

Potentialités et risques liés à l'introduction d'une essence forestière exotique dans un contexte de changement climatique : Cas du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* (Endl.) Carr.) en Belgique

Auteur : Pirronitto, Salvatore

Promoteur(s) : Claessens, Hugues; 11194

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : gestion des forêts et des espaces naturels, à finalité spécialisée

Année académique : 2019-2020

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/10343>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

POTENTIALITÉS ET RISQUES LIÉS À L'INTRODUCTION
D'UNE ESSENCE FORESTIÈRE EXOTIQUE DANS UN CONTEXTE
DE CHANGEMENT CLIMATIQUE : CAS DU CÈDRE DE L'ATLAS
(*CEDRUS ATLANTICA* (ENDL.) CARR.) EN BELGIQUE.

SALVATORE PIRRONITTO

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET DES ESPACES NATURELS

ANNÉE ACADÉMIQUE 2019-2020

CO-PROMOTEURS: HUGUES CLAESSENS & SOPHIE SCHMITZ (CRA-W)

©Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique¹ de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

¹ Dans ce cas, l'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre du personnel(s) enseignant de GxABT

POTENTIALITÉS ET RISQUES LIÉS À L'INTRODUCTION
D'UNE ESSENCE FORESTIÈRE EXOTIQUE DANS UN CONTEXTE
DE CHANGEMENT CLIMATIQUE : CAS DU CÈDRE DE L'ATLAS
(*CEDRUS ATLANTICA* (ENDL.) CARR.) EN BELGIQUE.

SALVATORE PIRRONITTO

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET DES ESPACES NATURELS

ANNÉE ACADÉMIQUE 2019-2020

CO-PROMOTEURS: HUGUES CLAESSENS & SOPHIE SCHMITZ (CRA-W)

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier le Centre wallon de Recherches agronomiques et tout particulièrement le laboratoire de mycologie de m'avoir accueilli en tant que stagiaire afin que je puisse réaliser dans les meilleures conditions ce travail de fin d'études. Je remercie davantage Madame S. Schmitz d'avoir accepté d'être ma co-promotrice et d'avoir toujours été à mon écoute tout au long de mon travail. Je tiens également à adresser mes plus sincères remerciements à Monsieur A. Charlier sans qui cette étude n'aurait pas été la même. Merci pour sa formation, sa pédagogie, sa bonne humeur et sa disponibilité durant ces mois de travail. Un grand merci à vous deux d'avoir tout fait pour que l'expérience d'inoculation soit assurée malgré le contexte un peu spécial que nous avons connu suite à la pandémie du Covid-19.

J'aimerais ensuite remercier mon autre co-promoteur, le professeur H. Claessens, pour son aide, son écoute et ses conseils durant l'élaboration de ce mémoire et plus particulièrement dans mes moments de doute.

Un grand merci à Monsieur Y. Brostaux d'avoir toujours répondu présent à mes questions statistiques.

Je remercie également tous les ingénieurs de cantonnement et les agents du DNF d'avoir accepté ma présence sur leurs territoires respectifs et pour les différents échanges que j'ai pu avoir avec certains.

Un tout grand merci à Monsieur F. Courbet, ingénieur de recherche à l'INRAE, pour sa collaboration et les différentes discussions que nous avons pu avoir concernant le cèdre de l'Atlas.

J'aimerais ensuite remercier ma famille et tout particulièrement mes parents de m'avoir permis de faire ces études formidables. Merci d'avoir toujours cru en moi et de m'avoir fait confiance durant ces années universitaires.

Finalement, j'aimerais remercier ma compagne, Léa, pour son soutien et ses conseils durant l'intégralité de mes études. Merci d'avoir toujours été là même dans les moments les plus difficiles.

Résumé :

Les changements climatiques ne sont plus à prouver. Les sécheresses estivales sont une des conséquences mettant le plus à mal l'écosystème forestier. Face à la rapidité de ces modifications, une des solutions proposées pour accroître la résilience des forêts est l'utilisation d'essences exotiques. Ces espèces introduites hors de leur aire de distribution naturelle sont-elles réellement la solution à l'équation ? Cette étude a pour but de discuter des potentialités et des risques de l'introduction du cèdre de l'Atlas en Belgique. Cet arbre réputé pour sa tolérance à la sécheresse est un candidat intéressant face aux problèmes actuels. Cependant, la prudence et la lucidité doivent être de mise. En effet, les essences exotiques ne sont pas exemptes de défauts et une analyse de risque est obligatoire pour ne pas aggraver la situation.

C'est pourquoi, dans ce travail de fin d'étude, en plus de la littérature scientifique existante, plusieurs démarches ont été réalisées afin d'apporter différents éléments de réponses. Les objectifs de cette étude sont donc multiples : 1) Réaliser un monitoring dans les jeunes parcelles de cèdres actuelles afin de tirer des conclusions sur leurs croissances et leurs états de santé ; 2) Prévoir une potentielle propagation d'un agent pathogène dans les forêts wallonnes due à l'introduction du cèdre de l'Atlas : cas du *Sirococcus tsugae* ; 3) Prévoir un potentiel nouvel agent pathogène sur cet arbre : cas du *Sirococcus conigenus*.

Les résultats ont montré qu'actuellement le cèdre se porte bien en Wallonie. Une bonne production et un bon état de santé sont observés. Cependant, la pression du gibier et la sensibilité à la dominance sont les deux éléments qui ont causé les plus grands problèmes jusqu'ici. Concernant la première expérience d'inoculation, le cèdre, le tsuga et le mélèze semblent être fort sensibles à *S. tsugae*. Pour ce qui est de la deuxième, *S. conigenus* ne semble pas être un problème pour le cèdre même si quelques nécroses ont été observées.

Il est vrai que le cèdre est un arbre avec des potentialités fortes intéressantes mais son introduction doit être limitée. En effet, des risques tels qu'une potentielle invasivité ou le manque de co-évolution ne sont pas quantifiable à l'heure actuelle. Les quelques plantations présentes en Belgique doivent donc servir de parcelles sentinelles et un suivi dans le temps est obligatoire afin de suivre l'évolution et l'adaptation de cette essence.

Mots-clés : Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* (Endl.) Carr.), essence forestière exotique, potentialités, risques, expérience d'inoculation, *Sirococcus tsugae*, productivité, changements climatiques

Abstract :

Climate change is a proven fact. Summer droughts are one of the most damaging consequences for the forest ecosystem. Given the rapidity of these changes, one of the solutions suggested to increase the resilience of forests is the use of exotic species. Are these species introduced out of their natural area really the solution to the equation ? The aim of this study is to discuss the potentialities and risks of the introduction of Atlas cedar in Belgium. This tree, known for its drought's resistance, is an interesting contender in the face of current problems. However, caution and lucidity must not be forgotten. Indeed, exotic species are not free of defects and a risk analysis is mandatory in order to not make thing worse.

This is why, in this study, in addition to the existing scientific papers, several steps have been taken in order to provide different elements of answers. Aims of this study are multiple: 1) To carry out a monitoring in the young plots of cedars to draw conclusions on their growth and health status ; 2) To predict a potential propagation of a pathogen due to the introduction of Atlas cedar: case of *Sirococcus tsugae* ; 3) To predict a potential new pathogen on this tree: case of *Sirococcus conigenus*.

These results showed that cedar is currently doing well in Wallonie. A good wood production and a good state of health are observed. However, game pressure and susceptibility to dominance are the two elements that have caused greatest problems so far. Concerning the first inoculation experiment, cedar, western hemlock and larch seem to be very sensitive to *S. tsugae*. Concerning the second, *S. conigenus* does not seem to be a problem for cedar although some necrosis has been observed.

It is true that the Atlas cedar is a tree with interesting strong potential but its introduction should be limited. Indeed, risks such as potential invasiveness or lack of co-evolution are not quantifiable now. The few plantations present in Belgium must be therefore serve as sentinel plots and monitoring over time is mandatory in order to follow the evolution and adaptation of this species.

Keywords : Atlas cedar (*Cedrus atlantica* (Endl.) Carr.), exotic tree species, potentialities, risks, inoculation experiment, *Sirococcus tsugae*, productivity, climate change

Table des matières

I.	Introduction générale	1
1.	Mise en contexte	1
2.	Le cèdre de l'Atlas (<i>Cedrus atlantica</i> (Endl.) Carr.)	6
2.1.	Distribution à travers le temps	6
2.2.	Autécologie	6
2.3.	Physiologie	8
2.4.	Problèmes sanitaires	11
2.5.	Qualité et valorisation du bois	14
2.6.	Sylviculture	15
2.7.	L'avenir du cèdre	16
2.8.	Le cèdre en Belgique	17
3.	Objectifs	17
II.	Matériels et méthodes	19
1.	Monitoring	19
1.1.	Zone d'étude	19
1.2.	Description et analyse des sites	19
1.3.	Installation des placettes de mesures	22
1.4.	Données dendrométriques	22
1.5.	Données sanitaires	22
1.6.	Base de données et traitements statistiques	23
2.	Tests d'inoculation	24
2.1.	Matériel végétal	24
2.2.	Matériel fongique	24
2.3.	Plan d'expérimentation	25
2.4.	Postulat de Koch	26
2.5.	Analyse statistique	27
III.	Résultats	28
1.	Monitoring	28
1.1.	Mesures dendrométriques	28
1.2.	Etat sanitaire	31
2.	Test d'inoculation	37
2.1.	<i>Sirococcus tsugae</i>	37
2.2.	<i>Sirococcus conigenus</i>	40
IV.	Discussion générale	42
1.	Discussion sur les résultats	42

1.1.	Monitoring	42
1.2.	Tests d'inoculations	45
2.	Potentialités	46
3.	Risques	48
4.	Recommandations sylvicoles	55
5.	Perspectives d'avenir.....	57
V.	Conclusion finale	59
VI.	Bibliographie	60
VII.	Annexes	67

Table des figures

Figure 1 : Moyennes annuelles des anomalies de températures en Europe pour la période 1981-2010, basées sur des valeurs mensuelles de janvier 1979 à février 2020 (Source : Copernicus ; https://climate.copernicus.eu/surface-air-temperature-february-2020).....	2
Figure 2 : Différence de la fréquence des sécheresses (DRF) et de la fréquence des sécheresses extrêmes (ExDRF) entre les périodes 2070-2100 et 1981-2010 représentées par le nombre d'événement par décade calculée par la moyenne de 11 simulations de l'EURO-CORDEX ; la colonne de gauche représente le scénario RCP 4.5 et la colonne de droite le scénario RCP 8.5 (Spinoni et al., 2018)	2
Figure 3 : Evolution de la largeur de cerne (en mm) en fonction des années ; l'année 1976 est considérée comme l'année transitoire (Latte et al., 2016)	3
Figure 4 : Effet du stress hydrique sur les dégâts causés par différents agents représentés par la moyenne de la valeur Hedges'd (Jactel et al., 2011).....	3
Figure 5 : Adaptation de la spirale de Manion.....	4
Figure 6 : Distribution naturelle du cèdre de l'Atlas au Maroc et en Algérie (Courbet et al., 2012).....	6
Figure 7 : Ecogramme du cèdre de l'Atlas (Source : https://www.fichierecologique.be)	8
Figure 8 : Cycle de reproduction du cèdre de l'Atlas (Source : https://www.fichierecologique.be)	9
Figure 9 : Comparaison des périodes de végétation de différentes essences résineuses (Aussenac, 1984)...	9
Figure 10 : Classes de fertilité et courbes de croissance en hauteur dominante du cèdre de l'Atlas en France réalisées par l'INRAE pour la région méditerranéenne. Les traits pleins représentent les limites de classes tandis que les traits pointillés représentent la valeur centrale de la classe considérée. L'âge est compté à partir de la graine. (Courbet et al., 2007).....	10
Figure 11: Répartition actuelle de <i>Sirococcus tsugae</i> en Europe (Source : https://gd.eppo.int/taxon/SIROTS/distribution)	12
Figure 12 : Répartition de la processionnaire du pin en France ; La zone bleue représente l'aire potentielle de l'insecte créée par les modélisations de l'INRA tandis que les carrés verts forment son front d'expansion reporté par les correspondants-observateur du DSF (Gaudry & Laubray, 2018).	12
Figure 13 : Evolution de la production de fèces dans le temps selon trois types de combinaisons de températures ; la température nocturne est fixée à 3°C tandis que la température du jour varie selon trois valeurs : 6°C, 9°C et 12°C (Battisti et al., 2005).	13
Figure 14 : Comparaison des propriétés technologiques du bois de cèdre avec d'autres essences résineuses (Courbet et al., 2012 d'après El Azzouzi et Keller, 1998).	15
Figure 15 : Evolution de l'aire potentielle du cèdre de l'année 2000 (en haut) jusqu'à la fin du siècle (en bas) générée par le modèle CARAIB se basant sur la production primaire nette (en gramme de carbone par m ² par an) (Demarteau et al., 2007).	16

Figure 16 : Carte d'aptitude du cèdre de l'Atlas en Belgique (Source : https://www.fichierecologique.be) .	17
Figure 17 : Répartition de l'ensemble des îlots présentant du cèdre en Wallonie (Source : Carte des zones bioclimatiques, Université de Gembloux Agro-Bio Tech).....	19
Figure 18 : Plan d'expérimentation des deux tests d'inoculations ; la flèche noire représente la source de variation potentielle liée à la différence de luminosité.....	25
Figure 19 : Incision en forme de « U » inversé sur l'écorce des plants afin d'y appliquer la biopsie mycélienne (© S. Pirronitto).....	26
Figure 20 : Distribution du nombre d'îlots en fonction de la classe d'âge	29
Figure 21: Distribution des tiges de cèdres prospectées par classe de hauteur (N=419) et par classe de circonférence (N=255).....	29
Figure 22 : Régressions linéaires de la circonférence moyenne et de la hauteur moyenne en fonction de l'âge des cédraies pures	30
Figure 23 : Répartition des dégâts de gibiers observés dans ce monitoring dans les peuplements purs (N=419)	32
Figure 24 : Distribution des différents dégâts de gibier selon l'âge des peuplements purs.....	32
Figure 25 : Différence de la sensibilité au gibier selon la présence ou non de protection individuelle sur les plants âgé entre 2 et 5 ans dans les peuplements purs.....	33
Figure 26 : Distribution des notes DEPERIS pour l'ensembles des tiges prospectées dans les cédraies pures (N=419)	33
Figure 27 : Présence d' <i>Armillaria</i> sp. sur cèdre (© S. Pirronitto).....	34
Figure 28 : Distribution des cèdres frottés et abrutis dans les peuplements mélangés (N =150)	34
Figure 29 : Répartition des dégâts de gibiers selon la présence de protection ou non sur les cèdres présents dans les peuplements mélangés.	35
Figure 30 : Distribution des notes DEPERIS sur l'ensemble des tiges prospectées dans les peuplements mélangés (N=150)	35
Figure 31 : Signes de dépérissement sévères sur mélèze (haut à gauche), sur tsuga (haut à droite) et sur cèdre (en bas) (© A. Charlier)	38
Figure 32 : Exemple de nécroses observées sur les différentes essences : (A) <i>Picea abies</i> ; (B) <i>Larix x eurolepis</i> ; (C) <i>Pseudotsuga menziesii</i> ; (D) <i>Tsuga heterophylla</i> ; (E) <i>Cedrus atlantica</i> (© A. Charlier).....	39
Figure 33 : Boxplot des longueurs de nécroses induites par <i>S. tsugae</i> avec pour chaque essence le résultat de l'AV2	40

<i>Figure 34 : Boxplot des longueurs de nécroses induites par S. conigenus sur cèdre et sur douglas par rapport au plants témoins.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure 35 : Comparaison des tendances de croissance des cédraies wallonnes et des cédraies d'Aquitaine (Lefièvre et al., 2010), d'Ardèche (Girard et al., 2018) et de Bretagne (Hainry & Colombet, 2009) avec les courbes de productivité des cédraies méditerranéennes ; les classes représentent les classes de fertilité considérées dans le sud de la France (Courbet et al., 2007)</i>	<i>42</i>
<i>Figure 36 : Comparaison de la croissance en hauteur des cédraies wallonnes avec différents peuplements français d'Aquitaine (Lefièvre et al., 2010), d'Ardèche (Girard et al., 2018) et de Bretagne (Hainry & Colombet, 2009)</i>	<i>43</i>
<i>Figure 37 : Variation du prix de vente sur pied en fonction du volume de l'arbre moyen (Courbet et al, 2012)</i>	<i>47</i>
<i>Figure 38 : Schéma des facteurs expliquant une invasion biologique (adapté de Catford et al., 2009)</i>	<i>48</i>
<i>Figure 39 : Taux de signalements des correspondants-observateurs du DSF en fonction du type de gestion forestière. Ils permettent de mettre en évidence les différents agents pathogènes ou d'autres agents causals qui affectent les forêts françaises. La base de données représente 60 000 signalements datant de 1984 à 2014 (Desprez-Loustau et al., 2016)</i>	<i>52</i>

Table des tableaux

<i>Tableau 1 : Avantages et inconvénients de l'utilisation d'essences exotiques en gestion forestière</i>	<i>5</i>
<i>Tableau 2 : Liste des agents biotiques et abiotiques provoquant des problèmes sanitaires aux cédraies ; l'astérisque indique les espèces indigènes au cèdre dans son aire naturelle</i>	<i>11</i>
<i>Tableau 3 : Description des plantations de cèdre en Wallonie</i>	<i>20</i>
<i>Tableau 4 : Analyse stationnelle des sites.</i>	<i>21</i>
<i>Tableau 5 : Système de cotation de la méthode DEPERIS (Goudet et al., 2018).</i>	<i>23</i>
<i>Tableau 6 : Caractéristiques des plants de différentes essences forestières utilisés dans les tests d'inoculations.....</i>	<i>24</i>
<i>Tableau 7 : Résumé de l'ensemble des données dendrométriques récoltées dans les îlots en pur</i>	<i>28</i>
<i>Tableau 8 : Résumé de l'ensemble des données dendrométriques collectées pour les peuplements mélangés.....</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 9 : Agents pathogènes retrouvés sur des branches nécrosées prélevées dans les différents sites visités ; le nombre d'occurrences représente le nombre de sites touchés par l'agent pathogène</i>	<i>36</i>
<i>Tableau 10 : Résumé de l'expérience d'inoculation de S. tsugae sur différentes essences forestières.....</i>	<i>37</i>
<i>Tableau 11 : Résumé de l'expérience d'inoculation de S. conigenus sur cèdre et sur douglas.....</i>	<i>40</i>
<i>Tableau 12 : Résumé des signalements du Département de la Santé des Forêts sur cèdres en France</i>	<i>52</i>

I. Introduction générale

Le changement climatique n'est plus un phénomène à prouver. Année après année, l'Homme observe avec désarroi les conséquences de ses actes impactant en premier lieu la source même de son évolution : son environnement. Les forêts sont la preuve même de ce changement et n'échappent pas à la règle. Sécheresses, dépérissements, scolytes, maladies, tous ces mots n'ont jamais été autant prononcés ou évoqués qu'à l'heure actuelle. Une réelle rupture d'un équilibre, pourtant bien rodé, se produit dirigeant les gestionnaires forestiers vers l'inconnu. Face à ces événements, certains se demandent si l'utilisation d'essences forestières exotiques ne serait pas la solution aux problèmes rencontrés. Parmi ces dernières, le cèdre de l'Atlas, essence emblématique du Maroc, ferait partie de la liste des espèces composant la forêt de demain. Mais qu'en est-il réellement ?

