

# ENSEIGNEMENTS DES PLANTATIONS PASSEES DANS LE CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE



## Domaine d'approfondissement gestion forestière

Présenté par : Bertrand CROISILLE

Stage effectué du 01/03/2017 au 08/09/2017

Au Conservatoire Génétique des Arbres Forestiers de l'Office National des Forêts  
2163 avenue de la pomme de pin, 45075 Orléans CEDEX 2

Maître de stage : Brigitte MUSCH

Enseignant référent : Yves EHRHART

Soutenu le 25/09/2017

Source : T. Lamant

AGROPARISTECH – OFFICE NATIONAL DES FORETS

ENSEIGNEMENTS DES PLANTATIONS PASSEES  
DANS LE CONTEXTE DE CHANGEMENT  
CLIMATIQUE

Domaine d'approfondissement  
gestion forestière

Présenté par : Bertrand CROISILLE

Stage effectué du 01/03/2017 au 08/09/2017

Au Conservatoire Génétique des Arbres Forestiers de l'Office National des Forêts  
2163 avenue de la pomme de pin, 45075 Orléans CEDEX 2

Maître de stage : Brigitte MUSCH

Enseignant référent : Yves EHRHART

Soutenu le 25/09/2017



## Résumé :

Le changement climatique annonce la vulnérabilité de plusieurs essences. Le forestier s'interroge alors sur la résilience des peuplements en place et se pose la question des nouvelles essences. L'autécologie des essences exotiques en France étant limitée, le département Recherche et développement de l'Office National des Forêt souhaite apporter des éléments de réponses. Pour cela, les plantations passées présentent un intérêt et les arboretums scientifiques en particulier. Ils sont situés dans différents contextes écologiques (Méditerranéen, montagnard et océanique) et présentent un matériel génétique important. Notre étude a pour but de mettre en place une méthode de sélection des meilleures essences de chaque arboretum, avec des critères utiles pour le gestionnaire forestier. La détermination de ces critères devra être faite de manière impartiale. Puis, si une essence est sélectionnée dans un arboretum et si elle est présente dans un autre alors nous pourrions tenter d'en déduire des informations sur son autécologie en contexte de changement climatique. Une visite sur le terrain viendra alors vérifier nos résultats, l'état sanitaire des arbres étant nécessaire et absent dans les bases de données. L'étude a conduit à la mise en place d'une méthode qui pourra être appliquée à d'autres arboretums.

## Abstract :

Climate change announces the vulnerability of several species. Then, the forester wonders about the resilience of the existing stands and ask him questions about new species. Since the autecology of exotic species in France is limited, the research and development department of the National Forest Office would like to provide answers. For this, past plantations are of interest and more exactly, scientific arboretums. They are located in different ecological contexts (Mediterranean, mountainous and oceanic) and present an important genetic material. Our study aims to establish a method of selecting the best species from each arboretum, with criteria useful for the forest manager. The determination of these criteria should be made in an impartial manner. Then, if a species is selected in an arboretum and if it is present in another one, then we would try to deduce informations about its autecology in the context of climate change. A field visit will then verify our results, the health status of the trees being necessary and absent in the databases. The study led to the establishment of a method that could be applied to other arboretums.



# 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 sûr d'en citer la source.

## 3) Sanction :

En cas de manquement à ces consignes, le département SIAFEE se réserve le droit d'exiger la réécriture du document, dans ce cas la validation de l'Unité d'Enseignement ou du diplôme de fin d'études sera suspendue.

## 4) Engagement :

Je soussigné Bertrand Croisille

Reconnait avoir lu et m'engage à respecter les consignes de non plagiat

A Orléans, le 09/09/17

Signature : BCROISILLE

## REMERCIEMENTS :

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à l'accomplissement de ce travail.

Tout d'abord, j'adresse mes remerciements à Brigitte MUSCH, ma tutrice de l'ONF, qui a fait preuve d'un management en or tout au long de mon stage. Cela m'a permis de m'épanouir pleinement dans mon travail. Son dynamisme est à prendre en exemple.

Ensuite, je tiens à remercier Thierry LAMANT, du dendrologue au CGAF. Incollable sur les questions de nomenclatures, passionné et enthousiaste, ce fut un réel plaisir d'être en sa compagnie pour visiter les arboretums de l'Office.

Puis, je souhaite vivement remercier Yves ROUSSELLE, mon initiateur au logiciel Rstudio. Sans cette découverte, son accompagnement et son esprit critique, les résultats n'auraient pu être égalés.

Merci à Anthony DUBOIS, pour sa bonne humeur et les très bons moments partagés tout au long de cette expérience.

Merci à Bénédicte Le GUERROUE, pour sa compagnie lors des journées de travail.

Merci également à toute l'équipe du département recherche et développement de l'ONF, pour leur accueil chaleureux, pour les séminaires organisés, pour les connaissances qu'ils m'ont apportées et pour les réunions auxquelles j'ai pu participer. Merci de m'avoir reçu au sein de votre département, ce fut une expérience très riche.

Merci à Yves Ehrhart, mon tuteur AgroParisTech pour son accompagnement, son écoute et ses conseils.

Merci à toutes les personnes de l'INRA, doctorants, stagiaires, permanents et techniciens, pour les repas et cafés joyeusement partagés.

Merci enfin, à ma famille et mes amis pour leur soutien et les week-ends avec eux, permettant toujours de reprendre mon travail avec le sourire.

## TABLE DES MATIERES

Remerciements : .....	1
Table des matières .....	2
Table des figures : .....	4
Table des tableaux : .....	4
Table des annexes.....	4
1 Introduction .....	6
1.1 Contexte de l'étude.....	6
1.2 L'Office National des forêts.....	7
1.3 Les arboretums .....	7
2 Matériel et méthodes .....	9
2.1 Matériel végétal : arboretums scientifiques.....	9
2.1.1 Arboretum en contexte océanique : Roumare .....	9
2.1.2 Arboretums en contexte méditerranéen : Le Caneiret, Plan Esterel, Le Treps.....	11
2.1.3 Arboretums en contexte montagnard : Le col des 3 sœurs et saint-Anastasie.....	14
2.2 Matériel scientifique.....	16
2.2.1 Mesures effectuées sur les arboretums .....	16
2.2.2 Les Fichiers arboretums .....	17
2.3 Méthodes .....	18
2.3.1 Méthode de standardisation Intra arboretum.....	18
2.3.2 Méthode Inter arboretum.....	20
2.3.3 Méthode de sélection.....	21
2.3.4 Méthode de potentialité Inter arboretum : .....	26
3 Résultats .....	27
3.1 Résultats de la création de la base de données .....	27
3.1.1 Niveau Lot de graines.....	27
3.1.2 Résultats Intra arboretum .....	28
3.1.3 Résultats Inter arboretum .....	28
3.2 Résultats de la sélection .....	29
3.2.1 Sélection inter arboretum .....	29
3.2.2 Résultats graphiques des sélections.....	31
3.3 Résultats de la méthode de potentialité .....	35
3.3.1 Résultats généraux.....	35
3.3.2 Résultats graphiques.....	41

4	Discussion .....	44
4.1	Base de donnée Inter arboretum.....	44
4.2	La méthode de sélection .....	44
4.3	Les essences innovantes .....	45
5	Conclusion.....	48
	Bibliographie :.....	49
	Annexes :.....	51

## TABLE DES FIGURES :

Figure 1: Méthode de sélection appliqué à l'arboretum de Roumare pour les gymnospermes .....	25
Figure 2 : Effet lot de graine pour Pinus banksiana sur l'arboretum de Roumare .....	27
Figure 3 : Graphique de circonférence/Hauteur pour les feuillus sélectionnés .....	31
Figure 4 : Graphique de survie juvénile/ survie adulte pour les feuillus sélectionnés .....	32
Figure 5 : Graphique de circonférence/Hauteur pour les résineux sélectionnés .....	33
Figure 6 : Graphique de Survie juvénile / Survie adulte pour les résineux sélectionnés.....	34
Figure 7 : Histogramme du nombre d'arboretum plantés par espèces.....	35
Figure 8 : Histogramme du nombre d'arboretum plantés par espèces.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 10: Graphique de Circonférence/Hauteur pour les feuillus innovants .....	41

## TABLE DES TABLEAUX :

Tableau 1 : Matériel génétique de l'arboretum de Roumare.....	10
Tableau 2 : Matériel génétique de l'arboretum du Caneiret .....	12
Tableau 3 : Matériel génétique de l'arboretum du Plan Esterel.....	13
Tableau 4 : Matériel génétique de l'arboretum du Treps .....	13
Tableau 5 : Matériel génétique de l'arboretum du Col de 3 sœurs .....	15
Tableau 6 : Matériel génétique de l'arboretum de Saint-Anastasia .....	15
Tableau 7 : Tableau des mesures effectuées sur les arboretums .....	16
Tableau 8 : Extrait du fichier placeaux pour l'arboretum de roumare .....	17
Tableau 9 : Seuils arbitraires des critères de sélection pour l'arboretum de Roumare .....	22
Tableau 10 : Tableau de la valeur des critères par la méthode des moyennes .....	23
Tableau 11 : Tableau des seuils des critères de sélection pour les angiospermes .....	24
Tableau 12 : Tableau des seuils des critères de sélection pour les gymnospermes.....	24
Tableau 13 : Résultats de la méthode intra arboretum .....	28
Tableau 14 : Extrait de la base de donnée inter arboretum .....	28
Tableau 15: Résultats de la sélection angiospermes par rapport au matériel génétique initialement présent .....	29
Tableau 16 : Résultats de la sélection angiospermes par rapport au matériel génétique actuellement présent .....	29
Tableau 17 : Résultats de la sélection gymnospermes par rapport au matériel génétique initialement présent .....	30
Tableau 19 : Tableau récapitulatif des taxons qui répondent aux critères de la méthode de potentialité .....	37
Tableau 20 : Tableau de l'état sanitaire des essences potentielles dans les différents contextes.....	39

## TABLE DES ANNEXES

Annexe 1 : Sélection des angiospermes par arboretum.....	53
Annexe 2 : Sélection des gymnospermes par arboretum.....	55
Annexe 3 : Sélection des angiospermes par ordre alphabétique.....	58
Annexe 4 : Sélection des gymnospermes par ordre alphabétique.....	60
Annexe 5 : Plan de situation des arboretums scientifique de l'Office National des Forêts.....	63



# 1 INTRODUCTION

## 1.1 CONTEXTE DE L'ETUDE

Le réchauffement climatique n'est plus à mettre en doute. Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) prévoit en effet des scénarios de hausse de la température moyenne entre 1,1 ° et 6,4 ° C sur une période de 100 ans (IPCC, 2014). En France, sur la base d'un doublement des émissions de CO<sub>2</sub>, en 2060, les températures seront en moyenne supérieures de 2 degrés et les précipitations connaîtront une hausse de 20 % en hiver et une baisse de 15 % en été (Moisselin, 2002). Les impacts de ces changements climatiques sur les végétaux sont certains. Les arbres sont des essences longévives avec des vitesses de migration bien inférieure aux vitesses prédites de modification du climat. Depuis plusieurs années, et notamment après 2003, année d'une sécheresse de forte intensité, de nombreuses essences ont été affectées : le pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) en zone méditerranéenne, le sapin (*Abies alba* Mill.) dans les Alpes du Sud, l'épicéa (*Picea abies* Karst.) (Lebourgeois et al., 2010), le douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) dans les bordures du Massif central et le chêne pédonculé (*Quercus robur* L.) dans de nombreuses zones. Des essences que l'on croyait réputées au déficit hydrique comme les chênes vert (*Quercus ilex* L.) et pubescent (*Quercus pubescens* Willd.), le châtaignier (*Castanea sativa* Mill.) ou le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.), ont aussi été affectées (Riou-Nivert, 2012). Le Département Santé des Forêts a constaté des affaiblissements de la vitalité des peuplements et des dépérissements. De plus, à partir des conditions climatiques futures, des modèles prédisent les aires de distribution potentielle des espèces dans l'avenir. Ceux-ci prédisent tous une régression de leurs aires de répartition quel que soit le scénario (Piedallu C, 2009).

Face à ces changements majeurs, les gestionnaires forestiers ont besoin de revoir leur plan de gestion en intégrant ces nouvelles contraintes. Parmi les différentes solutions possibles pour adapter les peuplements aux changements climatiques qui s'offrent à eux, le choix du matériel forestier est un levier important. Ils ont besoin de connaître la vulnérabilité des essences en place qu'elles soient autochtones ou non et d'avoir à leur disposition de nouvelles essences à mettre en place. De cette manière, ils vont pouvoir diversifier leurs peuplements et les adapter aux nouvelles conditions climatiques (augmentation des températures, changement du régime des précipitations, sécheresses plus fréquentes).

Etre capable de déterminer l'essence compatible avec les conditions actuelles et futures ou de savoir si l'essence en place est susceptible de s'adapter est fondamental pour maintenir une forêt productive. Jusqu'à présent, les gestionnaires forestiers pouvaient pour proposer une essence s'appuyer sur les acquis l'autécologie des essences, définie comme la science des réponses biologiques des espèces aux facteurs abiotiques (climat, sol...). Or ces connaissances pour les essences autochtones sont remises en cause par les changements climatiques et pratiquement inexistantes pour les essences introduites.

Les gestionnaires forestiers sont particulièrement conscients de ces enjeux et de l'importance du choix des essences (Gaudin *et al.*, 2016). Malheureusement, leurs connaissances en la matière, ne leur permettent pas d'assumer cette lourde décision seuls. Il devient donc urgent de renforcer les savoirs dans ce domaine afin de leur proposer des options, de les orienter.

Pour permettre au sylviculteur d'opter pour de nouvelles ressources génétiques dans ce contexte de vulnérabilité de la forêt française face aux changements climatiques, plusieurs options sont disponibles, telles que :

- Rechercher les meilleures provenances des essences autochtones pour une diversification du matériel génétique afin d'enrichir génétiquement les populations locales par migration assistée.
- Diversifier les essences forestières à l'échelle du massif pour favoriser les mélanges, permettant d'atténuer le risque.

Les enjeux sont très importants pour l'Office National des Forêts qui prend une part active à cette réflexion à l'échelle française mais aussi européenne.

## 1.2 L'OFFICE NATIONAL DES FORETS

L'Office National des Forêts est en charge de 1300 forêts domaniales et 15600 forêts de collectivités, soit 25% de la forêt française. Les territoires confiés à l'ONF couvrent 10 millions d'hectares. Ainsi qu'un demi-million d'espaces non-forestiers (dunes, landes, zones de montagnes). Faire vivre et perdurer le patrimoine commun est l'une des missions de l'Office. Assurer sa protection et son renouvellement tout en utilisant à bon escient les ressources que la forêt produit est l'objectif de l'établissement. Mais face au changement climatique, le savoir-faire et les méthodes sylvicoles ne vont pas suffire pour maintenir des peuplements productifs (Paillassa & Perrier, 2017). Le pôle Recherche, Développement & Innovation (pôle RDI) a pour mission d'anticiper ces changements en proposant des options d'adaptation raisonnées et innovantes en valorisant des connaissances existantes. Diagnostiquer la vulnérabilité de l'essence en place, faire évoluer la composition des peuplements, proposer des ressources génétiques adaptées, dynamiser la sylviculture, gérer les risques et suivre les impacts, sont les 5 axes de travail du pôle RDI pour apporter des réponses à la communauté. Le projet RENESSENCE, qui vient d'être initié s'inscrit pleinement dans cette démarche. Son objectif est la mise en place d'un réseau d'expérimentation collaboratives multipartenaire associant les gestionnaires et le département RDI pour l'évaluation de nouveau matériel forestier en fonction de différents scénarios climatiques pour le futur. La finalité de ce projet est d'améliorer la connaissance du comportement des essences et des provenances dans différents contextes bioclimatiques (climat et sols). Afin de sélectionner, le matériel adapté à ces expérimentations et à la forêt de demain, la valorisation du patrimoine génétique existant dans différents dispositifs de recherche est une des démarches adoptées. Les arboretums scientifiques de l'ONF apparaissent alors comme un élément de réflexion central et un outil de travail majeur.

Outre l'analyse des données des arboretums scientifiques, nous nous demanderons en quoi des dispositifs anciens tels que les arboretums scientifiques peuvent-ils contribuer à la mise en place de nouveaux dispositifs pour sélectionner des ressources génétiques adaptées aux évolutions climatiques ?

## 1.3 LES ARBORETUMS

La définition la plus commune d'un arboretum est un parc consacré à la culture expérimentale d'arbres et arbustes en vue d'étudier leur comportement. (Encyclopédie Larousse, 2017).

Les arboretums ont pour objectif principal l'apport de connaissances. Ainsi, les arboretums peuvent être classifiés en 3 différents types. : Les arboretums pédagogiques qui proposent une collection la plus diversifiée possible pour faire appréhender la diversité spécifique arborée à un large public. Des informations sur le pays d'origine, les caractéristiques remarquables y sont souvent disponibles. Un autre type d'arboretum est celui collection. Il peut être assimilé à un zoo ou l'on conserve *ex situ* des espèces menacées d'extinction dans leur milieu naturel. Le dernier type est l'arboretum scientifique qui

rassemble un nombre limité d'espèces mais représenté par un grand nombre de sujets permettant d'évaluer la diversité intra spécifique des essences. Ce dernier type correspond le plus aux besoins des forestiers en apportant des éléments de réponse aux questions qu'ils se posent.

A partir de 2004, un recensement des arboretums à l'ONF a été initié. Il a mis en lumière leur grand nombre (143 arboretums) et leur variabilité tant en termes de date de création (1864 et 2003) que de surface (0,5 à 43 hectares) ou de richesse spécifique. La typologie précédemment exposée leur a été appliquée et une sélection rigoureuse a permis de retenir 15 arboretums (NDS-09-G-1544) d'intérêt national parmi ceux-ci.

Le département RDI de l'ONF et plus particulièrement le Conservatoire Génétique des Arbres Forestiers (CGAF) a focalisé son travail sur les arboretums d'intérêt scientifiques l'objectif étant d'identifier de nouvelles essences permettant d'enrichir notre flore dans le cadre des changements climatiques. Ces arboretums sont situés dans 3 grandes régions biogéographiques françaises : méditerranéenne, océanique et montagnarde. Plus de 400 espèces aux provenances variées ont été plantés. L'originalité de ces arboretums réside dans le nombre important de représentant pour chaque essence, la traçabilité des lots plantés, de l'origine géographique jusqu'à la parcelle et les différentes prises de mesures effectuées. L'ensemble de ces arboretums scientifiques constitue donc un patrimoine expérimental très riche et un outil de travail intéressant à revisiter avec de nouvelles questions scientifiques.

L'enjeu de ce travail est de tester s'il est possible de revisiter des dispositifs anciens créés pour d'autres questions scientifiques, de les analyser en réseau alors qu'ils ont été mis en place indépendamment afin d'éclairer les forestiers sur l'adaptation des essences peu connues aux changements climatiques. Les arboretums scientifiques sont des dispositifs regroupant toutes les caractéristiques permettant de mener à bien ce challenge. Une analyse multi site des arboretums n'a encore jamais été tentée et pourrait permettre de faire avancer la connaissance sur la plasticité des essences contenues dans ceux-ci. De plus, qualifier le comportement d'une espèce dans différents arboretums installés dans des contextes pédoclimatiques différents pourrait permettre d'obtenir de nouvelles données sur son autécologie et d'alimenter de manière étayée les besoins de connaissances pour des fins de reboisement et de diversification de la forêt française.

Dans ce mémoire, premièrement, nous allons présenter l'ensemble des arboretums scientifiques, leurs similitudes et leurs différences puis nous harmoniserons le jeu de données, les dispositifs étant hétérogènes et les données complexes. Puis, nous proposerons une méthode de sélection sans *a priori* avec des critères utiles au gestionnaire. Cette méthode permettra de mettre en lumière les meilleurs taxons de chaque arboretum. Dans cette partie, nous définirons des critères de sélection ainsi que leur valeur.

Dans un deuxième temps, nous comparerons leurs comportements dans les différents arboretums. Nous tenterons alors de proposer une stratégie pour généraliser les résultats obtenus. Et enfin, nous discuterons de l'intérêt de tels dispositifs pour le choix des essences dans un contexte de changement climatique. A partir d'une essence sélectionnée dans un arboretum, pouvons-nous savoir à la vue de son comportement dans d'autres contextes écologiques si elle constitue une essence innovante pour demain ?

## 2 MATERIEL ET METHODES

### 2.1 MATERIEL VEGETAL : ARBORETUMS SCIENTIFIQUES

Nous allons commencer par une présentation des six arboretums scientifiques de l'Office National des Forêts. Mis en place par l'INRA avec l'aide des gestionnaires, aucun n'a été mis en place pour les questions qui nous occupent aujourd'hui. Ils ont été conçus indépendamment mais présentent des similitudes. C'est pourquoi cette présentation sera scindée en trois parties, correspondant aux trois grandes régions biogéographiques françaises dans lesquelles ils sont situés : océanique, méditerranéenne et montagnarde. Le plan de situation de ces arboretums est donné en annexe 5.

#### 2.1.1 ARBORETUM EN CONTEXTE OCEANIQUE : ROUMARE

##### 2.1.1.1 HISTORIQUE ET OBJECTIFS

---

La « ceinture verte » de Rouen est composée de trois massifs forestiers domaniaux : Forêt Verte, Forêt de Rouvray et forêt de Roumare. Dans les années 1960, les usines installées le long des berges de la Seine, qui traverse Rouen, rejettent d'importants volumes de composés soufrés et fluorés. Les retombés atmosphériques de ceux-ci sont la cause de dépérissements (J-C Bastien, 1988) chez le pin sylvestre, le chêne et le hêtre (nécroses foliaires, pertes de production). Les gestionnaires ont alors besoin de ressources génétiques plus tolérantes aux pluies acides.

