base. Prise en compte du changement climatique* – Paris : CNPF-IDF – 224 p.

SAINTONGE (François-Xavier). 2007 – L'encre du châtaignier – *Forêts de France* n°506 - DSF – p. 31-32.

SMITHER (Jason). 2005 – Potentialité du chêne rouge d'Amérique dans la Montagne Noire Audoise – CRPF LR – Rapport de stage – 56 p.

TIMBAL (Jean). 1990 – Le chêne rouge d'Amérique : Ecologie et facteurs limitants - *Revue Forestière Française* vol. XLII, n° 2, p. 165-173.

TIMBAL (Jean), KREMER (Antoine), LE GOFF (Noël) et NEPVEU (Gérard). 1994 – *Le Chêne rouge d'Amérique* – Paris : INRA – 564 p.

USDA- 2003 – Northern Red Oak– Consulté le 3 août –
https://www.nrs.fs.fed.us/atlas/tree/RFtreemod_833.html

Liste des contacts

Nom	Fonction	Adresse	Téléphone	Mèl.
ALGAYER Baptiste	Ingénieur d'étude INRA UMR LISAH	Bâtiment 24 2 place Pierre Viala 34060 MONTPELLIER	04.99.61.24.03	baptiste.algayer@supagro.fr
BARRAU Jacques	Responsable UT Béziers-Piémont	2 boulevard Maréchal Leclerc 34500 Béziers	04.67.97.65.53 06.80.41.79.44	jacques.barrau@onf.fr
BECQUEY Jacques	Ingénieur IDF	IDF - CNPF Lyon 175 cours Lafayette 69006 LYON	04.37.24.04.08	jacques.becquey@cnpf.fr
BONNET David	Agent patrimonial UT le Piémont	2 boulevard Maréchal Leclerc 34500 Béziers	06.81.48.62.74	david.bonnet@onf.fr
BOYER Christine	Technicienne CRPF Antenne du Gard	288 chemin Blaties 30140 BAGARD	04.66.60.92.93	christine.boyer@crpf.fr
CABANETTES Alain	Ingénieur de recherche INRA UMR Dynafor	31326 CASTANET-TOLOSAN	05.61.28.50.28	alain.cabanettes@inra.fr
CHABALIER Jean-Christophe	Technicien CRPF. Antenne de l'Aude	CRPF - ZA de Sautès à Trèbes 22 rue de l'Industrie 11878 CARCASSONNE	04.68.47.64.25 06.73.84.89.20	jean- christophe.chabalier@crpf.fr
CHARTIER Michel	Animateur SIG, données et R&D cartographique	13 avenue des Droits de l'Homme 45921 ORLEANS	02.38.71.90.62	michel.chartier@cnpf.fr
COULOUMA Guillaume	Ingénieur d'étude INRA UMR LISAH	Bâtiment 24 2 place Pierre Viala 34060 MONTPELLIER	04.99.61.30.74	guillaume.coulouma@inra.fr
DAUBREE Jean-Baptiste	Chef du pôle interrégional Sud Est de la Santé des Forêts	Département de la santé des forêts 84141 MONTFAVET	04.90.81.11.21	jean- baptiste.daubree@agriculture .gouv.fr
DECARSIN Laurent	Gestion des propriétés forestières du département	DDTM Aude 105 boulevard Barbès 11838 CARCASSONNE	04.68.11.69.22 06.72.86.79.53	laurent.decarsin@aude.fr

Nom	Fonction	Adresse	Téléphone	Mèl.
DEVAUX Nicolas	Ingénieur de recherche INRA UMR LISAH	Bâtiment 24 2 place Pierre Viala 34060 MONTPELLIER	04.99.61.25.45	nicolas.devaux@supagro.fr
DUCOUSSO Alexis	Ingénieur de recherche INRA Bordeaux	69 route d'Arcachon 33610 CESTAS	05.35.38.53.61	alexis.ducouso@inra.fr
FONTAINE Carole	Chargée de mission itinéraire sylvicole	PNR du Haut Languedoc 1 place du Foirail 34220 Saint-Pons-de-Thomières	04.67.97.38.22	sylv-foreccast@parc-haut- languedoc.fr
FORTIN Mathieu	Enseignant-chercheur INRA UMR LERFoB	Centre AgroParisTech – site Nancy 14 rue Girardet 54042 NANCY	03.83.39.68.71	mathieu.fortin@agroparistec h.fr
GAUDRIOT Sylvain	Agent patrimonial UT Ouest Audois	MF de la Loubatière 11310 LACOMBE	04.68.47.13.35 06.35.29.08.91	sylvain.gaudriot@onf.fr
GIRARD Pierre	Technicien DSF Sud-Ouest	Département de la santé des forêts 84141 MONTFAVET	04.90.81.11.22 06.16.28.27.15	pierre.girard@agriculture.gou v.fr
GRES Emilie	Chef de Projet SIG Agence Aude-Pyrénées-Orientales	61 avenue Georges Guille 11 890 CARCASSONNE	04.68.11.40.26	emilie.gres@onf.fr
HAMELIN Jean-Philippe	Technicien ONF Correspondant Observateur du DSF	55 Bd Clémenceau 66820 VERNET LES BAINS	04.68.05.70.78 06.10.93.48.15	jean-philippe.hamelin@onf.fr
HOUSSET Johann	Chargé de mission projet LIFE Forêt Changement climatique	PNR du Haut Languedoc 1 place du Foirail 34220 Saint-Pons-de-Thomières	04.67.97.38.22 07.84.37.63.61	foret-foreccast@parc-haut- languedoc.fr
LECOMTE Benoit	Ingénieur CRPF	378 rue de la Galéra 34097 MONTPELLIER	04.67.41.68.16 06.74.83.64.11	benoit.lecomte@crpf.fr
LEMAIRE Jean	Ingénieur IDF	IDF – CNPF Lyon 175 cours Lafayette 69006 LYON	02.38.71.90.62	jean.lemaire@cnpf.fr
MAGAUD Jean-Yves	Technicien CRPF Antenne de Lozère	16 quai Berlière 48000 MENDE	04.66.65.26.79	jean-yves.magaud@crpf.fr
MARITON Bruno	Technicien CRPF Antenne des Pyrénées- Orientales	Maisons des vins et des vigneron 19 avenue de Grande Bretagne 66006 PERPIGNAN	04.68.55.88.02	bruno.mariton@crpf.fr