Cette étude a pour but final de faire le point sur l'avenir du cèdre de l'Atlas en Wallonie. En guise d'introduction, une mise en contexte est proposée afin de poser le cadre sur les problématiques et les incertitudes que subissent les forêts à l'heure actuelle. Ensuite, le cèdre de l'Atlas sera présenté en long et en large afin de pouvoir discuter de son avenir sur notre territoire. Afin d'être le plus complet possible, deux démarches majeures ont été réalisées afin d'avoir plusieurs axes d'analyse. La première est la réalisation d'un monitoring à travers les différents peuplements de cèdres présents actuellement en Belgique. L'objectif est d'avoir une meilleure vision de la composition de ces peuplements et d'avoir les premières tendances de croissance ainsi que son état sanitaire global. La deuxième est la réalisation d'expériences d'inoculation pour mettre en évidence une potentielle sensibilité à deux champignons : *Sirococcus conigenus* et *Sirococcus tsugae*. Les tenants et les aboutissants de ces parties seront présentés plus en profondeur à la fin de cette introduction générale.

1. Mise en contexte

Le changement climatique est bien réel. En Europe, l'hiver 2019-2020 a été le plus chaud jamais enregistré (Copernicus, 2020). Les activités anthropiques à travers le globe prouvent une nouvelle fois qu'elles sont la cause principale des modifications que le monde entier connaît désormais (GIEC, 2014) : élévation de la température, répartition différente des précipitations, augmentation des périodes de sécheresses, etc. En Europe, une augmentation moyenne de plus d'un degré par rapport à la normale est observée (Figure 1) tandis qu'en Belgique, la barre des deux degrés est déjà franchie (Copernicus, 2020 ; IRM, 2020). Si aucune action n'est prévue pour freiner ce phénomène, les différents modèles s'accordent sur une élévation des températures atteignant potentiellement les 5°C sur notre territoire d'ici la fin du siècle ce qui pourrait modifier considérablement le fonctionnement de l'écosystème forestier (AWAC, 2011 ; IRM, 2020).

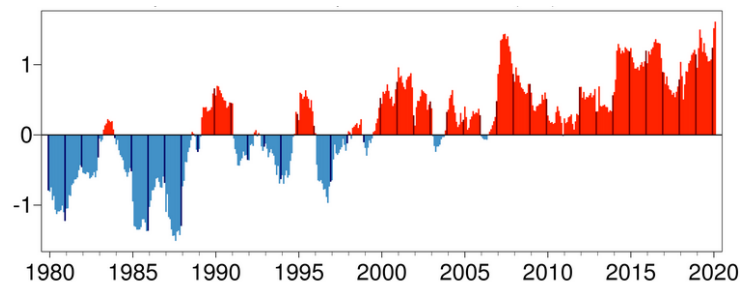


Figure 1 : Moyennes annuelles des anomalies de températures en Europe pour la période 1981-2010, basées sur des valeurs mensuelles de janvier 1979 à février 2020 (Source : Copernicus ; <https://climate.copernicus.eu/surface-air-temperature-february-2020>)

La forêt, dépendant de son milieu pour croître, va bien évidemment être la cible de perturbations dues aux changements globaux (Seidl, 2017). Tout d'abord, des effets positifs peuvent être observés comme un allongement de la période de végétation avec un avancement du débourrement (Menzel et al., 2006) ou une augmentation de la production de biomasse (Loustau et al., 2004). Malheureusement, cette dernière affirmation est souvent contrecarrée par un des effets négatifs les plus préoccupants concernant les forêts : le stress hydrique (Allen et al., 2010).

L'augmentation des températures et la diminution des précipitations en été vont induire des épisodes de sécheresses impactant les essences les plus sensibles ou ne se trouvant pas dans des conditions stationnelles optimales. Spinoni et al. (2018) a généré des simulations à haute résolution montrant que la fréquence de ces événements augmentera dans toute l'Europe d'ici 2100 (Figure 2). Pour la Belgique, il faut s'attendre à un déficit hydrique estival et/ou printanier tous les 10 ans voire quasiment deux dans le scénario le plus pessimiste.

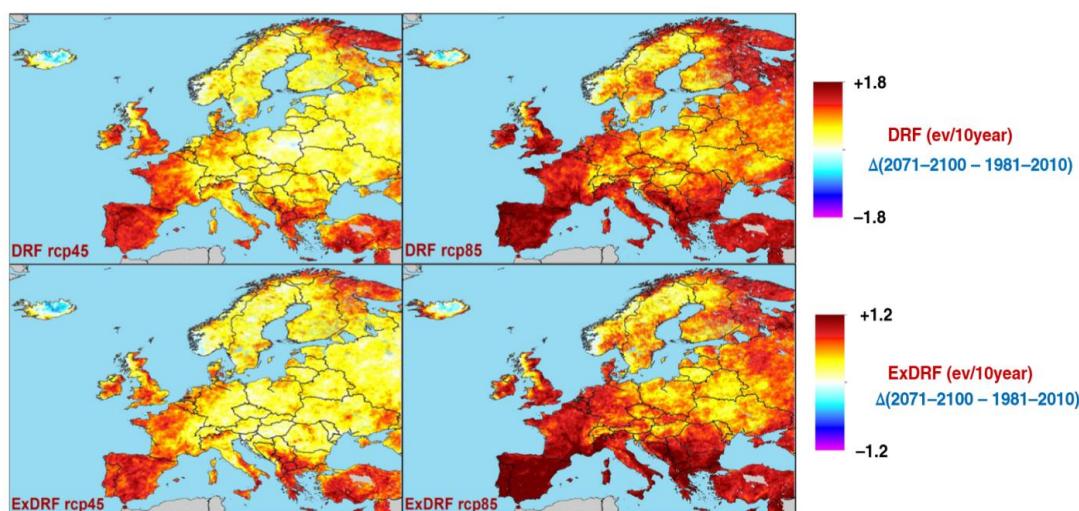


Figure 2 : Différence de la fréquence des sécheresses (DRF) et de la fréquence des sécheresses extrêmes (ExDRF) entre les périodes 2070-2100 et 1981-2010 représentées par le nombre d'événement par décennie calculée par la moyenne de 11 simulations de l'EURO-CORDEX ; la colonne de gauche représente le scénario RCP 4.5 et la colonne de droite le scénario RCP 8.5 (Spinoni et al., 2018)

Les essences n'étant pas adaptées à ce type de phénomène subiront des dégâts non négligeables en commençant par des diminutions de croissance. Latte et al (2016) l'ont déjà parfaitement illustré pour le hêtre en Belgique en étudiant l'évolution de ses largeurs de cernes (Figure 3).

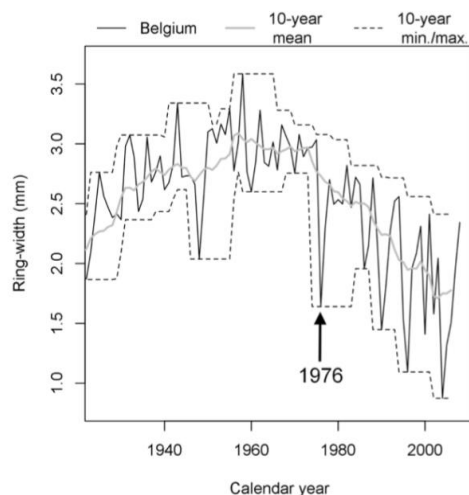


Figure 3 : Evolution de la largeur de cerne (en mm) en fonction des années ; l'année 1976 est considérée comme l'année transitoire (Latte et al., 2016)

L'arbre se fragilisant, des modifications physiologiques apparaissent avec notamment une augmentation de la concentration en azote dans les feuilles. S'en suivent des pullulations d'insectes ou des attaques d'agents pathogènes. La méta-analyse de Jactel et al. (2011) a permis de mettre en évidence une augmentation tant des agents primaires foliaires due notamment à l'appétence des feuilles que des agents secondaires profitant de l'état de faiblesse de l'arbre comme les pullulations de scolytes que le monde forestier belge connaît ces dernières années (Figure 4).

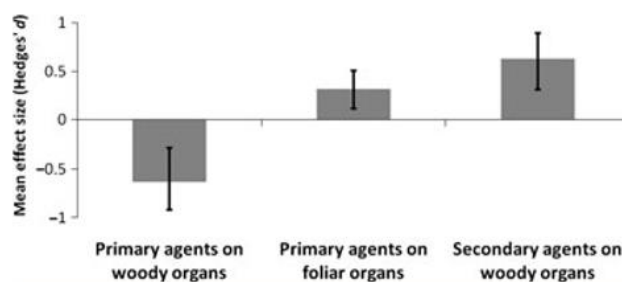


Figure 4 : Effet du stress hydrique sur les dégâts causés par différents agents représentés par la moyenne de la valeur Hedges'd (Jactel et al., 2011)

Si le stress hydrique est souvent au cœur des inquiétudes quant à l'avenir des forêts, les pluies abondantes hivernales pourraient tout autant fragiliser l'arbre si le sol ne permet pas une bonne infiltration. Avec la description de tous ces éléments, il est aisé de comprendre que si l'arbre n'est pas adapté à ces perturbations stationnelles, il sera incapable de survivre à l'accumulation de ces effets négatifs le menant inéluctablement vers le dépérissement et la mortalité (Gillner et al., 2013 ; Allen et al., 2015). C'est ce qu'on appelle, en gestion forestière, la spirale de Manion (Figure 5). En conséquence, la migration est souvent la meilleure solution pour survivre. C'est pourquoi, les aires de répartitions de différentes essences risquent de changer dans le futur (Badeau et al., 2007).

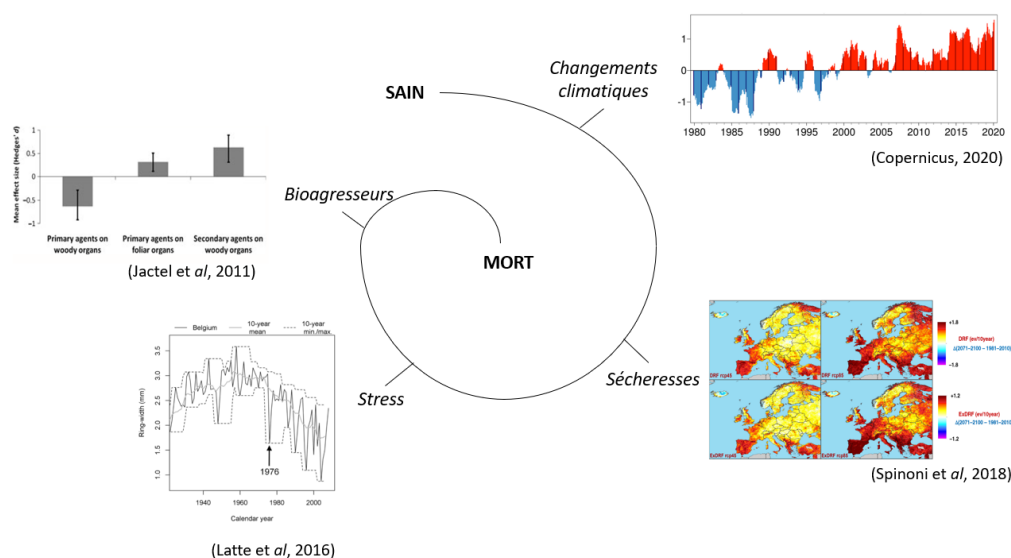


Figure 5 : Adaptation de la spirale de Manion

Les changements globaux sont rapides et les arbres, au vu de leur physiologie, n'ont pas le temps de s'adapter à ces perturbations. Malgré la description des tendances à venir, il est très difficile de prédire avec exactitude ce qu'il adviendra de l'écosystème forestier à l'avenir. C'est pourquoi, ne sachant pas vers quel équilibre la forêt de demain tend, le forestier doit gérer cet écosystème de la manière la plus durable possible. Pour cela, une combinaison de mesures sylvicoles devra être privilégiée afin d'augmenter la résilience des forêts et de préserver des conditions saines de développement (Bolte et al., 2009 ; Himpens et al., 2017) : favoriser un mélange d'essences et de structure d'âge, planter l'arbre dans des conditions optimales de développement, promouvoir la biodiversité, valoriser toutes les essences en station avec le très bel exemple du bouleau en Belgique (Dubois, 2016), protéger les sols et les réserves en eau, adopter une sylviculture dynamique et/ou proche de la nature avec par exemple la méthode Q/D (Wilhelm et Rieger, 2017). Tous ces principes doivent être appliqués dès aujourd'hui afin de limiter les risques et les dégâts inutiles futurs.

Mais en parallèle à ces principes, face à la rapidité des changements globaux, une autre alternative revient sur le devant de la scène : la plantation d'essences exotiques. L'introduction d'espèces hors de leur aire de distribution naturelle n'est pas une pratique nouvelle et a déjà été utilisée dans le passé à travers l'Europe et même en Belgique avec notamment des plantations pures équiennes d'épicéas et de douglas. L'ancienneté de cette pratique permet aujourd'hui de tirer les avantages et les inconvénients de leurs utilisations (Tableau 1).

Tableau 1 : Avantages et inconvénients de l'utilisation d'essences exotiques en gestion forestière

Avantages	Sources
Maintien ou amélioration de la productivité	Messier et al. (2003) ;
Adaptation aux changements globaux	Meason et Mason (2014)
Diversification des peuplements	Kerr et al. (2015)
Inconvénients	
Perte de biodiversité	Felton et al. (2013) ; Fang et al. (2014)
Risque d'invasivité et risque économique lié à sa gestion	Richardson et Rejmanek (2011) ; Kjaer et al. (2013) ; Pimentel et al. (2005) ; Scalera (2010)
Risque d'hybridation	Dodet et Collet (2012)
Introduction d'agents pathogènes et ravageurs	Ghelardini et al. (2016)
Modification stationnelle (exemple : acidification)	Ehrenfeld (2003) ; Ashton et al. (2005) ; Aerts et al. (2017)
Risque lié au manque de coévolution avec les espèces indigènes	Karlman et al. (1994) ; Piou et al. (2002) ; Piotrowska et al. (2018)

Il en ressort que l'introduction d'essences exotiques est une pratique qui n'est pas exempte de risques d'un point de vue environnemental ou économique si l'espèce n'est ni connue ni testée au préalable (Ennos et al., 2019).

C'est exactement dans ce contexte que s'inscrit ce travail de fin d'études. Afin de pouvoir tirer des conclusions sur l'avenir d'une essence exotique dans une gestion forestière, ses caractéristiques doivent être connues et son développement doit être surveillé. C'est pourquoi, le cèdre de l'Atlas, essence encensée dans le cadre de l'adaptation des forêts aux changements climatiques, est le cœur de ce travail. Cette essence, ayant notamment fait ses preuves lors de son introduction en France, revient souvent comme étant l'arbre peuplant les forêts de demain. La monographie qui suit tentera d'apporter les raisons de cette réputation et permettra de fournir les informations suffisantes afin de tirer les premières conclusions de cette essence. A partir de maintenant, considérez que l'utilisation du mot cèdre seul fait directement référence à cette espèce.

2. Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* (Endl.) Carr.)

2.1. Distribution à travers le temps

Essence d'origine montagnarde (Figure 6), le cèdre de l'Atlas se retrouve principalement dans les chaînes de montagnes marocaines telles le Rif, le Moyen Atlas et le Haut Atlas et dans quinze îlots montagneux algériens culminant à des altitudes variant de 1400 à 2400 mètres d'altitude (M'Hirit et Benzyane, 2006 ; Courbet et al., 2012).

Vu le caractère méditerranéen que lui procure cette répartition géographique, les gestionnaires forestiers français ont été les premiers à planter cette essence dans le Mont Ventoux en 1862. Aujourd'hui, la France est le pays possédant la plus grande superficie de cédraies hors de sa distribution naturelle (Demarteau et al., 2007). D'ailleurs, la grande majorité de la littérature scientifique sur le cèdre provient des essais réalisés depuis plus de cent ans dans différents départements français et renseignant sur les conditions optimales nécessaires à la réussite d'un peuplement en cèdre. Ensuite, des pays tels l'Italie ou la Hongrie ont commencé à leur tour à planter cet arbre dans leurs régions (Demarteau et al., 2007).

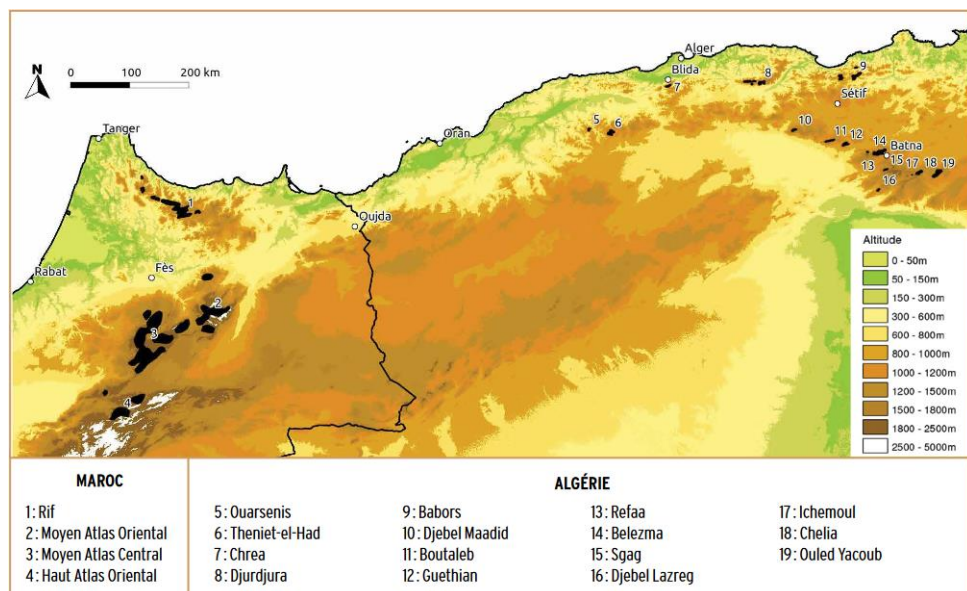


Figure 6 : Distribution naturelle du cèdre de l'Atlas au Maroc et en Algérie (Courbet et al., 2012)

2.2. Autécologie

2.2.1. Climat

Le cèdre croît dans des climats méditerranéens c'est-à-dire des climats à hiver humides frais et à été sec (Aussenac, 1984). Etant une essence qui aime la chaleur, la température moyenne annuelle doit être comprise entre 8 et 14°C mais le cèdre supporte des températures extrêmes de -25°C à 41°C (Aussenac, 1984 ; Van Lerberghe, 2007). Malgré cette tolérance, il a besoin de grandes quantités en eau allant de 600 à 1500 mm par an (Van Lerberghe, 2007). Différents essais hors de la zone méditerranéenne ont montré que la croissance du cèdre est tout à fait possible dans des climats moins secs et plus froids (Riou-Nivert, 2007). Mais attention, le cèdre ne supporte pas de forts taux d'humidité comme le brouillard, ce qui peut compromettre son adaptation et sa croissance. De plus, le gel tardif est un élément l'impactant fortement (Courbet et al., 2012). Avec cela, le cèdre

montrerait également une sensibilité au période de gel-dégel intense. En effet, Girard et al. (2018) ont pu mettre en évidence que la succession de températures hivernales négatives suivi d'un réchauffement brutal du à des stations chaudes est néfaste vu que des anomalies de croissance voire des mortalités ont été observées en Ardèche. Finalement, son bois cassant le rend vulnérable également au vent et à la neige (Van Lerberghe, 2007 ; Courbet et al., 2012).