En 1975, fruit d'une collaboration entre l'INRA (Institut National pour la Recherche Agronomique) et l'ONF, l'arboretum de Roumare est mis en place. L'objectif qui lui est assigné est de trouver des essences de production résistantes aux conditions environnementales. L'arboretum de Roumare est donc, à l'origine, un arboretum d'élimination. Le but est en une quinzaine d'années, d'effectuer un tri des essences les mieux adaptées. (P. Allemand, 1993). Les essences doivent répondre à deux critères : un taux de survie important et des accroissements annuels au moins égaux à ceux des essences auxquelles elles doivent se substituer. Mais, dans la même période, les pouvoirs publics durcirent la réglementation en matière de rejet de polluants dans l'atmosphère et, le taux de particules ayant chuté, l'arboretum a perdu sa vocation initiale. Il a néanmoins été suivi et mesuré depuis sa création, ce qui permet d'en tirer d'autres enseignements.

##### 2.1.1.2 CLIMAT ET GEOLOGIE

---

L'arboretum de Roumare est constitué des trois parcelles : parcelle 62 en forêt domaniale Verte, parcelles 252 et 263 en forêt domaniale de Roumare totalisant une surface de 15,3 ha. Il est installé à

une altitude moyenne de 100 m sur des terrains plats dont le sol est de type brun acide (pH = 4,5), à faible réserve en eau, reposant sur une roche-mère crayeuse.

Le climat est qualifié d'océanique altéré.

D'après la base de données Météo-France, la station de Rouen-Boss, indique sur la période 1981-2010, une température annuelle moyenne de 10°C et un cumul des précipitations de 658,2 mm/an. Des températures annuelles comprises entre 3 et 18°C avec des épisodes hivernaux pouvant atteindre des températures très froides (-17°C en 1985). Les températures moyennes estivales sont assez fraîches (20°C).

Les précipitations sont globalement bien réparties tout au long de l'année (environ 60 mm/mois), avec des petits déficits en avril et août (40 mm/mois), rattrapé en novembre et décembre (80 mm/mois).

### 2.1.1.3 MATERIEL GENETIQUE

48 genres représentent un ensemble de 122 espèces et 293 lots de graines. Pour tenir compte de la variabilité génétiques de chaque espèce, différents lots de graines de la même espèce ont été installés. Chaque lot de graine peut être représenté par un ou plusieurs placeaux. 895 placeaux ont été installés par placeaux unitaire de 20 ou 30 plants.

	Nombre de genres	Nombre d'espèces	Nombre de lots de graines
<b>Feuillus</b>	31	57	98
<b>Résineux</b>	17	65	195
<b>Total</b>	<b>48</b>	<b>122</b>	<b>293</b>

TABLEAU 1 : MATERIEL GENETIQUE DE L'ARBORETUM DE ROUMARE

Les 3 genres les plus représentés en termes d'espèces sont :

<b>Résineux</b>	<b>Feuillus</b>
- genre <i>Pinus</i> 23 espèces	- genre <i>Acer</i> 6 espèces
- genre <i>Picea</i> 12 espèces	- genre <i>Betula</i> 6 espèces
- genre <i>Abies</i> 9 espèces	- genre <i>Fraxinus</i> 6 espèces

## 2.1.2 ARBORETUMS EN CONTEXTE MEDITERRANEEN : LE CANEIRET, PLAN ESTEREL, LE TREPS

### 2.1.2.1 HISTORIQUE ET OBJECTIFS

---

En zone méditerranéenne, le couvert boisé a bien d'autres rôles que la production de bois. Bien qu'elle possède une biodiversité importante, deux problèmes majeurs sont identifiés dans cette région auxquels vont devoir répondre les arboretums : des incendies récurrents entraînant une érosion accélérée des sols (faute de végétation) et des pathogènes comme la cochenille du pin maritime (*Matsucoccus feytaudi*) ravagent les pinèdes. Celle-ci apparaît alors comme fragile et menacée (Y. Rinaudo, 1988). Il semble donc nécessaire de trouver des solutions pour accélérer sa régénération, sa ré-végétalisation et sa production de bois. La loi sur la reconstitution de la forêt méditerranéenne a permis la création des arboretums écologiques forestiers d'élimination. L'objectif était de trouver des nouvelles essences, résistantes aux feux, aux ravageurs et aux conditions climatiques contrastées de la zone méditerranéenne. Ces nouvelles espèces seraient alors utilisées en enrichissement ou en substitution d'espèces autochtones, notamment dans les zones très dégradées.

En 1974 puis en 1976 furent créés respectivement les arboretums du Caneiret et de Plan Estérel dans l'objectif de trouver des substituts à *Pinus pinaster* et lutter contre les incendies. En 1975, fut créé l'arboretum du Treps, également dans l'objectif était de trouver des substituts au pin maritime.

Ce travail a permis, dans les années 90, de fournir une liste d'espèces ligneuses pertinente pour la région (P. Allemand, 1993). Toutefois, une fois les essais remis à la gestion, les arboretums ont continué à être mesurés ce qui permet de les revisiter pour d'autres objectifs.

### 2.1.2.2 CLIMAT ET GEOLOGIE

---

Les arboretums du Caneiret et du Plan Esterel se situent tous deux en forêt domaniale de l'Estérel, dans le Var. Le premier d'une superficie 4 ha, se trouve, entre 260 et 320m d'altitude alors que le second de 7 ha est en situation de plateau à une altitude d'environ 400m. Ils sont installés sur une roche mère volcanique dont le sol pauvre et caillouteux composé de rhyolite amarante avec un mull acide (pH de 5,5) bien structuré.

Le troisième, l'arboretum du Treps, d'une surface de 1,8 ha est situé en forêt domaniale des Maures à 620 m d'altitude. Il est aussi en situation de plateau sur gneiss magmatitique, le sol est plus profond et plus fertile que dans l'Estérel.

Le climat de ces trois arboretums est de type méditerranéen. La base de données Météo-France indique sur la station de Fréjus, situé à une dizaine de kilomètres des arboretums, une température annuelle moyenne de 14.4°C. Les températures maximales estivales peuvent atteindre 40°C et dépasser 30°C pendant plusieurs jours. Les températures moyenne hivernales sont positives, mais des épisodes de froids peuvent arriver, comme en 1985 et atteindre des températures de -10°C.

Le cumul moyen des précipitations annuel est de 825 mm. La répartition de celles-ci est très hétérogène. Elle est en forme de « V » avec un minimum mensuel en juillet (14mm) et un maximum de 90 mm pendant l'hiver. Bien que l'hiver soit plutôt humide en moyenne, les précipitations sont cumulées sur un faible nombre de jours.

L'altitude des arboretums leur permet d'avoir des températures d'environ 1°C plus fraîches tous les 100m. L'arboretum du Treps reçoit moins de précipitations (690 mm).

### 2.1.2.3 MATERIEL GENETIQUE

---

#### CANEIRET

L'arboretum du Caneiret comporte 96 genres, principalement feuillus. Ces 96 genres représentent un ensemble de 251 espèces et 407 lots de graines. Chaque lot de graines d'une espèce est représenté par un ou plusieurs placeaux. 558 placeaux ont été installés. La plupart sont des placeaux unitaire de 30 plants. Certains en comporte moins.

	Nombre de genres	Nombre d'espèces	Nombre de lots de graine
<b>Feuillus</b>	82	189	297
<b>Résineux</b>	14	62	110
<b>Total</b>	<b>96</b>	<b>251</b>	<b>407</b>

TABLEAU 2 : MATERIEL GENETIQUE DE L'ARBORETUM DU CANEIRET

Les 3 genres les plus représentés en termes d'espèces sont:

<b>Résineux</b>		<b>Feuillus</b>	
- genre <i>Pinus</i>	22 espèces	- genre <i>Eucalyptus</i>	42 espèces
- genre <i>Cupressus</i>	11 espèces	- genre <i>Allocasuarina</i>	9 espèces
- genre <i>Abies</i>	3 espèces	- genre <i>Acer</i>	5 espèces

## PLAN ESTEREL

L'arboretum de Plan Estérel comporte 77 genres, 202 espèces, 362 lots de graines réparties sur 547 placeaux. Les placeaux sont constitué en moyenne de 30 plants.

	Nombre de genres	Nombre d'espèces	Nombre de lots de graines
<b>Feuillus</b>	62	143	225
<b>Résineux</b>	15	59	137
<b>Total</b>	<b>77</b>	<b>202</b>	<b>362</b>

TABLEAU 3 : MATERIEL GENETIQUE DE L'ARBORETUM DU PLAN ESTEREL

Les 3 genres les plus représentés en termes d'espèces sont:

<b>Résineux</b>		<b>Feuillus</b>	
- genre <i>Pinus</i>	27 espèces	- genre <i>Eucalyptus</i>	50 espèces
- genre <i>Cupressus</i>	13 espèces	- genre <i>Quercus</i>	10 espèces
- genre <i>Callitris</i>	3 espèces	- genre <i>Fraxinus</i>	6 espèces

## TREPS

L'arboretum du Treps comporte 31 genres, 82 espèces, 136 lots de graines réparties sur 207 placeaux. Les placeaux sont constitué en moyenne de 30 plants.

	Nombre de genres	Nombre d'espèces	Nombre de lot de graines
<b>Feuillus</b>	19	40	54
<b>Résineux</b>	12	42	82
<b>Total</b>	<b>31</b>	<b>82</b>	<b>136</b>

TABLEAU 4 : MATERIEL GENETIQUE DE L'ARBORETUM DU TREPS

Les 3 genres les plus représentés en termes d'espèces sont:

<b>Résineux</b>		<b>Feuillus</b>	
- genre <i>Pinus</i>	20 espèces	- genre <i>Eucalyptus</i>	13 espèces
- genre <i>Cupressus</i>	8 espèces	- genre <i>Fraxinus</i>	3 espèces
- genre <i>Abies</i>	3 espèces	- genre <i>Prunus</i>	3 espèces

### 2.1.3 ARBORETUMS EN CONTEXTE MONTAGNARD : LE COL DES 3 SŒURS ET SAINT-ANASTASIE.

#### 2.1.3.1 HISTORIQUE ET OBJECTIFS

---

Dans le Massif Central, l'activité pastorale reste importante dans certaines zones d'altitude. La forêt présente un intérêt pour le bétail qui, étant exposé aux intempéries peut s'en servir d'abris (Birot Y., 1977). La forêt occupe une place secondaire dans l'économie de la région mais peut devenir une activité complémentaire. Cependant, jusque dans les années 70, à cette altitude la seule essence connue comme résistante était l'épicéa. Or celle-ci ne donnait pas une entière satisfaction en tant qu'abri pour le bétail, très exposé aux intempéries sévères. De plus, à partir de cette période s'amorce une déprise agricole particulièrement forte dans ces régions. Or, la monoculture, comme celle de l'épicéa, étant souvent source de problème sanitaire, il semblait important de pouvoir proposer aux sylviculteurs un panel d'essences répondant à leurs besoins et aux caractéristiques climatiques montagnardes.

Les connaissances sur le matériel végétal (espèces ou provenances) susceptibles de s'installer et de bien se développer dans ces conditions écologiques étant faibles, l'arboretum de Saint-Anastasie est à la fois un test de comparaison de provenances d'Épicéa et également un arboretum d'élimination. L'Arboretum du Col des 3 Sœurs seulement un arboretum d'élimination.

En 1969 a été installé l'arboretum de Saint-Anastasie et celui du Col des 3 sœurs en 1974.

#### 2.1.3.2 CLIMAT ET GEOLOGIE

---

Deux sites ont été retenus, le col des Trois-Sœurs (1390 à 1480m) en forêt domaniale de la croix de Bor en Lozère et l'arboretum de Saint-Anastasie, en forêt sectionale de Saint-Anastasie, dans le Cantal à 1200m.

Le col des 3 sœurs cumule une surface de 5,3 hectares, réparti en 3 zones. Une zone située au col à sol profond (1,78 ha), une zone de crête très exposé au vent (1,74 ha) et une zone de pente (1,74 ha) au sol également profond, enrichi par colluvionnement (JC BASTIEN, 1990). Une petite zone de tourbière est également présente (0,1ha). Les deux postes météorologiques les plus proches (Saint-Denis-en-Margeride (7.5km à l'Ouest) et Saint-Jean-la-Fouilleuse (10km à l'Est)) confirment le climat rude. La température moyenne annuelle de 6,1°C. De plus, pendant deux mois (janvier et février), la température moyenne est inférieure à 0°C. Enfin, le risque de gelée existe tout au long de l'année. On relève des températures négatives en mai, juin et août. Les précipitations moyennes annuelles sont relativement faibles compte tenu de l'altitude : 983 mm pour l'année avec un maximum en mai (100 mm) et un minimum en juillet (65 mm). Les sols sont développés sur granite porphyroïde, riche en matière organique peu décomposé. Ils sont acides (ph 5) et considérés comme fertiles pour la région.

L'arboretum de Saint-Anastasie fait 5,7 hectares. Le climat est similaire mais une influence océanique lui permet de bénéficier de plus de précipitations. Depuis sa création, la hauteur des précipitations moyennes varie fortement d'une année à l'autre mais globalement se révèle supérieure : 1 300 mm. La roche mère est volcanique et le pH également acide (5).

Il est également important de signaler l'importance de la neige dans ces arboretums qui peut être à l'origine de dégâts considérables sur les arbres entraînant beaucoup de casse de branches voire de cimes.

### 2.1.3.3 MATERIEL GENETIQUE

#### COL DES 3 SŒURS

L'arboretum du col des 3 sœurs comporte 16 genres, 71 espèces, 339 lots de graines réparties sur 950 placeaux. Les placeaux sont constitués en moyenne de 30 plants. Chaque provenance a été installée dans le site col, crête et pente. Il a été installé plus de 27 000 plants.

	Nombre de genres	Nombre d'espèces	Nombre de lots de graines
<b>Feuillus</b>	8	22	36
<b>Résineux</b>	8	49	303
<b>Total</b>	<b>16</b>	<b>71</b>	<b>339</b>

TABLEAU 5 : MATERIEL GENETIQUE DE L'ARBORETUM DU COL DE 3 SŒURS

Les 3 genres les plus représentés sont:

<b>Résineux</b>		<b>Feuillus</b>	
- genre <i>Pinus</i>	15 espèces	- genre <i>Betula</i>	5 espèces
- genre <i>Abies</i>	14 espèces	- genre <i>Fraxinus</i>	4 espèces
- genre <i>Picea</i>	8 espèces	- genre <i>Acer</i>	3 espèces

#### SAINT-ANASTASIE

L'arboretum de Saint-Anastasia comporte 6 genres, 39 espèces, 130 provenances réparties sur 163 placeaux. Les placeaux sont très hétérogènes (de 10 à 300 plants par placeaux). Il a été installé plus de 5 000 plants.

	Nombre de genres	Nombre d'espèces	Nombre de provenances
<b>Feuillus</b>	1	1	1
<b>Résineux</b>	5	38	129
<b>Total</b>	<b>6</b>	<b>39</b>	<b>130</b>

TABLEAU 6 : MATERIEL GENETIQUE DE L'ARBORETUM DE SAINT-ANASTASIE

Les 3 genres les plus représentés sont:

<b>Résineux</b>		<b>Feuillus</b>	
- genre <i>Pinus</i>	14 espèces	- genre <i>Betula</i>	1 espèce
- genre <i>Picea</i>	12 espèces		
- genre <i>Abies</i>	9 espèces		

## 2.2 MATERIEL SCIENTIFIQUE

### 2.2.1 MESURES EFFECTUEES SUR LES ARBORETUMS

Une première vague de mesures et d'analyses de données a été effectuée 5, 10 et 15 ans après leur création selon les cas. En effet, l'objectif de ces arboretums était d'effectuer, pour chacun d'eux, un tri des ressources génétiques les plus intéressantes, c'est-à-dire les mieux adaptées aux pluies acides à Roumare, aux incendies et Matsucoccus en région méditerranéenne et à la substitution de l'épicéa en Margeride. L'objectif était de retenir des espèces ayant "survécus" à ces différentes contraintes mais qui avaient aussi montré tout au long de l'expérimentation une bonne vigueur. Cet objectif a donc été atteint dans les différents contextes. Les mesures effectuées étaient la survie, la hauteur et le diamètre à 1,3m.

Dans le contexte de l'adaptation des forêts au changement climatique et avec l'objectif d'acquérir des données de survie et de croissance, le Conservatoire Génétique des Arbres Forestier a lancé de nouvelles campagnes de mesures sur les 6 arboretums. La campagne de mesure de 2008 comprend un taux de survie et celle de 2010 des mesures de circonférence à 1,3m pour tous les arbres du placeau et de hauteur pour les 3 plus gros.

Arboretum	Année de création principale	Dernières survies disponibles	Mesures de survie CGAF	Mesures de Circ/Haut CGAF
Caneiret	1974	1982 (8 ans)	2008 (34 ans)	2010
Plan Estérel	1976	1982 (6 ans)	2008 (32 ans)	2010
Treps	1975	1982 (7 ans)	2008 (33 ans)	2010
Col des 3 sœurs	1974	1993 (19 ans)	2008 (34 ans)	2010
Saint-Anastasia	1969	1993 (24 ans)	2008 (39 ans)	2010
Roumare	1976	1995 (19 ans)	2008 (32 ans)	2011

TABLEAU 7 : TABLEAU DES MESURES EFFECTUEES SUR LES ARBORETUMS

Une éclaircie sanitaire effectuée à Roumare en 2008 a retiré tous les arbres morts sur pied ou très dépérissants. Les données de survie ont été prises avant l'intervention. Une éclaircie sylvicole pour les placeaux les plus denses a également eu lieu en 2010 dans tous les arboretums.

Le taux de survie par placeau a été mesurées à différentes dates depuis l'année de plantation. Celle-ci diffère d'un arboretum à l'autre, nous avons conservé la dernière mesure de survie de chaque arboretum.

Pour chaque arboretum, nous disposons donc :

- De la dernière mesure de survie issue de l'utilisation en tant qu'arboretums d'élimination (non faite par le CGAF)
- D'une mesure de survie datant de 2008 (faite par le CGAF)
- D'un diamètre de tous les arbres présents par placeau en 2010 (faite par le CGAF)
- Hauteur des 3 dominants par placeaux en 2010 (faite par le CGAF)

## 2.2.2 LES FICHIERS ARBORETUMS

Les données passées dans les arboretums sont hétérogènes à la fois en date de prise de mesure, de conservation de données... De plus, depuis la création des arboretums des changements de nomenclature et de numérotation de placeaux ont eu lieu.

Pour chaque arboretum, deux types de fichiers sont disponibles.

Un premier fichier comprend l'évolution de l'effectif de chaque placeau. Dans ce fichier, on trouve :

- Le nom de l'arboretum
- L'espèce
- Le numéro du placeau
- Le numéro du lot de graines
- L'effectif initial
- L'effectif de la dernière mesure ante CGAF
- L'effectif de la mesure CGAF de 2008

Le second fichier correspond aux mesures effectuées en 2010 par le CGAF. On trouve :

- Le nom de l'arboretum
- L'espèce
- Le numéro de placeau
- Le numéro du lot de graines
- La circonférence de tous les arbres présents au moment de la mesure
- La hauteur des 3 arbres dominants

Pour chaque placeau, il y a autant de lignes que d'arbres présents en 2010. Exemple pour l'arboretum de Roumare :

ARBO	Numéro de placeau	Espèce	Lot de graine	Circonférence (cm)	Hauteur (m)
ROU	286	<i>Pinus banksiana</i>	70306	60	10,00
ROU	286	<i>Pinus banksiana</i>	70306	55	8,00
ROU	286	<i>Pinus banksiana</i>	70306	78	9,00
ROU	286	<i>Pinus banksiana</i>	70306	51	-
ROU	286	<i>Pinus banksiana</i>	70306	58	-

TABLEAU 8 : EXTRAIT DU FICHIER PLACEAUX POUR L'ARBORETUM DE ROUMARE

## 2.3 METHODES

Dans cette partie, nous allons voir comment un travail d'uniformisation au niveau de chaque arboretum va permettre de créer une base de données inter arboretums. Puis, à partir de cette base de données, nous verrons comment réaliser une sélection des meilleures essences de chaque arboretum. Enfin, nous essayerons de montrer comment à partir des essences sélectionnées et de notre base de données, nous pouvons mettre en lumière les essences potentiellement intéressantes en vue du changement climatique.

### 2.3.1 METHODE DE STANDARDISATION INTRA ARBORETUM

Le premier travail consiste à réaliser un fichier identique pour chaque arboretum. Cependant, les mesures ont été prises et archivées par des équipes différentes sans cohérence entre elles. Entre les premières mesures et les dernières des évolutions de la taxonomie ont eu lieu. De plus, des erreurs de numéros de placeaux ont été détectées entre les différentes années de mesures. Pour remédier à cela et réussir à faire correspondre les deux fichiers, plusieurs étapes de standardisation sont nécessaires.

#### 2.3.1.1 VALIDITE DE LA NOMENCLATURE

---

Selon la flore forestière française, la nomenclature des végétaux est définie comme une combinaison binaire, formée du nom du genre suivi d'une épithète spécifique. Derrière celle-ci est notée par une abréviation, le nom du (ou des) botaniste(s) qui sont intervenus dans l'établissement de ces noms.

Or, en observant les données de nos deux fichiers, nous avons constaté que plusieurs changements de nomenclature ont été réalisés au cours des différentes mesures, ce qui donne lieu à des incohérences.

Exemple : *Abies alba*, *Abies pectinata*.

Ces deux noms se réfèrent à la même essence : *Abies alba* Mill.

Cette précision de taxonomie est essentielle pour la suite du travail. On ne peut pas distinguer deux essences alors qu'en réalité, ce sont les mêmes. Un travail de standardisation de la nomenclature a donc été effectuée avec comme référence celle de « The Plant List » ([theplantlist.org](http://theplantlist.org)). Ce travail a été réalisé avec la collaboration de Thierry Lamant, dendrologue du CGAF.