Nom	Fonction	Adresse	Téléphone	Mèl.
NOUGIER Stéphane	Chef de service ONF	8 rue des variétés Résidence le Kheops 66000 PERPIGNAN	04.68.35.77.06	stephane.nougier@onf.fr
D'ORAZIO Jean-Michel	Technicien CRPF Antenne de l'Hérault	Maison de Pays 1 rue de la République 34600 BEDARIEUX	04.67.95.40.76	jean-michel.dorazio@crpf.fr
PEREZ Vincent	Technicien SIG INRA UMR LERFoB	Centre AgroParisTech – site Nancy 14 rue Girardet 54042 NANCY	03.83.39.68.49	vincent.perez@agroparistech.fr
PIEDALLU Christian	Ingénieur de recherche INRA UMR LERFoB	Centre AgroParisTech – site Nancy 14 rue Girardet 54042 NANCY	03.83.39.68.77	christian.piedallu@agroparistech.fr
ROUYER Emmanuel	Ingénieur Forestier Responsable placettes de référence Midi-Pyrénées	7 chemin de la Lacade 31320 AUZEVILLE-TOLOSANE	05.61.75.42.54 06.74.56.31.10	emmanuel.rouyer@crpf.fr
VAUTHIER Denis	INRA PACA. UMR Entomologie et Forêt Méditerranéenne	228 route de l'Aérodrome Domaine Saint Paul – Site Agroparc 84914 AVIGNON	04.32.72.29.07	denis.vauthier@inra.fr

Table des annexes

Annexe 1 : Localisation des placettes en chêne rouge dans le Languedoc-Roussillon

Annexe 2 : Protocole de mesures sur le terrain

Annexe 3 : Fiche de relevé de terrain pour l'étude du chêne rouge d'Amérique

Annexe 4 : Notice d'utilisation de la fiche de relevé de terrain

Annexe 5 : Descriptions des variables utilisées

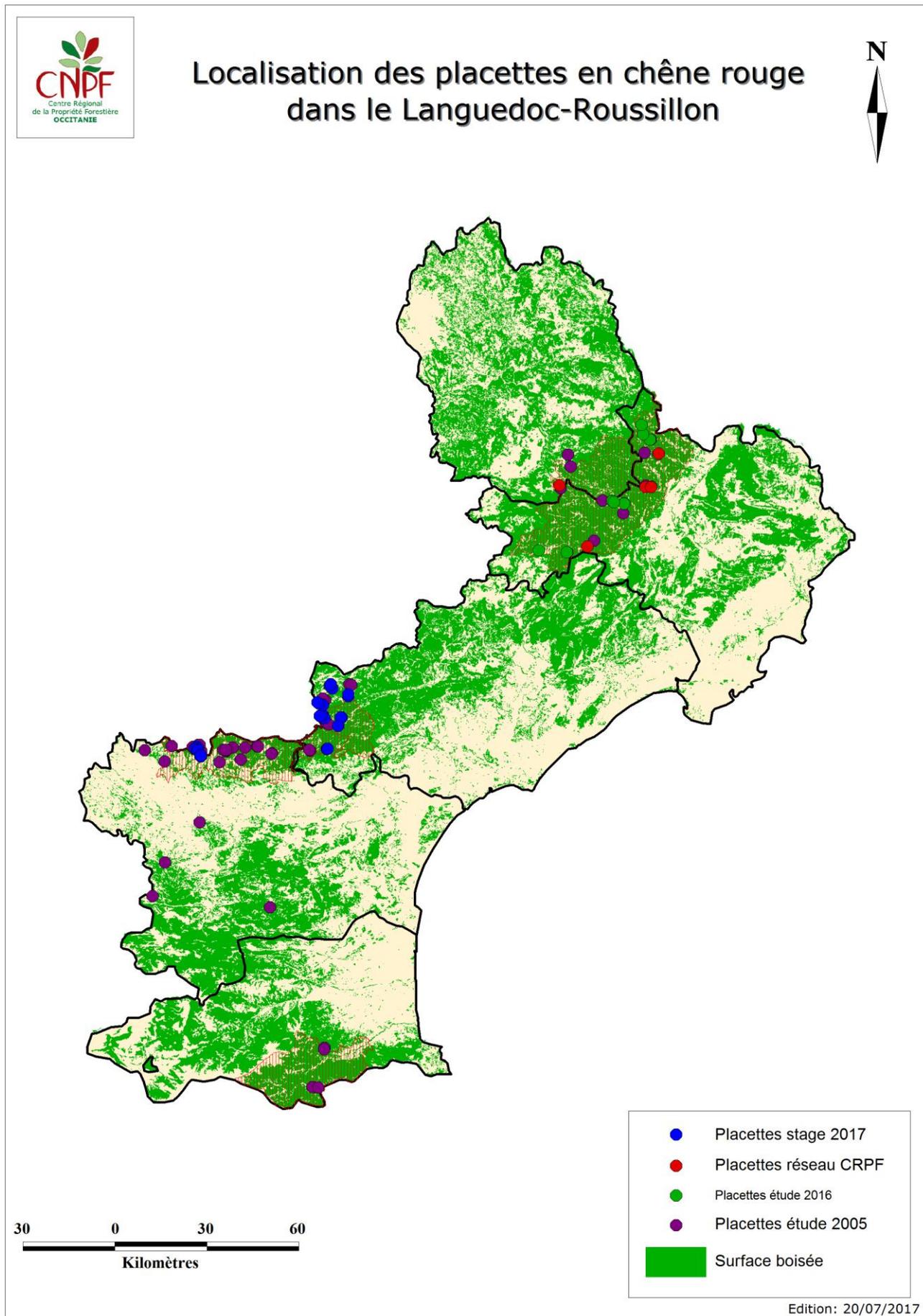
Annexe 6 : Courbes de croissance du chêne rouge et modélisation de la courbe limite des deux classes de fertilité.

Annexe 7 : Principales pathologies mise en évidence sur le territoire d'étude

Annexe 8 : Adaptation des essences au contexte méditerranéen, exemple d'un l'arboretum dans le Gard

Annexe 9 : Principales essences utilisées en reboisement dans la propriété de Mme Bourrely

Annexe 10 : Photographies des essences de l'arboretum



Annexe 2 : Protocole de mesures sur le terrain

Ce document présente le protocole détaillé utilisé afin de compléter la fiche de relevé terrain présentée en Annexe 3 L'essence concernée est le chêne rouge d'Amérique.