2.2.2. Altitude et exposition

Vu le climat préférentiel du cèdre, il est aisé de comprendre que l'altitude et l'exposition jouent un rôle important. Les altitudes présentant des risques de gels, de températures hivernales trop faibles ou de neige sont à éviter absolument (Courbet et al., 2012). Dans la même logique, les fonds de vallées sont des stations non propices à l'établissement du cèdre. A l'inverse, les versants sud sont par exemple favorables vu le caractère thermophile du cèdre (Van Lerberghe, 2007).

2.2.3. Type de sol

A côté des paramètres climatiques, les facteurs qui sont véritablement déterminants dans la pérennité de cette essence sont la profondeur et la texture du sol (Riou-Nivert, 2007). En effet, le système racinaire du cèdre peut être caractérisé de pivotant et de puissant, s'ancrant en profondeur dans le sol (Rameau et al., 1989). L'arbre a donc une capacité de prospection plus grande que beaucoup d'espèces, lui permettant d'aller chercher l'eau dans les horizons les plus profonds. Cet enracinement est le véritable atout du cèdre car il lui permet de supporter des épisodes de sécheresses si seulement l'enfouissement est possible. C'est pourquoi, une bonne aération, une charge caillouteuse modérée et un mélange d'éléments structurels sont trois éléments favorables au bon développement racinaire car le cèdre est très sensible à l'anaérobiose et à la compacité du sol (Courbet et al., 2012).

En ce qui concerne la richesse chimique du sol, le cèdre y est indifférent et supporte une grande variabilité de pH (Courbet et al., 2012). Allant du sol calcaire au sol acide, le développement est tout à fait possible tant que la profondeur du sol et du sous-sol sont suffisantes. A noter quand même que les croissances les plus fortes sont observées sur sol schisteux et gréseux (Ripert & Boiseau, 1994 ; Ripert, 2007). Le cèdre tolère donc le calcaire sans offrir des croissances exemplaires et est également déconseillé sur des sols podzoliques (Courbet et al., 2012).

La synthèse de ces informations peut se faire sous la forme d'un écogramme (Figure 7).

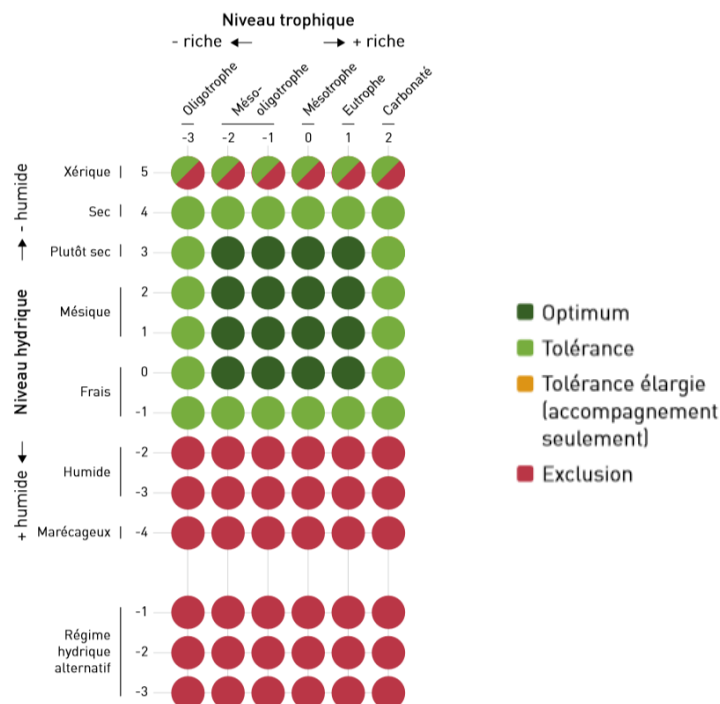


Figure 7 : Ecogramme du cèdre de l'Atlas (Source : <https://www.fichierecologique.be>)

2.3. Physiologie

2.3.1. Régénération

La régénération naturelle est un point important à aborder car celle-ci peut, à la fois, assurer la pérennité d'un peuplement et poser de gros problèmes dans une gestion forestière si l'abondance des semis est élevée. La régénération du cèdre est un processus complexe où des paramètres précis doivent être respectés si l'on veut avoir des semis viables à terme. C'est pourquoi ces différentes étapes seront présentées afin d'être le plus complet possible.

Premièrement, la maturité sexuelle commence vers 15-20 ans mais ne devient efficace qu'à partir de 40 ans (Courbet et al., 2012). Le cycle (Figure 8) débute avec la floraison. Le cèdre étant une essence monoïque, les inflorescences mâles apparaissent fin juin tandis que les inflorescences femelles débutent fin août. La pollinisation se déroule en automne pour avoir une fécondation au printemps suivant (Toth, 1978). Le développement embryonnaire dure ensuite deux ans. Le cycle de fructification du cèdre est donc de trois ans permettant d'anticiper la dissémination des graines (Toth, 1978 ; Courbet et al., 2012).

Si la fécondation est une étape aisée nécessitant juste l'aide du vent, la suite du processus est beaucoup plus complexe. Le cône arrivant à maturité, sa désarticulation est conditionnée par des épisodes de gel-dégel durant l'hiver tandis que l'ouverture des écailles nécessite la chaleur et l'humidité (Toth, 1978). Dans les premières plantations du Mont-Ventoux, la régénération naturelle a été une réussite produisant des centaines d'hectares de peuplements naturels à l'issue de quatre générations (Courbet et al., 2007). Notez tout de même que la régénération de ces peuplements est favorisée vu leur vent abondant et la pente des massifs.

La graine libérée, elle peut se disperser sur des distances allant de 30 à 60 mètres ou plus suite à l'action du vent (Courbet et al., 2012). Mais après être arrivée au sol, il faut encore qu'elle puisse croître. La levée de dormance est assurée par l'hiver et la germination peut débuter au printemps si la température dépasse les 6°C (Aussenac, 1984). Ensuite, la survie des semis est dépendante de son développement racinaire. Comme discuté précédemment, le système racinaire du cèdre est son atout mais est surtout la condition nécessaire et suffisante afin d'assurer sa vitalité. En effet, ce dernier doit être suffisant parce que les jeunes semis sont très sensibles à un coup de chaud brutal et à la sécheresse (Aussenac, 1984 ; Courbet et al., 2012). C'est uniquement à partir d'un âge de deux ans que les semis commencent à supporter des stress hydriques élevés (Finkelstein, 1981).

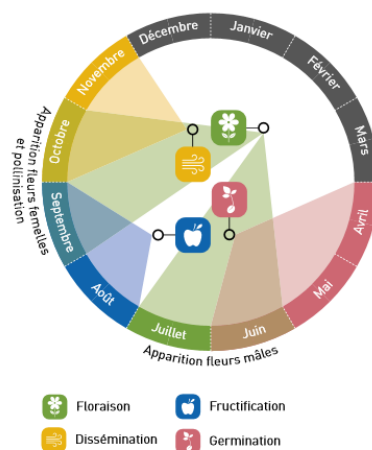


Figure 8 : Cycle de reproduction du cèdre de l'Atlas (Source : <https://www.fichierecologique.be>)

2.3.2. Tempérament

Malgré son origine montagnarde, le cèdre est bien une essence thermophile et est qualifié d'héliophile (Aussenac, 1981 ; Van Lerberghe, 2007). Dans son jeune âge, un léger couvert supérieur peut lui être bénéfique afin d'éviter des rayons solaires trop incidents en lui causant des dommages comme cités précédemment (Van Lerberghe, 2007). De plus, ayant une régénération assez complexe ou dans le cadre d'une plantation, le cèdre est sensible à la végétation basse et en général, ne supporte pas la concurrence (Courbet et al, 2012). En grandissant, le cèdre possède une fâcheuse tendance à former des grosses branches latérales (Van Lerberghe, 2007).

2.3.3. Croissance et productivité

Une autre particularité du cèdre est sa longue saison de végétation (Figure 9) lui procurant ainsi une durée de croissance en hauteur plus longue (Aussenac, 1984).



Figure 9 : Comparaison des périodes de végétation de différentes essences résineuses (Aussenac, 1984)

Cette particularité ajoutée à celle de son enracinement profond, lui permet souvent de surmonter des épisodes estivaux en continuant à croître et à photosynthétiser même en période de stress hydrique (Ducrey, 1994 ; Courbet et al, 2012). C'est pourquoi, le cèdre est une essence à tendance xérophile (Rameau et al., 1989). Ainsi, le cèdre est capable de surmonter des sécheresses grâce aux mois de septembre et d'octobre. De plus, si une année bien arrosée suit de tels épisodes, il absorbera ce déficit au printemps suivant (Finkelstein, 1981 ; Aussenac, 1984). La place que s'est fait le cèdre en tant qu'essence providentielle face au changement climatique est dorénavant compréhensible.

La croissance du cèdre peut être qualifiée de lente dans les premières années (Ripert & Boiseau, 1994). Ensuite, la croissance est moyennement rapide et non soutenue. Par exemple, arrivé vers l'âge de 100 ans et selon la sylviculture de l'ONF (DT Méditerranée), le diamètre de l'arbre peut être compris entre 50 et 60 cm avec un accroissement moyen de 10 m³/ha/an (Courbet et al., 2007). En France, l'INRAE a ajusté des courbes de croissance en hauteur dominante pour la région méditerranéenne mettant en lumière quatre classes de fertilité (Figure 10). Ces dernières ont été construites à partir d'analyse de tiges dominantes prélevées dans 22 peuplements du sud-est de la France. Or, il s'avère que la croissance des jeunes reboisements ne suit plus ces courbes : pour un indice de fertilité donné, ils ont tendance à pousser plus vite dans le jeune âge, du fait de la modification du climat, des dépôts azotés et peut être des pratiques sylvicoles (meilleurs plants et techniques de reboisement), pour ensuite ralentir dans le temps. La projection de croissance (et donc de production) faite à partir de jeunes arbres risque d'être surestimée d'autant plus que les arbres seront jeunes et la projection loin de la mesure. C'est pourquoi, afin de pouvoir juger sur la croissance réelle du cèdre dans un pays, il est primordial d'avoir un jeu de données assez fourni et âgé afin d'éviter la surestimation liée à ce constat.

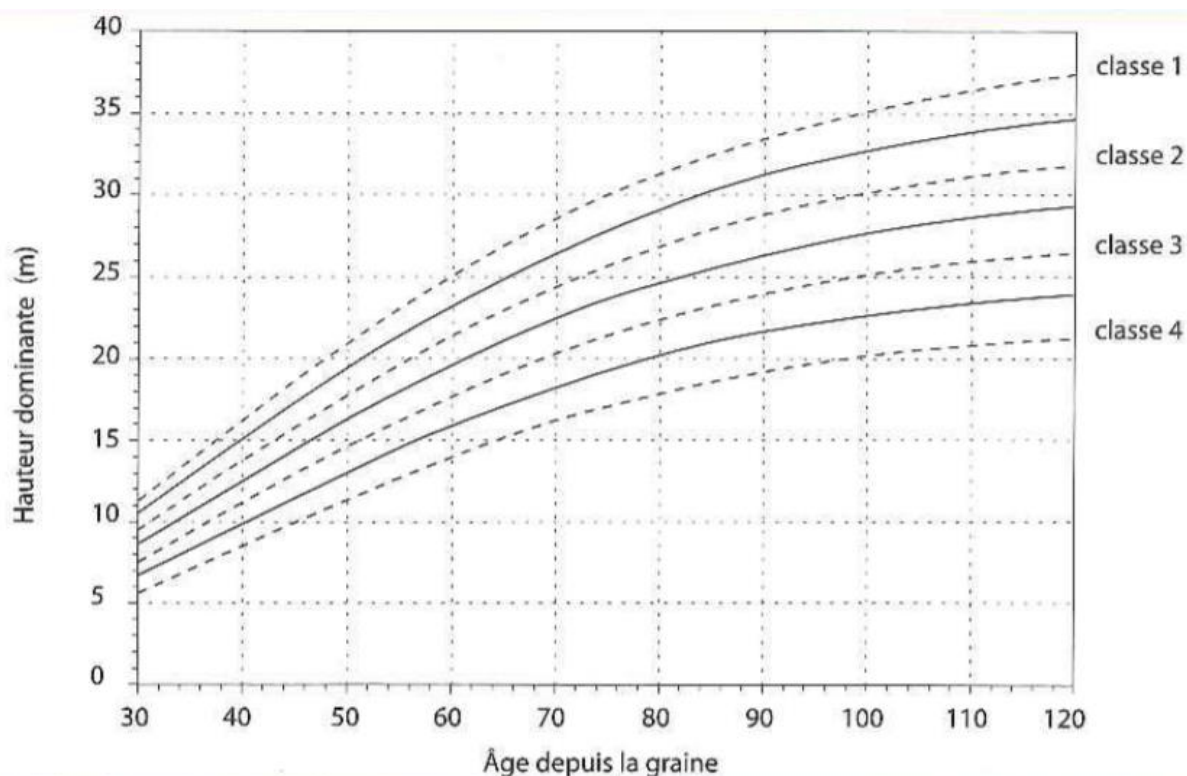


Figure 10 : Classes de fertilité et courbes de croissance en hauteur dominante du cèdre de l'Atlas en France réalisées par l'INRAE pour la région méditerranéenne. Les traits pleins représentent les limites de classes tandis que les traits pointillés représentent la valeur centrale de la classe considérée. L'âge est compté à partir de la graine. (Courbet et al., 2007)

2.4. Problèmes sanitaires

Dans une gestion forestière, les problèmes sanitaires d'une essence doivent être connus afin d'assurer une bonne prévention et dans le cas échéant, une lutte efficace. Grâce à la littérature, le Tableau 2 a été construit en reprenant les agents causant le plus de dommages et revenant souvent dans les différents articles consultés afin d'avoir une liste des risques ou des bioagresseurs principaux pouvant provoquer des dommages non négligeables aux cédraies.

Tableau 2 : Liste des agents biotiques et abiotiques provoquant des problèmes sanitaires aux cédraies ; l'astérisque indique les espèces indigènes au cèdre dans son aire naturelle

Insectes	Source
<i>Cedrobium laportei</i> *	
La tordeuse du cèdre (<i>Epinotia cedricida</i>)*	
L'hylobe (<i>Hylobius abietis</i>)	
<i>Megastigmus spp.</i> *	Fabre (1999) ; Candau (2008) ;
<i>Phaenops marmottani</i> *	Nageleisen (2007) ; Courbet et al. (2012)
Le curvidenté (<i>Pityokteines curvidens</i>)	
La processionnaire du pin (<i>Thaumetopoea pityocampa</i>)	
Agents pathogènes	
<i>Armillaria spp.</i>	
<i>Botrytis cinerea</i>	
<i>Heterobasidion annosum</i>	Nageleisen (2007) ; Rossman et al. (2008) ;
<i>Sirococcus tsugae</i>	Courbet et al. (2012)
<i>Sphaeropsis sapinea</i>	
Agents climatiques	
Gel tardif, grêle	Nageleisen (2007) ; Courbet et al. (2012) ; Girard et al. (2018)
Autres	
Rongeurs & gibiers	Lecomte (2007) ; Nageleisen (2007) ; Ladier et al. (2012)

Beaucoup d'espèces sont indigènes à l'aire naturelle du cèdre et d'autres ont déjà été gérées par le biais de lutte biologique comme *C. laportei* (Nageleisen, 2007). C'est pourquoi, dans ce paragraphe, seuls trois problèmes émergents pour le cèdre seront discutés.

2.4.1. *Sirococcus tsugae*

Provenant d'Amérique, ce champignon a été détecté pour la première fois en Europe au Royaume-Uni en 2013 (Pérez-Sierra et al, 2015) pour ensuite être découvert en Belgique en 2018 (Schmitz et al., 2018). Confondu au départ avec *Sirococcus conigenus*, il a été prouvé qu'il s'agissait bien de deux espèces différentes (Rossman et al., 2008).

S. tsugae provoque la brûlure des pousses et les essences susceptibles d'être attaquées seraient les genres *Cedrus spp.* et *Tsuga spp.* Les symptômes de cette maladie sont une décoloration rosâtre des aiguilles et des nécroses sur les branches qui provoquent des dépérissements et *in fine*, la mort de l'arbre.

Son expansion rapide en Grande-Bretagne via la dispersion de spores par le vent et par les précipitations lui a valu d'être quatre ans sur la liste d'alerte de l'EPPO². Aujourd'hui, sa répartition actuelle en Europe (Figure 11) l'a destitué de cette liste. En effet, vu la faible distribution du cèdre ou du tsuga dans les forêts européennes, il est normal que son expansion ait été limitée. Toutefois, dans une optique où le cèdre serait planté de plus en plus vu ses avantages décrits plus haut, la distribution de *S. tsugae* pourrait s'étendre et il doit être impérativement surveillé pour éviter des dégâts sanitaires non négligeables.

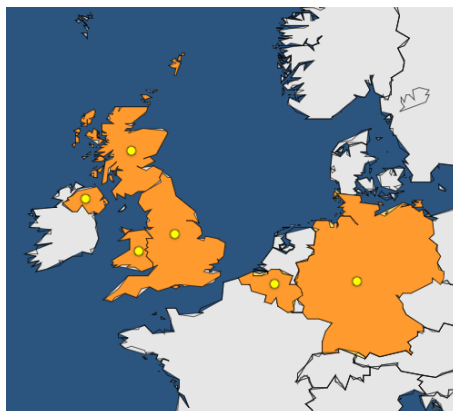


Figure 11: Répartition actuelle de *Sirococcus tsugae* en Europe (Source : <https://gd.eppo.int/taxon/SIROTS/distribution>)

2.4.2. *Thaumetopoea pytyocampa*

Du côté des insectes, la processionnaire du pin pourrait être un problème pour le cèdre. Avec les changements climatiques, son aire de distribution tend à s'étendre vers le nord (Figure 12) et bien que ce bioagresseur attaque préférentiellement les pins, le cèdre pourrait tout autant être impacté si ses essences préférentielles venaient à être limitées.