#### 2.3.1.2 UNICITE DES LOTS DE GRAINES

---

Les espèces ont souvent été testées plusieurs fois au sein des arboretums. Il peut s'agir de répétition c'est-à-dire que c'est le même lot de graines qui a été planté sur différents placeaux, soit elles ont fait l'objet de plusieurs importations d'une même provenance mais des années différentes où de différentes provenances. Nous avons choisi de ne pas travailler à l'échelle de l'essence mais du lot de graines. En effet, c'est le grain le plus fin que nous possédons. Cet identifiant est très riche et permet pour les essences qui possèdent plusieurs lots de faire une analyse plus poussée sur les différences entre origines et années de récolte avec plusieurs provenances. Ces lots de graines correspondent à une année d'introduction pour une essence et une provenance.

Si plusieurs numéros de lot de graines peuvent exister pour une même espèce due à des introductions différentes, un même numéro de lot de graines ne devrait pas être attribué à 2 lots de graines de 2 espèces

différentes. Or c'est le cas pour une dizaine de numéros de lots de graines. Après vérification qu'il s'agissait bien d'espèces différentes, nous avons donc subdivisé chacun de ces lots en nombre d'espèces pour lesquelles il correspondait.

Par exemple si le numéro lot de graines 123 correspond à l'essence A et l'essence B. Je vais recoder de la manière suivante : 123\_1 pour le lot de l'essence A et 123\_2 pour le lot 123 de l'essence B.

### **2.3.1.3 ASSEMBLAGE DES DEUX FICHIERS**

---

L'assemblage de nos deux fichiers (avant et après le CGAF) est primordial pour pouvoir suivre les informations complètes par placeaux au cours du temps. Il y a eu une renumérotation des placeaux lors des plans successifs. Il existe des écarts entre le compte rendu d'installation initial, plan et la réalité actuelle du terrain. Des essences ont été remplacées très rapidement ou regarnies sans qu'une trace papier ait été conservée. Les numéros des placeaux se sont décalés au fur et à mesure des mortalités, les plans initiaux ne sont donc plus valables. Il nous est absolument nécessaire d'assembler ces deux fichiers. Nous avons procédé de la manière suivante :

Notre nomenclature étant normée et les lots de graines uniques, nous pouvons maintenant raisonner à partir du binôme : Espèce – lot de graine. Exemple : *Pinus banksiana* Lamb. - 70306

Pour un arboretum, chaque binôme correspond à un nombre fixe placeaux et les décalages étant (plus ou moins) réguliers, nous avons réussi à développer un programme R (R Core Team, 2014) permettant de retrouver les deux numéros de placeaux correspondant au même placeau. Cette étape s'est relevée très longue et compliquée.

### **2.3.1.4 VERIFICATION**

---

Pour finir, nous avons construit un programme de vérification de cet assemblage. Ceci nous permettant de retirer les placeaux pour lesquels l'association n'avait pas marché. Nous avons repris manuellement les cas possibles. Certaines données n'ont pas pu être corrigées. Finalement, il existe des cas qui n'ont pas de cohérence entre les deux fichiers et il est donc impossible de s'en servir.

Ce travail d'harmonisation des fichiers a tout d'abord été testé sur un seul arboretum pour être ensuite généralisé à l'ensemble des six. Ce qui nous conduit à la méthode de mise en place d'une base de données inter arboretum.

### 2.3.2 METHODE INTER ARBORETUM

Afin de pouvoir traiter les données efficacement pour notre question de recherche, il est nécessaire de mettre en place une base de données unique utilisable par tous afin de synthétiser les informations de chaque essence pour chaque arboretum. Dans ce tableau nous travaillerons à l'échelle du lot de graines.

Un tableau multi arboretum a donc été bâti à l'échelle du lot de graines.

Dans ce tableau, on distinguera trois types de donnée :

- Les données concernant la représentation du lot de graine dans l'arboretum :
  - Nombre de placeaux mis en place dans l'arboretum
  - Nombre d'arbres mesurés en 2010

*NB* : Nous avons décidé de nommer cette donnée, « donnée statistique ».

- Les données de survie :
  - Taux de survie correspondant à l'avant dernière mesure

*NB* : Cette donnée sera baptisée « survie juvénile » (âge des plants compris entre 8 et 19 ans)

- Taux de survie lors de la mesure du CGAF en 2008 (dernière mesure)

*NB* : Cette donnée sera baptisée « survie adulte » (âge des plants compris entre 30 et 34 ans)

Le taux de survie est défini par :  $\frac{\text{Nombre d'individus } (t)}{\text{Nombre d'individus } (t_0)} \times 100$

Avec « t » : date de la mesure et « t0 » : date de plantation

Le taux de survie des plants issus d'un lot de graine, pour une essence au sein d'un arboretum est calculé comme la moyenne des taux de survie de tous les placeaux de ce lot de graine dans l'arboretum en question.

- Les données de croissance :
  - Diamètre moyen à 1,3m en centimètre pour tous les individus d'un lot de graines présent en 2010.
  - Hauteur moyenne en mètre pour les 3 trois plus gros individus d'un lot de graines présent en 2010

On crée alors un tableau récapitulatif faisant apparaître toutes ces données, pour chaque essence, chaque lot de graine, pour tous les arboretums.

### 2.3.3 METHODE DE SELECTION

L'objectif de cette partie, est d'explicitier la méthode mise en place pour mener la sélection des essences. A partir de la base de données obtenue, une logique de filtres successifs permettra de ne garder que les essences qui répondent le mieux aux besoins du gestionnaire forestier. C'est-à-dire une essence avec un bon taux de survie, ne nécessitant pas de regarnis source de surcoût financier, mais aussi avec une croissance au moins équivalente à celle des essences en place.

Dans cette partie, nous allons voir quels critères et quelles valeurs seuils nous avons utilisé pour les filtres successifs.

#### 2.3.3.1 METHODE GENERALE

---

Nous allons suivre la démarche chronologique qui correspond à l'évolution de notre réflexion. A partir de la base de données présentée dans la partie précédente, nous avons accès à trois types de données concernant les arbres :

- Les données statistiques : Nombre de placeaux / Nombre d'arbres mesurés en 2010
- Les données de survie : Taux de survie juvénile / Taux de survie adulte
- Les données de croissance : Diamètre de tous les arbres présents et la hauteur des 3 arbres les plus gros du placeau.

Des filtres successifs vont être appliqué sur chacune de ces données afin d'éliminer au fur et à mesure les lots de graines qui ne répondent pas aux conditions.

- Les données statistiques permettent de s'assurer que la taille de l'échantillon est suffisante pour avoir une bonne représentativité du comportement de l'essence. On ne peut pas se baser sur un seul arbre pour connaître la potentialité de l'essence. On va donc s'assurer que l'essence est présente en nombre suffisant pour être prise en compte.
- Les données de survie permettent d'obtenir des informations sur l'adaptation de l'essence au site de l'étude, si elle a réussi à survivre dans le contexte pédoclimatique. C'est un critère primordial car si une essence a une croissance excellente mais à un taux de survie de trop faible, ce n'est pas souhaitable pour le gestionnaire. Il faut donc s'assurer qu'elle présente un bon taux de survie, à la fois pendant la phase juvénile mais également pendant la phase adulte.
- Enfin, le troisième filtre correspond aux données de croissance. Si l'essence observée a une taille d'échantillon représentative et de bons taux de survie juvénile et adulte, le dernier filtre est celui de la croissance. Une circonférence et une hauteur minimal vont être sélectionnées en dessous desquelles l'essence ne sera pas choisie.

Cette stratégie de filtre va être appliquée à tous les arboretums. Afin de déterminer les valeurs seuils des critères, la distribution de chaque variable a été analysée. Cette analyse permet de déterminer des seuils

pour chacun des critères, en essayant de trouver un compromis entre une valeur élevée permettant de sélectionner les meilleures espèces et pas trop élevées pour qu'il y ait tout de même des sélectionnés. Pour l'arboretum de Roumare, cette stratégie a permis d'obtenir les valeurs suivantes :

Critères	Valeur
Nombre de placeaux	2
Nombre d'arbres inventoriés	10
Survie juvénile (%)	0,5
Survie adulte (%)	0,2
Circonférence minimale (cm)	60
Hauteur minimale (m)	15

**TABLEAU 9 : SEUILS ARBITRAIRES DES CRITERES DE SELECTION POUR L'ARBORETUM DE ROUMARE**

La même stratégie a commencé à être appliquée pour les autres arboretums. Il n'est pas possible de prendre les mêmes valeurs puisque les conditions pédoclimatiques sont radicalement différentes d'un arboretum à l'autre. En observant la distribution des données et en essayant de respecter une cohérence les trois grands contextes écologiques (fertilité plus faible dans le sud, risque de gelées dans le massif central, concurrence plus forte à Roumare...) nous avons tenté de trouver des seuils pour ces critères. Mais il est très difficile d'obtenir des seuils représentatifs des arboretums par cette méthode.

Les résultats de cette méthode arbitraire ne sont pas satisfaisants car ils s'éloignent fortement des normes de sylvicultures et ne repose pas sur des méthodes sans a priori. L'objectif étant bien la mise en place d'une sélection systématique. Nous avons donc mis en place une méthode de détermination des critères plus rigoureuse baptisé la « méthode des moyennes ».

### 2.3.3.2 METHODE DES MOYENNES :

La partie entière de la moyenne du critère sur l'arboretum détermine le seuil de ce dernier. Ainsi, pour l'arboretum de Roumare, la valeur seuil du critère « Circonférence » est déterminé par la circonférence moyenne sur l'arboretum, pour tous les lots de graines. Celui-ci est de X cm. La valeur du critère de sélection « circonférence » sera donc X cm et tous les lots de graines ayant une circonférence inférieure à X cm seront écartés. Et ainsi de suite pour les autres critères.

Voici un tableau présentant les résultats de détermination des valeurs seuils pour chaque critère à l'aide de cette méthode.

	N_plac	Nb_arb	Circ_cm	Ht_m	Sur_1	Sur_2
Caneiret	1	3	31	8	0,8	0,3
Plan Esterel	1	3	42	8	0,8	0,2
Treps	1	5	57	9	0,7	0,4
Col des 3 sœurs	1	17	47	9	0,6	0,4
St-Anastasia	1	8	55	11	0,8	0,3
Roumare	1	14	80	15	0,7	0,4

TABLEAU 10 : TABLEAU DE LA VALEUR DES CRITERES PAR LA METHODE DES MOYENNES

Avec : N\_plac : Moyenne du nombre de placeaux mis en place dans l'arboretum

Nb\_arb : Moyenne du nombre d'arbres mesuré en 2010

Circ\_cm : Moyenne de la circonférence moyenne des arbres mesurés en 2010 (en cm)

Ht\_m : Moyenne de la hauteur moyenne des 3 arbres dominants mesurés en 2010 (en m)

Sur\_1 : Moyenne de la survie juvénile (en %)

Sur\_2 : Moyenne de la survie adulte (en %)

Cette méthode semble assez robuste et présente l'avantage de l'objectivité pour la détermination des valeurs seuils des critères. On se base uniquement sur le jeu de données. Cependant, cette approche fournit des valeurs de seuils communes pour toutes les espèces d'un arboretum. Pour les critères de croissance, vu l'âge des arboretums, un avantage est donné aux essences ayant une croissance juvénile forte et en particulier aux gymnospermes. Or, les différences entre angiospermes et les gymnospermes sont trop importantes pour ne pas les prendre en compte. Au sein même de ces groupes, certaines espèces (cas des Eucalyptus au Caneiret) surpassent toutes les autres ce qui écrase complètement tous les autres taxons, d'autant plus qu'étant très représentés, ils tirent la moyenne vers le haut. Les résineux, mêmes avec des croissances très correctes n'ont aucune chance d'être sélectionnés par cette méthode.

### 2.3.3.3 METHODE DES MOYENNES SEPARÉES :

La méthode de moyennes séparées est comparable à celle des moyennes mais les calculs des seuils se font séparément pour les angiospermes et gymnospermes.

Voici les résultats obtenus :

	N_plac	Nb_arb	Circ_cm	Ht_m	Eff_1	Eff_2
Caneiret	1	3	38	19	0,8	0,5
Plan Esterel	1	3	43	10	0,8	0,2
Treps	1	4	44	10	0,7	0,4
Col des 3 sœurs	1	1	36	8	0,2	0,2
St-Anastasia	1	5	55	14	0,3	0,2
Roumare	2	13	66	15	0,7	0,4

TABLEAU 11 : TABLEAU DES SEUILS DES CRITERES DE SELECTION POUR LES ANGIOSPERMES

	N_plac	Nb_arb	Circ_cm	Ht_m	Eff_1	Eff_2
Caneiret	1	9	22	3	0,8	0,4
Plan Esterel	1	7	41	7	0,9	0,5
Treps	1	8	61	9	0,8	0,3
Col des 3 sœurs	2	20	47	9	0,6	0,3
St-Anastasia	1	10	55	11	0,8	0,4
Roumare	2	16	86	15	0,8	0,2

TABLEAU 12 : TABLEAU DES SEUILS DES CRITERES DE SELECTION POUR LES GYMNASPERMES

On peut s'apercevoir de la différence du critère « Circonférence » pour l'arboretum du Caneiret : « 19 m » pour les feuillus et « 3 m » pour les résineux. La séparation du calcul et donc de la sélection va donc nous permettre de prendre en compte ces très fortes différences de croissance. Cette méthode permet de laisser la possibilité aux feuillus comme aux résineux de chaque contexte de révéler leur performance.

Voici un exemple graphique de représentation de la méthode de sélection appliqué à Roumare pour les gymnospermes.

## Méthode de sélection des espèces appliquée aux gymnospermes de l'arboretum de Roumare.

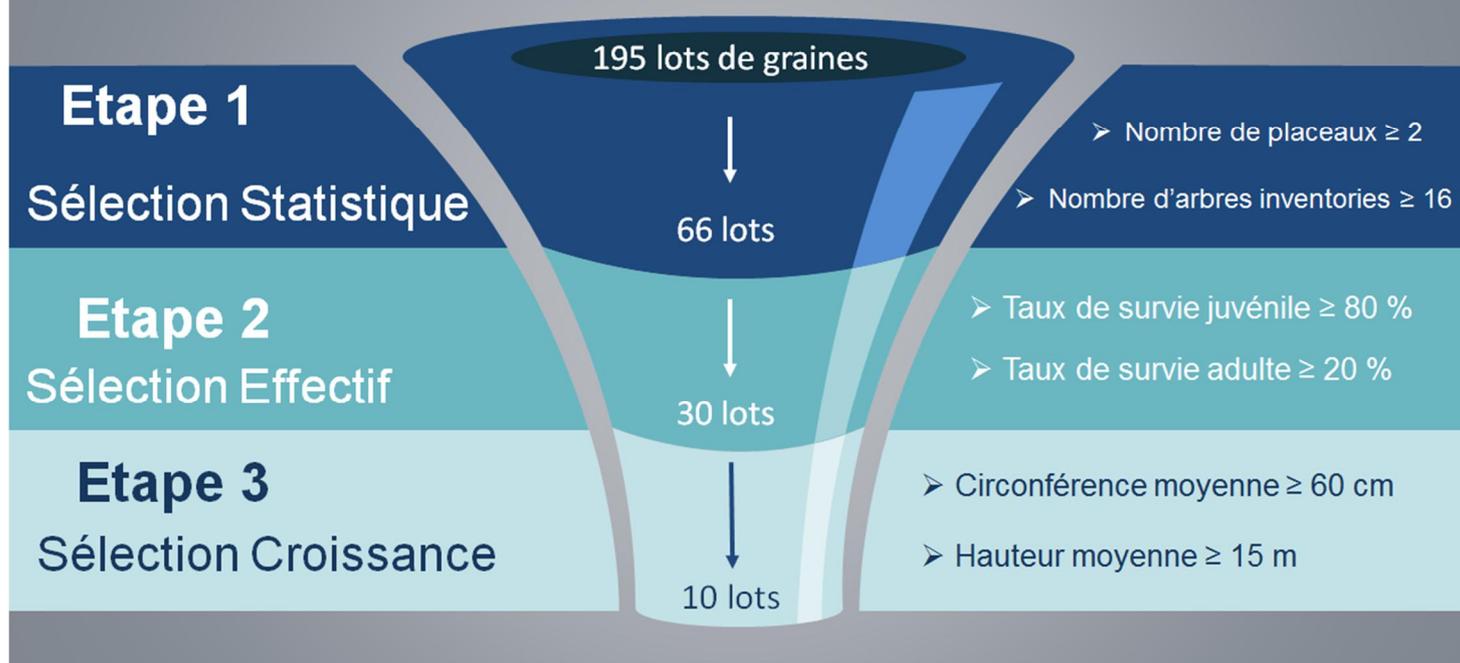


FIGURE 1: METHODE DE SELECTION APPLIQUE A L'ARBORETUM DE ROUMARE POUR LES GYMNOSPERMES

L'ordre de la sélection a été testé et n'a aucune influence sur le résultat final puisque les lots de graines sélectionnés répondent à tous les critères. La sélection finale comprend alors les meilleurs lots de graines dans l'arboretum. L'objectif de notre méthode de sélection est donc atteint.

#### 2.3.4 METHODE DE POTENTIALITE INTER ARBORETUM :

La première étape de notre démarche était de déterminer les meilleurs lots de graines par essence dans un arboretum donné. C'est ce que l'on vient de voir avec la méthode de sélection. Cette première phase a été réalisée séparément pour chaque arboretum. L'analyse multi site des arboretums a pour but de savoir si les essences sélectionnées dans un contexte donné peuvent avoir un potentiel de croissance, s'adapter dans d'autres contextes, notamment en vue du changement climatique.

L'analyse de la base de données croisant numéro de lot de graines et répartition dans les arboretums montre qu'il existe un nombre très faible d'occurrence. Les arboretums n'ont pas été conçus en réseau avec des espèces et lots de graines communes afin de permettre une analyse de la réponse à différentes conditions pédoclimatiques des essences/provenances. Dans l'analyse multi site, nous utiliserons donc seulement l'information essence.

C'est-à-dire, si dans l'arboretum A, le lot de graines 123 de l'espèce X a été sélectionnée, alors nous retiendrons juste que l'espèce X a été sélectionné dans l'arboretum A.

Pour observer le comportement d'une essence dans différents contextes bioclimatiques, trois types de données vont être intéressantes :

- Dans combien d'arboretum l'essence a-t-elle initialement été plantée ?
- Dans combien d'arboretum l'essence est-elle, aujourd'hui, encore présente ?
- L'essence a-t-elle été sélectionnée dans un arboretum ?

Pour rendre l'analyse plus claire, nous avons donc décidé de regrouper ces données dans les trois grands types de contextes :

- Océanique : Arboretum de Roumare (ROU).
- Montagnard : Arboretum du Col des 3 sœurs (COL) et Saint-Anastasie (SAI).
- Méditerranéens : Le Caneiret (CAN), Plan Estérel (PLA) et le Treps (TRE).

Puis, dans la mesure où l'objectif du travail est une analyse multi site des arboretums, nous retirerons alors tous les taxons qui ont été plantés dans un seul contexte. En effet, on ne peut pas conclure sur leur capacité d'adaptation. Les arboretums ont été initialement installés pour répondre à des enjeux locaux ce qui peut expliquer le faible nombre d'essences communes à tous les arboretums.

Nous allons donc sous-échantillonner notre base de données pour ne garder que les espèces qui ont les données utilisables pour notre l'étude multisite, à savoir :

- Le taxon a été planté dans au moins deux contextes bioclimatiques.
- Le taxon est aujourd'hui présent dans au moins deux contextes bioclimatiques.
- Le taxon a été sélectionné dans au moins un contexte bioclimatique ou plus.

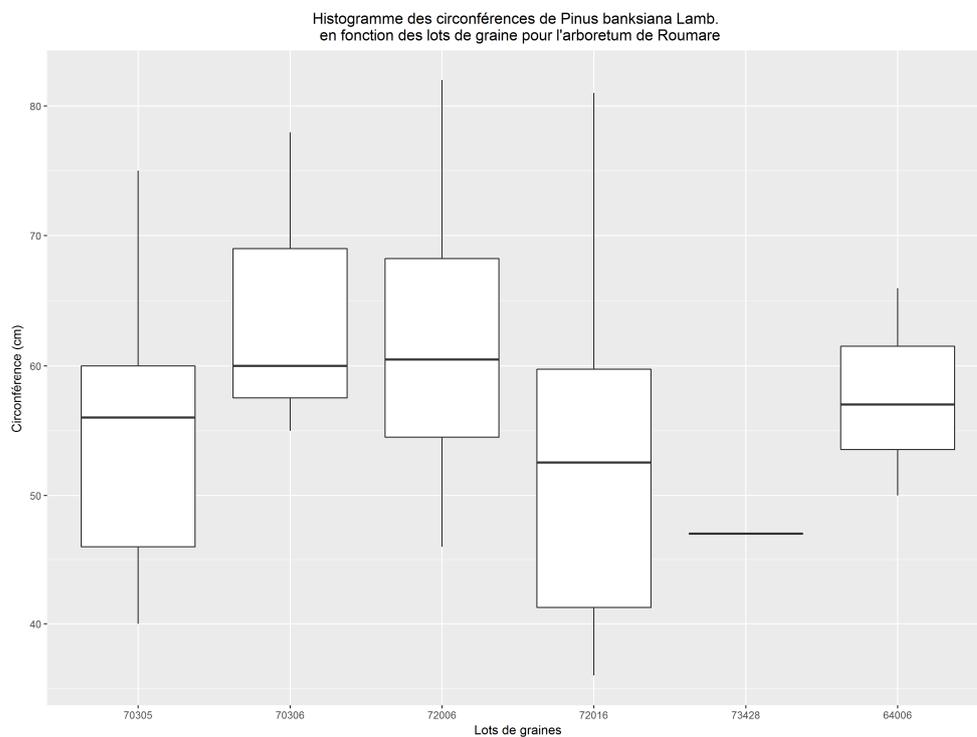
Une visite sur le terrain permettra de vérifier l'état sanitaire des espèces.

## 3 RESULTATS

### 3.1 RESULTATS DE LA CREATION DE LA BASE DE DONNEES

#### 3.1.1 NIVEAU LOT DE GRAINES

Le graphique ci-dessous décrit la variabilité pour le critère circonférence existante entre un lot de graines et entre lots de graines pour *Pinus banksiana*.