Objectifs des mesures :

- Consolider la base de données du CRPF sur le chêne rouge d'Amérique dans l'ex-région Languedoc-Roussillon
- Mettre en évidence l'effet de la station sur la fertilité pour l'essence et sur le développement de pathologies.

Matériel nécessaire :

- | | |
|--|----------------------------|
| - Pioche / Tarière | - Compas |
| - Testeur de pH colorimétrique | - Décamètre |
| - Couteau de pédologie | - Appareil photo |
| - Eau | - Dendromètre TruPulse 200 |
| - Notice d'utilisation de la fiche de relevé | - Topofil |

1. Se rendre sur la placette

Les placettes identifiées sont géo-référencées par des coordonnées GPS en Lambert 93 et WGS 84 depuis le logiciel de SIG. L'opérateur se rend précisément, par navigation GPS, au point d'inventaire ainsi défini.

Ce point représente le centre de la placette. Afin d'éviter les effets bordures, il sera systématiquement choisi pour être situé en **cœur de peuplement**. L'opérateur a la possibilité de se déplacer de quelques mètres du point initial afin de se positionner dans cette condition. Il peut aussi décider de se déplacer légèrement pour définir le centre de la placette s'il estime que le sol ou la microtopographie ne sont pas caractéristiques de la zone dans son ensemble. Une technique potentielle consiste à se fixer un azimuth et un nombre de pas à parcourir avant d'implanter le centre de la placette. Cet azimuth et ce nombre de pas devront être identiques chaque fois que le centre d'une placette nécessite d'être modifié.

2. Prendre les coordonnées de la placette

Dans tous les cas, même si la placette n'a pas été déplacée, l'opérateur prend toujours les coordonnées du point GPS au centre de la placette de mesure et les reporte sur la fiche de mesures. Les coordonnées sont en Lambert 93.

3. Définition des limites de la placette

Les placettes réalisées dans cette étude sont des placettes rectangulaires à surface variable et à nombre d'arbres fixes. Ce choix a été arrêté afin de pouvoir calculer la surface de la placette et ainsi être en mesure de déterminer la surface terrière et la densité du peuplement.

Depuis le centre de la placette, l'opérateur se déplace à environ 15 mètres au nord puis environ 5 mètres à l'est pour se placer entre deux rangs d'arbres. Ce nouveau point représente un angle de la placette. La personne utilise ensuite le topofil, en direction de l'ouest, pour mesurer une largeur du rectangle d'environ 10 mètres pour se situer de nouveau entre deux rangs.

Puis l'opérateur comptabilise 20 tiges de chêne rouge, compris dans cette largeur en se dirigeant vers le centre de la placette. Une fois les 20 arbres définis, l'opérateur se place de nouveau entre deux rangs pour mesurer la longueur du rectangle.

NB : Seuls les arbres de diamètre à 1m30 supérieur à 7,5 cm sont comptabilisés.

La multiplication de la largeur par la longueur (exprimées en mètre) permet de calculer la surface totale de la placette.

4. Description de la station

→ Topographie

Un relevé de la topographie est effectué. Les informations collectées sont les suivantes :

- Situation topographique
- Bilan en eau (Départ vs Arrivée)
- Topographie stationnelle
- Confinement
- Pente (%)
- Exposition

La notice d'utilisation de la fiche de relevé de terrain (Annexe 4) permet d'aider l'opérateur à compléter cette partie.

→ Peuplement

Cette partie du protocole permet de renseigner le type de peuplement, son homogénéité, l'environnement général de la plantation (Bande coupe-feu, plantation en bouquet, bord de route...), si le peuplement est en mélange, et si oui, avec quelle essence ?

Enfin, il est demandé de renseigner la trace de travaux sylvicoles.

→ Sous-étage

Les principales espèces herbacées ou ligneuses présentes en sous-étage sur l'ensemble de la surface de la placette font l'objet d'un recensement. Il est également nécessaire d'indiquer la hauteur des plus grandes espèces.

→ Gibier

Un module du protocole permet de renseigner les indices d'une pression du gibier sur le peuplement. L'opérateur doit donc indiquer s'il perçoit des dégâts sur les arbres liés au gibier, si des protections ont été mises en place et l'état de ces protections.

5. Description du sol

Cette description est effectuée au centre de la placette.

Création d'une fosse à la pioche (40x40x40 cm environ) puis poursuivre par un sondage à la tarière jusqu'à rencontrer le socle ou un obstacle empêchant la progression. Si la profondeur maximale de sol paraît trop faible au regard de la hauteur des arbres du peuplement, il est possible de creuser une autre fosse à deux mètres à l'est du premier trou.

Les étapes de la description sont :

- **Description humus.** Afin de conserver une certaine précision d'informations, sans alourdir le protocole, seulement 3 types d'humus sont renseignés : mor, moder, mull.
- **Mesure du pH** à 10 cm dans l'horizon A. Le pH est mesuré grâce à un testeur de pH colorimétrique.
- **Description des horizons.** Pour chaque horizon, il convient de renseigner : l'**épaisseur** (en cm), la **texture** (défini grâce au triangle des textures de Jamagne), la **charge en éléments grossiers** (en pourcentage), la **présence de racines** et l'**hydromorphie** (attribution d'une note de 0 à 3 comme défini sur la notice d'utilisation de la fiche de relevés).

- **Profondeur d'arrêt** de la tarière (en cm) et cause de l'arrêt : roche mère, bloc rocheux, longueur maximale du manche atteinte.

6. Mesures dendrométriques

Les mesures suivantes doivent être prises :

- **Diamètre à 1m30** des 20 arbres dominants ou co-dominants de la placette. Mesure au demi centimètre près.
- **Hauteur totale des arbres.** Le nombre d'arbres à mesurer dépend de la surface de la placette. En effet, ces mesures permettent de calculer la hauteur dominante du peuplement. Cette hauteur correspond à la moyenne des hauteurs totales des 100 arbres à l'hectare. Dans notre étude, en fonction de la superficie de la placette, le nombre de hauteurs à mesurer est de 3 à 5 tiges. Les hauteurs sont mesurées grâce à un dendromètre TruPulse 200 afin d'obtenir directement la valeur de la hauteur totale.