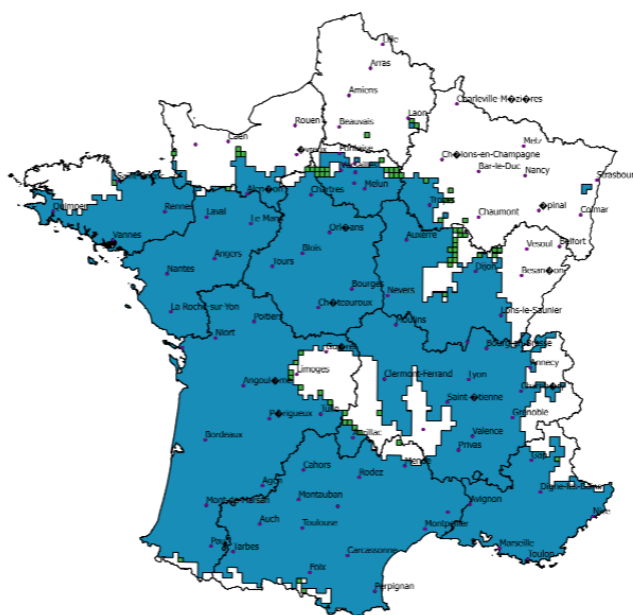


Figure 12 : Répartition de la processionnaire du pin en France ; La zone bleue représente l'aire potentielle de l'insecte créée par les modélisations de l'INRA tandis que les carrés verts forment son front d'expansion reporté par les correspondants-observateur du DSF (Gaudry & Laubray, 2018).

² European and Mediterranean Plant Protection Organization

Son arrivée en Belgique est possible dans quelques années si les températures continuent à augmenter car le facteur limitant de cet insecte est la température hivernale (Roques et al., 2015). En effet, afin de comprendre entièrement le phénomène, le cycle biologique de l'insecte doit être connu.

La femelle vient pondre ses œufs sur le sommet des arbres en été. Les larves résultant de ces œufs, vont débiter par consommer les aiguilles jusqu'à l'automne. Afin de survivre pendant l'hiver, ces chenilles vont tisser un nid caractéristique afin de créer un microclimat favorable à leur développement (Nageleisen et al., 2010). Pour assurer leur survie, ces chenilles vont sortir la nuit afin de continuer à consommer les aiguilles. Mais cette escapade nocturne nécessite une combinaison particulière : la température du jour doit être supérieure à 6°C et celle de nuit à 0°C. Si un de ces paramètres n'est pas respecté, la chenille ne sort pas se nourrir. Battisti et al. (2005) ont parfaitement démontré ce phénomène en étudiant la production de fèces selon la température du jour (Figure 13). Ensuite, dès le début du mois de février, les chenilles descendent de l'arbre en procession pour s'enfoncer dans le sol afin de commencer le stade de pupa. A l'été, les papillons sortent et s'envolent pour aller coloniser d'autres arbres perpétuant ainsi le cycle. En connaissant ce principe, il est facile de comprendre que le changement climatique va jouer un rôle positif dans le cycle biologique de l'insecte. Une période de diapause allant de 1 à 3 ans est possible durant la phase souterraine. Les fluctuations de populations (gradations) se manifestent tous les 6 ans avec un pic pendant 1 à 2 ans (Nageleisen et al., 2010).

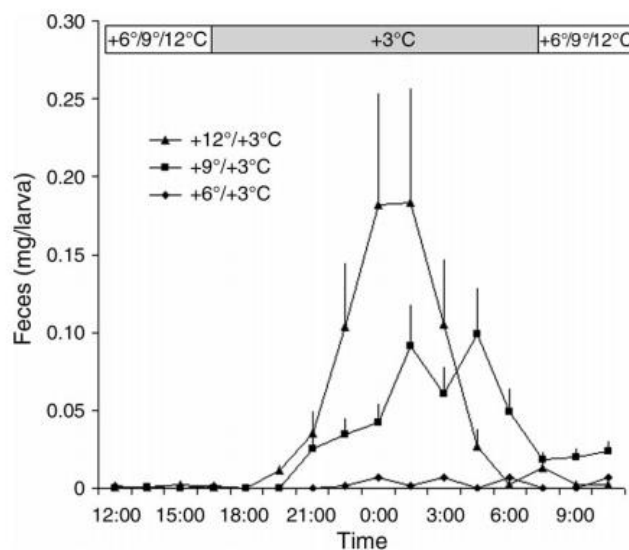


Figure 13 : Evolution de la production de fèces dans le temps selon trois types de combinaisons de températures ; la température nocturne est fixée à 3°C tandis que la température du jour varie selon trois valeurs : 6°C, 9°C et 12°C (Battisti et al., 2005).

Comme mentionné plus haut, les dégâts occasionnés sont des défoliations par consommation d'aiguilles de l'automne jusqu'au printemps si les conditions sont favorables aux chenilles. Toutefois, Nageleisen et al. (2010) mentionnent que son agressivité est faible et que les cas de mortalités sont rares. Cependant, ils rapportent également que la processionnaire du pin est le deuxième insecte ravageur le plus souvent signalé par le Département de la santé des forêts prouvant sa forte fréquence en France.

2.4.3. Les conséquences du gel tardif

Après avoir décrit les deux bioagresseurs pouvant provoquer des dégâts non négligeables sur le cèdre à l'avenir, un autre paramètre déjà discuté précédemment pourrait avoir son importance : le gel tardif. Un débourrement précoce suite aux changements climatiques ou un stress hydrique de l'année le précédant pourrait être préjudiciable pour le cèdre s'il est couplé à un gel tardif printanier. Ce type de stress pourrait également être la porte d'entrée d'agents de faiblesse comme *Sphaeropsis sapinea* ou des scolytes comme *Pityokteines curvindens*. Le cèdre est en effet proche du sapin d'un point de vue phylogénétique (Du Merle et al., 1989 cité par Nageleisen, 2007). De ce fait, le cèdre serait potentiellement sensible à une série de bioagresseurs colonisant les résineux en commençant par le sapin (Nageleisen, 2007).

2.5. Qualité et valorisation du bois

En plus d'avoir une large amplitude écologique, le bois de cèdre est très intéressant en terme de valorisation. El Azzouzi et Keller (1998) ont réalisé un article complet sur les propriétés technologiques de ce bois (Figure 14) et dans ce paragraphe, les points les plus intéressants seront présentés en faisant toujours écho à leur article si d'autres auteurs ne sont pas référencés.

Tout d'abord, il faut savoir que le bois de cèdre possède une grande durabilité naturelle, ce qui lui confère un avantage non négligeable dans les utilisations extérieures. De plus, il est imputrescible grâce à sa forte teneur en huiles essentielles qui peut également être valorisée. Sa résistance à la mûre est également une qualité (Jacquot et al., 1972 cité par El Azzouzi et Keller, 1998).

La densité moyenne de bois est supérieure aux autres essences résineuses (Figure 14) et est liée à sa texture élevée. Une corrélation a été observée entre la largeur de cerne et la texture du bois ce qui lui vaut une autre particularité en tant que résineux : plus son cerne est large, plus sa densité est grande.

Afin de finir avec ses qualités, le bois de cèdre possède un faible retrait se déformant donc peu au séchage lui procurant ainsi une bonne stabilité et une excellente qualité confirmée par les travaux de Brunetti et al. (2001).

Le gros inconvénient de ce bois, déjà mentionné en début de cette monographie, est qu'il est cassant et possède donc un module d'élasticité faible le rendant sensible aux chocs. De plus, sa forte branchaison peut altérer les caractéristiques de résistance du bois de par la formation de nœuds.

Ses nombreuses qualités lui valent d'être valorisable dans de nombreux usages que ce soit de la menuiserie, de l'ébénisterie ou du tranchage. Son bois cassant doit limiter son utilisation en charpente.

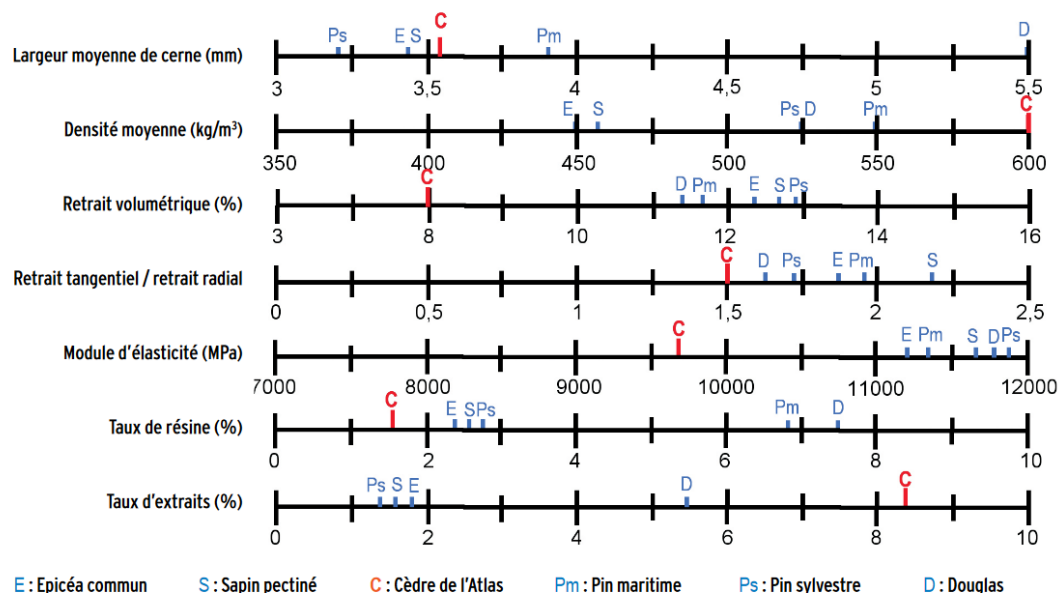


Figure 14 : Comparaison des propriétés technologiques du bois de cèdre avec d'autres essences résineuses (Courbet et al., 2012 d'après El Azzouzi et Keller, 1998).

2.6. Sylviculture

Au terme de la description des caractéristiques biologiques et physiques du cèdre de l'Atlas, il est maintenant possible de définir des points importants afin d'apporter une sylviculture adaptée à cette essence.

La branchaison de cette essence sera l'élément clé de la gestion mise en place. Lors des plantations, des distances à 2,5 mètres x 2,5 mètres sont recommandées en France ce qui équivaut à une densité d'au moins 1000 plants par hectare (Riou-Nivert, 2007). En grandissant, l'élagage artificiel est obligatoire vu la difficulté des branches basses à tomber (Courbet et al., 2007). Des élagages précoces et dynamiques sont prévus afin de limiter la croissance des branches basses et donc la potentielle présence de nœuds dans le bois. Ensuite, vu le caractère héliophile du cèdre, des éclaircies fortes et précoces sont également favorables au bon développement de l'arbre en largeur. C'est pourquoi, les sylviculteurs français interviennent dès une hauteur tournant autour des 15 mètres c'est-à-dire plus ou moins 30 ans. Par la suite, des éclaircies sont prévues tous les 10 ans afin de laisser tout l'espace dont le cèdre a besoin pour croître (Courbet et al., 2012 ; Ladier et al., 2012). Ainsi l'âge d'exploitabilité varie entre 100 et 120 ans selon la fertilité du sol (Courbet et al., 2007). Bien que la majeure partie des cédraies ou des peuplements mélangés avec le cèdre soient des forêts régulières, le peuplement en irrégulier est tout à fait une possibilité qui nécessite d'être testée vu que cette essence supporte un léger couvert dans son jeune âge. Des mélanges avec des chênes par exemple seraient intéressants à tester vu que dans son aire d'origine, des associations avec le chêne vert sont inventoriées (M'Hirit et Benzyane, 2006 ; Courbet et al., 2012).

2.7. L'avenir du cèdre

Après cette description biologique, le cèdre semblerait effectivement intéressant dans un contexte de changement climatique. Dans son aire d'origine, l'arbre semble montrer ses limites. En 2007, la superficie totale représentait environ 160 000 hectares (Demarteau et al., 2007) mais ce nombre est à la baisse parce que les cédraies nord africaines subissent de grandes vagues de sécheresse et des dégâts dus au bétail qui dégradent fortement ces peuplements (Linares et al., 2012 ; Navarro-Cerrillo et al., 2019). Ces dépérissements lui valent d'être considéré comme espèce en danger sur la liste rouge de l'IUCN (Thomas, 2013). A la vitesse à laquelle ces changements climatiques évoluent, cette essence est vouée à disparaître si l'Homme ne l'assiste pas dans sa migration vu la barrière géographique lui faisant face (Riou-Nivert, 2007).

Demarteau et al. (2007) prédisaient grâce à l'utilisation du modèle CARAIB³, qui se base sur la production primaire nette, que l'aire potentielle de cette essence se trouverait en Belgique d'ici la fin du siècle (Figure 15). De plus, certains forestiers wallons en ont déjà planté sur des petites parcelles afin de diversifier leurs peuplements. Il est donc temps d'étudier cette essence plus en profondeur afin de pouvoir juger de sa présence sur notre territoire.

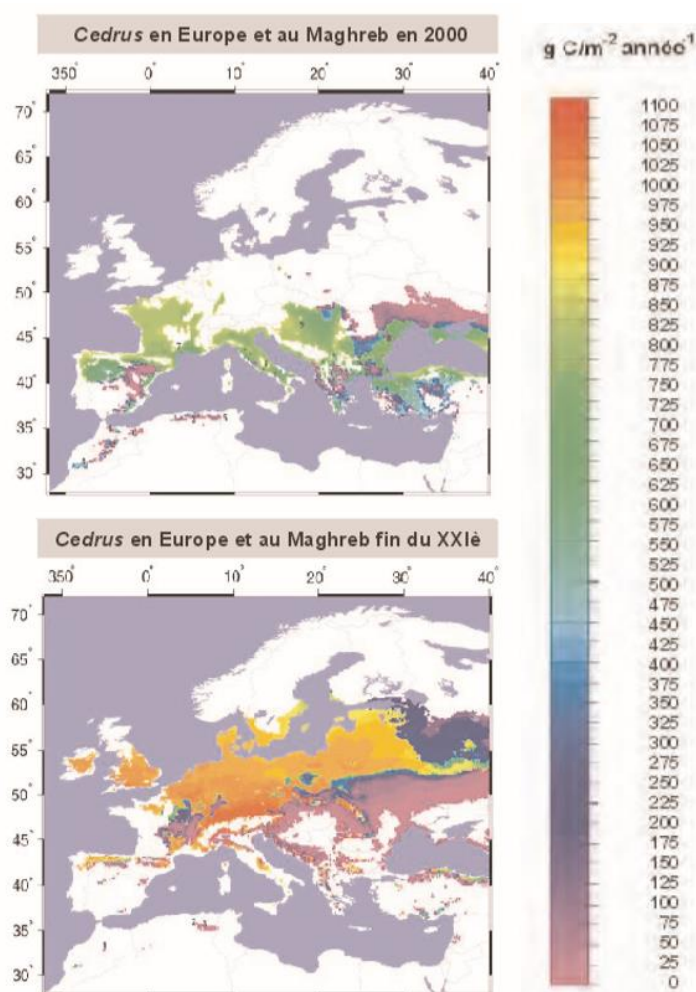


Figure 15 : Evolution de l'aire potentielle du cèdre de l'année 2000 (en haut) jusqu'à la fin du siècle (en bas) générée par le modèle CARAIB se basant sur la production primaire nette (en gramme de carbone par m² par an) (Demarteau et al., 2007).

³CARbon Assimilation In the Biosphere

2.8. Le cèdre en Belgique

Sur notre territoire, cette essence est peu connue. Malgré tout, au vu de ses besoins et de l'ensemble de ses caractéristiques, il a été possible de générer une carte montrant les régions où des plantations de cèdres seraient viables et également là où le risque est trop grand mettant en péril son développement (Figure 16).

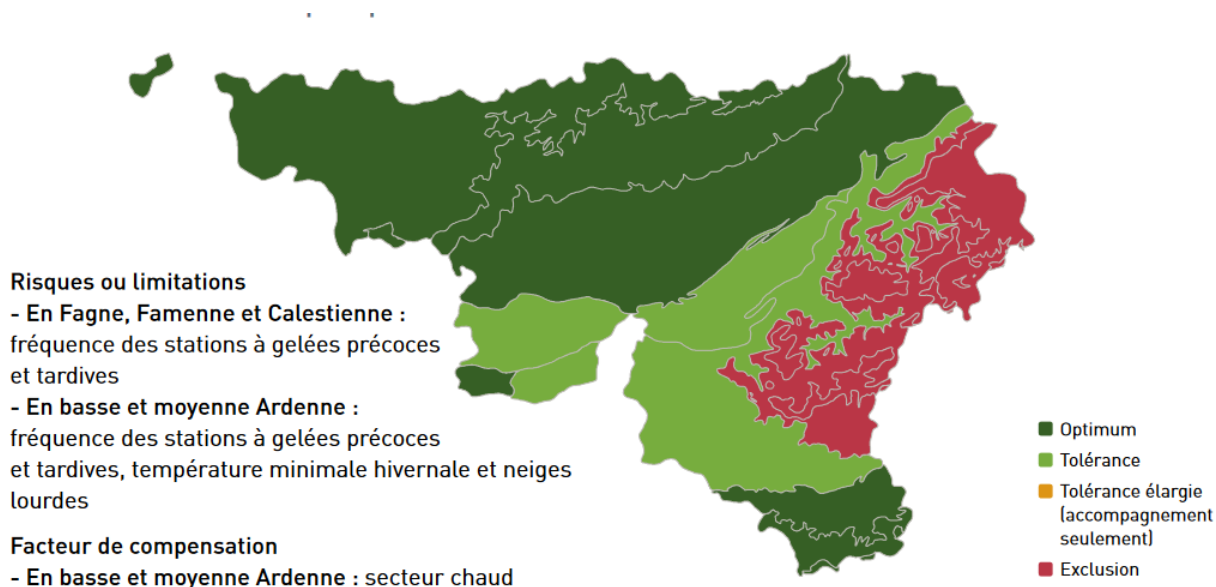


Figure 16 : Carte d'aptitude du cèdre de l'Atlas en Belgique (Source : <https://www.fichierecologique.be>)

Il n'y a qu'en moyenne et en haute Ardenne qu'il faut éviter de planter du cèdre. En effet, à ces altitudes, les températures hivernales et la neige deviennent des facteurs qui impacteront fortement sa croissance. En ce qui concerne, la basse Ardenne et la zone Fagne, Famenne et Calestienne, l'essence se trouve en zone de tolérance ce qui veut dire qu'elle est viable mais certains facteurs pourront affecter sa croissance. En effet, dans ces régions, les périodes de gels tardifs et/ou de chutes de neige sont possibles et, selon l'intensité de ces événements, ces facteurs pourront limiter sa productivité. C'est pourquoi, la plantation dans les secteurs chauds est le principal facteur de compensation.

3. Objectifs

Dans ce contexte, ce mémoire de master a pour but d'identifier les potentialités et les risques liés à l'introduction du cèdre de l'Atlas en Belgique. C'est pourquoi, une grande partie de cette introduction était vouée à la description de cet arbre, passage obligé afin de pouvoir l'étudier parfaitement. Dans ce paragraphe, il est question de rappeler les différentes démarches mises en place afin d'apporter des informations supplémentaires.