**FIGURE 2 : EFFET LOT DE GRAINE POUR *PINUS BANKSIANA* SUR L'ARBORETUM DE ROUMARE**

Ainsi, pour une espèce donnée, un lot de graine peut donner de très bons résultats, quand un autre lot peut en donner de bien plus médiocres. On observe bien des différences de circonférences en fonction des différents lots de graines sur l'exemple de *Pinus banksiana* (Figure 2). Le lot de graines est l'information la plus fine existante dans les arboretums. Cet identifiant est très riche et permet pour les essences qui possèdent plusieurs lots de graines de faire une analyse plus précise sur les différences entre origines ou années de récolte.

### 3.1.2 RESULTATS INTRA ARBORETUM

A partir de la méthode intra arboretum, permettant l'assemblage des fichiers disponibles, un fichier consensus a été bâti pour chaque arboretum. Chacun de ces fichiers a été réalisé à l'échelle du lot de graines.

Arboretum	Nombre de lots de graines dans la base de donnée	Nombre de lots de graines initialement présent dans les arboretums	Nombre de lots de graines manquants (%)
Le Caneiret	382	407	6
Plan Estérel	334	362	7
Le Treps	130	136	5
Col des 3 sœurs	328	339	4
Saint-Anastasié	124	130	5
Roumare	275	293	6

TABLEAU 13 : RESULTATS DE LA METHODE INTRA ARBORETUM

On remarque que l'on a un nombre de lots de graines manquantes pour chaque arboretum. La moyenne de ces lots de graines manquant est de 5,5%. Ceci est dû aux incohérences parfois trop fortes entre les fichiers ou aux placeaux morts qui ne sont plus répertoriés.

### 3.1.3 RESULTATS INTER ARBORETUM

Les fichiers intra arboretum étant uniformisés, ils ont été associés afin de constituer la base de données inter arboretum. La base de données contenant 1573 lots de graines, issu des 6 arboretums.

Taxon	Lot de graine	Nombre de placeaux	Nombre arbres mesurés (2010)	Circ moy. (cm)	Ecart type circ.	Haut moy. (m)	Ecart type haut	Survie juvénile	Survie adulte	Arboretum
Pinus banksiana Lamb.	70305	3	6	43.5	8.3	7.8	1	0.5	0.3	COL
Pinus banksiana Lamb.	70306	3	3	53.4	16.6	4.2	3.7	0.38	0.12	COL
Pinus banksiana Lamb.	72006	3	18	50.1	6.8	9.9	0.3	0.79	0.51	COL
Pinus banksiana Lamb.	72007	3	9	48.2	7.2	9.1	2.1	0.54	0.25	COL
Pinus banksiana Lamb.	72008	3	15	41.3	10.8	7.6	1	0.35	0.33	COL
Pinus banksiana Lamb.	72009	3	31	42.2	12.8	9.1	1.4	0.76	0.51	COL
Pinus banksiana Lamb.	72010	3	11	37.1	7.5	6.6	1.8	0.64	0.28	COL
Pinus banksiana Lamb.	72011	3	17	50.6	9.5	8.3	2.3	0.79	0.36	COL
Pinus banksiana Lamb.	62006	1	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	ROU
Pinus banksiana Lamb.	70305	1	13	54.9	9.9	9.4	0.2	0.77	0.5	ROU
Pinus banksiana Lamb.	70306	1	3	64.3	12.1	9	1	0.9	0.23	ROU
Pinus banksiana Lamb.	72006	3	16	61.7	9.9	12.3	2.5	0.83	0.26	ROU
Pinus banksiana Lamb.	72016	6	14	52.2	13	10.5	3.4	0.86	0.11	ROU

TABLEAU 14 : EXTRAIT DE LA BASE DE DONNEE INTER ARBORETUM

On observe donc que l'on a, pour *Pinus banksiana* Lamb., plusieurs lots de graines qui ont été testées dans les différents arboretums. On peut remarquer que pour certains lots de graines, tous les arbres sont morts comme pour le « 62006 » à Roumare pour lequel 0 arbres sont mesurés en 2010. Cela signifie que tous les placeaux correspondants à ce lot de graines sont morts (ici, il y en avait un seul). Il n'y a donc aucune donnée associées à ce lot de graines pour cet arboretum.

## 3.2 RESULTATS DE LA SELECTION

### 3.2.1 SELECTION INTER ARBORETUM

Les résultats de notre sélection sont à observer de manière dichotomique. En effet, feuillus et résineux ont été analysés de manière distincte. Les résultats seront donc toujours séparés en angiospermes et gymnospermes.

	Nombre de genres sélectionnés / initialement présent	Nombre d'espèces sélectionnés / initialement présentes	Nombre de lots de graines sélectionnés
Le Caneïret	1 / 15	13 / 189	13 / 297
Plan Estérel	1 / 62	5 / 143	5 / 225
Le Treps	1 / 19	4 / 40	4 / 54
Le Col des 3 sœurs	1 / 8	1 / 22	1 / 36
Saint Anastasie	0 / 1	0 / 1	0 / 1
Roumare	7 / 31	8 / 57	12 / 98

TABLEAU 15: RESULTATS DE LA SELECTION ANGIOSPERMES PAR RAPPORT AU MATERIEL GENETIQUE INITIALEMENT PRESENT

	Nombre de genres sélectionnés / actuellement présent	Nombre d'espèces sélectionnés / actuellement présent	Nombre de lots de graines sélectionnés / actuellement présent
Le Caneïret	1 / 7	13 / 44	13 / 76
Plan Estérel	1 / 5	5 / 48	5 / 74
Le Treps	1 / 6	4 / 16	4 / 21
Le Col des 3 sœurs	1 / 5	1 / 10	1 / 12
Saint Anastasie	0 / 1	0 / 1	0 / 1
Roumare	7 / 21	8 / 41	12 / 75

TABLEAU 16 : RESULTATS DE LA SELECTION ANGIOSPERMES PAR RAPPORT AU MATERIEL GENETIQUE ACTUELLEMENT PRESENT

Au sein des arboretums méditerranéens, un seul genre est sélectionné, il s'agit des eucalyptus. Beaucoup d'espèces d'eucalyptus ont été sélectionnées. Il est intéressant de remarquer qu'une grande diversité de genres ont été testés (62 au Plan Estérel) mais seuls les eucalyptus sont sélectionnés. On peut également

voir qu'il y a eu beaucoup de mortalité chez les feuillus dans ce contexte (293 lots de graines initiaux au Caneiret pour 76 présent aujourd'hui). Puis, dans les arboretum du Massif central, très peu de feuillus ont été sélectionnés mais on a également peu de feuillus qui ont été testés. Aucun lot sélectionné à Saint-Anastasia n'apparaît donc pas comme incohérent. On voit qu'il y également 2/3 des lots de graines de feuillus du Col des 3 sœurs qui sont morts. Enfin, l'arboretum de Roumare est l'arboretum qui a le meilleur taux de survie des lots de graines (76% de survie) et qui sélectionne le plus de feuillus en terme de genres.

Concernant les résineux :

	Nombre de genres sélectionnés / initialement présent	Nombre d'espèces sélectionnés / initialement présent	Nombre de lots de graines sélectionnés / initialement présent
Le Caneiret	3 / 14	6 / 62	8 / 110
Plan Estérel	2 / 15	4 / 59	8 / 137
Le Treps	2 / 12	5 / 42	9 / 82
Le Col des 3 sœurs	3 / 8	15 / 49	50 / 303
Saint Anastasia	3 / 5	8 / 38	12 / 129
Roumare	5 / 17	8 / 65	10 / 195

**TABLEAU 17 : RESULTATS DE LA SELECTION GYMNOSPERMES PAR RAPPORT AU MATERIEL GENETIQUE INITIALEMENT PRESENT**

	Nombre de genres sélectionnés / actuellement présent	Nombre d'espèces sélectionnés / actuellement présent	Nombre de lots de graines sélectionnés / actuellement présent
Le Caneiret	3 / 4	6 / 23	8 / 59
Plan Estérel	2 / 3	4 / 19	8 / 67
Le Treps	2 / 8	5 / 25	9 / 59
Le Col des 3 sœurs	3 / 8	15 / 40	50 / 300
Saint Anastasia	3 / 5	8 / 28	12 / 116
Roumare	5 / 15	8 / 57	10 / 173

**TABLEAU 18 : RESULTATS DE LA SELECTION GYMNOSPERMES PAR RAPPORT AU MATERIEL GENETIQUE ACTUELLEMENT PRESENT**

Il est intéressant de remarquer que le nombre de genre de résineux testé est bien inférieur à celui des feuillus. La diversité des genres de résineux est plus faible que celle des feuillus. En méditerranée, le nombre de genres sélectionnés est supérieur et les taux de survies sont meilleurs. Dans le massif central, on peut remarquer que l'on a de très bonnes survie (300/303) et plus de 10% des lots de graines qui sont sélectionnés. La diversité génétique de la sélection dans le massif central est donc élevée, à la fois en termes de genre, d'espèce et de lots de graines. A Roumare, les lots de graines complètement morts sont également assez faibles (22/195), et la diversité de la sélection est également intéressante. Toutefois parmi les 8 espèces sélectionnées, on n'a que 10 lots de graines. Une espèce sélectionnée est donc rarement sélectionnée sous différents lots de graines.

### 3.2.2 RESULTATS GRAPHIQUES DES SELECTIONS

Nous allons désormais observer les résultats graphiques de notre sélection. Il est plus intéressant de représenter tous les arboretums sur le même graphique afin de voir comment se situent les espèces sélectionnées d'un arboretum par rapport à un autre.

#### 3.2.2.1 ANGIOSPERMES

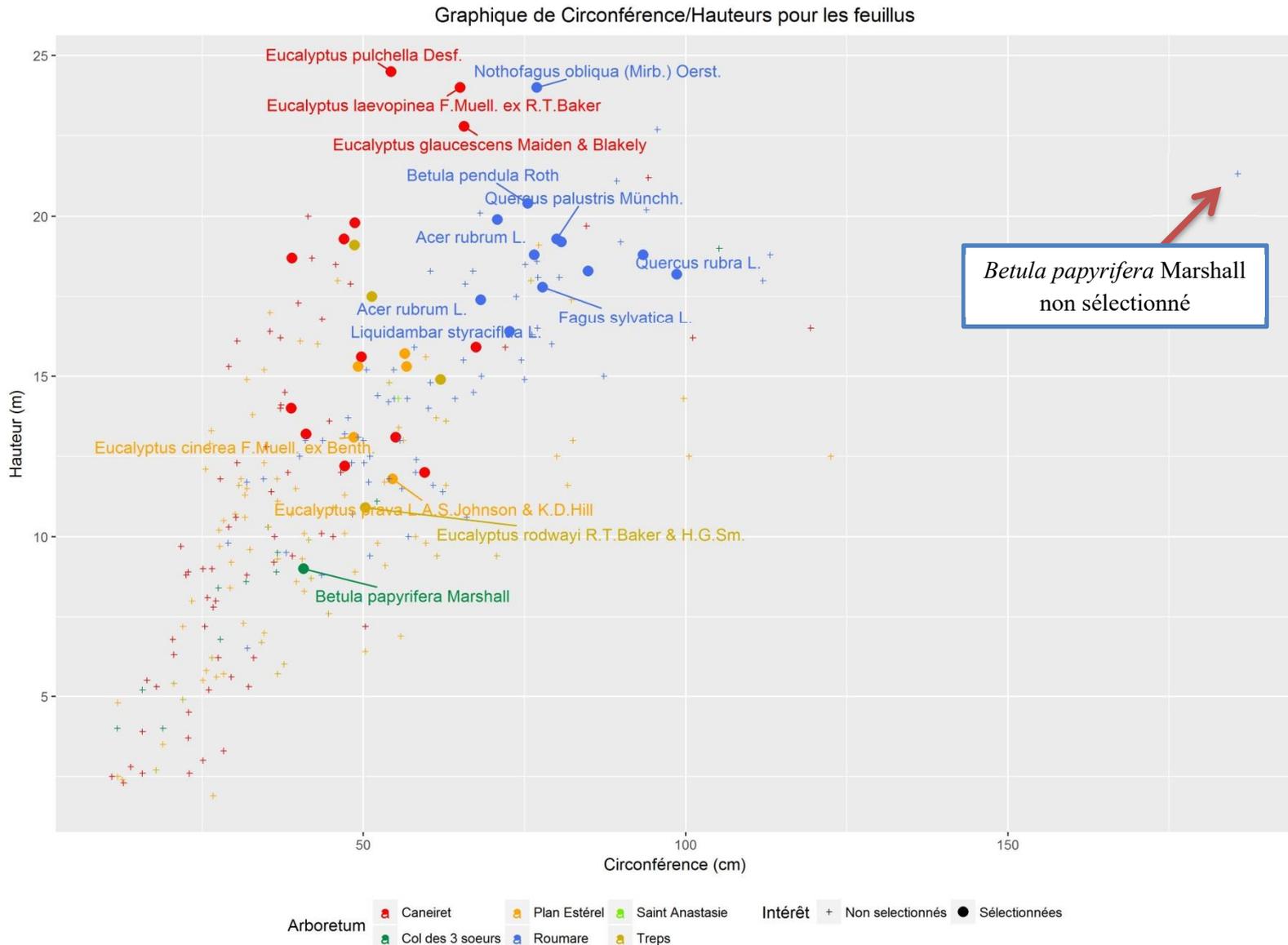


FIGURE 3 : GRAPHIQUE DE CIRCONFERENCE/HAUTEUR POUR LES FEUILLUS SELECTIONNES

On a représenté par de petites croix de couleurs chaque lot de graine. La couleur correspond à l'arboretum dans lequel il est présent. S'il est représenté par un rond, alors il est sélectionné.

Les lots sélectionnés sont plutôt situés dans la partie du graphique qui contient les valeurs hautes de hauteur et de diamètres quel que soit l'arboretum. Ce graphique nous montre que des espèces peuvent

présenter des potentialités supérieures à celle du milieu. C'est le cas des Eucalyptus qui surpassent le hêtre et ce, dans un contexte climatique bien plus défavorable.

L'exemple du point le plus à droite du graphique est un bon exemple d'un lot de graines présentant une très bonne croissance mais qui n'a pas été sélectionné. C'est un lot de graines de *Betula papyrifera* Marshall, présent à Roumare et qui présente une circonférence moyenne de 185 cm et une hauteur moyenne de 21,3 m. Il apparaît donc comme excellent. Il a dû être éliminé car ne répondant pas aux critères de survie.

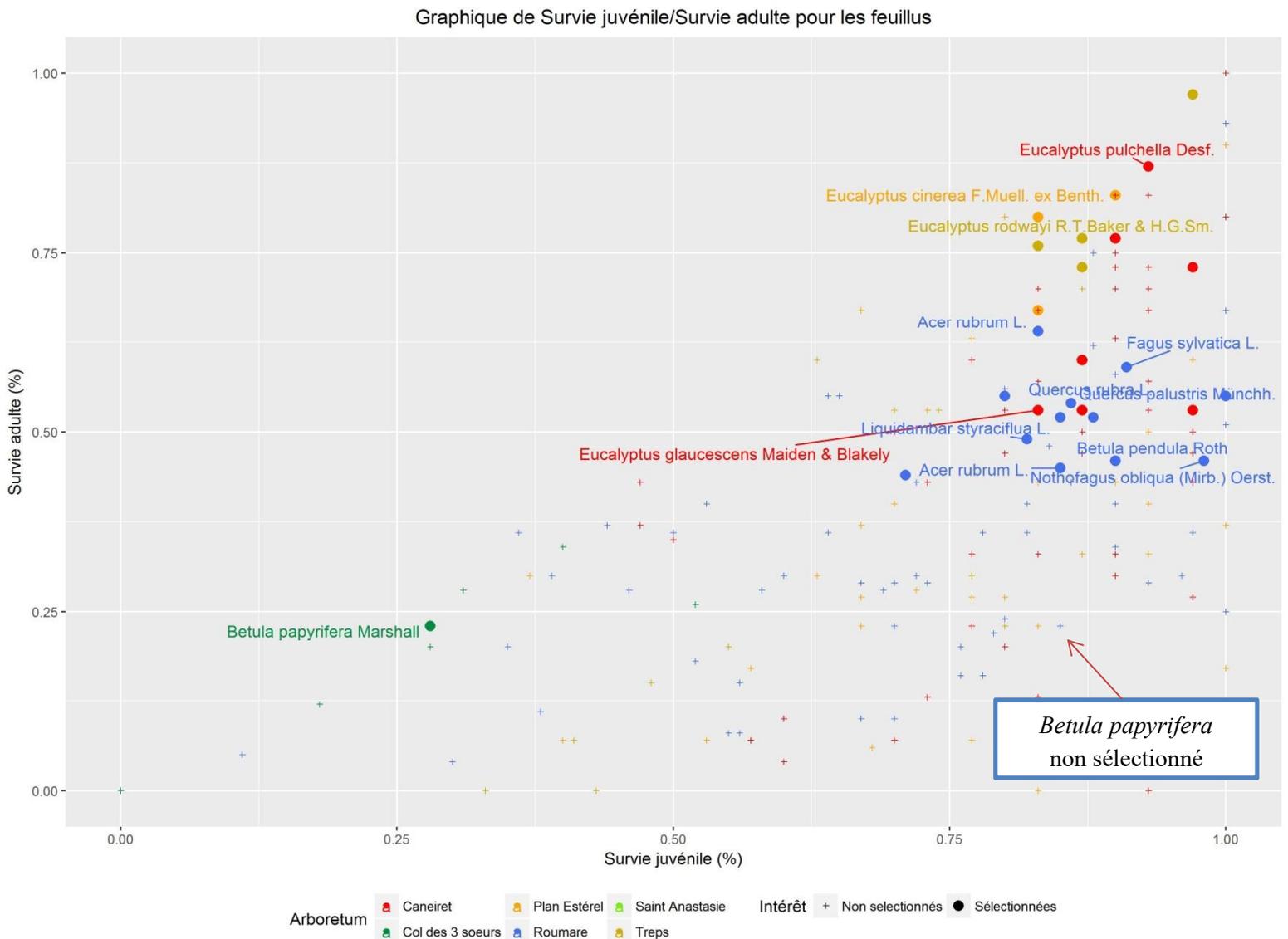


FIGURE 4 : GRAPHIQUE DE SURVIE JUVENILE/ SURVIE ADULTE POUR LES FEUILLUS SELECTIONNES

Le graphique ci-dessus montre que les lots de graines ont presque tous une survie adulte supérieure à 50% et des survies juvéniles excédant les 75%. Le taux de survie qui est un critère essentiel pour le gestionnaire permet de faire un tri important au sein des différents lots de graines.

Le lot de graines de *Betula papyrifera* qui présentait une très bonne croissance se situe au niveau de la flèche rouge avec une survie adulte de 12%. Ce qui est très faible. En observant également les données « statistiques », on constate que deux placeaux ont été plantés, l'un d'eux est mort et l'autre ne présente plus que 3 arbres. On voit donc, au travers de cet exemple, la pertinence des résultats obtenus via cette méthode de sélection. Un lot de graines est sélectionné s'il répond à un ensemble de critères, qui ne sont pas forcément visuels (diamètre, hauteur).

### 3.2.2.2 GYMNOSPERMES

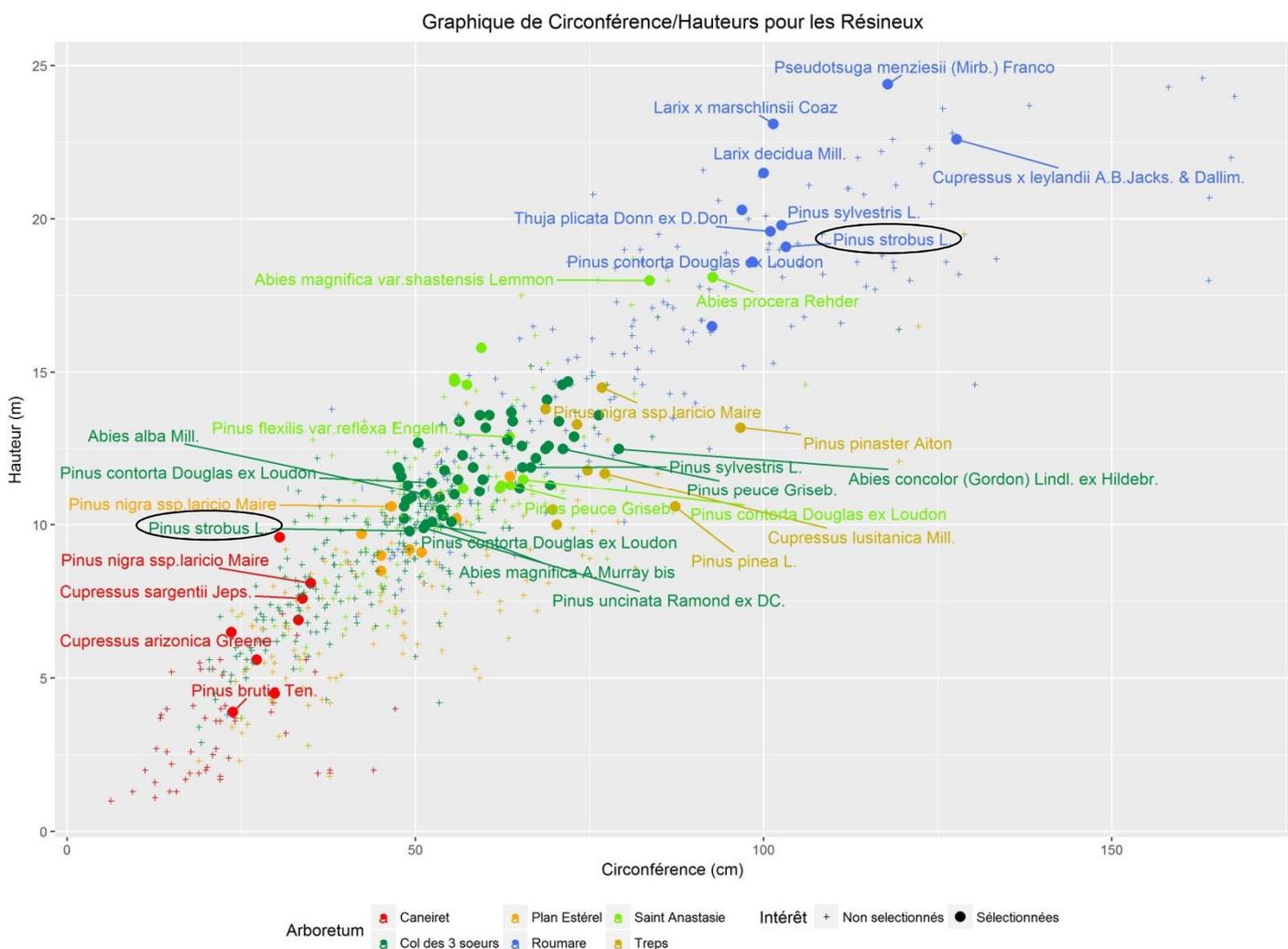


FIGURE 5 : GRAPHIQUE DE CIRCONFERENCE/HAUTEUR POUR LES RESINEUX SELECTIONNES

On remarque immédiatement que le nuage de points est bien plus étroit que celui des angiospermes. De plus, on observe que la croissance en circonférence des résineux est plus rapide que celle des feuillus, le nuage de points est incliné vers la droite. On peut également remarquer une certaine distribution des arboretums, contrairement aux angiospermes. En effet, on observe que les points de même couleur sont assez proches les uns des autres. Pour *Pinus strobus* L. deux lots de graines ont été sélectionnés. L'un

des lots, en bleu est testé à l'arboretum de Roumare, l'autre, en vert, est testé au Col des 3 sœurs. Les deux sont sélectionnés, la croissance de hauteur varie du simple au double (19 m à Roumare, 10 m au Col des 3 sœurs) et la croissance en diamètre également (103 cm à Roumare contre 49 cm au col des 3 sœurs). Toutefois, ces deux lots sélectionnés ne sont pas issus du même lot de graines. Il peut donc y avoir un effet lot de graines supérieur à celui de l'environnement.