7. Mesures de l'état sanitaire

L'opérateur évalue ensuite l'état sanitaire des 20 arbres inventoriés. Il est principalement défini par la répartition de la masse foliaire sur le houppier, la présence d'agents pathogènes ou de critères de dépérissement. Les données suivantes sont collectées :

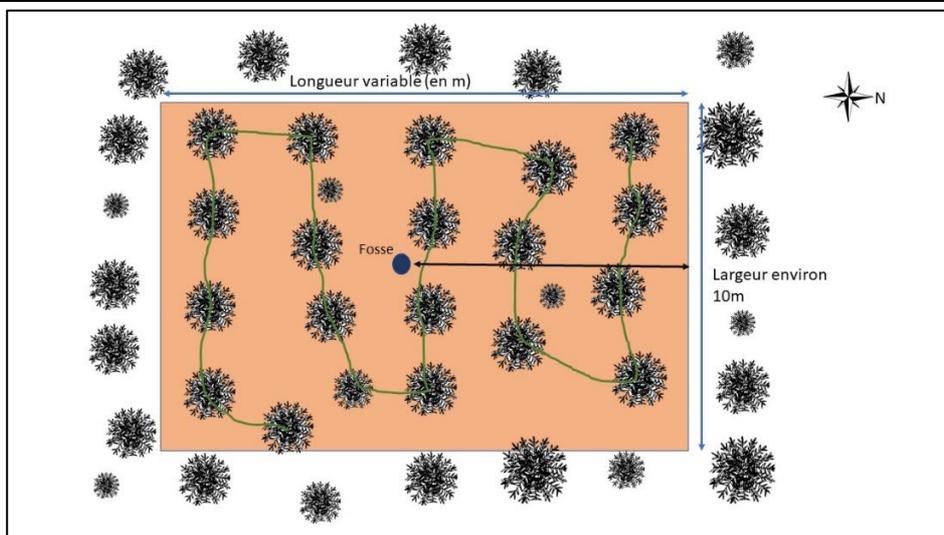
- Rectitude : Droit / Sinueux
- Gélivure : Oui / Non
- Tâches foliaires : Absence de feuillage / Oui / Non
- Traces d'encre : Oui / Non
- Champignon : Oui / Non
- Qualité du feuillage : Absence de feuillage / Présence de fenêtré / Transparence globale / RAS
- Gourmands : Absent / Peu nombreux / Nombreux / Très nombreux

Pour tout caractère anormal, une photographie est systématiquement prise.

8. Photographies de la placette

Des photographies de l'environnement de la plantation, de la fosse pédologique, des troncs, des houppiers et de chaque élément anormal sont pris en photo afin d'immortaliser l'état de la placette au moment de l'inventaire.

9. Schéma récapitulatif



Annexe 3 : Fiche de relevé de terrain pour l'étude du chêne rouge d'Amérique

Placette n°		Auteur		Date	
Région		Département		Commune	
Forêt		Propriétaire		N° PSG	
Coordonnées GPS				Réf. Photos	

Altitude		Exposition		Pente (%)		Confinement (%)	
Précipitation annuelle (mm)				Evènement climatique récent			
Position Topographique	Plateau		Haut de versant			Bilan hydrique	D>A
	Vallon		Milieu de versant				D=A
	Replat		Bas de versant				D<A

Outils fosse	Pioche		Tarière		Humus	Mull Moder Mor		
Profondeur d'arrêt		Roche mère						
Cause de l'arrêt	Volontaire		Contrainte dalle	Bloc rocheux				
Fracturation de la dalle	Continue		Facturé	Non déterminée				
Horizon 1								
Epaisseur		Texture		Charge en EG	<10% 10-30% >50%	Hydromorphie	0 1	2 3
Horizon 2								
Epaisseur		Texture		Charge en EG	<10% 10-30% >50%	Hydromorphie	0 1	2 3
Horizon 3								
Epaisseur		Texture		Charge en EG	<10% 10-30% >50%	Hydromorphie	0 1	2 3

RUM		Espèce floristique dominante	
------------	--	-------------------------------------	--

Remarques :

Type de peuplement	TSF		Futaie irrégulière		Homogénéité	
	Taillis simple		Futaie régulière			
Environnement du peuplement						
En mélange ?	Oui Non	Si oui, quelles essences ?			Comportement	Dominant Co-dominant Accompagn. Nan
Traces de travaux sylvicoles ?		Aucune	Souches	Rémanent		Cicatrices
Nature des travaux sylvicoles						

Sous-Etage					
Espèces				Hauteur (m)	
Gibier					
Dégâts du gibier	Aucun Frottis Abroutissement	Protection	Aucune Indiv. Collective	Etat protection	RAS Endommagée Détruite Enlevée NaN

Placette					
Longueur (m)		Largeur (m)		Surface	
				(m ²)	(ha)

Surface terrière (m ² /ha)	
---------------------------------------	--

Densité (tg/ha)	
-----------------	--

	Diamètre (cm)	Rectitude	Gélivure (Oui/Non)	Taches foliaires (Oui/Non/NaN)	Traces d'encre (Oui/Non)	Champignons (Oui/Non)	Qualité Feuillage	Gourmands	Remarques
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									

Gourmands :
A = Absent
P = Peu présent
N = Nombreux
TN : Très nombreux

Qualité feuillage :
RAS = Correcte
F = Fenêtre
T = Transparence
A = Absent de feuilles

Rectitude :
S = Sinueux
D = Droit

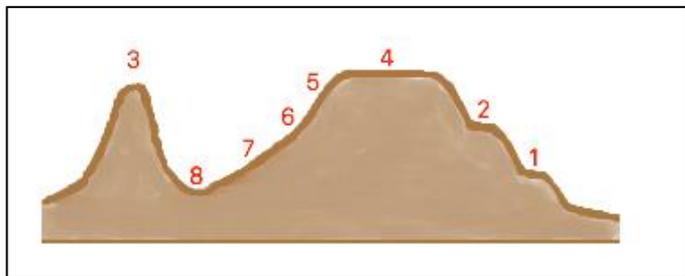
N	D (cm)	Clinomètre			Htot (m)
		%bas	%haut	Dist. (m)	
1					
2					
3					
4					
5					

N = 100*Surface Placette (ha)

N =

=>Do =	
=>Ho =	

Position topographique et bilan hydrique :



Code	Situation topo.	Circulation de l'eau
1	Replat de bas de versant	Arrivée > Départ
2	Replat de haut de versant	Arrivée > Départ
3	Crête	Arrivée < Départ
4	Plateau	Arrivée = Départ
5	Haut de versant	Arrivée < Départ
6	Milieu de versant	Arrivée = Départ
7	Bas de versant	Arrivée > Départ
8	Vallon	Arrivée > Départ