Premièrement, au vu des quelques plantations réalisées par le DNF⁴ ces dernières années, il est plus qu'intéressant de suivre l'adaptation et la croissance de cette essence chez nous. C'est pourquoi, un monitoring a été réalisé sur l'ensemble de ces parcelles. Ces visites ont été l'occasion de contrôler l'état sanitaire des plantations ainsi que leur développement.

⁴ Département de la Nature et des Forêts

Deuxièmement, le risque de dispersion d'une maladie est considéré. Les brûlures des pousses causées par *Sirococcus tsugae* est la plus incertaine à l'heure actuelle pour le cèdre. C'est pourquoi, une expérience d'inoculation a été mise en place sur l'ensemble des essences résineuses productives en Wallonie pour tenter de prévoir une propagation éventuelle de cet agent pathogène vers d'autres essences et d'ainsi définir sa gamme d'hôtes. Cette partie s'appuie sur le projet HARMSTAT du Centre wallon de Recherches agronomiques (CRA-W) qui concerne l'établissement du statut phytosanitaire de différents organismes nuisibles aux végétaux parmi lesquels *S. tsugae*. En parallèle à cet essai expérimental, une autre expérience d'inoculation uniquement sur cèdre et douglas a été réalisée afin de prédire l'expansion d'un autre champignon largement répandu sur notre territoire. L'agent pathogène en question dans cet essai est *Sirococcus conigenus* qui produit des dégâts non négligeables dans les douglasaies wallonnes par exemple mais qui est également assez répandu sur d'autres résineux. Ces deux champignons ont été confondus dans le passé et cette inoculation permettra de voir si oui ou non, *S. conigenus* pourrait être une menace pour le cèdre de l'Atlas.

Ce travail de fin d'étude profite donc de l'ensemble des éléments théoriques et pratiques récoltés durant ces mois de travail pour tirer les premières conclusions de cette essence en Wallonie.

II. Matériels et méthodes

1. Monitoring

1.1. Zone d'étude

Le monitoring est effectué sur tout le territoire de la Wallonie en Belgique dans les forêts gérées par le DNF durant le mois de mai 2020. Les sites potentiels de cèdre ont été recueillis grâce au responsable cartographique du DNF. Au départ, 32 îlots de forêts publiques étaient répertoriés. Après une analyse en profondeur et diverses discussions avec les chefs de cantonnements et/ou agents de triage, le nombre de sites prospectés est descendu à 23 (Figure 17). Malgré le fait que cela diminue considérablement le jeu de données utilisé, les causes de cette diminution apportent des informations non négligeables à prendre en compte, et qui seront présentées plus loin dans ce travail (Discussion générale – 1.1.1 Retour de terrain).

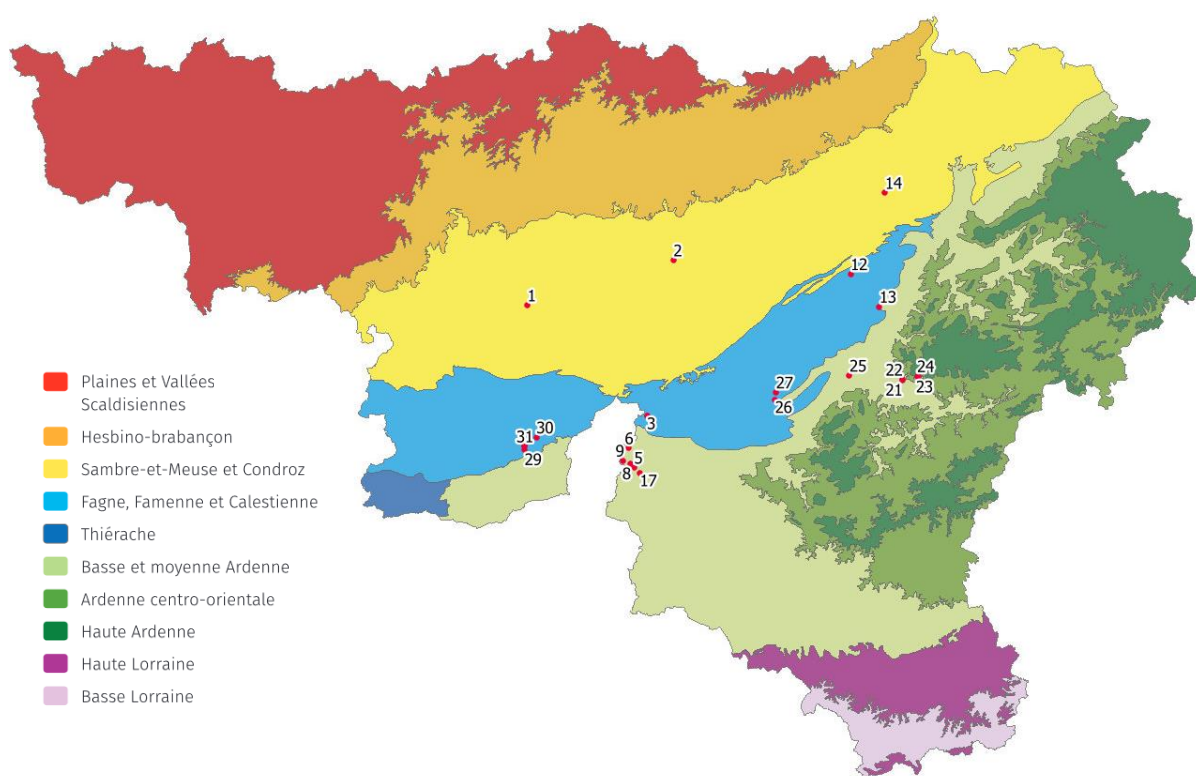


Figure 17 : Répartition de l'ensemble des îlots présentant du cèdre en Wallonie (Source : Carte des zones bioclimatiques, Université de Gembloux Agro-Bio Tech).

1.2. Description et analyse des sites

1.2.1. Plantations de cèdre

Les sites prospectés représentent 12 hectares dont 3 hectares en mélange avec d'autres essences résineuses telles que l'épicéa, le douglas, le mélèze ou le pin sylvestre. Les différents peuplements sont jeunes avec un âge variant de 2 à 18 ans (Tableau 3).

Tableau 3 : Description des plantations de cèdre en Wallonie

Site	Superficie de cèdre dans l'îlot (ha)	Superficie totale de l'îlot (ha)	Date de plantation
1	0,0975	0,0975	2015
2	0,9352	0,9352	2011
3	0,1811	1,2075	2008
4	0,3623	1,2075	2014
5	0,0692	0,3462	2010
6	0,4635	1,5447	2015
8	0,5346	4,4552	2012
9	0,3049	3,3857	2002
12	0,9301	0,9301	2017
13	0,2851	0,2851	2009
14	0,1631	0,6523	2018
17	0,2069	1,0347	2004
21	0,1045	0,1100	2014
22	0,4899	0,4899	2014
23	0,2340	2,6005	2018
24	0,0805	4,0203	2017
25	1,4782	1,4782	2017
26	0,3411	0,8527	2017
27	2,4870	2,4870	2011
28	0,4484	0,4484	2016
29	0,3791	0,3791	2016
30	1,4141	1,4141	2018
31	0,2811	0,2811	2016

1.2.2. Analyse stationnelle des sites

Pour chaque site, une analyse des caractéristiques biotiques et abiotiques (Tableau 4) a été réalisée à l'aide de plusieurs cartes fournies par l'équipe «Gestion des Ressources Forestières » de Gembloux Agro-Bio Tech (ULiège). Voici la liste de celles utilisées dans ce travail :

- Une carte des altitudes de Wallonie
- Une carte des pentes des reliefs de Wallonie
- La carte des sols de Wallonie
- Une carte des sous-secteurs radiatifs
- Une carte des niveaux trophiques selon la méthodologie du FEE
- Une carte des niveaux hydriques selon la méthodologie du FEE
- La carte des zones bioclimatiques de Wallonie selon la méthodologie du FEE

Tableau 4 : Analyse stationnelle des sites.

Site	Altitude (m)	Pente (%)	Type de sol	Sous-secteur radiatif	Niveau trophique	Niveau hydrique	Aptitude	Zone bioclimatique
27	255	20,0	Gbbk6	Chaud	2	5	Exclusion	Fagne, Famenne et Calestienne
2	274	2,7	Aca0	Neutre	-2	0	Optimum	Sambre-et-Meuse et Condroz
5	290	9,0	Gbbfi2	Chaud	-2	2	Optimum	Basse et Moyenne Ardenne
6	288	13,6	Gbbfi2	Neutre	-2	2	Optimum	Basse et Moyenne Ardenne
8	344	20,6	Gbbr2	Chaud	-2	3	Optimum	Basse et Moyenne Ardenne
9	271	20,0	Gbbr2	Chaud	-2	3	Optimum	Basse et Moyenne Ardenne
14	208	16,4	Gbap2	Neutre	-1	2	Optimum	Sambre-et-Meuse et Condroz
17	332	11,6	Gcbr0_1	Neutre	-2	0	Optimum	Basse et Moyenne Ardenne
21	357	5,3	Gbbfi3	Neutre	-2	3	Optimum	Basse et Moyenne Ardenne
22	356	22,9	Gbbr2	Froid	-2	2	Optimum	Basse et Moyenne Ardenne
23	480	3,1	Gbbr2	Neutre	-2	2	Optimum	Ardenne centro-orientale
24	494	12,9	Gbbr2	Neutre	-2	2	Optimum	Ardenne centro-orientale
25	326	24,2	uGbbr2	Chaud	-2	3	Optimum	Basse et Moyenne Ardenne
1	251	4,4	Gbap4	Neutre	-1	4	Tolérance	Sambre-et-Meuse et Condroz
3	190	21,8	Gbbf4	Froid	-1	4	Tolérance	Fagne, Famenne et Calestienne
4	190	21,8	Gbbf4	Froid	-1	4	Tolérance	Fagne, Famenne et Calestienne
12	209	8,6	Gbbf4	Neutre	-1	4	Tolérance	Fagne, Famenne et Calestienne
13	366	17,3	Gbbq3	Chaud	-2	4	Tolérance	Fagne, Famenne et Calestienne
26	220	20,7	Gbbk6	Froid	2	5	Tolérance	Fagne, Famenne et Calestienne
28	230	8,4	Gbbk6	Neutre	2	5	Tolérance	Fagne, Famenne et Calestienne
29	205	17,2	Gbbk4	Chaud	1	5	Tolérance	Fagne, Famenne et Calestienne
30	221	0,5	Gbbk6	Neutre	2	5	Tolérance	Fagne, Famenne et Calestienne
31	230	3,2	Gbbk4	Neutre	0	4	Tolérance	Fagne, Famenne et Calestienne

Les explications de chaque annotation ou de chaque terme se retrouvent dans la partie « Annexes 1 » qui suit la bibliographie de ce travail.

1.3. Installation des placettes de mesures

Les enjeux de ce monitoring étaient multiples et consistaient à donner un état des lieux général des cèdres présents actuellement en Wallonie. Ayant des peuplements purs et mélangés et après une première visite qui a permis de mieux se rendre compte de la composition des différents peuplements, une méthode focalisée sur le cèdre a été appliquée afin de favoriser un jeu de données le concernant. C'est pourquoi, un nombre de bois fixe a été privilégié afin de pallier aux différences observées entre sites et afin de recueillir un maximum d'informations sur cette essence. Il est vrai que, contrairement à un système de placette traditionnelle circulaire, cette méthode ne permet pas de faire un suivi dans le temps mais vu le jeune âge des différents peuplements, un état des lieux global avec une méthode centrée sur le cèdre semblait plus judicieux afin d'avoir une vue d'ensemble sur la question. Ainsi, dans ce travail, aucun marquage n'a été effectué sur les arbres et ce dernier permet uniquement de tirer des conclusions sur les cédraies wallonnes à l'instant t considéré.

Pour chaque îlot, le centre de ce dernier était le point de référence. A partir de celui-ci, les 25 cèdres les plus proches étaient choisis afin de réaliser les différentes observations. En ce qui concerne les peuplements mélangés, le même principe a été respecté à l'exception du fait que les 25 plus proches tiges des autres essences ont fait l'objet d'une partie des observations. Cette méthode est donc centrée sur les réussites de plantations ne permettant pas de montrer un certain taux de reprise.

1.4. Données dendrométriques

Les premières données récoltées ont été de type dendrométrique. La hauteur totale et la circonférence à 1,30 mètres ont été mesurées pour tous les arbres d'une hauteur minimale de 1,50 mètres. En deçà, seule la hauteur a été rapportée. De cette manière, dans le cas des mélanges, les mesures concernant les autres essences permettront de comparer la croissance du cèdre à celle des autres essences. Ces données ont été récoltées à l'aide d'un pied à coulisse, d'une perche télescopique ou d'un vertex selon la hauteur des arbres.

1.5. Données sanitaires

1.5.1. Note *DEPERIS*

Des données permettant d'apprécier la santé des peuplements ont également été récoltées. Pour chaque cèdre, la méthode *DEPERIS* a été appliquée afin d'attribuer une note représentant la santé globale de l'arbre. Afin de générer cette note, deux critères sont nécessaires : la mortalité des branches (MB) et le manque d'aiguilles (MA). Pour chacun, une note comprise entre 0 et 5 a été attribuée (Tableau 5). C'est la raison pour laquelle cette méthode a été préférée à une autre. L'utilisation de ces deux paramètres permet de mieux quantifier l'état sanitaire d'un arbre.

Tableau 5 : Système de cotation de la méthode DEPERIS (Goudet et al., 2018).

Note	Intensité	Fréquence	Nombre	% indicatif
0	Nulle à très faible	Nulle à très faible	0 à quelques rares	0 à 5
1	Légère	Faible	Quelques à peu nombreux	6 à 25
2	Assez forte	Modérée	Assez nombreux	26 à 50
3	Forte	Importante	Nombreux	51 à 75
4	Très forte	Très importante	Très nombreux	76 à 95
5	Total	Toute la partie notée concernée	Total	96 à 100

La combinaison de ces deux notes permet, par le biais d'une formule mathématique, de définir une note globale de l'état sanitaire de l'arbre :

$$\text{DEPERIS} = (((5 - \text{MB})/5) * \text{MA}) + \text{MB}$$

Les bornes du critère DEPERIS sont donc également comprises entre 0 et 5. Plus la note tend vers la valeur maximale, plus la santé de l'arbre tend vers la mortalité. A partir d'une note globale de 3, l'arbre est considéré comme dépérissant. Bien que cette méthode soit utilisée dans le cadre de dépérissements, il est intéressant de l'utiliser ici juste pour donner une idée de la santé des peuplements. Dans le cas de mortalités de branches dues à des nécroses, un échantillon a été prélevé et analysé au laboratoire afin de tenter d'identifier l'agent causal.

1.5.2. Dégâts de gibier

Les dégâts de gibier sont fréquents sur cèdre; c'est pourquoi la présence ou non de ce facteur a été relevé sur le terrain. Pour chaque plant, la nature des dégâts éventuels (frottis, abroutissement et écorcement) a été notée. En ce qui concerne les frottis, la hauteur à partir du sol a été relevée.

1.6. Base de données et traitements statistiques

L'intégralité de ces mesures font l'objet d'une base de données reprenant l'ensemble des sites visités. Les statistiques descriptives telles que des calculs de moyennes ou des distributions, des analyses de la variance et des régressions linéaires ont permis de traiter l'ensemble des données. Les logiciels Excel (Microsoft Office) et R Studio ont permis leur analyse.

2. Tests d'inoculation

2.1. Matériel végétal

En ce qui concerne le premier test d'inoculation avec *Sirococcus tsugae*, cinq essences résineuses communément cultivées en Wallonie ont été prises en compte, en plus de *Cedrus atlantica*, afin d'étudier la gamme potentielle d'hôtes : *Picea abies*, *Pseudotsuga menziesii*, *Pinus sylvestris*, *Larix x eurolepis* et *Tsuga heterophylla*. Des plants de 2 ans en motte ont été privilégiés afin d'avoir d'une part une circonférence assez conséquente afin de faciliter l'inoculation et d'autre part afin de limiter le stress de transplantation lors du repotage. Quand cela n'était pas possible, des plants en racines nues toujours âgés de 2 ans ont été choisis à la place. Le tableau 6 reprend l'ensemble des informations concernant les plants utilisés lors de l'expérience.

Tableau 6 : Caractéristiques des plants de différentes essences forestières utilisés dans les tests d'inoculations.

Essence	Age	Taille (cm)	Diamètre moyen à mi-hauteur (mm)	Provenance
<i>Picea abies</i>	Motte 2/0	25-45	6	France
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Motte 2/0	15-25	3.5	France
<i>Pinus sylvestris</i>	Racines nues S2R	15-20	5	Belgique
<i>Larix x eurolepis</i>	Racines nues S1R1	35-45	6	Belgique
<i>Tsuga heterophylla</i>	Motte 2/0	20-25	4	France
<i>Cedrus atlantica</i>	Motte 2/0	15-20	7	France

Pour le deuxième test d'inoculation concernant *Sirococcus conigenus*, uniquement des plants de cèdre et de douglas ont été utilisés.

2.2. Matériel fongique

La souche de *S. tsugae* utilisée dans cette expérience a été isolée à partir de branches nécrosées de *C. atlantica* prélevées le 13/02/20 à Transinne, seul lieu où la présence de cet agent pathogène a été rapportée actuellement. Pour cela, ces dernières ont été désinfectées pendant 3 minutes dans une solution hypochlorite de sodium et rincées à l'eau stérile. Après la désinfection, elles ont été écorcées et les portions correspondant aux fronts de nécroses ont été retenues. Ces fragments de cambium ont été placés sur milieu de culture PDA (Potato Dextrose Agar, Difco) dans une étuve à 22°C. Après une semaine de croissance, les mycéliums présentant des caractéristiques propres au genre *Sirococcus* (mycélium gris-blanchâtre aérien, un noircissement du centre et des conidies fusiformes, hyalines, uniseptées de dimensions moyennes 10 x 3 µm) ont été repiqués sur PDA. Une PCR spécifique à *S. tsugae* a été réalisée confirmant bien son identité (Smith et Stanosz, 2008).

Le CRA-W possédait plusieurs souches de *S. conigenus* dans leur mycothèque. Après être sorties de collection et placées sur milieu PDA, la souche qui sporulait le plus et qui donc présentait un meilleur potentiel d'infection a été retenue. Elle avait été isolée en 2015 et provenait de rameaux

de douglas d'un peuplement de Leykaul (numéro de mycothèque : 4833). Cette dernière a également été repiquée et conservée sur PDA dans une armoire thermorégulatrice à 22°C.