Les taux de survies sont hétérogènes au sein de l'arboretum, le facteur essence est supérieur à celui de la localisation. On remarque que l'on a une situation inversée par rapport à la croissance, un taux de survie excellent dans le sud, très faible pour Roumare et intermédiaire pour le col des 3 sœurs.

Graphique de Survie juvénile/Survie adulte pour les résineux

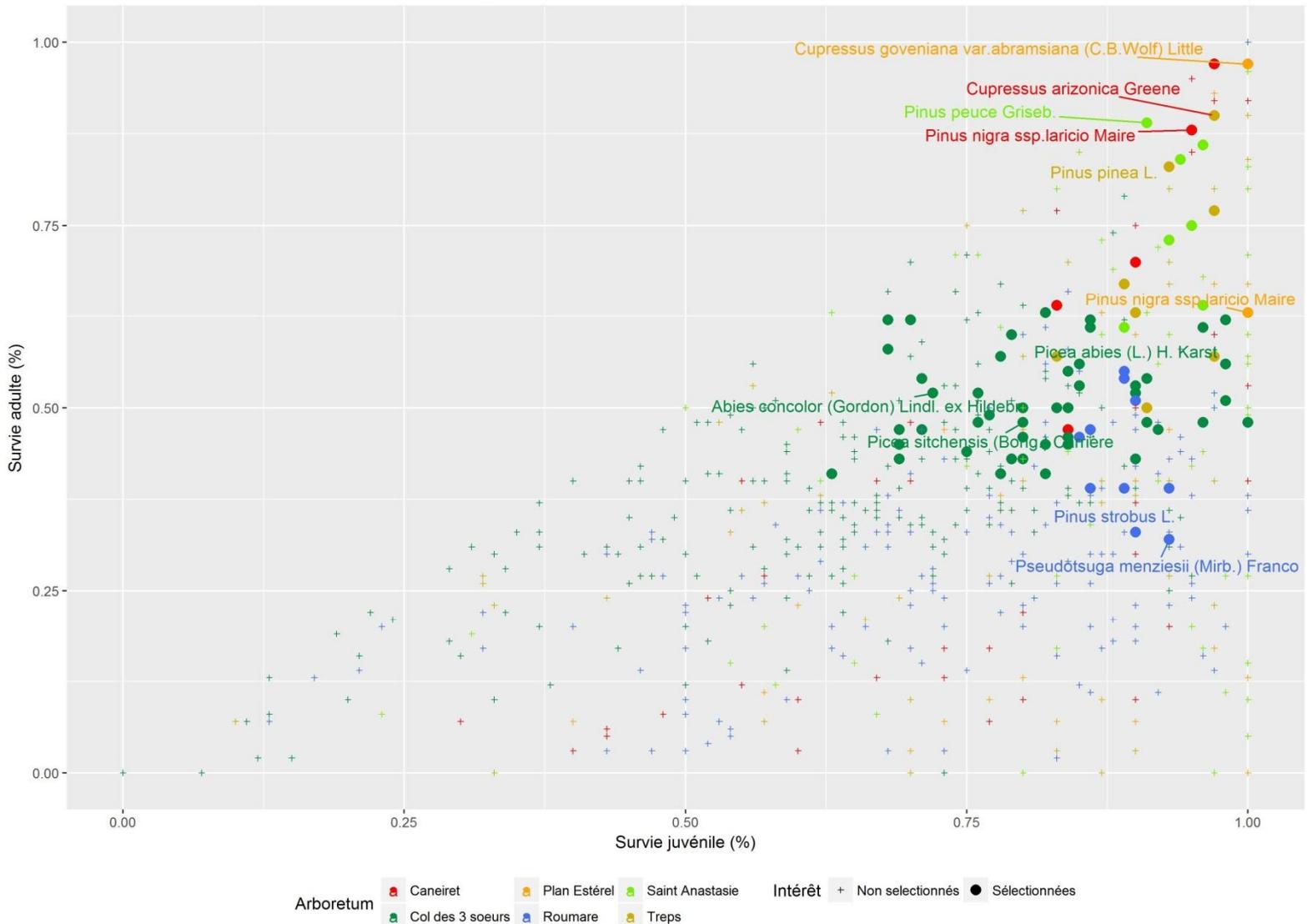
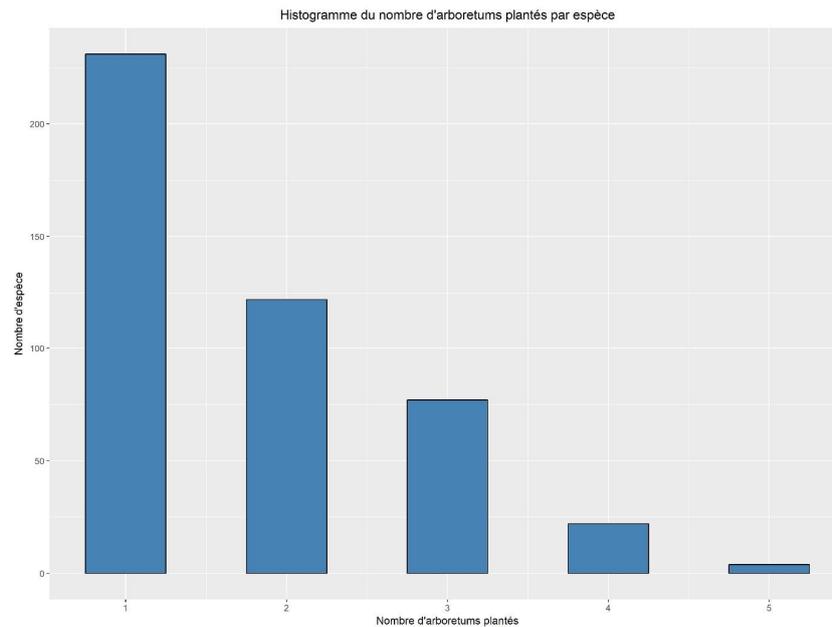


FIGURE 6 : GRAPHIQUE DE SURVIE JUVENILE / SURVIE ADULTE POUR LES RESINEUX SELECTIONNES

### 3.3 RESULTATS DE LA METHODE DE POTENTIALITE

#### 3.3.1 RESULTATS GENERAUX

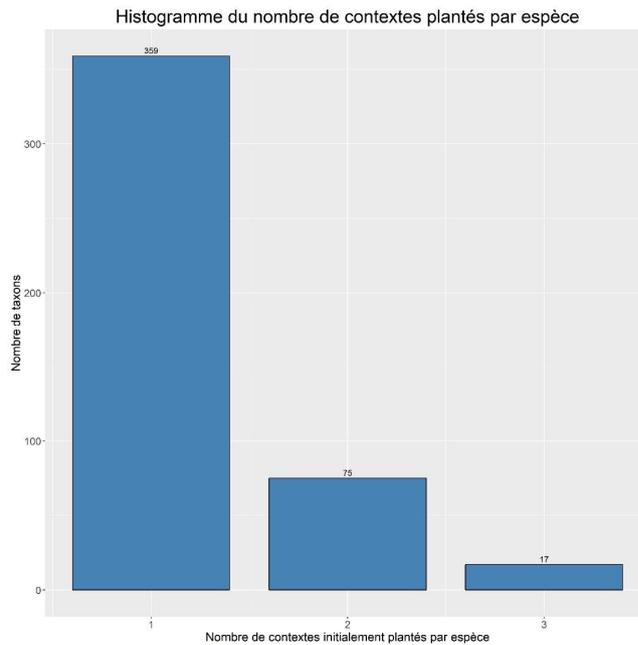
Le graphique ci-dessous présente la distribution du nombre d'essences dans les arboretums dans lesquels sont plantées chaque espèce. Il montre que l'on dispose de peu d'espèces qui sont plantées dans plusieurs arboretums. (Figure 7).



**FIGURE 7 : HISTOGRAMME DU NOMBRE D'ARBORETUM PLANTES PAR ESPECES**

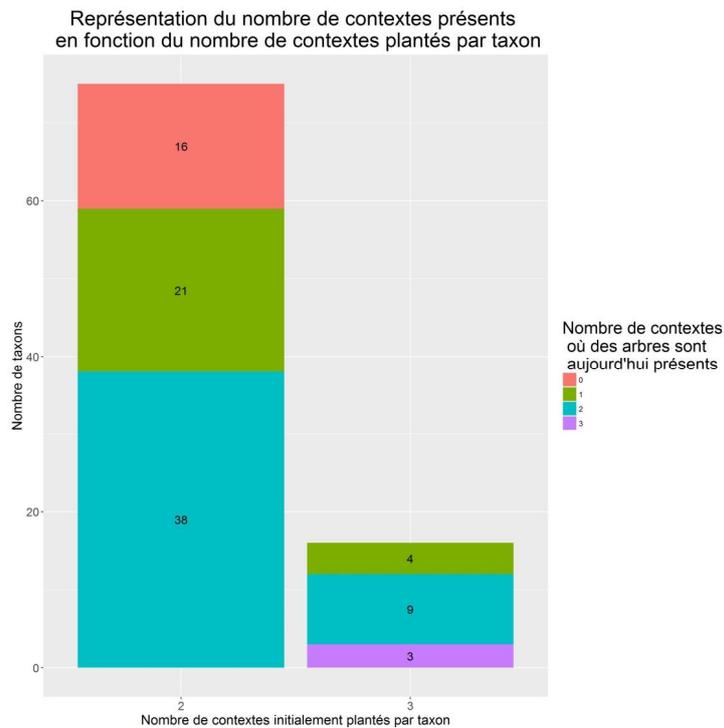
Quatre espèces seulement ont été plantées dans 5 arboretums et 22 espèces dans 4 arboretums différents. Les essences présentes dans 3 arboretum sont difficilement exploitable car cela peut correspondre à une essence plantée dans les 3 arboretums Méditerranéens (exemple : les Eucalyptus).

La figure 8 montre que 359 essences ne sont plantées que dans un contexte écologique, 75 sont présentes dans 2 contextes et seulement 16 sont présentes dans les 3 contextes



**FIGURE 8 : HISTOGRAMME DU NOMBRE DE CONTEXTES PLANTES PAR ESPECES**

La figure 9 montre que sur 16 taxons plantés dans les 3 contextes bioclimatiques. Il y a 3 taxons sur les 16, qui sont aujourd’hui présents dans les 3 contextes. 9 taxons sur 16 qui ne sont présents que dans 2 des 3 contextes. Et 4 taxons qui ne sont présents plus que dans 1 seul contexte.



**FIGURE 9 : REPARTITION CONTEXTES PLANTES / CONTEXTES PRESENTS**

Le tableau ci-dessous donne les essences plantées dans au moins deux contextes, où elles sont encore présentes et sélectionnées.

Taxons	Contextes plantes	Contextes où les arbres sont présents aujourd'hui	Contextes où les arbres sont sélectionnés	Contexte où l'essence a montré une tolérance
<i>Abies alba</i> Mill.	MC ROU	MC ROU	MC	ROU
<i>Abies balsamea</i> (L.) Mill.	MC ROU	MC ROU	MC	ROU
<i>Abies magnifica</i> var. <i>shastensis</i> Lemmon	MC ROU	MC ROU	MC	ROU
<i>Abies nordmanniana</i> ssp. <i>equi-trojani</i> Coode	MC ROU	MC ROU	MC	ROU
<i>Abies procera</i> Rehder	MC ROU	MC ROU	MC	ROU
<i>Betula pendula</i> Roth	MC ROU	MC ROU	ROU	MC
<i>Larix decidua</i> Mill.	SUD MC ROU	MC ROU	ROU	MC
<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst	MC ROU	MC ROU	MC	ROU
<i>Picea engelmannii</i> Parry ex Engelm.	MC ROU	MC ROU	MC	ROU
<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	MC ROU	MC ROU	MC	ROU
<i>Picea omorika</i> (Pancic) Purk.	MC ROU	MC ROU	MC	ROU
<i>Picea sitchensis</i> (Bong.) Carrière	MC ROU	MC ROU	MC	ROU
<i>Pinus contorta</i> Douglas ex Loudon	MC ROU	MC ROU	MC ROU	MC ROU
<i>Pinus flexilis</i> var. <i>reflexa</i> Engelm.	MC ROU	MC ROU	MC	ROU
<i>Pinus monticola</i> Douglas ex D. Don	SUD MC ROU	MC ROU	MC	ROU
<i>Pinus nigra</i> J.F. Arnold	SUD ROU	SUD ROU	SUD ROU	SUD ROU
<i>Pinus nigra</i> ssp. <i>laricio</i> Maire	SUD ROU	SUD ROU	SUD	ROU
<i>Pinus nigra</i> ssp. <i>pallasiana</i> (Lamb.) Holmboe	SUD ROU	SUD ROU	SUD	ROU
<i>Pinus peuce</i> Griseb.	MC ROU	MC ROU	MC	ROU
<i>Pinus strobus</i> L.	MC ROU	MC ROU	MC ROU	MC ROU
<i>Pinus sylvestris</i> L.	MC ROU	MC ROU	MC ROU	MC ROU
<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	SUD ROU	SUD ROU	ROU	SUD
<i>Sequoia sempervirens</i> (D. Don) Endl.	SUD ROU	SUD ROU	SUD	ROU

TABLEAU 18 : TABLEAU RECAPITULATIF DES TAXONS QUI REPONDENT AUX CRITERES DE LA METHODE DE POTENTIALITE (MC : MASSIF CENTRAL, CONTEXTE MONTAGNARD ; ROU : ROUMARE, CONTEXTE OCEANIQUE ; SUD : CONTEXTE MEDITERRANEEN)

Plusieurs cas coexistent :

➤ Les cas verts : Les espèces montagnardes à potentiel d'adaptation

L'essence a été sélectionnée dans le Massif Central et elle est aujourd'hui présente dans le Massif Central et à Roumare. L'essence est donc très bien adaptée au contexte montagnard mais, par sa survie en climat plus tempéré, on peut dire qu'elle présente un certain potentiel à un climat plus chaud que son optimum écologique. Ce qui représente un bon argument en contexte de réchauffement climatique. Douze espèces sont dans ce cas de figure.

➤ Les cas rouges : Les espèces méditerranéennes à potentiel d'adaptation

L'espèce a été sélectionnée dans le Sud et, elle est présente dans le Sud et à Roumare. C'est donc une essence bien adaptée à un contexte méditerranéen, au climat rude et sec. Elle peut se développer sur des sols pauvres mais lorsqu'elle se trouve en climat plus arrosé et sur des sols plus fertiles (Roumare), elle se développe bien.

➤ Les cas gris : Les espèces atlantique à potentiel d'adaptation

Les espèces sont, cette fois-ci, sélectionnées dans l'arboretum de Roumare. Elles y sont à leur optimum, mais leur présence dans un autre contexte (SUD ou MC) permet d'obtenir des informations sur leurs capacités d'adaptation à des climats plus contrastés.

➤ Les cas violets : Les espèces spécialisées à potentiel contenant une information supplémentaire :

Ce sont les rares essences à avoir été plantés dans les 3 contextes, mais elles n'ont pas survécu dans un des contextes. On peut classer ces espèces dans l'un des cas précédents. Mais puisqu'il existe un contexte où elles n'ont pas survécu, alors on peut dire qu'elle ne présente pas de potentiel d'adaptation à ce contexte.

➤ Les cas saumon : Les espèces à optimum écologique large :

Ces essences ont été sélectionnées dans deux contextes. Elles sont donc à optimum écologique large.

L'arboretum de Roumare est l'arboretum pont qui permet de comparer les essences entre elles. Il n'existe pas d'essence qui soit présentes à la fois dans le SUD et le MC.

A partir de ces résultats, nous sommes allés sur le terrain afin de voir l'état sanitaire des espèces, leur état. Si l'essence sélectionnée fait bien partie des meilleures et si les espèces à potentiel, le sont effectivement ou si elles sont trop dépérissantes.

On peut résumer les constatations faites dans le tableau suivant. Les cases en vert correspondent à l'arboretum où l'espèce a été sélectionnée (par la méthode de sélection).

Taxons	CAN/PLA	TREPS	ROUMARE	Col des 3 sœurs	Saint Anastasie
<i>Abies alba</i> Mill.	-	-	Bien, sains.	Très bien, sains et vigoureux.	-
<i>Abies magnifica var.shastensis</i> Lemmon	-	-	Moyen, croissance faible, un peu dominés par les voisins.	Très bien, beaux diamètres, de belles pousses annuelles.	Pas très homogènes, certains dépérissent.
<i>Abies nordmanniana ssp.equi-trojani</i> Coode	-	(Vus hors arboretum mais très bien)	-	Très beaux.	-
<i>Abies procera</i> Rehder	-	-	Quelques sujets mais en bon état sanitaire.	En forme.	Certains dépérissent ou sont déjà morts.
<i>Betula pendula</i> Roth	-	-	Bon état sanitaire.	Ok, bien pour le climat, bien pour mélange.	-
<i>Larix decidua</i> Mill.	-	-	Très bien, en forme, sains.	Bonne vigueur, bonnes croissances.	Très bien.
<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst	-	-	Corrects.	Très sains.	Naturalisé, il fonctionne bien.
<i>Picea engelmannii</i> Parry ex Engelm.	-	-	Médiocres.	Sains, en forme.	Etat sanitaire très médiocre
<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	-	-	Sans intérêt, dépérissant.	Sains, vigoureux, très abimés par les cerfs.	En train de mourir.
<i>Picea omorika</i> (Pancic) Purk.	-	-	Sains, bien.	Bon état sanitaire.	Marchent bien, en peuplement, très sains.
<i>Picea sitchensis</i> (Bong.) Carrière	-	-	Sains mais dégâts de gibier.	En place, quelques dépérissements.	-
<i>Pinus contorta</i> Douglas ex Loudon	-	-	Mauvaise forme, fourche à 2m.	Branches cassées.	Sains.
<i>Pinus flexilis var.reflexa</i> Engelm.	-	-	Sains	Sains, vigoureux.	Sains.
<i>Pinus monticola</i> Douglas ex D.Don	-	-	Sains.	Présence de rouille.	Sains.
<i>Pinus nigra</i> J.F.Arnold	-	Très sains.	Sains.	-	-
<i>Pinus nigra ssp.laricio</i> Maire	Très bien, bon état sanitaire, hétérogènes.	Très bien, bon état sanitaire.	Bien, inaccessibles (ronces).	-	-
<i>Pinus nigra ssp.pallasiana</i> (Lamb.) Holmboe	Bien, feuilles un peu courtes (stress).	Très bien.	Bon état sanitaire.	-	-
<i>Pinus peuce</i> Griseb.	-	-	Bon état sanitaire, ok.	Ok, sains.	Très bien, vigoureux.
<i>Pinus strobus</i> L.	-	-	Bonne santé, vigoureux.	Ok mais blessures de cervidés et attaques de rouille vésiculeuse.	-
<i>Pinus sylvestris</i> L.	-	-	Sains.	Sains.	-
<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	Sains, hors arboretums.	Hors arboretum, Sains.	Quelques beaux.	-	-
<i>Sequoia sempervirens</i> (D.Don) Endl.	Très bon état sanitaire.	-	Très bon état sanitaire.	-	-

TABLEAU 19 : TABLEAU DE L'ETAT SANITAIRE DES ESSENCES POTENTIELLES DANS LES DIFFERENTS CONTEXTES

A partir de ces constatations, nous pouvons affiner nos résultats. Il n'est pas souhaitable de retenir des essences qui présentent de mauvais états sanitaires dans le contexte où elles ont été sélectionnées comme dans les contextes où elles présentent un potentiel d'adaptation :

- Espèces exotiques retenues :

- *Abies nordmanniana* ssp. *equi-trojani* Coode
- *Betula pendula* Roth
- *Larix decidua* Mill.
- *Pinus flexilis* var. *reflexa* Engelm.
- *Pinus nigra* ssp. *laricio* Maire
- *Pinus nigra* ssp. *pallasiana* (Lamb.) Holmboe
- *Pinus nigra* J.F. Arnold
- *Picea omorika* (Pancic) Purk.
- *Pinus peuce* Griseb.
- *Robinia pseudoacacia* L.
- *Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl.