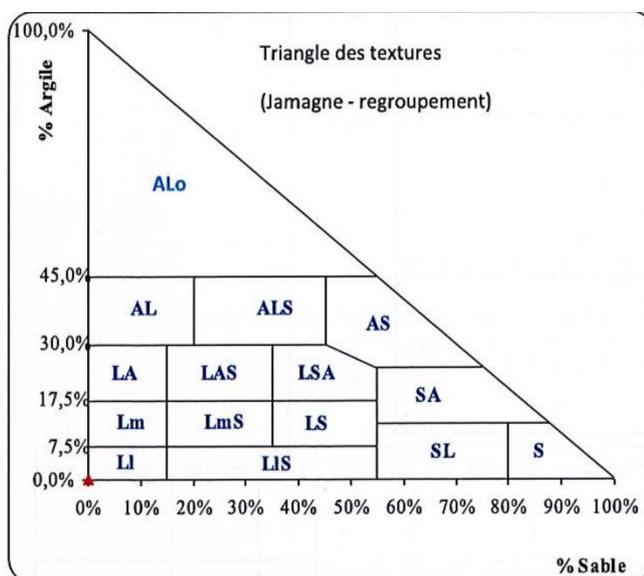
Humus (Jabiol & al) :

Mull : à disparition rapide des litières, liés à une activité notable de vers de terres fousseurs. Constitué d'un mélange homogène de matières organiques bien humifiées et de minéraux.

Moder : à horizons A non ou peu bioturbés, à l'activité animale maximale au niveau des horizons O. Formé de débris végétaux partiellement décomposés.

Mor : sans activité animale. Caractérisé par un horizon F feutré et un horizon H présentant

Texture :



Note hydromorphie : (pour chaque horizon)

- 0 = 0-2 % aucune tâche de rouille ou presque
- 1 = 2-15 % quelques tâches diffuses
- 2 = 15-40 % tâches de rouilles présentes
- 3 = +40 % tâches de rouilles fortement présentes

Type de peuplement :

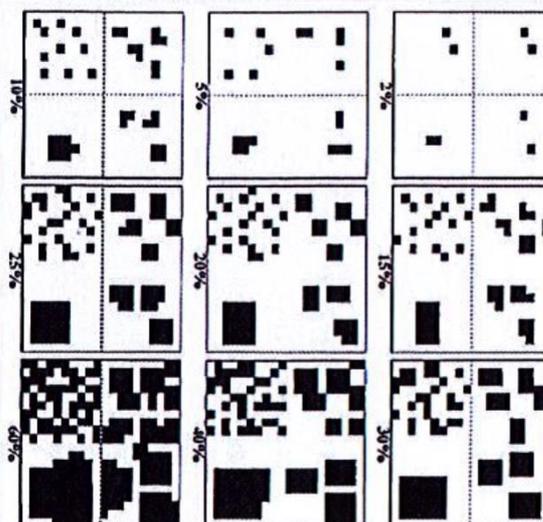
TSF : Peuplement d'origine mixte à deux étages, comprenant un taillis simple et une réserve caractérisée par des arbres de différentes dimensions.

Taillis simple : Peuplement issu de la régénération végétative des arbres par rejets de souches et drageons.

Futaie régulière : Peuplement dont la majorité des arbres a le même âge et est issue de graines ou de plants.

Futaie irrégulière : Peuplement issue de graines ou de

Éléments grossiers :



Annexe 5 : Descriptions des variables utilisées

Nom de la variable	Description	Source
ALTI_25m	Altitude	MNT au pas de 25
ORIdgre	Orientation en degré	MNT au pas de 25
northness	Exposition	MNT au pas de 25
eastness	Exposition	MNT au pas de 25
PENTE%	Pente en pourcentage	MNT au pas de 25
TPI25100	<i>Topographic Position Index</i>	MNT au pas de 25
TOPOMNT	Position topographique	MNT au pas de 25
BILANEUMNT	Bilan en eau	MNT au pas de 25
PhHumus	pH de l'humus	Données de terrain
RU	Réserve utile	Données de terrain
Profondeur_Arrêt	Profondeur d'arrêt de prospection de la fosse pédologique	Données de terrain
Hauteur dominante	Hauteur dominante du peuplement	Données de terrain
H50	Hauteur dominante du peuplement rapportée à 50 ans	Données de terrain
CLASSH50	Classification de la fertilité des stations en fonction de la hauteur dominante à 50 ans.	Données de terrain
Sinueux	Présence d'arbres sinueux (0 ou 1)	Données de terrain
Gélivure	Présence de gélivure sur les troncs (0 ou 1)	Données de terrain
Encre	Présence de trace d'encre (0 ou 1)	Données de terrain
Gourmands	Présence de gourmands (0 ou 1)	Données de terrain
TransparenceF	Présence de transparence foliaire dans le houppier (0 ou 1)	Données de terrain
P_an_AU	Précipitation annuelle	modèle AURITALIS
P_0410_AU	Précipitation entre les mois d'avril et d'octobre	modèle AURITALIS
ETP_an_AU	Evapotranspiration annuel	modèle AURITALIS
PETP_0410_AU	Bilan hydrique climatique entre les mois d'avril et d'octobre	modèle AURITALIS
PETP_0608_AU	Bilan hydrique climatique entre les mois de juin et août	modèle AURITALIS
PETP_0509_AU	Bilan hydrique climatique entre les mois de mai et septembre	modèle AURITALIS
PETP_an_AU	Bilan hydrique climatique annuel	modèle AURITALIS
TM_an_AU	Température moyenne annuelle	modèle AURITALIS
TM_0608_AU	Température moyenne entre les mois de juin et août	modèle AURITALIS
TM_0410_AU	Température moyenne entre les mois d'avril et d'octobre	modèle AURITALIS
TM_pr_AU	Température moyenne au printemps	modèle AURITALIS
TM_et_AU	Température moyenne en été	modèle AURITALIS
TM_au_AU	Température moyenne en automne	modèle AURITALIS
TM_hiv_AU	Température moyenne hivernale	modèle AURITALIS
tmax_ete_DI	Température maximale en été	modèle DIGITALISv1