2.3. Plan d'expérimentation

L'objectif de cette expérience est d'étudier la pathogénicité et la sévérité de symptômes occasionnés par un agent pathogène sur diverses essences résineuses. Pour cela, les observations ont porté sur les longueurs de nécroses potentiellement induites par le champignon en question. Dans les deux tests, deux types de facteurs fixes sont utilisés : inoculation ou absence de l'agent pathogène (facteur 1) et l'essence forestière (facteur 2). Afin d'avoir un contrôle de l'hétérogénéité liée à la différence de luminosité au sein de la logette expérimentale, le dispositif en blocs aléatoires en parcelles divisées (split-plot) a été préconisé. L'expérience était composée de dix blocs aléatoires (facteur 3) et chacun a été créé de la sorte : les lignes liées au facteur 1 ont été placées aléatoirement et à l'intérieur de celles-ci, les différentes essences forestières ont été attribuées à leur tour de façon aléatoire (Figure 18). Les deux tests portant sur le même type de facteur, ils ont tous deux été placés dans le même bloc afin de profiter du même témoin mais les résultats seront traités séparément. L'ensemble de l'expérience a eu lieu dans une logette expérimentale maintenant la température à 22°C pour une durée de quatre semaines (Figure 19).

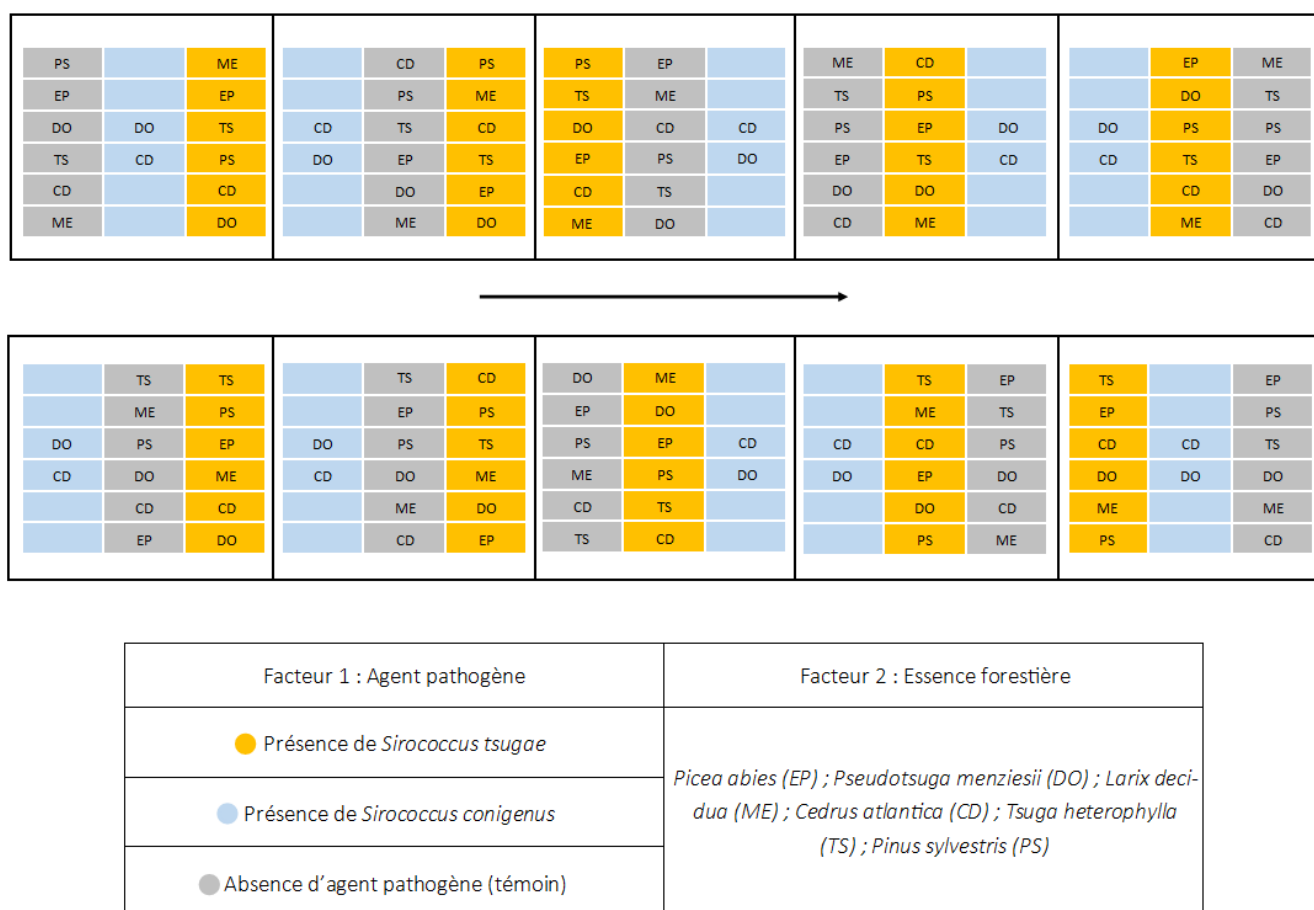


Figure 18 : Plan d'expérimentation des deux tests d'inoculations ; la flèche noire représente la source de variation potentielle liée à la différence de luminosité.

2.4. Postulat de Koch

2.4.1. Biopsies

Les biopsies mycéliennes utilisées dans les tests d'inoculation provenaient de la périphérie (front de croissance) des colonies âgées de 12 jours chacune. Ce délai a été choisi afin d'avoir une assez grande quantité d'inoculum pour la mise en place de l'expérience. Pour les témoins, de simples biopsies de PDA ont été utilisées.

2.4.2. Méthode d'inoculation

Dans cette expérience, l'inoculation sur tige a été choisie. Une incision à un tiers de la hauteur totale de chaque plant a été réalisée en forme de « U » inversé afin d'y appliquer par la suite les biopsies (Figure 19). Celles-ci ont été soigneusement appliquées avec la face du mycélium contre le cambium des tiges. Ensuite, l'écorce a été réappliquée légèrement vers la tige et un film en paraffine a été utilisé afin de contenir le tout.



Figure 19 : Incision en forme de « U » inversé sur l'écorce des plants afin d'y appliquer la biopsie mycélienne (© S. Pirronitto)

2.4.3. Réisolement

Après la durée de l'expérience, des essais d'isolement ont été effectués à partir des fronts de nécroses s'étant développés afin de confirmer que ces dernières sont bien dues à l'agent pathogène inoculé. Une partie des fronts de nécrose a également été conservée au congélateur en vue d'un éventuel test PCR ciblant spécifiquement l'agent pathogène inoculé (méthode complémentaire visant à limiter le risque de faux négatif inhérent aux méthodes microbiologiques).

2.5. Analyse statistique

Les données ont été analysées grâce au logiciel R Studio tandis que l'analyse statistique s'est faite grâce au logiciel SAS 9.4. Tout d'abord, un examen préliminaire a été réalisé à l'aide de statistiques descriptives pour explorer le jeu de données. Ensuite, pour déterminer la pathogénicité du champignon, une analyse de la variance (ANOVA) à trois critères de classification croisés a été effectuée. L'étude de la p-valeur permettra de tirer des conclusions sur la significativité des résultats.

III. Résultats

1. Monitoring

1.1. Mesures dendrométriques

1.1.1. Ilots en pur

L'ensemble des données dendrométriques sont disponibles dans le Tableau 7. Pour chaque site, la circonférence moyenne ainsi que la hauteur moyenne sont toujours accompagnées de leurs extrema. Le nombre de tiges est également annoncé permettant d'avoir une idée des tiges ayant dépassé les 1,5 mètres en ce qui concerne la circonférence ou bien tout simplement le nombre de tiges présentes dans l'îlot. En effet, par exemple pour le site 5, seuls 19 cèdres étaient présents ne permettant pas d'atteindre le quota de 25 comme fixé au départ. Le coefficient de variation est également indiqué afin de montrer la variabilité qui existe au sein même des sites.

Tableau 7 : Résumé de l'ensemble des données dendrométriques récoltées dans les îlots en pur

Site	N150	C130 _{min} (cm)	C130 _{max} (cm)	C130 _{moy} (cm)	CV (%)	Ntot	H _{min} (m)	H _{max} (m)	H _{moy} (m)	CV (%)
1	24	1.6	7.5	5.0	27.7	25	1.2	2.7	2.2	16.1
2	25	3.8	27.6	13.8	41.7	25	1.7	5.7	3.6	24.9
3	25	12.3	38.2	27.5	24.3	25	2.9	6.9	5.0	19.6
5	19	7.2	33.0	22.2	29.9	19	2.2	6.7	4.6	21.7
6	20	2.8	9.7	5.3	31.0	25	1.2	2.3	1.8	19.5
9	25	18.9	72.3	49.1	67.5	25	4.5	12.0	9.3	18.6
12	0	/	/	/	/	25	0.5	1.1	0.8	21.8
13	25	8.8	31.4	18.1	34.7	25	3.0	6.7	4.4	23.9
17	25	9.4	55.0	35.4	36.5	25	3.0	10.6	7.9	21.9
21	25	5.7	19.2	12.0	29.8	25	2.0	4.0	3.2	16.9
22	25	6.0	17.3	12.1	22.5	25	2.0	3.9	3.1	13.9
25	0	/	/	/	/	25	0.6	1.3	0.9	22.2
27	17	1.9	14.5	6.8	50.1	25	0.9	3.5	2.0	32.9
28	0	/	/	/	/	25	0.4	1.0	0.6	28.0
29	0	/	/	/	/	25	0.5	1.4	0.8	27.9
30	0	/	/	/	/	25	0.3	0.9	0.6	22.2
31	0	/	/	/	/	25	0.4	1.0	0.6	26.2

Les résultats montrent une gamme de hauteur moyenne allant de 0.6 mètres à 9.3 mètres pour des âges respectifs de 2 et 18 ans avec un maximum de 12 mètres pour ce dernier. En ce qui concerne la circonférence moyenne, elle varie de 5 à 49 centimètres avec un maximum à 72.3 centimètres. Il est à souligner également que la circonférence varie plus au sein d'un site que la hauteur.

Comme montré dans le chapitre précédent, l'ensemble des îlots est jeune (Figure 20). En effet, la figure 21 représente différentes distributions qui permettent de mettre en avant ce constat avec notamment 164 tiges n'atteignant pas les 1,50 mètres. Ces graphes permettent également de mieux se représenter la composition des cédraies pures actuelles.

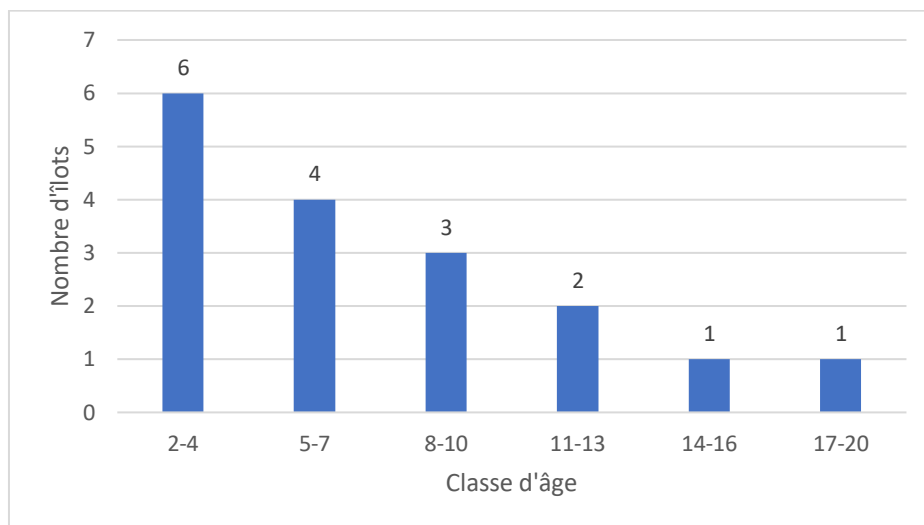


Figure 20 : Distribution du nombre d'îlots en fonction de la classe d'âge

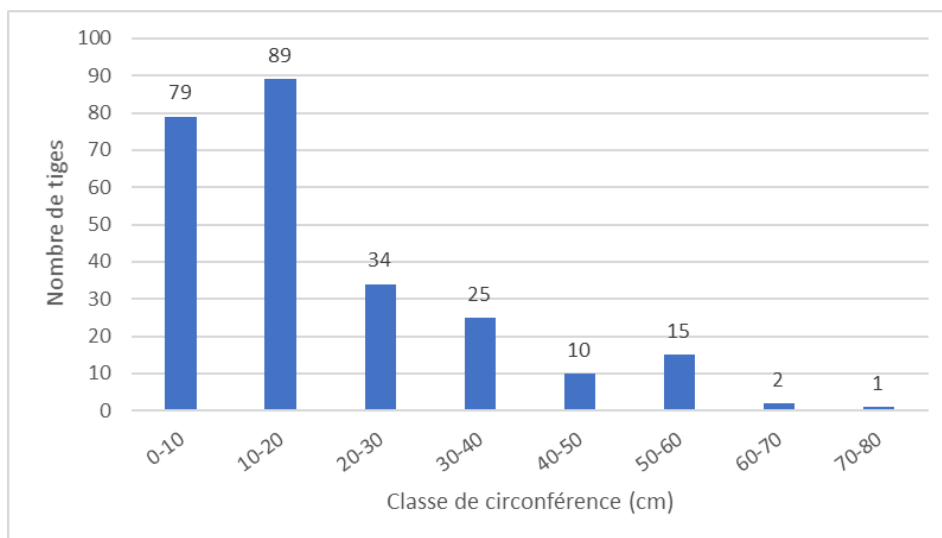
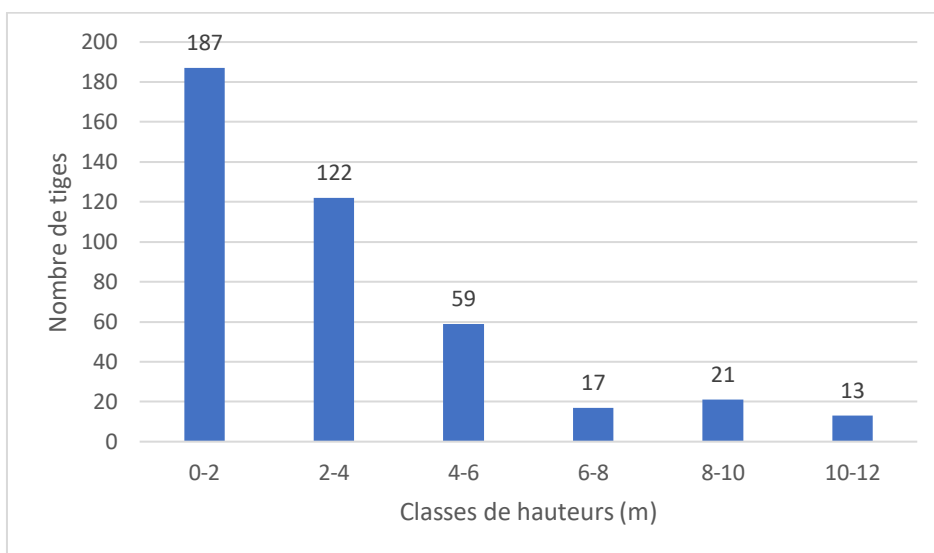


Figure 21: Distribution des tiges de cèdres prospectées par classe de hauteur (N=419) et par classe de circonférence (N=255)

L'ensemble des données permet aussi de tirer les premières tendances de croissance chez nous. Des régressions linéaires de la hauteur moyenne ainsi que de la circonférence moyenne en fonction de l'âge des peuplements permettent de mieux s'imaginer sa croissance (Figure 22).

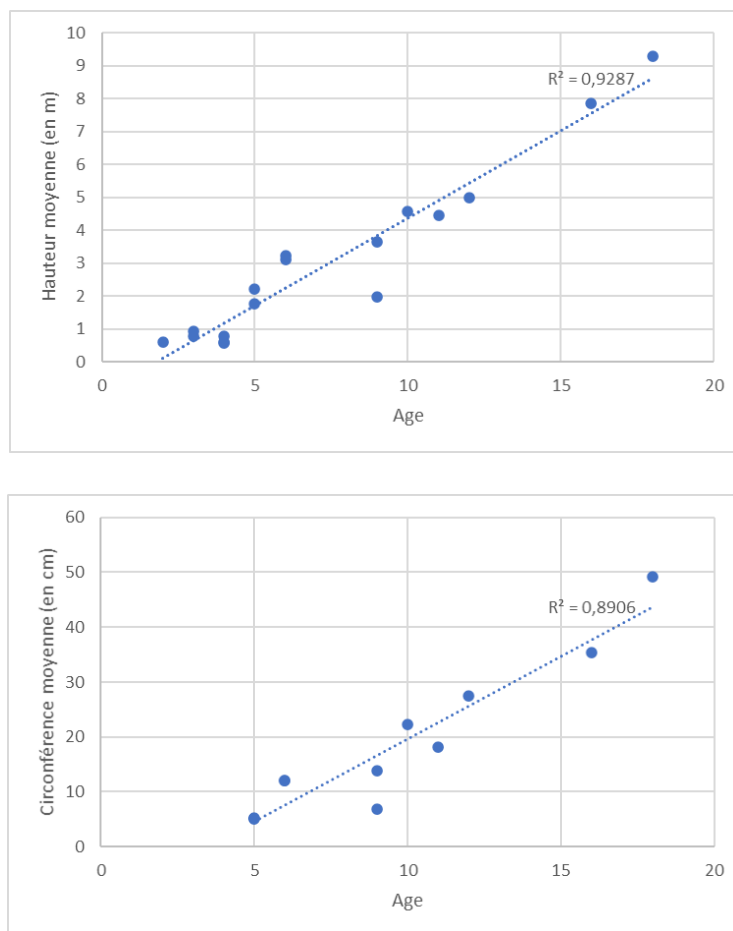


Figure 22 : Régressions linéaires de la circonférence moyenne et de la hauteur moyenne en fonction de l'âge des cédraies pures

1.1.2. Ilots en mélange

En ce qui concerne les peuplements mélangés, le jeu de données est beaucoup moindre (Tableau 8). En effet, la diminution du nombre de sites a affecté tout particulièrement ce type de peuplement. De plus, l'âge de ces derniers est très jeune, ce qui fait que peu d'informations étaient collectables concernant la circonférence. Comme vous pouvez le voir, le site 8 ne possède que des données concernant le cèdre. Cet îlot représente une parcelle de plantation en bouquet de diverses essences résineuses mais où la régénération naturelle d'autres essences telles des feuillus s'est fortement exprimée. Cet îlot a donc été mis dans les peuplements mélangés au vu de la situation qu'il représente mais seuls les cèdres ont été reportés au vu de la complexité que cette placette représentait en terme de structure de peuplement.