- Espèces rejetées car dépérissantes :

- *Abies balsamea* (L.) Mill.
- *Abies magnifica* var. *shastensis* Lemmon
- *Abies procera* Rehder
- *Picea engelmannii* Parry ex Engelm.
- *Picea glauca* (Moench) Voss
- *Picea sitchensis* (Bong.) Carrière
- *Pinus contorta* Douglas ex Loudon
- *Pinus monticola* Douglas ex D. Don
- *Pinus strobus* L.

- Espèces autochtones retenues :

- *Abies alba* Mill.
- *Picea abies* (L.) H. Karst

### 3.3.2 RESULTATS GRAPHIQUES

#### 3.3.2.1 ANGIOSPERMES

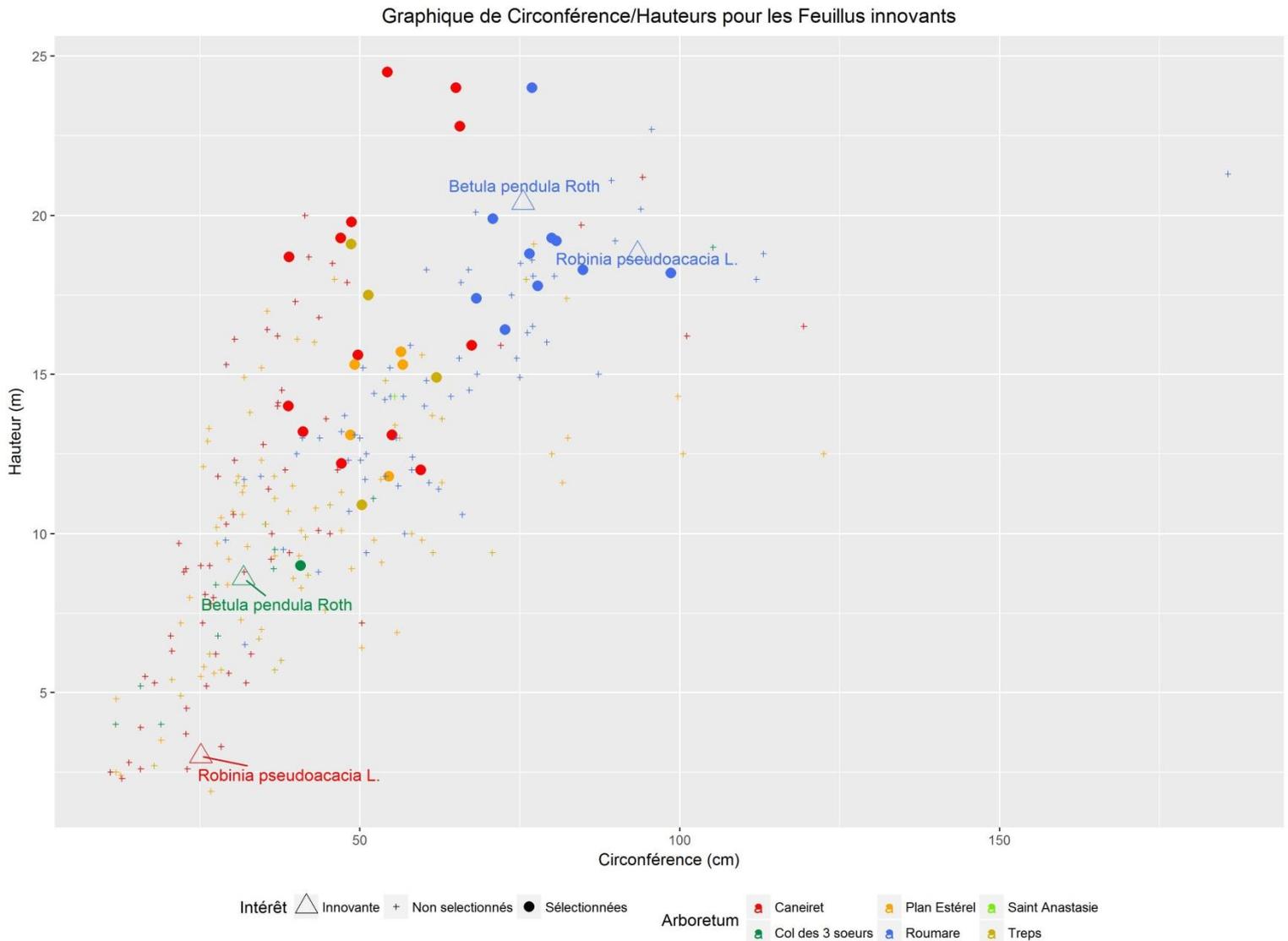


FIGURE 8: GRAPHIQUE DE CIRCONFERENCE/HAUTEUR POUR LES FEUILLUS INNOVANTS

La figure 10 présente les Circonférences/Hauteurs pour l'ensemble des lots de graines. Sur ce graphique les lots de graines présents mais pas sélectionnés sont représentés par une croix, les essences sélectionnées par un rond et les essences qui ont un potentiel d'adaptation avec un triangle. Lorsque l'essence est représentée par plusieurs lots de graines dans un arboretum, on a représenté de manière systématique le meilleur plateau. Pour les angiospermes présentes dans deux arboretums, seules deux essences *Robinia pseudoacacia* L. et *Betula pendula* Roth, sont des essences innovantes c'est-à-dire sélectionnées et encore présentes dans un autre arboretum.

Le triangle rouge correspond au robinier à Plan Esterel, faible hauteur et circonférence mais tout de même présent dans un climat méditerranéen. Cette essence ayant été sélectionnée à Roumare. On peut

conclure qu'elle peut non seulement présenter de très bons accroissements et un taux de survie juvénile et adulte acceptables mais également qu'elle présente une très bonne résistance à la sécheresse.

### 3.3.2.2 GYMNOSPERMES

Graphique de Circonférence/Hauteurs pour les Résineux innovants

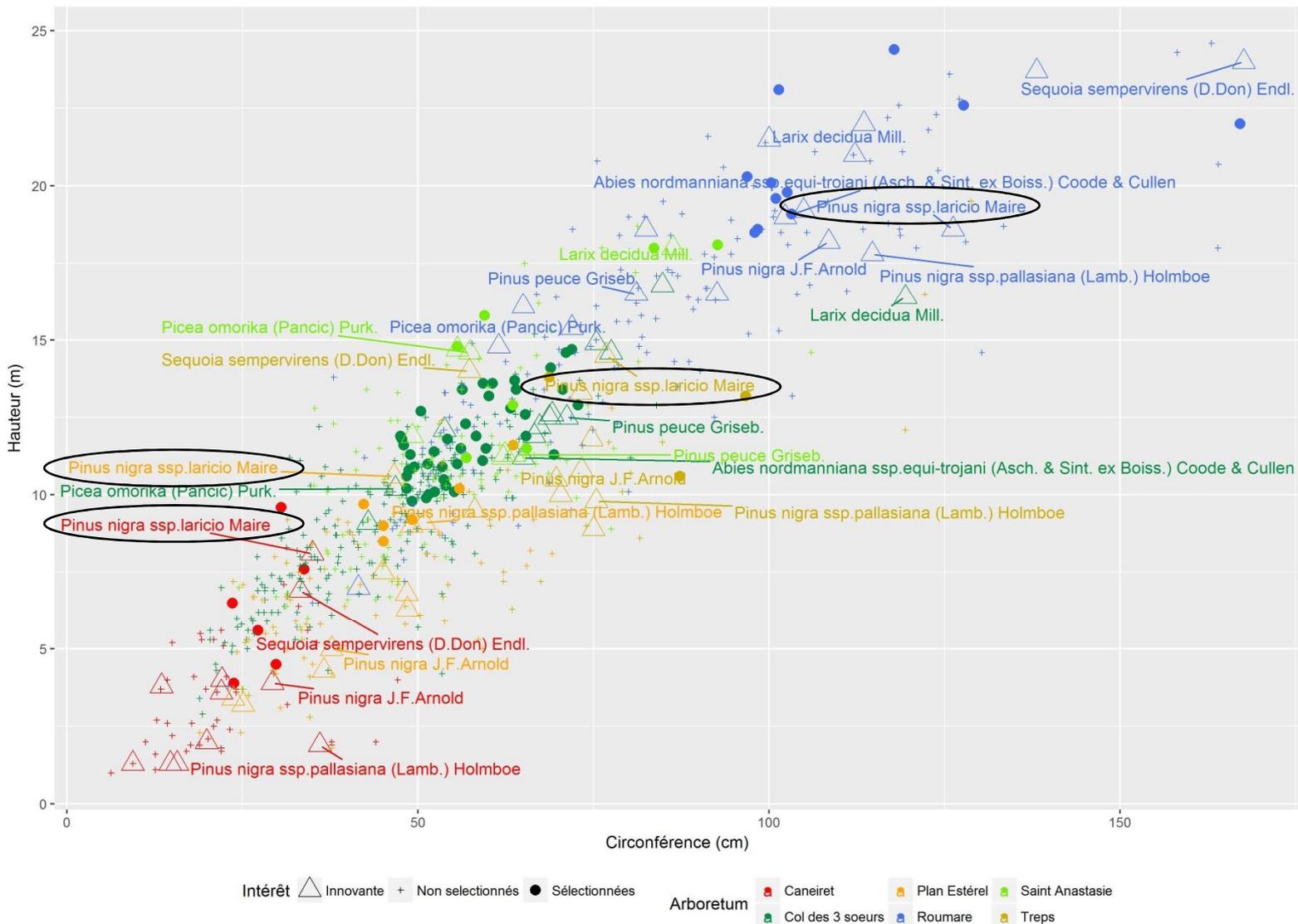


FIGURE 11 : GRAPHIQUE DE CIRCONFERENCE/HAUTEUR POUR LES RESINEUX INNOVANTS

On peut voir sur ce graphique que des essences n'ayant pas été sélectionnées dans leur contexte mais désormais potentielles peuvent présenter de meilleurs accroissements que les essences sélectionnées dans ce même contexte. C'est par exemple le cas de *Pinus nigra ssp. laricio Maire*. sélectionné au Treps, dans chaque contexte où ce taxon est présent, il nous montre de très bons accroissements.

Le second exemple très intéressant est celui de *Larix decidua Mill.*, en effet sélectionnée à Roumare avec plus de 100 cm de circonférence et 20 m de hauteur, on le trouve dans un contexte bien plus froid au col des 3 sœurs avec une circonférence de 75 cm de moyenne et 15 m de hauteur, ce qui est tout à fait satisfaisant.



*Sequoia sempervirens* dans l'arboretum du Caneiret (à gauche) et à Roumare (à droite).



*Larix decidua* dans l'arboretum du Col des 3 sœurs et à Roumare.

## 4 DISCUSSION

### 4.1 BASE DE DONNEE INTER ARBORETUM

La mise en place d'une base de données est indispensable lorsque l'on veut analyser des données disparates. Elle permet de mettre en relation des plantations qui ont été installées à différentes époque et avec des objectifs différents. Il est indispensable de nettoyer et standardiser les données afin de pouvoir les analyser. Les arboretums ne présentent pas d'hétérogénéité sur le plan de l'expérience mais sur le suivi, les conditions stationnelles et le climat. Les campagnes de mesures ont également été réalisées à différentes dates. Le taux de données par arboretums non utilisables varie de 5 à 10%. À la vue du nombre de lots de graines, du nombre d'intervenants sur ce dossier, ce taux est acceptable.

La base de données inter arboretum, rassemble l'ensemble des fichiers arboretums. Celle-ci présente l'avantage de pouvoir traiter tous les arboretums de la même manière. Cependant, les années de création et les âges des mesures le sont différentes, il n'est donc pas possible de tirer des conclusions quand la valeur du critère survie est plus élevée dans un arboretum que dans un autre. La valeur des critères de survie n'est pas comparable d'un arboretum à l'autre.

Ces différences de méthodologie sur les mesures posent de nombreux problèmes pour leurs analyses. Ces écueils peuvent être gommés en multipliant les prises de mesures et les sites. Les 6 arboretums présentent de nombreux lots de graines mais représentés dans très peu de sites. Afin d'affiner les résultats obtenus, il serait utile d'augmenter les points pour ces essences atypiques dans d'autres contextes pédo climatiques. La création de cette base de données a permis d'analyser les dispositifs et d'en tirer des informations concernant le comportement de ces essences face aux changements climatiques

### 4.2 LA METHODE DE SELECTION

La méthode de sélection mise en place se base uniquement sur des données quantitatives et des critères sans a priori. Celle-ci permet de sélectionner les meilleures espèces de chaque arboretum avec des critères utiles au gestionnaire. La valeur des critères de sélection a été déterminée de manière objective tout en respectant les spécificités de chaque arboretum. Elle permet également de prendre en compte les différences entre angiospermes et gymnospermes. Il pourrait être intéressant d'essayer de mener le raisonnement plus loin en déterminant des critères de sélection pour chaque genre.

Au sein des différents arboretums, 8,5 % en moyenne des lots de graines présents dans l'arboretum sont sélectionnés. Cela peut sembler faible mais il faut rappeler que ces dispositifs n'ont pas été conçus pour répondre à ces problématiques. L'approche terrain a permis d'observer un plateau de chaque essence sélectionnée. Dans la grande majorité des cas, les résultats étaient conformes à nos attentes (et aux performances intrinsèques de l'arboretum). Les critères et seuils qui ont été utilisés sont donc fiables.

Cependant, en comparant les résultats obtenus à la littérature (JC Bastien, 1988), certaines espèces sont absentes de notre sélection. Ainsi, pour l'arboretum de Roumare, *Abies grandis* Lindl. *Alnus rubra* Bong. n'étaient pas présents dans notre sélection. La raison est le faible taux de survie malgré des

circonférences élevées. Notre méthode est basée sur des critères de sylviculture pour le choix des filtres utilisés et prend donc en compte la survie. Ce critère est essentiel pour le gestionnaire, une faible survie au stade juvénile entraîne des coûts supplémentaires de regarnis et les coûts sont encore supérieurs au stade adulte. Les études précédentes comme les avis des différents experts ne placent pas ce critère comme indispensables, les données de croissance étant considérées comme prioritaires. Notre méthode est plus contraignante et élimine des essences prometteuses (en terme de croissance). Un modèle permettant de faire varier le taux de survie minimal en fonction des performances de l'arbre pourrait être un entre-deux ; un arbre présentant de très fortes circonférences aurait alors un seuil de sélection de survie plus bas. Ceci est une des limites de la méthode et pourrait être optimisé.

Notre méthode de sélection est donc intéressante et son originalité réside dans la mise en place des trois critères : statistiques, croissance et survie. Le critère statistique amène plus de solidité aux résultats. La méthode de détermination de la valeur des critères de sélection est robuste mais présente des limites. Toutefois, un intérêt majeur de la démarche est la possibilité de faire évoluer les critères, puisque la mise en place de cette méthode est programmée informatiquement et modifiable.

### 4.3 LES ESSENCES INNOVANTES

Les essences retenues sont essentiellement des gymnospermes. C'est un biais dû à la composition initiale des arboretums. En effet, s'il existe une relative parité entre feuillus et résineux dans l'arboretum de Roumare, ce n'est pas le cas dans les arboretums du massif central. De plus, peu d'espèces d'angiospermes sont communes entre les arboretums de Roumare et du Sud. D'autre part, la plupart de ces espèces sont originaires d'Amérique du Nord. C'est un nouveau biais de notre sélection dû à la composition de ces arboretums. Les onze essences retenues doivent maintenant être vérifiées sur le terrain à travers d'autres dispositifs existants mais aussi par de nouvelles expérimentations. Notre étude montre qu'il existe une forte variabilité intra lots. Il est important de connaître l'origine de cette variabilité et de pouvoir tester les meilleures ressources génétiques.

Parmi les essences innovantes,

Le sequoia toujours vert ou *Sequoia sempervirens* ((D. Don) Endl.) a retenu notre attention. C'est un arbre atteignant 23 m pour 1,6 m de diamètre dans les arboretums. Son aire s'étend sur une longueur de 700 km le long et 75 km de large le long de la côte, habituellement entre 0 et 300 m d'altitude mais exceptionnellement jusqu'à 1000 m (The gymnosperm database). Il semble particulièrement résistant aux chaleurs sèches à l'état adulte comme l'attestent son comportement en 2003 et 2006 et les années qui ont suivi où aucun dépérissement n'a été mesuré dans les arboretums. Sa résistance aux grands froids est également meilleure quand les arbres sont âgés, les jeunes sujets pouvant être plus sensibles. En 1985, lors de très grands froids en France, des spécimens de plus de 40 m ont entièrement roussi avant de reverdir intégralement au printemps suivant. (T. Lamant, 2017, communication personnelle). Nous l'avons sélectionné au Caneiret pour ses bonnes croissances, sa bonne survie et l'état sanitaire observé sur le terrain confirme le très bon comportement de ce taxon dans des conditions climatiques difficiles. On le trouve également à Roumare où il n'est pas sélectionné. Le critère survie de notre sélection n'a pas permis de le sélectionner pour sa faible survie adulte. La méthode de potentialité à tout de même permis de le mettre en exergue. Elle résiste à de fortes chaleurs et, est capable de produire des accroissements impressionnants.

La seconde essence résineuse qui retient mon attention est *Larix decidua* Mill. Celle-ci se rencontre en Europe dans les massifs montagneux des Alpes (de 1000 à 2400 m), Carpates (de 600 à 1300 m) et Sudètes (400 à 800 m). On la trouve également en plaine en Pologne (150 à 600 m). Cette essence nécessite une pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 600 et 1200 mm et une luminosité importante (The gymnosperm database). Suite à notre analyse, on peut constater que cette essence se comporte très bien en altitude, même lorsque ses périodes de végétations sont assez courtes et résiste bien au froid. C'est une des essences résineuses qui présente une des plus fortes croissances juvéniles (JC Bastien, 1988). Etant sélectionnée à Roumare, ceci nous montre qu'elle résiste bien à un climat plus tempéré et nous permet de penser qu'il peut être très intéressant de l'essayer en climat montagnard. Dans l'hypothèse d'une augmentation des températures, on sait que cette essence se comportera bien même si le climat montagnard devient plus chaud. De plus, il paraît tout à fait intéressant de diversifier le paysage des plateaux de Lozère, on trouve beaucoup d'Épicéa, et dans le contexte actuel de changement climatique, il est nécessaire de diversifier le panel d'essences. Le mélèze d'Europe produit également un bois est de très bonne qualité. Toutefois, les mélèzes sont sensibles au chancre. Il serait intéressant de tester aussi le mélèze hybride entre mélèze d'Europe et du Japon. Ceux-ci sont plus plastiques et moins sensible au chancre que le mélèze d'Europe.

*Pinus peuce* Griseb. serait également très intéressante pour l'enrichissement de ces zones. Son aire naturelle est morcelée en 17 populations qui s'étagent entre 600 et 2200 m d'altitude au sud-est de l'Europe entre 41° et 43° de latitude nord (Macédoine, Monténégro, Albanie, Grèce, sud Serbie, Bulgarie) et 20° à 24° de longitude Est. Il supporte bien les stations pauvres et podzoliques. Il craint les excès d'eau dans le sol. C'est une espèce plutôt montagnarde, sa présence à Roumare nous indique un potentiel de résistance à la chaleur. Elle possède une croissance juvénile forte.

*Picea omorika* (Pancic) Purk. présente aussi un fort potentiel. C'est une espèce rare dont l'aire est limitée à la vallée de la Drina qui sépare la Bosnie de la Serbie entre 43° 21' et 44° 08' de latitude nord et 18° 37' à 19° 40' de longitude est. On recense actuellement 14 populations en Bosnie-Herzégovine et 11 en Serbie, ce qui représente au total un millier d'arbres adultes environ. Considéré comme une espèce relique de l'ère tertiaire, ce taxon se rencontre principalement en versants nord souvent escarpés, entre 300 et 1700 m d'altitude. Ce taxon supporte la chaleur s'il dispose d'une alimentation en eau dans le sol. Cette essence étant présente en très grands placeaux (500 plants) dans l'arboretum de Saint-Ansatie, cela nous a permis d'apprécier son très bon comportement en peuplement. Son origine méditerranéenne est un argument de plus en faveur du changement climatique. Les deux essences précédentes produisent également un bois d'excellente qualité, utilisable en charpente.

Concernant les feuillus. Le robinier faux-accacia, *Robinia pseudoacacia* L. apparaît comme une essence prometteuse à la vue de sa vigueur, sa rusticité et ses caractéristiques de résistance à la chaleur (Flore forestière française). C'est un arbre pouvant atteindre au moins 25 m de haut et jusqu'à 2 m de diamètre dans son aire naturelle. Cette espèce est originaire de l'est des États-Unis et son aire naturelle est divisée en deux zones principales disjointes, les Appalaches à l'est, et à l'ouest du fleuve Mississippi, dans le plateau d'Ozark et les monts Ouachita. Il est naturalisé en Europe depuis son introduction en France dès 1604.

Même en contexte méditerranéen, sa plasticité lui permet, dans une certaine mesure, de supporter le climat et la baisse de la pluviométrie durant la saison de végétation. Les caractéristiques de son bois sont tout à fait remarquables en termes de durabilité et son âge d'exploitabilité (40 ans) est plus court que des essences actuelles. Le développement de cette essence peut permettre de limiter les risques par rapport aux événements extrêmes. Un travail est actuellement en cours pour sélectionner les meilleures

provenances françaises afin de constituer un verger à graines corrigeant ses défauts de rectitude et obtenir un bois de qualité supérieure. Ses régénérations sont très actives. Cet arbre semble présenter un réel intérêt et être innovant.