tmin_hiv_DI	Température minimale en hiver	modèle DIGITALISv1
tmoy_au_DI	Température moyenne en automne	modèle DIGITALISv1
tmoy_et_DI	Température moyenne en été	modèle DIGITALISv1
tmoy_hi_DI	Température moyenne hivernale	modèle DIGITALISv1
tmoy_pr_DI	Température moyenne printemps	modèle DIGITALISv1
P_an_DI	Précipitations totales (mm) annuelles	modèle DIGITALISv1
prec_pr_DI	Précipitation moyenne (mm) au printemps	modèle DIGITALISv1
prec_au_DI	Précipitation moyenne (mm) à l'automne	modèle DIGITALISv1
prec_et_DI	Précipitation moyenne (mm) en été	modèle DIGITALISv1
prec_hiv_DI	Précipitation moyenne (mm) hivernale	modèle DIGITALISv1
rad_pr_DI	Radiation moyenne au printemps	modèle DIGITALISv1
rad_et_DI	Radiation moyenne en été	modèle DIGITALISv1
rad_hiv_DI	Radiation moyenne hivernale	modèle DIGITALISv1
rad_au_DI	Radiation moyenne à l'automne	modèle DIGITALISv1
rad_an_DI	Radiation moyenne annuelle	modèle DIGITALISv1
de_an_DI	Déficit d'évaporation annuel	modèle DIGITALISv1
etp_pr_DI	Evapotranspiration au printemps	modèle DIGITALISv1
etp_et_DI	Evapotranspiration en été	modèle DIGITALISv1
etp_au_DI	Evapotranspiration à l'automne	modèle DIGITALISv1
etp_hiv_DI	Evapotranspiration hivernale	modèle DIGITALISv1
ETP_an_DI	Evapotranspiration annuelle	modèle DIGITALISv1
PETP_0608_DI	Bilan hydrique climatique entre les mois de juin et août	modèle DIGITALISv1
PETP_pr_DI	Bilan hydrique climatique au printemps	modèle DIGITALISv1
PETP_et_DI	Bilan hydrique climatique en été	modèle DIGITALISv1
PETP_au_DI	Bilan hydrique climatique à l'automne	modèle DIGITALISv1
PETP_hiv_DI	Bilan hydrique climatique hivernale	modèle DIGITALISv1

* modèle AURITALIS : modèle combinant AURELHY et DIGITALIS (moyenne trentenaire période 1981-2010). Pas de 50 mètres.

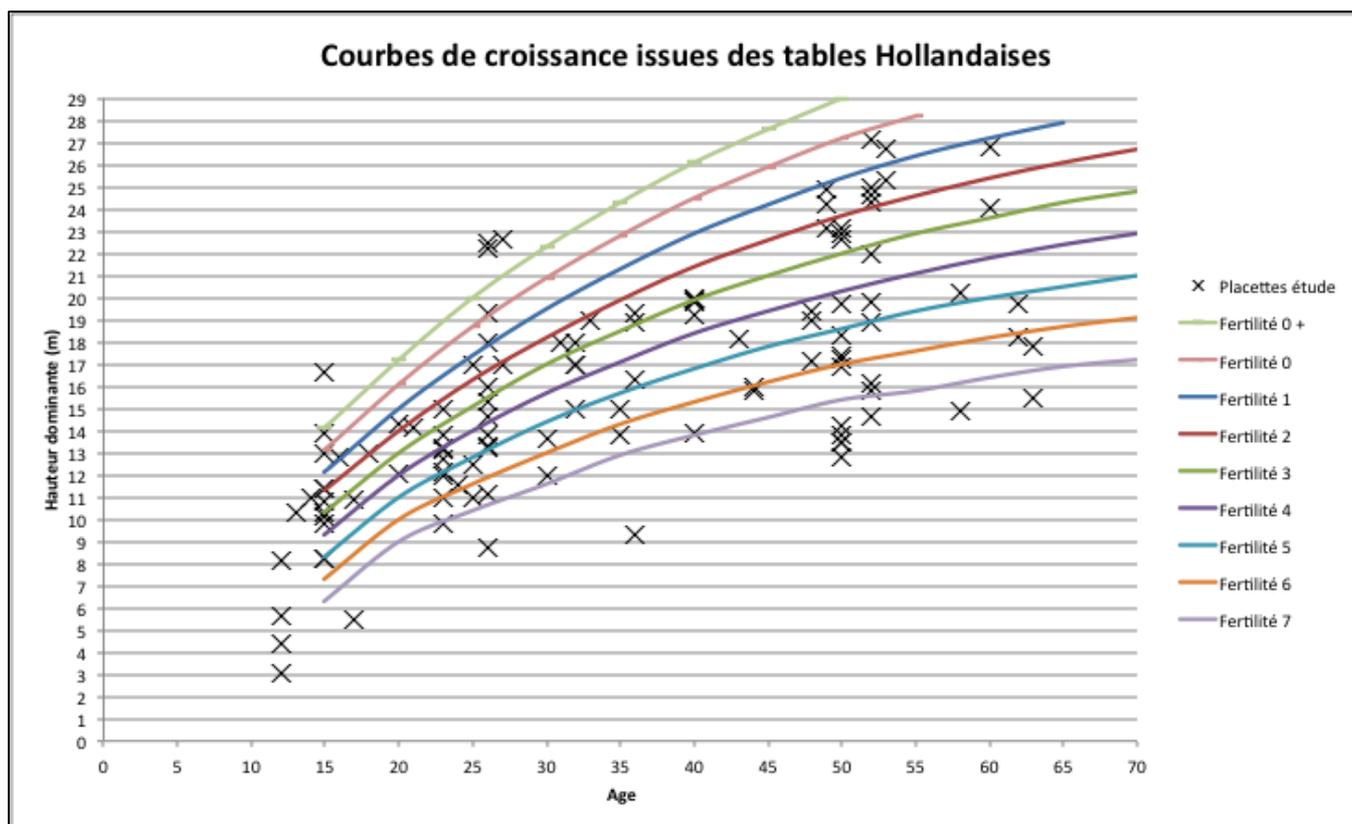
** modèle DIGITALISv1 (période 1986-2010). Pas de 50 mètres.