Tableau 8 : Résumé de l'ensemble des données dendrométriques collectées pour les peuplements mélangés

Site	Essence	N150	C130 _{min} (cm)	C130 _{max} (cm)	C130 _{moy} (cm)	CV (%)	Ntot	H _{min} (m)	H _{max} (m)	H _{moy} (m)	CV (%)
4	Cèdre	24	2.8	9.7	5.4	36.8	25	1.3	3.2	2.0	40.5
	Douglas	25	3.5	16.0	9.5	40.9	25	1.5	4.4	3.0	73.4
8	Cèdre	5	3.7	5	4.1	12.9	25	0.5	2.0	1.1	37.1
14	Cèdre	0	/	/	/	/	25	0.7	1.7	1.2	23.6
	Épicéa	0	/	/	/	/	25	0.6	1.5	1.0	25.0
23	Cèdre	0	/	/	/	/	25	0.4	0.8	0.6	12.0
	Douglas	0	/	/	/	/	5	0.5	0.8	0.7	13.0
	Épicéa	0	/	/	/	/	18	0.4	0.8	0.6	11.4
	Mélèze	0	/	/	/	/	2	0.7	0.8	0.8	7.1
24	Cèdre	5	0.3	0.6	0.5	24.3	25	0.5	1.9	1.3	36.7
	Douglas	0	/	/	/	/	3	1.9	2.0	1.9	5.1
	Épicéa	3	0.4	0.5	0.5	6.7	21	1.0	1.4	1.2	10.9
	Mélèze	1	0.5	0.5	0.5	/	1	2.0	2.0	2.0	/
26	Cèdre	0	/	/	/	/	25	0.4	0.4	0.6	14.0
	Pins	0	/	/	/	/	25	0.4	0.4	0.7	11.4

Vu l'âge des îlots et du peu d'informations récoltés, il est difficile de mettre en évidence des différences concernant les circonférences. Par contre, certaines analyses de la variance ont été réalisées sur les hauteurs : le douglas possède une hauteur supérieure sur le site 4 (p-valeur < 0.001), le cèdre possède une hauteur supérieure sur le site 14 (p-valeur = 0.005) et le pin possède une hauteur supérieure sur le site 26 (p-valeur = 0.001). Pour les sites 23 et 24, la différence entre le nombre d'arbres mesurés est trop grande pour pouvoir mettre en avant des différences significatives avec toutes les essences en présence. Par contre, si dans les deux cas, l'analyse est réalisée avec l'essence la plus abondante, l'épicéa, un test ANOVA spécifique à des données déséquilibrées montre qu'il n'y a pas de différence significative entre la hauteur du cèdre et de l'épicéa (p-valeur(site 23) = 0.85 ; p-valeur(site 24) = 0.44).

1.2. Etat sanitaire

1.2.1. Ilot en pur

Les résultats concernant les dégâts de gibier montrent qu'une grande majorité de cèdres sont indemnes. Sur 419 cèdres, 33,4 % des cèdres sont touchés avec notamment 8,4% qui sont frottés, 18,1% qui sont abrutis et 6.9% qui sont à la fois frottés et abrutis (Figure 23). Les frottis sur tronc sont souvent légers mêmes si certains sont beaucoup plus profonds avec déjà une cicatrisation.

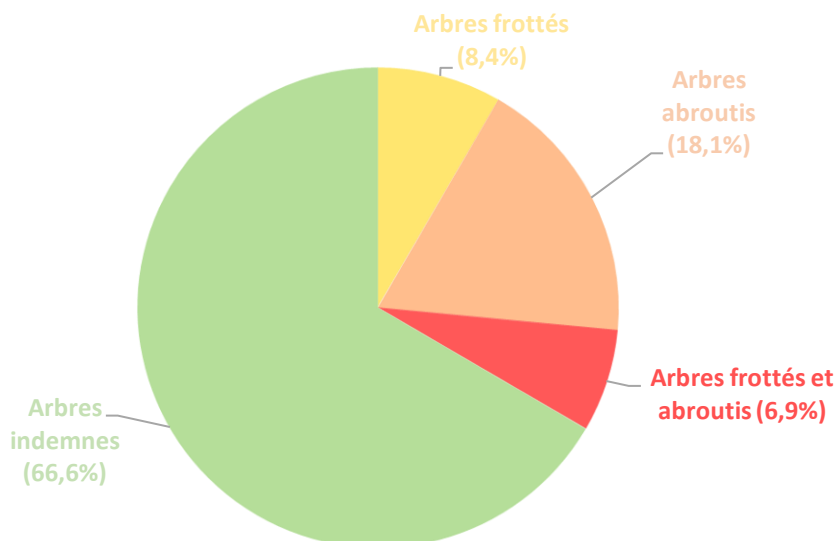


Figure 23 : Répartition des dégâts de gibiers observés dans ce monitoring dans les peuplements purs (N=419)

La distribution des dégâts de gibier selon l'âge des arbres (Figure 24) permet également de mettre en évidence une tendance souvent observée : les jeunes plants sont les proies préférentielles et sont les plus sensibles. La hauteur de frottis est toujours inférieure à 1,5 mètres ce qui laisse penser que ce sont majoritairement des dégâts de chevreuil.

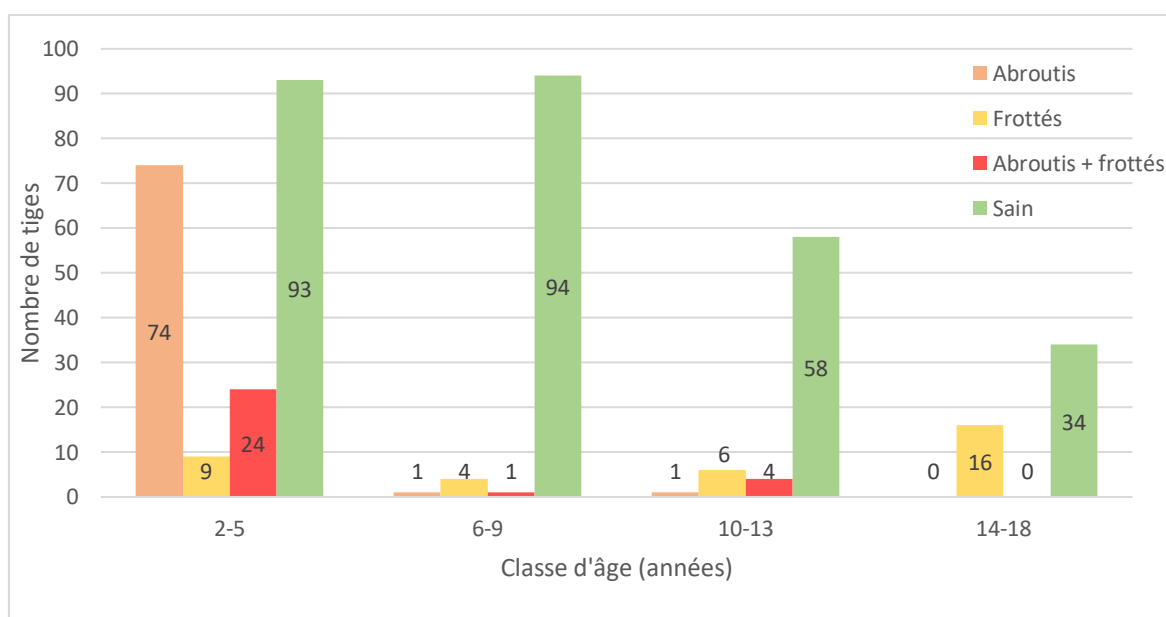


Figure 24 : Distribution des différents dégâts de gibier selon l'âge des peuplements purs

En rétrécissant le scope sur les plants âgés entre 2 et 5 ans, les protections individuelles montrent tout de même leur efficacité et permettent de réduire les risques liés aux dégâts de gibier (Figure 25). En effet, parmi les 50 plants protégés, seuls deux présentent des frottements. Notez tout de même que l'ensemble des abroustissements relevés se trouvaient sur les branches latérales.

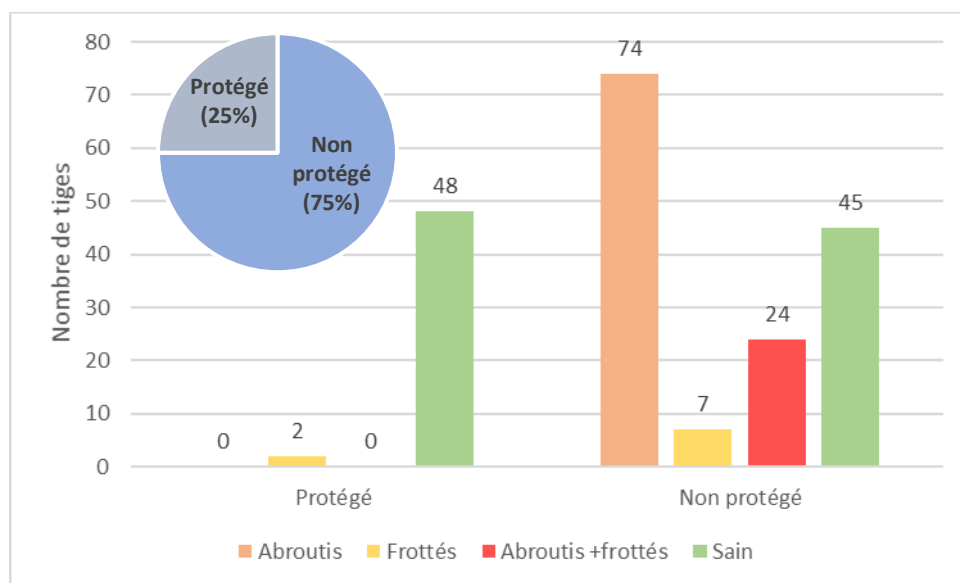


Figure 25 : Différence de la sensibilité au gibier selon la présence ou non de protection individuelle sur les plants âgés entre 2 et 5 ans dans les peuplements purs

Malgré le fait que le nombre de dégâts répertoriés est non négligeable, la santé générale des cèdres est très bonne. Comme le montre l'ensemble des cotations DEPERIS (Figure 26), très peu de cèdres sont morts ou bien dépérissants. La cause des mortalités observées n'a pas pu être établie pour tous compte tenu du laps de temps écoulé depuis la mort de l'arbre.

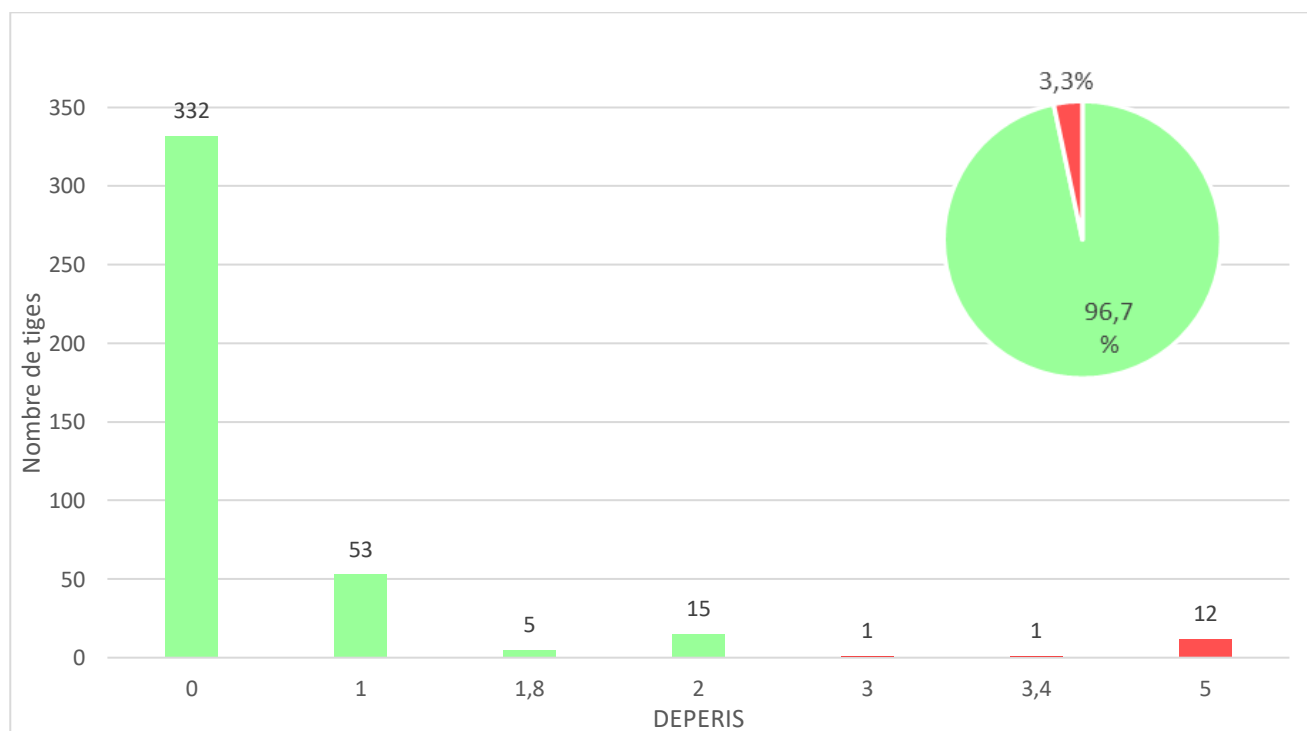


Figure 26 : Distribution des notes DEPERIS pour l'ensemble des tiges prospectées dans les cédraies purs (N=419)

Par contre, parmi les 12 mortalités observées, deux sont potentiellement liées à la présence d'armillaire (Figure 27) avec la présence de ce mycélium caractéristique blanc présent sous l'écorce.



Figure 27 : Présence d'*Armillaria* sp. sur cèdre (© S. Pirronitto)

1.2.2. Ilot en mélange

En ce qui concerne les îlots mélangés, sur 150 cèdres, 4.7% sont frottés, 16% sont abroutis et 1,3% présentent les deux types de dégâts (Figure 28).

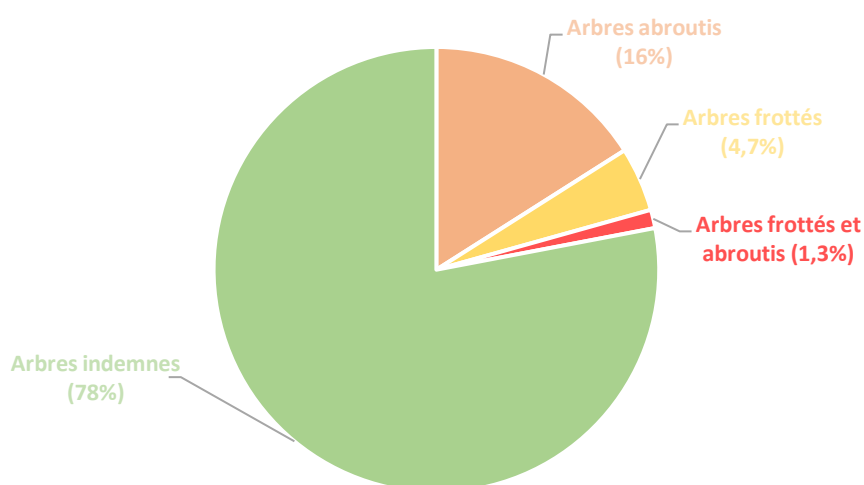


Figure 28 : Distribution des cèdres frottés et abroutis dans les peuplements mélangés (N =150)

Les dégâts de gibier sont moins présents que dans les plantations purs et cela est du certainement au plus grand nombre de plants protégés (Figure 29). Des abroutissements sont observés malgré les protections mais ils sont tous situés sur les branches latérales ne mettant pas à mal la vitalité des jeunes plants. Une nouvelle fois, les protections individuelles montrent leurs efficacités. Malgré tout, les arbres dépourvus de ces dernières ne présentent pas tant de dégâts car tout dépend de la densité de gibier environnant les peuplements.

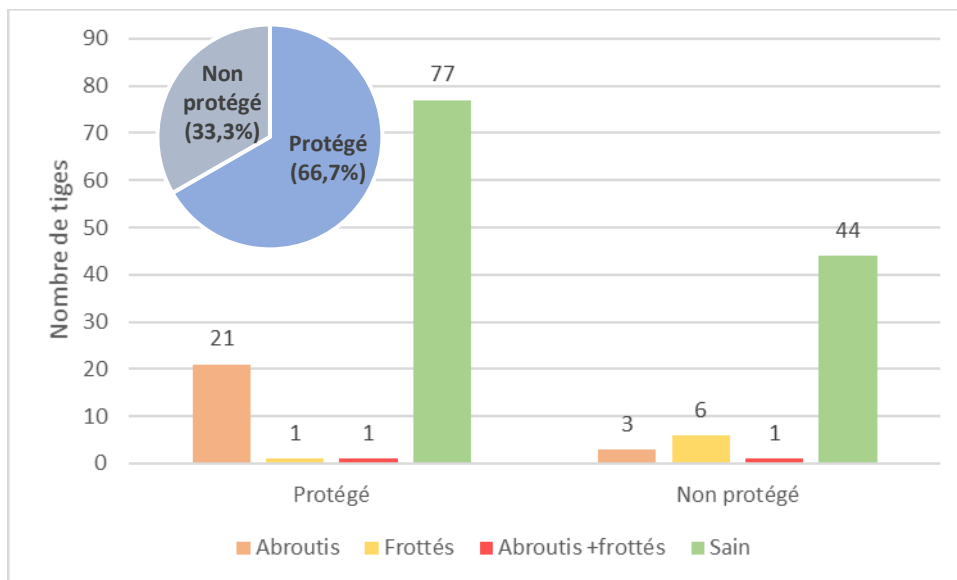


Figure 29 : Répartition des dégâts de gibiers selon la présence de protection ou non sur les cèdres présents dans les peuplements mélangés.

Tout comme les îlots en pur, les cèdres se portent bien (Figure 30): 1 seul plant est mort avec comme hypothèse un manque de reprise. Les quelques dégâts de gibier montrés ci-dessus ont provoqué des mortalités de branches expliquant les quelques notes tournant autour de 2.

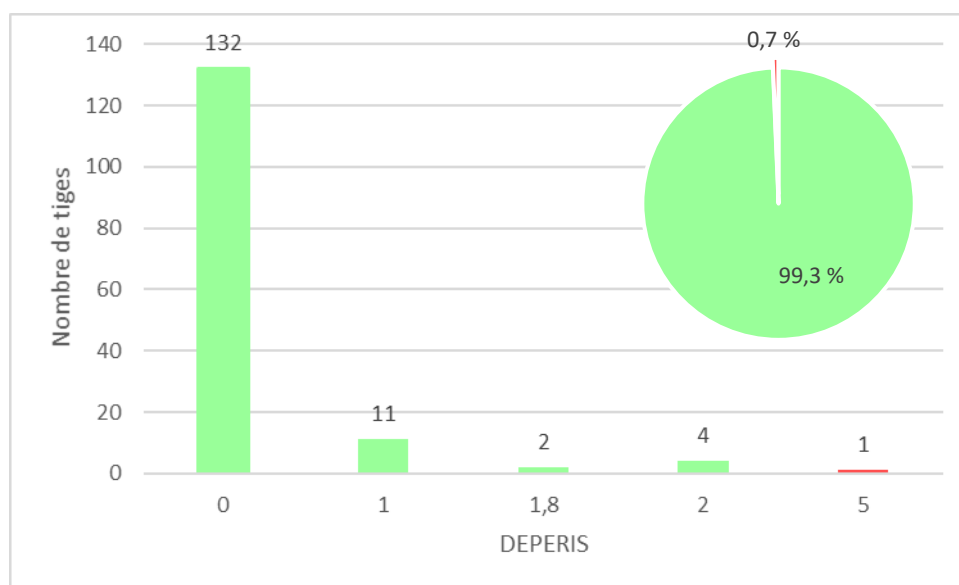


Figure 30 : Distribution des notes DEPERIS sur l'ensemble des tiges prospectées dans les peuplements mélangés (N=150)

1.2.3. Agents pathogènes retrouvés

Comme décrit plus haut, l'état de santé des cèdres rencontrés est globalement très bon. Cependant, dans 11 sites visités, quelques prélèvements sur le terrain de branches nécrosées ont permis d'identifier un certain nombre de champignons susceptibles d'occasionner des nécroses de rameaux (Tableau 9). Parmi les champignons identifiés, *Sphaeropsis sapinea* a été le plus fréquemment rencontré. La proximité de pins dans la strate arborée ou dans les alentours des îlots concernés peut expliquer cette fréquence de ce champignon plus connu pour ses dégâts occasionnés sur pins.