*Betula pendula* Roth. est sélectionné à Roumare pour ses bonnes performances. Son comportement social et son état sanitaire dans le massif central étaient très bons. Or très peu d'essences feuillues prennent place dans ce contexte montagnard. Il paraît évident que les mélanges feuillus/résineux sont toujours très bénéfiques pour la forêt, pour ses éléments minéraux et sa résilience. Un mélange épicéa/bouleau permet l'amélioration de la reprise et de la croissance juvénile des épicéas. (CDAF, guide n°7). Le bouleau verruqueux est une essence innovante pour des régions montagnardes. La production d'un bois de qualité secondaire est également intéressante, notamment pour le bois de chauffage des populations locales.

Il est important d'améliorer les connaissances sur ces essences en dehors de leur aire naturelle. En effet, les essences introduites peuvent avoir des réactions aux climats et des qualités de bois très différentes de celles de leur zone d'origine. L'enquête essence atypiques, menée par l'ONF a pour but de recenser les essences autochtones hors de leur contexte ainsi que les essences exotiques. Il serait donc possible de connaître les zones de présence de ces essences, en France. En recueillant le plus de données sur les présences des essences exotique en France, nous pourrions compléter les informations concernant l'autécologie de ces essences en climat changeant et, à terme, conseiller de manière efficace les gestionnaires forestiers.

## 5 CONCLUSION

Dans ce mémoire, nous avons vu comment il était possible de mettre en réseau différents arboretums. Ces dispositifs de recherche présentent un matériel génétique très riche et il est possible de continuer à les utiliser. L'harmonisation des données est une étape primordiale qu'il ne faut pas négliger. Une fois la base de données constituée, il est alors possible d'obtenir de multiples résultats. Nous avons essayé, par notre travail de présenter une de ces possibilités permettant de mettre en lumière les meilleures espèces de chaque arboretum selon des critères utiles pour le gestionnaire. L'approche terrain est indispensable pour affiner les résultats de cette méthode. Toutefois, nous avons vu la méthode de sélection présente certaines limites, qu'il serait intéressant d'améliorer.

Puis, en croisant les résultats des différents arboretums, nous avons obtenu des informations intéressantes concernant les potentiels d'adaptation des espèces. Ceci a été fait de manière systématique ce qui peut permettre d'appliquer la méthode à d'autres arboretums. Notre méthode peut s'incrémenter au cours du temps et faire évoluer les résultats. Les essences retenues semblent tout à fait pertinentes et il serait désormais nécessaire de continuer le raisonnement à partir de toutes les données de présences disponibles pour connaître les zones de plantations adaptées. Un travail de recherche sur les provenances est également possible à partir de notre base de données.

Enfin, ce travail montre comment à partir des plantations passées et des données de présence d'une essence, nous pouvons venir alimenter les analyses de vulnérabilité des essences et de leur potentialité. Toutefois, il serait intéressant pour compléter la démarche de tester des modèles de vulnérabilité de ces essences aux changements climatiques à la fois à partir des points de présence en France et dans l'aire naturelle. Cette approche pourrait également être complétée par une étude de dendrochronologie permettant de comprendre comment les essences sélectionnées ont réagi aux accidents climatiques passés.

Ce travail s'inscrit dans la démarche de recherche d'essences forestières innovantes pour le monde de demain.

## BIBLIOGRAPHIE :

Bastien J.-C., 1988 – Premiers enseignements des arboretums d'élimination de Basse-Seine, *Revue Forestière Française*, vol. XL, n°2, p. 108-116.

Bastien, J.-C., Imbert, P., Vallance, M., 1990 - Choix des espèces pour le reboisement en haute altitude. Premiers enseignements de l'arboretum Curie (Col des Trois-Sœurs - Lozère - alt. : 1 470m). *Revue Forestière Française*, vol. XLII, n°5, p. 495-509.

Brachet S., 2005 - Mise en place d'un réseau français d'arboretums pour une valorisation coordonnée des ressources ligneuses *ex situ* – De l'observation des écosystèmes forestiers à l'information sur la forêt – Paris – 2 et 3 février 2005.

Bréda N., Granier A., Aussenac G., 2004 - La Sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers. - *Revue forestière française*, vol. LIII, n° 2, p. 109-131.

Buchlin S., 2011 - Etude de la recolonisation des arboretums d'élimination par les espèces exogènes, en région méditerranéenne, Mémoire, Université Henri Poincaré, Nancy (FRA).

Piedallu C., Perez V., Gégout J.-C., Lebourgeois F., Bertrand R., 2009 - Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l'Epicéa, du Sapin, du Hêtre et du Chêne sessile en France. *Revue Forestière Française*, Ecole nationale du génie rural, 2009, LXI (6), pp.567-593.

Ducatillon C., Badeau V., Bellanger R., Buchelin S., Diadema K., Gili A., Thevenet J., 2015 - Détection précoce du risque d'invasion par des espèces végétales exotiques introduites en arboretum forestier dans le Sud-Est de la France. Émergence des espèces du genre *Hakea*. Mesures de gestion. *Revue d'Ecologie (Terre et Vie)*, Vol. 70 (suppl 12 « Espèces invasives »), p. 139-150.

Évaluation du dispositif de recherche et développement de l'Office National des Forêts – Office National des Forêts, Document n°3, Rapport d'activité 2004-08, 5 Octobre 2009, 83p.

Fady B. et J. Thévenet, 2006 - Les arboretums : un outil de recherche et d'éducation sur la biodiversité forestière - Le cas de l'arboretum du Ruscas (Var), *Forêt méditerranéenne*, XXVII, 3, p. 235-246.

Gaudin S., Madrolles F., Richard J.-B., Brusten T., 2016. - Typologie des stations forestières et choix des essences en contexte de changements climatiques. *Forêt entreprise* n°228. p. 49-54.

Lamant T., 2010 – Les arboretums d'intérêt national à l'Office National des Forêts – Présentation, Antibes.

Lebourgeois F., Rathgeber C., Ulrich E., 2010 - Effet de la variabilité climatique et des événements extrêmes sur la croissance d'*Abies alba*, *Picea abies* et *Pinus sylvestris* en climat tempéré français, *Revue forestière française*, vol. LXII, n° 1, p. 7-23.

Michelot A., Gachet S., Legay M., Landamnn G., 2013 - L'autécologie des essences forestières et son intégration dans les outils d'aide à la décision : synthèse et évaluation, Rapport d'étude dans le cadre du projet TRAITAUT.

Moisselin J-M., Schneider M., Canellas C., 2002 - Les changements climatiques en France au XX<sup>e</sup> siècle. Etude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations. Société météorologique de France, Paris (FRA).

Paillassa E., Perrier C., 2017. Production forestière et changement climatique : un défi pour l'expérimentation. Forêt entreprise n°232, janvier 2017. pp40-43.

R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>

Rameau, J.-C. et al., 1989– Flore forestière française, volume 1 : plaines et collines – IDF.

Rapport d'activité soumis pour évaluation des activités Recherche et Développement de l'Office National des Forêts période 2010-14 Fontainebleau, jeudi 19 février 2015.

Réseau national multipartenaire d'évaluation de ressources génétiques forestières pour le futur, (ESPERENSE), Appel à projet national 2017 – Innovation et investissement en forêt – Dossier de candidature

Rinaudo Y., 1988 - La forêt méditerranéenne d'hier à aujourd'hui – Le cas de la Provence, Forêt méditerranéenne, t. X, 1, p. 20-25.

Riou-Nivert P., 2012 - La forêt face au changement climatique : menaces et stratégies d'adaptation – Symbiose, le magazine d'AgroParisTech Alumni – n° 4, p. 15-19.

ORIENTATION SYLVICOLE, Guide n° 007 : peuplements mélangés - atouts, modalités, perspectives Centre de développement agroforestier de Chimay.

Y. BIROT - R. LANARÉS Briot Y., Lanarés R., 1977 – *Abies procera* : Une alternative à l'épicéa pour le reboisement des zones d'altitude sous climat océanique. Revue Forestière Française, vol. XXX, n°3, p. 199-205.

## ANNEXES :

### Annexe 1 : Angiospermes sélectionnées par arboretum

Taxon	N° lot de graines	Nombre de placeaux	Nombre arbres présents	Circ. Moy. (cm)	Ecart type circ	Haut . Moy. (m)	Ecart type haut.	Survie juvénile	Survie adulte	Arboretum
<i>Eucalyptus bridgesiana</i> F.Muell. ex R.T.Baker	58168	1	14	38.8	25.6	14	1.8	NA	0.6	CAN
<i>Eucalyptus glaucescens</i> Maiden & Blakely	711274	1	17	65.6	33	22.8	5.2	0.83	0.53	CAN
<i>Eucalyptus saint-johnii</i> (F.Muell. Ex R.T.Baker) F.Muell. ex R.T.Baker	72226	1	15	41.1	13.1	13.2	1.1	NA	0.57	CAN
<i>Eucalyptus viminalis</i> Labill.	72233	1	12	47.1	27.4	12.2	5.3	0.97	0.53	CAN
<i>Eucalyptus archeri</i> Maiden & Blakely	72240	1	16	67.5	31.1	15.9	1	0.83	0.53	CAN
<i>Eucalyptus rubida</i> H.Deane & Maiden	72281	1	23	38.9	29.8	18.7	1.8	0.9	0.77	CAN
<i>Eucalyptus ovata</i> Labill.	72283	1	21	47	27.6	19.3	1.4	0.97	0.73	CAN
<i>Eucalyptus pulchella</i> Desf.	72405_2	1	26	54.3	25.6	24.5	1.8	0.93	0.87	CAN
<i>Eucalyptus parvula</i> L.A.S.Johnson & K.D.Hill	73960	1	17	59.5	41.7	12	0.7	0.83	0.53	CAN
<i>Eucalyptus laevopinea</i> F.Muell. ex R.T.Baker	73971	2	38	65	32	24	1.1	NA	0.86	CAN
<i>Eucalyptus aggregata</i> H.Deane & Maiden	74680	1	12	48.7	30.9	19.8	1.4	0.87	0.53	CAN
<i>Eucalyptus delegatensis</i> F.Muell. Ex R.T.Baker	74684	1	12	49.7	18.9	15.6	0.7	0.87	0.6	CAN
<i>Eucalyptus cephalocarpa</i> Blakely	I177	1	23	55	26.6	13.1	0.4	NA	0.67	CAN
<i>Betula papyrifera</i> Marshall	71188	3	23	40.7	12.3	9	3.1	0.28	0.23	COL
<i>Eucalyptus cinerea</i> F.Muell. ex Benth.	72098	1	26	48.5	27.5	13.1	0.6	0.9	0.83	PLA
<i>Eucalyptus cordata</i> Labill.	72227	1	17	56.4	24.9	15.7	1.3	0.83	0.67	PLA
<i>Eucalyptus ovata</i> Labill.	72247	1	15	49.2	22.2	15.3	1.9	0.83	0.8	PLA
<i>Eucalyptus acaciiformis</i> H.Deane & Maiden	76574	1	22	56.7	23.2	15.3	0.1	NA	0.73	PLA
<i>Eucalyptus prava</i> L.A.S.Johnson & K.D.Hill	7978	1	6	54.5	20.9	11.8	1	NA	0.6	PLA
<i>Quercus palustris</i> Münchh.	71148	7	61	80.7	19.4	19.2	3	0.88	0.52	ROU
<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	73118	4	30	93.4	17.1	18.8	2.3	0.71	0.44	ROU
<i>Acer rubrum</i> L.	73286	4	34	68.2	15.3	17.4	2.4	0.83	0.64	ROU
<i>Acer rubrum</i> L.	73287	6	34	70.8	15.1	19.9	1.8	0.85	0.45	ROU
<i>Acer rubrum</i> L.	73288	4	16	84.9	14.5	18.3	2	0.8	0.55	ROU
<i>Acer rubrum</i> L.	73289	4	29	76.5	21.3	18.8	1.4	0.85	0.52	ROU
<i>Betula pendula</i> Roth	73304	6	87	75.5	20	20.4	3	0.9	0.46	ROU
<i>Liquidambar styraciflua</i> L.	74200	4	26	72.7	12.3	16.4	1.7	0.82	0.49	ROU
<i>Quercus rubra</i> L.	75197	4	32	98.6	27.7	18.2	2.1	0.86	0.54	ROU
<i>Quercus palustris</i> Münchh.	75243_1	3	25	80	14.2	19.3	1.2	1	0.55	ROU

Nothofagus obliqua (Mirb.) Oerst. Fagus sylvatica L.	77117	2	15	76.9	26.2	24	3.7	0.98	0.46	ROU
	ONF	4	46	77.8	18.9	17.8	1.7	0.91	0.59	ROU
Eucalyptus rodwayi R.T.Baker & H.G.Sm.	72224	1	17	50.3	16	10.9	1.6	0.87	0.77	TRE
Eucalyptus viminalis Labill.	72234	1	9	51.3	24.4	17.5	3	0.97	0.97	TRE
Eucalyptus gregsoniana L.A.S.Johnson & Blaxell	72236	1	23	48.6	23.2	19.1	0.3	0.87	0.73	TRE
Eucalyptus aggregata H.Deane & Maiden	72284	2	20	62	25.4	14.9	0.1	0.83	0.76	TRE

Annexe 2 : Gymnospermes sélectionnés par arboretum

Taxon	N° lot de graines	Nombre de placeaux	Nombre arbres présents	Circ. Moy. (cm)	Ecart type circ	Haut. Moy. (m)	Ecart type haut.	Survie juvénile	Survie adulte	Arboretum
<i>Pinus brutia</i> Ten.	60162	2	17	23.8	11.5	3.9	1.8	0.84	0.47	CAN
<i>Pinus nigra</i> ssp. <i>Jaricio</i> Maire	72172	2	53	35	14.5	8.1	1.2	0.95	0.88	CAN
<i>Cupressus goveniana</i> var. <i>abramsiana</i> (C.B.Wolf) Little	72406	2	53	29.8	12.4	4.5	0.7	0.83	0.94	CAN
<i>Cupressus sargentii</i> Jeps.	72409	1	21	33.8	13.8	7.6	1.2	0.9	0.7	CAN
<i>Sequoia sempervirens</i> (D.Don) Endl.	72411	2	19	33.2	21.1	6.9	6	0.83	0.64	CAN
<i>Cupressus arizonica</i> Greene	73032	1	24	23.6	8.8	6.5	0.3	0.97	0.9	CAN
<i>Cupressus goveniana</i> var. <i>abramsiana</i> (C.B.Wolf) Little	73035	1	28	30.5	10.5	9.6	0.9	0.97	0.97	CAN
<i>Cupressus goveniana</i> var. <i>abramsiana</i> (C.B.Wolf) Little	74654	1	29	27.2	11.1	5.6	0.3	0.97	0.97	CAN
<i>Pinus peuce</i> Griseb.	121	3	38	71.2	12.4	12.5	1	0.79	0.6	COL
<i>Pinus contorta</i> Douglas ex Loudon	2094	3	29	63.2	12.8	12.8	2.2	0.98	0.62	COL
<i>Pinus contorta</i> Douglas ex Loudon	2106	2	23	49.2	8.9	9.8	1.3	0.84	0.5	COL
<i>Pinus contorta</i> Douglas ex Loudon	59142	3	27	59.3	13.5	13.6	2.5	0.92	0.47	COL
<i>Pinus sylvestris</i> L.	60197	3	32	65.4	11.7	11.9	1.6	0.69	0.45	COL
<i>Pinus peuce</i> Griseb.	61042	4	44	69.1	13.9	12.6	1.6	0.77	0.49	COL
<i>Picea sitchensis</i> (Bong.) Carrière	62334	3	28	71.9	22.1	14.7	2	0.86	0.47	COL
<i>Picea sitchensis</i> (Bong.) Carrière	62380	3	36	64	16.1	13.4	5.1	0.84	0.55	COL
<i>Picea sitchensis</i> (Bong.) Carrière	64568	3	31	72.8	18.3	12.9	1.8	0.8	0.48	COL
<i>Pinus peuce</i> Griseb.	66403	3	33	67.3	13.5	12.2	1	0.76	0.52	COL
<i>Pinus peuce</i> Griseb.	66404	4	44	68.7	10.6	12.5	1.4	0.91	0.54	COL
<i>Abies alba</i> Mill.	67442	3	27	51.4	19.5	11	0.7	0.63	0.41	COL
<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst	68187	4	43	60.1	14.7	13.2	1.4	0.83	0.5	COL
<i>Abies nordmanniana</i> ssp. <i>equi-trojani</i> (Asch. & Sint. ex Boiss.) Coode & Cullen	68238	4	29	65	15.2	11.2	1.8	0.86	0.61	COL
<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst	68334	3	44	47.7	19.4	11.8	3.2	0.7	0.62	COL
<i>Pinus peuce</i> Griseb.	70224	3	34	66.6	14	11.9	1.2	0.84	0.5	COL
<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	71169	3	30	56.1	10	11.5	0.9	0.8	0.5	COL
<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	72037	3	27	53.5	10.1	10.9	1	0.8	0.46	COL
<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst	7204	4	55	56.8	11.7	12.3	1.4	0.96	0.61	COL
<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	72042	3	25	48.9	8.7	11.3	1.3	0.79	0.43	COL
<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	72045	3	29	55.6	10.6	11	1	0.84	0.46	COL
<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	72046	3	22	48.7	6.1	10.8	0.8	0.82	0.45	COL
<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	72047	3	23	54	8.1	10.3	0.9	0.8	0.43	COL
<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	72049	3	21	54.2	10.1	11.8	0.8	0.75	0.44	COL
<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	72052	3	27	48.4	11.6	10.2	1.1	0.78	0.41	COL

Abies balsamea (L.) Mill.	72059	3	23	59.7	9.7	11.5	0.9	0.82	0.41	COL
Pinus uncinata Ramond ex DC.	72192	3	28	51.2	12.6	9.9	0.9	0.69	0.43	COL
Picea abies (L.) H. Karst	7221	3	33	58.3	10.2	11.9	0.8	0.82	0.63	COL
Abies magnifica A.Murray bis	72384	3	40	52.4	18.4	10.1	1.8	0.78	0.57	COL
Picea abies (L.) H. Karst	73020	4	61	56.3	17	13.4	2.7	0.85	0.56	COL
Abies alba Mill.	73024	3	21	49.5	19.8	10.9	2.1	0.71	0.54	COL
Pinus strobus L.	73030	3	27	49.2	13.8	9.8	2.4	0.71	0.47	COL
Picea abies (L.) H. Karst	7311	3	38	50.4	11.2	12.7	0.7	0.91	0.48	COL
Abies magnifica A.Murray bis	73135	4	55	55.2	16.2	10.1	1.7	0.86	0.62	COL
Pinus monticola Douglas ex D.Don	73162	4	21	70.6	18.3	13.4	1.8	0.98	0.56	COL
Pinus monticola Douglas ex D.Don	73163	4	22	71.1	8.8	14.6	2.5	1	0.48	COL
Pinus monticola Douglas ex D.Don	73165	3	26	68.9	10.7	14.1	0.8	0.98	0.51	COL
Picea abies (L.) H. Karst	7320	2	26	47.5	12.3	11.9	1.2	0.9	0.53	COL
Abies magnifica var.shastensis Lemmon	73208	3	21	69.4	18.2	11.3	1.7	0.64	0.69	COL
Pinus contorta Douglas ex Loudon	73226	3	23	51.5	10	10	1.2	0.96	0.48	COL
Pinus contorta Douglas ex Loudon	73227	4	30	52.3	10.2	11.4	2.9	0.9	0.43	COL
Pinus contorta Douglas ex Loudon	73229	4	47	60.6	14.8	13.6	1.5	0.68	0.58	COL
Pinus contorta Douglas ex Loudon	73232	4	34	63.8	13.8	13.7	1.8	0.84	0.45	COL
Pinus contorta Douglas ex Loudon	73233	3	34	65.3	11.6	12.6	1.9	0.9	0.52	COL
Pinus contorta Douglas ex Loudon	73234	3	25	53.7	9.9	10.5	0.8	0.76	0.48	COL
Pinus contorta Douglas ex Loudon	73237	3	25	48	9.8	11.6	1.4	0.69	0.47	COL
Picea engelmannii Parry ex Engelm.	73267	3	24	48.4	12.9	10.6	1.4	0.68	0.62	COL
Picea engelmannii Parry ex Engelm.	73284	4	48	59.2	17.5	11.1	1.8	0.85	0.53	COL
Pinus nigra ssp.Jaricio Maire	62452	1	19	46.6	19.9	10.6	0.6	1	0.63	PLA
Pinus nigra ssp.pallasiana (Lamb.) Holmboe	63228	1	24	50.9	17.6	9.1	0.9	0.97	0.77	PLA
Cupressus goveniana var.abramsiana (C.B.Wolf) Little	73031	1	26	49.2	18.5	9.2	0.3	1	0.97	PLA
Cupressus arizonica Greene	73073	1	24	42.3	14.2	9.7	0.9	NA	0.87	PLA
Cupressus goveniana var.abramsiana (C.B.Wolf) Little	74096	1	21	63.6	24.2	11.6	0.9	NA	0.8	PLA
Cupressus arizonica Greene	741967	1	26	45.1	16.9	8.5	1.7	NA	0.97	PLA
Cupressus arizonica Greene	76502	1	29	45.1	17.6	9	0.7	NA	0.97	PLA
Cupressus torulosa D.Don	76927	1	25	55.9	20.7	10.2	0.9	NA	0.9	PLA
Pinus sylvestris L.	60197	7	48	96.9	13.8	20.3	1.8	0.85	0.46	ROU
Larix decidua Mill.	61242	6	41	100	15.7	21.5	1.1	0.89	0.54	ROU
Pinus sylvestris L.	62417	6	39	100.3	20.2	20.1	1.4	0.78	0.34	ROU
Abies nordmanniana ssp.equi-trojani (Asch. & Sint. ex Boiss.) Coode & Cullen	65330	6	45	102.3	19.3	19	1.1	0.77	0.38	ROU
Pinus sylvestris L.	65601_1	8	57	102.6	22.5	19.8	3.6	0.89	0.39	ROU
Pinus nigra J.F.Arnold	71195	4	33	92.6	17.2	16.5	1.8	0.86	0.39	ROU