L'évapotranspiration potentielle (ETP) représente la quantité maximale d'eau que peut restituer dans l'atmosphère un couvert végétal en pleine activité physiologique. Elle est caractérisée à la fois par la transpiration des arbres et l'évaporation de l'eau à la surface du sol et dans le couvert végétal. (Piedallu, 2012)

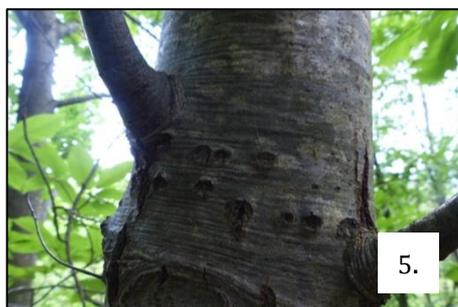
L'évapotranspiration réelle (ETR) caractérise l'eau qui a réellement pu être évaporée ou transpirée en fonction de la ressource en eau disponible.

Le déficit d'évaporation (de) permet de caractériser la demande d'évaporation non satisfaite par l'eau disponible. Il est calculé par différence entre l'ETP et l'ETR. Cet indice permet de définir le risque lié à la sécheresse.

Annexe 6 : Courbes de croissance du chêne rouge issues des tables hollandaises
(Source : La Bastide & al., 1972)



Annexe 7 : Principales pathologies mise en évidence sur le territoire d'étude



1. Taches foliaires, érinose, Sénéchas (30) (photo M. JOURDE)
2. Champignons. Pathogène indéterminé. (34) (photo J.M d'ORAZIO)
3. Gélivure du chêne rouge, Saissac (11) (photo M. JOURDE)
4. Transparence foliaire, Saint-Pons-de-Thomières (34) (photo M. JOURDE)
5. Tronc piqué, Saint-Jean-du-Gard (30) (photo M. JOURDE)
6. Taches foliaires, anthracnose, Sénéchas (30) (photo M. JOURDE)
7. Développement de gourmands, Courniou (34) (photo M. JOURDE)
8. Dégâts de cervidés, Vergounac (34) (photo M. JOURDE)

Annexe 8 : Adaptation des essences au contexte méditerranéen, exemple d'un l'arboretum dans le Gard

Dans l'objectif de prendre connaissance de la diversité des essences utilisées en reboisement dans la région des Basses-Cévennes, d'étudier leur croissance et leur potentialité d'adaptation, une visite de la propriété de Bannières (30) a été effectuée. Cette forêt, de 120 ha, appartient et est gérée depuis 1984 par Mme Bourrely, également vice-présidente du CRPF Occitanie.

La propriété, est située sur la Corniche des Cévennes entre 230 et 630 m d'altitude. Répartie sur les crêtes et sur l'ensemble des versants d'un bassin versant. La totalité des expositions sont présentes. Les terrains sont accidentés avec de très fortes pentes (de 40 à 100 %). La forêt bénéficie d'un climat de transition entre les secteurs de garrigues typiquement méditerranéens et les Cévennes plus montagnardes. Les précipitations annuelles sont de l'ordre de 1500 mm, avec une dominance automnale et un déficit important en été. La température moyenne annuelle est d'environ 12°C. Le socle est principalement composé de schiste et de gneiss. Enfin, les sols sont souvent peu profonds avec une charge en éléments grossiers importante.

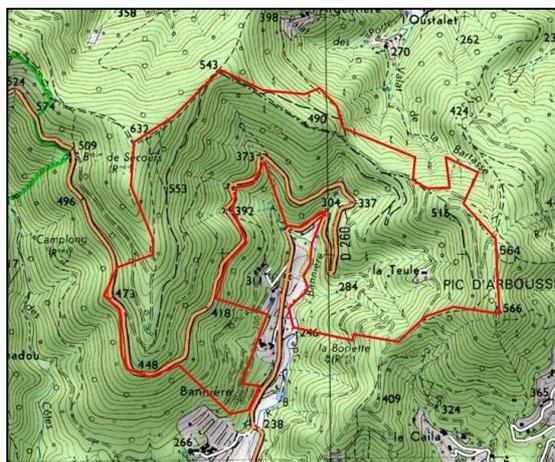


Figure 1 : Limite de propriété de Mme Bourrely
Auteur : Maxime JOURDE

La forêt, historiquement couverte en grande majorité par du pin maritime et du châtaignier, subit de très forts dépérissements. Le châtaignier, présent depuis le 13^{ème} siècle dans la région est aujourd'hui fragilisé par une surexploitation et tend à dépérir de façon irréversible. Afin de lutter contre la mort progressive de sa forêt et convaincue de la nécessité de définir rapidement des essences d'avenir adaptées aux variations climatiques de la région, la propriétaire a mis en place en 1992 un arboretum expérimental de 22 ha. Sur deux grandes parcelles en friches, 65 espèces feuillues et résineuses ont été utilisées en reboisement. Provenant des 5 continents, elles ont été implantées en fonction de leurs besoins en lumière, en sol et en humidité. La liste des essences utilisées et les quantités sont décrites en annexe 9. L'annexe 10 présente une galerie de photos des essences introduites sur cette propriété et laisse constater une bonne vigueur des individus.

Les objectifs de cette initiative sont multiples. Tout d'abord, elle permet de revaloriser les friches agricoles de la châtaigneraie en introduisant une diversité en essences. Le but est d'amorcer une régénération naturelle qui permettra d'améliorer petit à petit les peuplements en place. Cette démarche expérimentale permet, comme dans le cas de ce stage, de pouvoir suivre au cours du temps le comportement d'essences « atypiques » dans un contexte climatique changeant.

L'aspect expérimental était réellement une motivation de la propriétaire lors de la mise en place de ce projet. En effet, sa volonté a été d'utiliser différentes techniques sylvicoles afin de pouvoir comparer leurs effets. Parmi ces essais, nous pouvons citer l'utilisation de plans mycorhizés, l'emploi de provenances différentes pour une même essence, ou encore des travaux préparatoires du sol et des rémanents différents. Par exemple, les rémanents de coupe étaient broyés et intégrés dans le sol afin de jouer un rôle « d'éponge » et d'alimenter l'humus. Aussi, les rémanents de plus gros diamètres étaient mis en andain selon les courbes de niveau dans l'objectif de former des barrages qui accentuent l'infiltration locale et augmentent l'eau disponible pour la plante durant la période la plus sèche.

Présentant un intérêt certain pour les reboisements futurs dans les Basses-Cévennes, cet arboretum a fait l'objet d'une placette de référence du CRPF. Les mesures faites en 2001 et 2006 ainsi que les observations menées au cours de ce stage permettent d'apporter les premières hypothèses quant à

l'adaptation des différentes essences au climat méditerranéen. Le tableau suivant résume les observations faites sur les principales essences de la propriété.

Essences	Observations	Adaptation
Cèdre de l'Atlas	A 10 ans : Arbres sains, pas de défaut de forme. $H_m = 3,80m$ A 15 ans : $H_m = 5,70m$ A 25 ans : Arbres sains, bonne hauteur. Régénération naturelle.	++
Mélèze d'Europe	A 10 ans : Arbres sains, rectilignes. Très faible mortalité (9%). $H_m = 4,75m$ A 15 ans : Arbres sains. $H_m = 6,70m$ A 25 ans : Arbres sains, bonne hauteur. Bon accroissement annuel.	++
Cryptoméridia du Japon	A 10 ans : Arbres sains. $H_m = 2,45m$ A 25 ans : Arbres sains, forte mortalité.	+
Séquoia géant	A 10 ans : Accroissement stagne. A 25 ans : Très forte mortalité (98%)	--
Séquoia sempervirens	A 10 ans : Arbres sains. $H_m = 2,20$ A 25 ans : Arbres sains. Bon taux de survie.	+
Sapin du Colorado	A 25 ans : Très forte mortalité (94%). Survivants de bonne taille.	--
Sapin de Nordmann	A 25 ans : Arbres en bonne santé, bonne hauteur. Bon taux de survie.	++
Cormier	A 10 ans : Arbres en bonne santé. $H_m = 2,55m$ A 25 ans : arbres en bonne santé. Bon taux de survie. Régénération naturelle.	+
Liquidambar	A 10 ans : Arbres en bonne santé. $H_m = 1,50m$ A 15 ans : Bon taux de survie. Croissance très variable. A 25 ans : Arbres en bonne santé, bonne hauteur.	+
Erable plane	A 10 ans : Présence de régénération naturelle, mais arrêt de croissance. A 15 ans : Très forte mortalité.	--
Erable sycomore	A 10 ans : Régénération naturelle, mais arrêt de croissance. A 15 ans : Très forte mortalité.	--
Merisier	A 15 ans : Arbres très bien venant. Régénération naturelle. $H_m = 7,70m$ A 25 ans : Arbres en bonne santé, bonne hauteur.	++
Aulne de Corse	A 15 ans : Hauteur moyenne = 9,45m. Très adapté sur une parcelle où le cèdre dépérit à 10 ans. A 25 ans : Arbres en bonne santé, bonne hauteur. Réagit très bien au mélange avec des résineux. Excellente régénération naturelle.	++

Une conclusion commune aux différentes campagnes d'observation est que la réussite des reboisements en matière de survie des plants et de qualité de la bille de pied est principalement due au suivi du peuplement dans les premières années suivant son installation. Un dégagement régulier de la végétation du sous-étage permet de limiter les risques d'incendie et de concurrence pour la régénération naturelle. Aussi, en fonction des essences, un élagage assez précoce ainsi qu'une taille de formation permettent d'éviter les défauts de branchaison pour obtenir une belle bille de pied sur les premiers mètres.

Les résultats obtenus sur cet arboretum sont très prometteurs. Le taux de survie par bouquet est élevé et les hauteurs moyennes sont convenables. Cette initiative locale, ajoutée aux autres projets présents dans l'ex-région Languedoc-Roussillon, laisse supposer un fort potentiel de ces essences à s'adapter à un contexte méditerranéen changeant. Des études approfondies, similaire à celle effectuée sur le chêne rouge d'Amérique, permettraient de mieux cerner leur autécologie et ainsi les utiliser en reboisement sur les stations les plus propices.

Annexe 9 : Principales essences utilisées en reboisement dans la propriété de Mme Bourrely

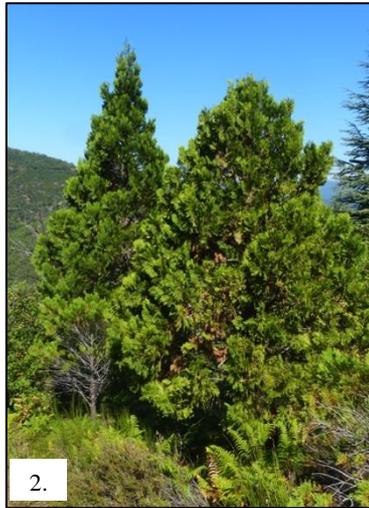
Essence	Quantité de plants initiale
Mélèze d'Europe*	100
Pin pignon	100
Pin de Salzman	88
Séquoia sempervirens*	94
Séquoia géant*	50
Calocèdre	100
Cryptomeria du Japon*	10
Cèdre de l'Himalaya*	100
Cèdre du Liban	10
Pin Laricio de Corse	15
Sapin du Colorado*	35
Cyprès de Lawson	50
Cyprès de l'Arizona	100
Cyprès de Provence	50
Bouleau blanc verruqueux	50
Liquidambar de Formose*	50
Tilleuls à petites feuilles	15

Essence	Quantité de plants initiale
Ginkgo biloba	100
Tulipier de Virginie	100
Chêne rouge d'Amérique	185
Alisier torminal	100
Aulne de Corse*	500
Genévrier oxycède	30
Févier d'Amérique	50
Sorbier domestique	50
Marronnier du japon	20
Alisier blanc	20
Cormier*	20
Chêne liège	20
Cerisier noir	50
Murier noir	50
Merisier*	140
Eucalyptus à feuilles rondes	20
Sapin de Bornwiller	30

*Essences ayant fait l'objet de mesures par le CRPF.

Annexe 10 : Photographies des essences de l'arboretum

- Essences résineuses



- 1 : Sapin du Colorado, *Abies concolor*
- 2 : Calocèdre, *Calocedrus decurrens*
- 3 : Séquoia sempervirens, *Sequoia sempervirens*
- 4 : Mélèze d'Europe, *Larix decidua*
- 5 : Cyprès d'Arizona, *Cupressus arizonica*
- 6 : Sapin de Nordmann, *Abies nordmanniana*
- 7 : Pin pignon, *Pinus pinea*

Auteur : Maxime JOURDE
Date : 18/08/17

- Essences feuillues



1 : Liquidambar de Formose, *Liquidambar formosana*

2 : Aulne de Corse, *Alnus cordata*

3 : Eucalyptus gunnii, *Eucalyptus gunnii*

4 : Tilleul à grandes feuilles, *Tilia platyphyllos*

5 : Peuplier tremble, *Populus tremula*

6 : Bouleau verruqueux, *Betula pendula*

Auteur : Maxime JOURDE

Date : 18/08/17