Pinus strobus L.	72001	6	43	103.2	22.8	19.1	1.9	0.9	0.33	ROU
Sequoiadendron giganteum (Lindl.) J.Buchholz	73187	5	43	167.1	40.1	22	2.8	0.77	0.35	ROU
Pinus contorta Douglas ex Loudon	73230	8	65	98.4	17.8	18.6	2.6	0.93	0.39	ROU
Pinus sylvestris L.	74196	4	30	98	19.8	18.5	1.5	0.79	0.33	ROU
Larix x marschlinii Coaz	74305	3	28	101.4	31.9	23.1	4.4	0.86	0.47	ROU
Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco	Bomo	3	24	117.8	19.4	24.4	2.5	0.93	0.32	ROU
Thuja plicata Donn ex D.Don	Boutûres 1	8	94	101	26.9	19.6	1.8	0.89	0.55	ROU
Cupressus x leylandii A.B.Jacks. & Dallim.	Boutûres 2	6	38	127.7	25.9	22.6	1.3	0.9	0.51	ROU
Pinus contorta Douglas ex Loudon	2154	1	20	65.5	13.9	11.5	0.9	NA	1	SAI
Pinus peuce Griseb.	61042	1	26	63.7	15.3	11.3	0.3	0.96	0.86	SAI
Picea engelmannii Parry ex Engelm.	61046	1	11	59.5	10.7	15.8	0.6	0.89	0.61	SAI
Picea omorika (Panic) Purk.	64069	1	308	57.4	8.6	14.6	0.3	0.92	0.93	SAI
Picea omorika (Panic) Purk.	64196	1	214	55.6	9.6	14.7	1.1	0.94	0.84	SAI
Abies magnifica var.shastensis Lemmon	6444	1	11	83.6	16.4	18	0.7	0.93	0.73	SAI
Abies procera Rehder	6603	1	77	92.7	25.9	18.1	2	0.96	0.86	SAI
Pinus peuce Griseb.	66403	1	18	62.4	15.8	11.3	0.3	0.95	0.75	SAI
Pinus peuce Griseb.	66404	1	30	62.1	15.3	11.2	0.2	0.91	0.89	SAI
Picea glauca (Moench) Voss	72039	1	11	56.9	12.9	11.2	1.6	NA	0.87	SAI
Pinus flexilis var.reflexa Engelm.	73157	1	20	63.5	17.9	12.9	1.4	NA	0.6	SAI
Pinus contorta Douglas ex Loudon	73229	1	16	55.6	12.9	14.8	1.3	0.96	0.64	SAI
Pinus nigra ssp.laricio Maire	61301	1	16	76.8	15.4	14.5	1.4	0.83	0.87	TRE
Pinus nigra ssp.laricio Maire	62452	1	14	73.2	12.5	13.3	0.6	0.97	0.77	TRE
Pinus nigra J.F.Arnold	63226	1	10	69.7	9.8	10.5	0.7	0.9	0.63	TRE
Pinus nigra ssp.pallasiana (Lamb.) Holmboe	63228	1	8	70.3	14.6	10	0.3	0.89	0.67	TRE
Pinus pinea L.	65230	1	15	87.3	19.1	10.6	0.8	0.93	0.83	TRE
Pinus nigra ssp.pallasiana (Lamb.) Holmboe	71225	1	13	74.7	9.5	11.8	1.4	0.97	0.57	TRE
Pinus pinaster Aiton	72195	1	14	96.7	17	13.2	1.1	0.83	0.57	TRE
Cupressus arizonica Greene	73032	1	15	68.7	10.7	13.8	0.5	0.97	0.9	TRE

Annexe 3 : Angiospermes sélectionnés par ordre alphabétique :

Taxon	N° lot de graines	Nombre de placeaux	Nombre arbres présents	Circ. Moy. (cm)	Ecart type circ	Haut · Moy. (m)	Ecart type haut.	Survie juvénile	Survie adulte	Arboretum
<i>Acer rubrum</i> L.	73286	4	34	68.2	15.3	17.4	2.4	0.83	0.64	ROU
<i>Acer rubrum</i> L.	73287	6	34	70.8	15.1	19.9	1.8	0.85	0.45	ROU
<i>Acer rubrum</i> L.	73288	4	16	84.9	14.5	18.3	2	0.8	0.55	ROU
<i>Acer rubrum</i> L.	73289	4	29	76.5	21.3	18.8	1.4	0.85	0.52	ROU
<i>Betula papyrifera</i> Marshall	71188	3	23	40.7	12.3	9	3.1	0.28	0.23	COL
<i>Betula pendula</i> Roth	73304	6	87	75.5	20	20.4	3	0.9	0.46	ROU
<i>Eucalyptus acaciiformis</i> H.Deane & Maiden	76574	1	22	56.7	23.2	15.3	0.1	NA	0.73	PLA
<i>Eucalyptus aggregata</i> H.Deane & Maiden	74680	1	12	48.7	30.9	19.8	1.4	0.87	0.53	CAN
<i>Eucalyptus aggregata</i> H.Deane & Maiden	72284	2	20	62	25.4	14.9	0.1	0.83	0.76	TRE
<i>Eucalyptus archeri</i> Maiden & Blakely	72240	1	16	67.5	31.1	15.9	1	0.83	0.53	CAN
<i>Eucalyptus bridgesiana</i> F.Muell. ex R.T.Baker	58168	1	14	38.8	25.6	14	1.8	NA	0.6	CAN
<i>Eucalyptus cephalocarpa</i> Blakely	1177	1	23	55	26.6	13.1	0.4	NA	0.67	CAN
<i>Eucalyptus cinerea</i> F.Muell. ex Benth.	72098	1	26	48.5	27.5	13.1	0.6	0.9	0.83	PLA
<i>Eucalyptus cordata</i> Labill.	72227	1	17	56.4	24.9	15.7	1.3	0.83	0.67	PLA
<i>Eucalyptus delegatensis</i> F.Muell. Ex R.T.Baker	74684	1	12	49.7	18.9	15.6	0.7	0.87	0.6	CAN
<i>Eucalyptus glaucescens</i> Maiden & Blakely	711274	1	17	65.6	33	22.8	5.2	0.83	0.53	CAN
<i>Eucalyptus gregsoniana</i> L.A.S.Johnson & Blaxell	72236	1	23	48.6	23.2	19.1	0.3	0.87	0.73	TRE
<i>Eucalyptus laevopinea</i> F.Muell. ex R.T.Baker	73971	2	38	65	32	24	1.1	NA	0.86	CAN
<i>Eucalyptus ovata</i> Labill.	72283	1	21	47	27.6	19.3	1.4	0.97	0.73	CAN
<i>Eucalyptus ovata</i> Labill.	72247	1	15	49.2	22.2	15.3	1.9	0.83	0.8	PLA
<i>Eucalyptus parvula</i> L.A.S.Johnson & K.D.Hill	73960	1	17	59.5	41.7	12	0.7	0.83	0.53	CAN
<i>Eucalyptus prava</i> L.A.S.Johnson & K.D.Hill	7978	1	6	54.5	20.9	11.8	1	NA	0.6	PLA
<i>Eucalyptus pulchella</i> Desf.	72405_2	1	26	54.3	25.6	24.5	1.8	0.93	0.87	CAN
<i>Eucalyptus rodwayi</i> R.T.Baker & H.G.Sm.	72224	1	17	50.3	16	10.9	1.6	0.87	0.77	TRE
<i>Eucalyptus rubida</i> H.Deane & Maiden	72281	1	23	38.9	29.8	18.7	1.8	0.9	0.77	CAN
<i>Eucalyptus saint-johnii</i> (F.Muell. Ex	72226	1	15	41.1	13.1	13.2	1.1	NA	0.57	CAN

R.T.Baker) F.Muell. ex R.T.Baker										
Eucalyptus viminalis Labill.	72233	1	12	47.1	27.4	12.2	5.3	0.97	0.53	CAN
Eucalyptus viminalis Labill.	72234	1	9	51.3	24.4	17.5	3	0.97	0.97	TRE
Fagus sylvatica L.	ONF	4	46	77.8	18.9	17.8	1.7	0.91	0.59	ROU
Liquidambar styraciflua L.	74200	4	26	72.7	12.3	16.4	1.7	0.82	0.49	ROU
Nothofagus obliqua (Mirb.) Oerst.	77117	2	15	76.9	26.2	24	3.7	0.98	0.46	ROU
Quercus palustris Münchh.	71148	7	61	80.7	19.4	19.2	3	0.88	0.52	ROU
Quercus palustris Münchh.	75243_1	3	25	80	14.2	19.3	1.2	1	0.55	ROU
Quercus rubra L.	75197	4	32	98.6	27.7	18.2	2.1	0.86	0.54	ROU
Robinia pseudoacacia L.	73118	4	30	93.4	17.1	18.8	2.3	0.71	0.44	ROU

Annexe 4 : Gymnospermes sélectionnés par ordre alphabétique :

Taxon	N° lot de graines	Nombre de placeaux	Nombre arbres présents	Circ. Moy. (cm)	Ecart type circ	Haut. Moy. (m)	Ecart type haut.	Survie juvénile	Survie adulte	Arboretum
<i>Abies alba</i> Mill.	67442	3	27	51.4	19.5	11	0.7	0.63	0.41	COL
<i>Abies alba</i> Mill.	73024	3	21	49.5	19.8	10.9	2.1	0.71	0.54	COL
<i>Abies balsamea</i> (L.) Mill.	72059	3	23	59.7	9.7	11.5	0.9	0.82	0.41	COL
<i>Abies magnifica</i> A.Murray bis	72384	3	40	52.4	18.4	10.1	1.8	0.78	0.57	COL
<i>Abies magnifica</i> A.Murray bis	73135	4	55	55.2	16.2	10.1	1.7	0.86	0.62	COL
<i>Abies magnifica</i> var. <i>shastensis</i> Lemmon	73208	3	21	69.4	18.2	11.3	1.7	0.64	0.69	COL
<i>Abies magnifica</i> var. <i>shastensis</i> Lemmon	6444	1	11	83.6	16.4	18	0.7	0.93	0.73	SAI
<i>Abies nordmanniana</i> ssp. <i>equi-trojani</i> (Asch. & Sint. ex Boiss.) Coode & Cullen	68238	4	29	65	15.2	11.2	1.8	0.86	0.61	COL
<i>Abies nordmanniana</i> ssp. <i>equi-trojani</i> (Asch. & Sint. ex Boiss.) Coode & Cullen	65330	6	45	102.3	19.3	19	1.1	0.77	0.38	ROU
<i>Abies procera</i> Rehder	6603	1	77	92.7	25.9	18.1	2	0.96	0.86	SAI
<i>Cupressus arizonica</i> Greene	73032	1	24	23.6	8.8	6.5	0.3	0.97	0.9	CAN
<i>Cupressus arizonica</i> Greene	73073	1	24	42.3	14.2	9.7	0.9	NA	0.87	PLA
<i>Cupressus arizonica</i> Greene	741967	1	26	45.1	16.9	8.5	1.7	NA	0.97	PLA
<i>Cupressus arizonica</i> Greene	76502	1	29	45.1	17.6	9	0.7	NA	0.97	PLA
<i>Cupressus arizonica</i> Greene	73032	1	15	68.7	10.7	13.8	0.5	0.97	0.9	TRE
<i>Cupressus goveniana</i> var. <i>abramsiana</i> (C.B.Wolf) Little	72406	2	53	29.8	12.4	4.5	0.7	0.83	0.94	CAN
<i>Cupressus goveniana</i> var. <i>abramsiana</i> (C.B.Wolf) Little	73035	1	28	30.5	10.5	9.6	0.9	0.97	0.97	CAN
<i>Cupressus goveniana</i> var. <i>abramsiana</i> (C.B.Wolf) Little	74654	1	29	27.2	11.1	5.6	0.3	0.97	0.97	CAN
<i>Cupressus goveniana</i> var. <i>abramsiana</i> (C.B.Wolf) Little	73031	1	26	49.2	18.5	9.2	0.3	1	0.97	PLA
<i>Cupressus goveniana</i> var. <i>abramsiana</i> (C.B.Wolf) Little	74096	1	21	63.6	24.2	11.6	0.9	NA	0.8	PLA
<i>Cupressus sargentii</i> Jeps.	72409	1	21	33.8	13.8	7.6	1.2	0.9	0.7	CAN
<i>Cupressus torulosa</i> D.Don	76927	1	25	55.9	20.7	10.2	0.9	NA	0.9	PLA
<i>Cupressus x leylandii</i> A.B.Jacks. & Dallim.	Boutûres 2	6	38	127.7	25.9	22.6	1.3	0.9	0.51	ROU
<i>Larix decidua</i> Mill.	61242	6	41	100	15.7	21.5	1.1	0.89	0.54	ROU
<i>Larix x marschlinii</i> Coaz	74305	3	28	101.4	31.9	23.1	4.4	0.86	0.47	ROU
<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst	68187	4	43	60.1	14.7	13.2	1.4	0.83	0.5	COL
<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst	68334	3	44	47.7	19.4	11.8	3.2	0.7	0.62	COL
<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst	7204	4	55	56.8	11.7	12.3	1.4	0.96	0.61	COL
<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst	7221	3	33	58.3	10.2	11.9	0.8	0.82	0.63	COL
<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst	73020	4	61	56.3	17	13.4	2.7	0.85	0.56	COL

<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst	7311	3	38	50.4	11.2	12.7	0.7	0.91	0.48	COL
<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst	7320	2	26	47.5	12.3	11.9	1.2	0.9	0.53	COL
<i>Picea engelmannii</i> Parry ex Engelm.	73267	3	24	48.4	12.9	10.6	1.4	0.68	0.62	COL
<i>Picea engelmannii</i> Parry ex Engelm.	73284	4	48	59.2	17.5	11.1	1.8	0.85	0.53	COL
<i>Picea engelmannii</i> Parry ex Engelm.	61046	1	11	59.5	10.7	15.8	0.6	0.89	0.61	SAI
<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	71169	3	30	56.1	10	11.5	0.9	0.8	0.5	COL
<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	72037	3	27	53.5	10.1	10.9	1	0.8	0.46	COL
<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	72042	3	25	48.9	8.7	11.3	1.3	0.79	0.43	COL
<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	72045	3	29	55.6	10.6	11	1	0.84	0.46	COL
<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	72046	3	22	48.7	6.1	10.8	0.8	0.82	0.45	COL
<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	72047	3	23	54	8.1	10.3	0.9	0.8	0.43	COL
<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	72049	3	21	54.2	10.1	11.8	0.8	0.75	0.44	COL
<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	72052	3	27	48.4	11.6	10.2	1.1	0.78	0.41	COL
<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	72039	1	11	56.9	12.9	11.2	1.6	NA	0.87	SAI
<i>Picea omorika</i> (Pancic) Purk.	64069	1	308	57.4	8.6	14.6	0.3	0.92	0.93	SAI
<i>Picea omorika</i> (Pancic) Purk.	64196	1	214	55.6	9.6	14.7	1.1	0.94	0.84	SAI
<i>Picea sitchensis</i> (Bong.) Carrière	62334	3	28	71.9	22.1	14.7	2	0.86	0.47	COL
<i>Picea sitchensis</i> (Bong.) Carrière	62380	3	36	64	16.1	13.4	5.1	0.84	0.55	COL
<i>Picea sitchensis</i> (Bong.) Carrière	64568	3	31	72.8	18.3	12.9	1.8	0.8	0.48	COL
<i>Pinus brutia</i> Ten.	60162	2	17	23.8	11.5	3.9	1.8	0.84	0.47	CAN
<i>Pinus contorta</i> Douglas ex Loudon	2094	3	29	63.2	12.8	12.8	2.2	0.98	0.62	COL
<i>Pinus contorta</i> Douglas ex Loudon	2106	2	23	49.2	8.9	9.8	1.3	0.84	0.5	COL
<i>Pinus contorta</i> Douglas ex Loudon	59142	3	27	59.3	13.5	13.6	2.5	0.92	0.47	COL
<i>Pinus contorta</i> Douglas ex Loudon	73226	3	23	51.5	10	10	1.2	0.96	0.48	COL
<i>Pinus contorta</i> Douglas ex Loudon	73227	4	30	52.3	10.2	11.4	2.9	0.9	0.43	COL
<i>Pinus contorta</i> Douglas ex Loudon	73229	4	47	60.6	14.8	13.6	1.5	0.68	0.58	COL
<i>Pinus contorta</i> Douglas ex Loudon	73232	4	34	63.8	13.8	13.7	1.8	0.84	0.45	COL
<i>Pinus contorta</i> Douglas ex Loudon	73233	3	34	65.3	11.6	12.6	1.9	0.9	0.52	COL
<i>Pinus contorta</i> Douglas ex Loudon	73234	3	25	53.7	9.9	10.5	0.8	0.76	0.48	COL
<i>Pinus contorta</i> Douglas ex Loudon	73237	3	25	48	9.8	11.6	1.4	0.69	0.47	COL
<i>Pinus contorta</i> Douglas ex Loudon	73230	8	65	98.4	17.8	18.6	2.6	0.93	0.39	ROU
<i>Pinus contorta</i> Douglas ex Loudon	2154	1	20	65.5	13.9	11.5	0.9	NA	1	SAI
<i>Pinus contorta</i> Douglas ex Loudon	73229	1	16	55.6	12.9	14.8	1.3	0.96	0.64	SAI
<i>Pinus flexilis</i> var. <i>reflexa</i> Engelm.	73157	1	20	63.5	17.9	12.9	1.4	NA	0.6	SAI
<i>Pinus monticola</i> Douglas ex D.Don	73162	4	21	70.6	18.3	13.4	1.8	0.98	0.56	COL
<i>Pinus monticola</i> Douglas ex D.Don	73163	4	22	71.1	8.8	14.6	2.5	1	0.48	COL
<i>Pinus monticola</i> Douglas ex D.Don	73165	3	26	68.9	10.7	14.1	0.8	0.98	0.51	COL
<i>Pinus nigra</i> J.F.Arnold	71195	4	33	92.6	17.2	16.5	1.8	0.86	0.39	ROU

<i>Pinus nigra</i> J.F.Arnold	63226	1	10	69.7	9.8	10.5	0.7	0.9	0.63	TRE
<i>Pinus nigra</i> ssp.laricio Maire	72172	2	53	35	14.5	8.1	1.2	0.95	0.88	CAN
<i>Pinus nigra</i> ssp.laricio Maire	62452	1	19	46.6	19.9	10.6	0.6	1	0.63	PLA
<i>Pinus nigra</i> ssp.laricio Maire	61301	1	16	76.8	15.4	14.5	1.4	0.83	0.87	TRE
<i>Pinus nigra</i> ssp.laricio Maire	62452	1	14	73.2	12.5	13.3	0.6	0.97	0.77	TRE
<i>Pinus nigra</i> ssp.pallasiana (Lamb.) Holmboe	63228	1	24	50.9	17.6	9.1	0.9	0.97	0.77	PLA
<i>Pinus nigra</i> ssp.pallasiana (Lamb.) Holmboe	63228	1	8	70.3	14.6	10	0.3	0.89	0.67	TRE
<i>Pinus nigra</i> ssp.pallasiana (Lamb.) Holmboe	71225	1	13	74.7	9.5	11.8	1.4	0.97	0.57	TRE
<i>Pinus peuce</i> Griseb.	121	3	38	71.2	12.4	12.5	1	0.79	0.6	COL
<i>Pinus peuce</i> Griseb.	61042	4	44	69.1	13.9	12.6	1.6	0.77	0.49	COL
<i>Pinus peuce</i> Griseb.	66403	3	33	67.3	13.5	12.2	1	0.76	0.52	COL
<i>Pinus peuce</i> Griseb.	66404	4	44	68.7	10.6	12.5	1.4	0.91	0.54	COL
<i>Pinus peuce</i> Griseb.	70224	3	34	66.6	14	11.9	1.2	0.84	0.5	COL
<i>Pinus peuce</i> Griseb.	61042	1	26	63.7	15.3	11.3	0.3	0.96	0.86	SAI
<i>Pinus peuce</i> Griseb.	66403	1	18	62.4	15.8	11.3	0.3	0.95	0.75	SAI
<i>Pinus peuce</i> Griseb.	66404	1	30	62.1	15.3	11.2	0.2	0.91	0.89	SAI
<i>Pinus pinaster</i> Aiton	72195	1	14	96.7	17	13.2	1.1	0.83	0.57	TRE
<i>Pinus pinea</i> L.	65230	1	15	87.3	19.1	10.6	0.8	0.93	0.83	TRE
<i>Pinus strobus</i> L.	73030	3	27	49.2	13.8	9.8	2.4	0.71	0.47	COL
<i>Pinus strobus</i> L.	72001	6	43	103.2	22.8	19.1	1.9	0.9	0.33	ROU
<i>Pinus sylvestris</i> L.	60197	3	32	65.4	11.7	11.9	1.6	0.69	0.45	COL
<i>Pinus sylvestris</i> L.	60197	7	48	96.9	13.8	20.3	1.8	0.85	0.46	ROU
<i>Pinus sylvestris</i> L.	62417	6	39	100.3	20.2	20.1	1.4	0.78	0.34	ROU
<i>Pinus sylvestris</i> L.	65601_1	8	57	102.6	22.5	19.8	3.6	0.89	0.39	ROU
<i>Pinus sylvestris</i> L.	74196	4	30	98	19.8	18.5	1.5	0.79	0.33	ROU
<i>Pinus uncinata</i> Ramond ex DC.	72192	3	28	51.2	12.6	9.9	0.9	0.69	0.43	COL
<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco	Bomo	3	24	117.8	19.4	24.4	2.5	0.93	0.32	ROU
<i>Sequoia sempervirens</i> (D.Don) Endl.	72411	2	19	33.2	21.1	6.9	6	0.83	0.64	CAN
<i>Sequoiadendron giganteum</i> (Lindl.) J.Buchholz	73187	5	43	167.1	40.1	22	2.8	0.77	0.35	ROU
<i>Thuja plicata</i> Donn ex D.Don	Boutûres 1	8	94	101	26.9	19.6	1.8	0.89	0.55	ROU

## Plan de situation des arboretums scientifique de l'Office National des Forêts