Tableau 9 : Agents pathogènes retrouvés sur des branches nécrosées prélevées dans les différents sites visités ; le nombre d'occurrences représente le nombre de sites touchés par l'agent pathogène

Agent pathogène :	Nombre d'occurrences :
<i>Sphaeropsis sapinea</i>	5
<i>Diaporthe sp.</i>	4
<i>Armillaria sp.</i>	2
<i>Phomopsis sp.</i>	2
<i>Pestalotiopsis sp.</i>	2
<i>Botrytis cinerea</i>	1
<i>Diplodia seriata</i>	1
<i>Pezicula neocinnamomea</i>	1
<i>Phoma herbarum</i>	1
<i>Strasseria geniculata</i>	1
<i>Sydowia polyspora</i>	1

2. Test d'inoculation

Avant d'aborder les différents résultats obtenus, il est à noter que sept plants de douglas n'ont pas repris et ont montré rapidement des signes de dessèchement. Il s'agissait de quatre plants témoins, un plant inoculé avec *S. tsugae* et deux plants inoculés avec *S. conigenus*. Concernant ces derniers, il y a bien évidemment eu une vérification et aucune nécrose n'était à signaler. C'est pourquoi, la cause physiologique est mise en avant. Ce type de problème est connu pour cette essence mais, malgré les précautions prises avant l'expérience, il n'a pas été possible d'avoir un taux de reprise de 100%. Malgré cette perte, l'analyse statistique n'a pas été impactée et des ajustements ANOVA ont été utilisés afin de palier à ce déséquilibre des données.

2.1. *Sirococcus tsugae*

Des symptômes de dépérissements (pertes d'aiguilles, flétrissements) ont seulement été observés sur le douglas, le mélèze, le cèdre et le tsuga mais avec des niveaux de gravité plus sévères concernant les trois dernières essences (Figure 31). Le pin sylvestre n'a montré aucun signe de faiblesse et n'a présenté aucune nécrose. L'épicéa semble aussi très peu sensible à l'agent pathogène avec seulement deux plants nécrosés de faible longueur. Pour les quatre autres essences, tous les plants ont présenté des nécroses mais celles dont les longueurs ont été les plus conséquentes concernent le mélèze, le tsuga et le cèdre (Figure 32 ; Tableau 10). La plus grande longueur de nécrose a été trouvée sur cèdre avec une mesure de 180 mm. Un champignon appartenant au genre *Sirococcus* a pu être réisolé à partir de ces nécroses à l'exception d'une seule sur mélèze. Une PCR spécifique (Smith & Stanosz, 2008) réalisée à partir de ces souches a confirmé qu'il s'agissait bien de l'espèce *S. tsugae*.

Tableau 10 : Résumé de l'expérience d'inoculation de *S. tsugae* sur différentes essences forestières

Essence forestière	Nombre de plants repris	Nombre de plants avec symptômes de dépérissements	Nombre de plants nécrosés	Longueur de nécrose minimale (mm)	Longueurs de nécrose maximale (mm)	Longueur de nécrose moyenne + écart-type (mm)	Fréquence de réisolation (%)
<i>Pinus sylvestris</i>	10	0	0	0	0	0	100
<i>Picea abies</i>	10	0	2	0	16.0	3.0 ± 6.3	100
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	7	4	7	12.0	31.0	22.1 ± 8.8	100
<i>Larix x eurolepis</i>	10	7	10	15.0	93.0	48.6 ± 22.9	90
<i>Cedrus atlantica</i>	10	10	10	28.0	180.0	71.5 ± 53.0	100
<i>Tsuga heterophylla</i>	10	9	10	30.0	115.0	66.7 ± 28.4	100



Figure 31 : Signes de dépérissement sévères sur mélèze (haut à gauche), sur tsuga (haut à droite) et sur cèdre (en bas) (© A. Charlier)



Figure 32 : Exemple de nécroses observées sur les différentes essences : (A) *Picea abies* ; (B) *Larix x eurolepis* ; (C) *Pseudotsuga menziesii* ; (D) *Tsuga heterophylla* ; (E) *Cedrus atlantica* (© A. Charlier)

L'analyse statistique stipule que l'interaction entre les facteurs fixes (essence forestière et agent pathogène) est très hautement significative (p -valeur < 0.0001) ce qui prouve qu'il y a présence d'interaction fixe. De plus, les deux facteurs fixes considérés présentent également une p -valeur très hautement significative (p -valeur < 0.0001), ce qui signifie qu'ils ne peuvent pas être étudiés séparément. Dès lors, il a fallu décomposer l'AV3. Cette expérience avait pour but de tester la pathogénicité de *S. tsugae* sur différentes essences résineuses, c'est pourquoi, l'AV3 a été décomposé selon le facteur « essence forestière » en une AV2 à six modalités. Les résultats de cette nouvelle analyse statistique (Figure 33) montrent que les moyennes du facteur fixe « agent pathogène » sont différentes et que cette différence est hautement significative pour le cèdre (p -valeur = 0.002) et très hautement significative pour le mélèze (p -valeur = 0.0008) et le tsuga (p -valeur < 0.0001).

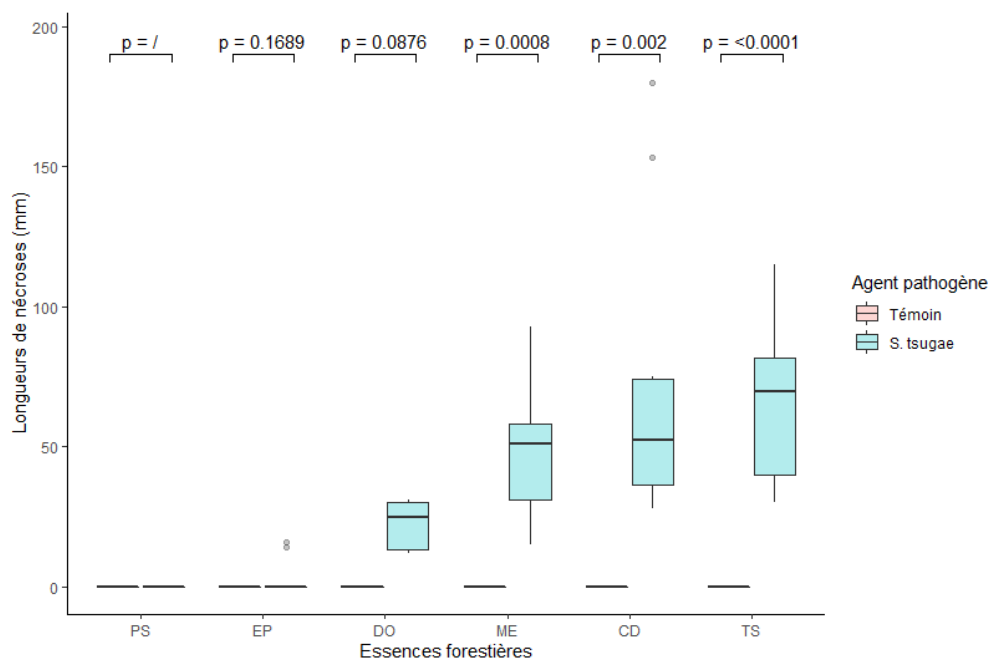


Figure 33 : Boxplot des longueurs de nécroses induites par *S. tsugae* avec pour chaque essence le résultat de l'AV2

Afin de terminer l'analyse statistique et vu que ce facteur ne possède que deux modalités, le calcul des intervalles de confiance a été réalisé. En effet, la différence significative observée grâce à l'évaluation de la p-valeur se trouve obligatoirement entre les deux moyennes comparées pour chaque essence. Dès lors, le calcul de l'intervalle de confiance pour chaque différence significative est préféré à une structuration des moyennes :

Mélèze : 48.6 ± 18.59 mm

Tsuga : 66.7 ± 20.3 mm

Cèdre : 71.5 ± 37.88 mm

2.2. *Sirococcus conigenus*

Le tableau 11 renseigne sur les résultats obtenus pour l'expérience d'inoculation de *Sirococcus conigenus* sur cèdre et douglas. Quelques signes de dépérissements légers sont apparus uniquement sur cèdre. Quelques nécroses ont pu être observées sur cèdre tandis qu'une seule est à reporter sur douglas (Figure 34). Une longueur de nécrose maximale de 90 mm est tout de même à signaler sur cèdre. Sur le peu de plants touchés, l'agent pathogène a toujours été réisolé avec succès.

Tableau 11 : Résumé de l'expérience d'inoculation de *S. conigenus* sur cèdre et sur douglas

Essence forestière	Nombre de plants repris	Nombre de plants avec des symptômes de dépérissements	Nombre de plants nécrosés	Longueur de nécrose minimale (mm)	Longueur de nécrose maximale (mm)	Longueur de nécrose moyenne + écart-type (mm)	Fréquence de réisolation (%)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	8	0	1	0	14.0	1.6 ± 4.7	100
<i>Cedrus atlantica</i>	10	4	4	0	90.0	17.4 ± 30.3	100

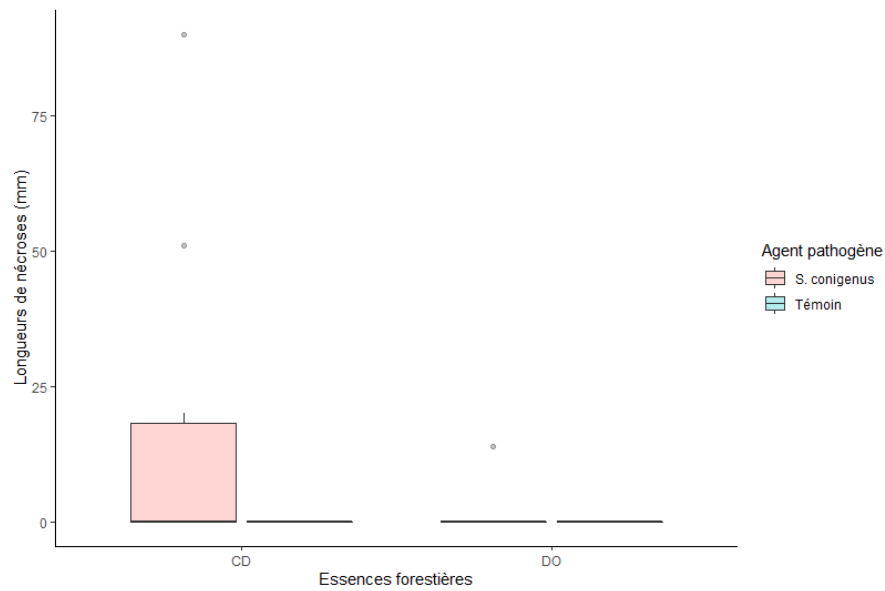


Figure 34 : Boxplot des longueurs de nécroses induites par *S. conigenus* sur cèdre et sur douglas par rapport au plants témoins

L'analyse statistique est sans appel, aucune différence significative n'est à signaler que ce soit au niveau de l'interaction des facteurs fixes (p -valeur = 0.39), du facteur « essence » (p -valeur = 0.60) ou du facteur « agent pathogène » (p -valeur = 0.62).

IV. Discussion générale

1. Discussion sur les résultats

1.1. Monitoring

Cette étude fut la première réalisée sur les jeunes plantations de cèdres en Belgique. Premièrement, elle a permis d'avoir une idée de leur présence au sein de notre territoire. Deuxièmement, le monitoring en lui-même a été conçu pour établir un premier constat sur cette essence dite prometteuse.

En ce qui concerne la croissance, elle est assez intéressante vu qu'elle suit la tendance de la courbe très productive des peuplements du sud de la France présentée dans l'introduction (Figure 35). De plus, afin d'avoir un autre outil de comparaison, plusieurs données issues de cédraies françaises ont été ajoutées : celles d'Aquitaine et plus précisément en Dordogne et dans le Lot-et-Garonne (Lefièvre et al., 2010), celles d'Ardèche (Girard et al., 2018) et celles présentes en Bretagne (Hainry & Colombet, 2009). Les hauteurs reprises de ces études représentent bien des hauteurs dominantes. Malgré le fait que les peuplements français utilisés soient plus vieux que ceux présents actuellement en Wallonie, la même tendance de croissance est observable voire supérieure à la courbe de plus grande fertilité pour certains peuplements français.

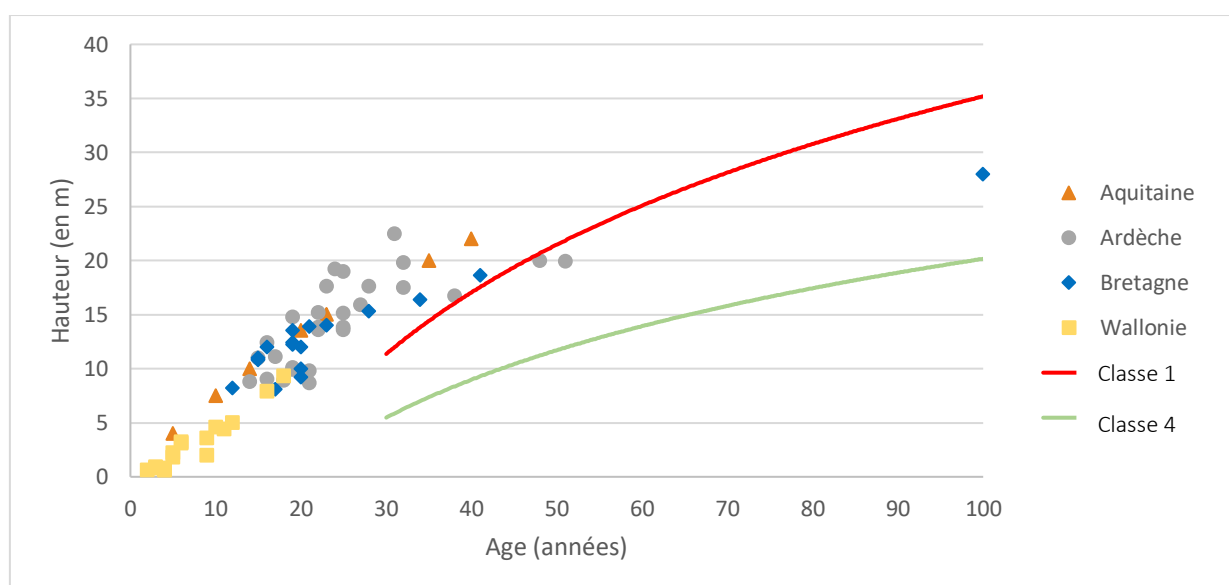


Figure 35 : Comparaison des tendances de croissance des cédraies wallonnes et des cédraies d'Aquitaine (Lefièvre et al., 2010), d'Ardèche (Girard et al., 2018) et de Bretagne (Hainry & Colombet, 2009) avec les courbes de productivité des cédraies méditerranéennes ; les classes représentent les classes de fertilité considérées dans le sud de la France (Courbet et al., 2007)

Malheureusement, le faible nombre d'îlot en Wallonie ne permet pas à l'heure actuelle d'établir une quelconque productivité. C'est pourquoi, seul un suivi dans le temps de ce paramètre permettrait de tirer des conclusions sur la productivité observée en Belgique. De plus, pour la même raison, aucune conclusion concernant des différences potentielles entre zones bioclimatiques ou quelques variables stationnelles ne peuvent être établies. Toutefois, il est quand même intéressant d'observer que les peuplements wallons suivent la tendance des différents peuplements en France malgré les différences stationnelles (Figure 36).

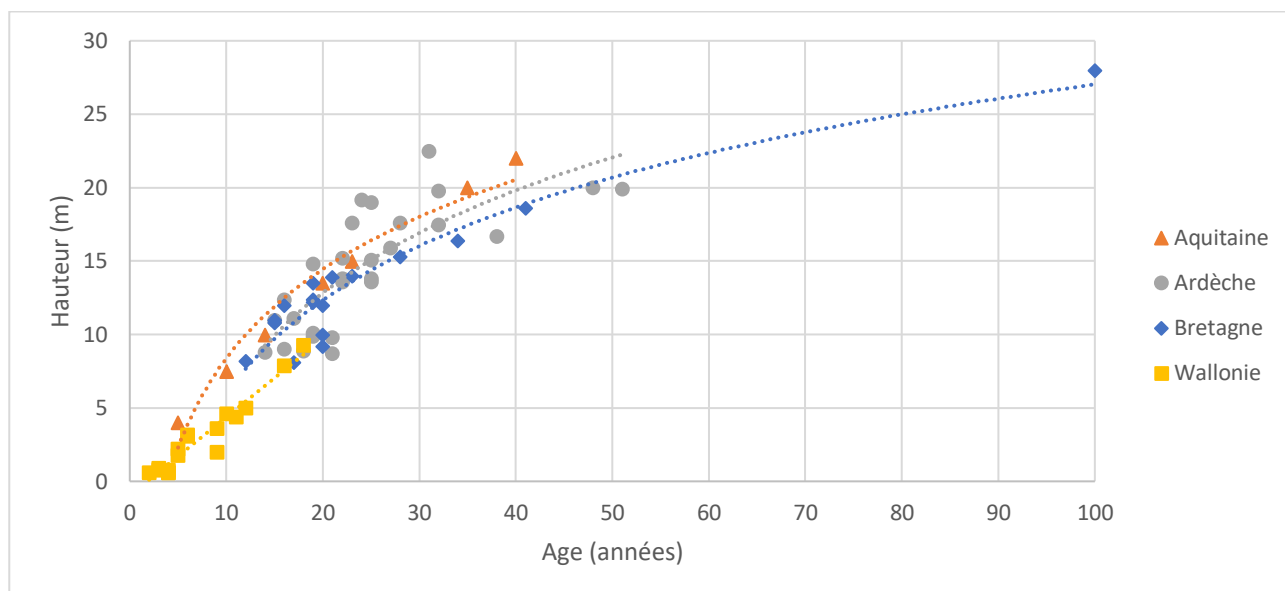


Figure 36 : Comparaison de la croissance en hauteur des cédraies wallonnes avec différents peuplements français d'Aquitaine (Lefèvre et al., 2010), d'Ardèche (Girard et al., 2018) et de Bretagne (Hainry & Colombet, 2009)

De plus, en regardant la courbe de tendance de la croissance des cèdres wallons (Figure 22), un seul point s'écarte fortement de celle-ci. Il s'agit du site 27 qui se trouve en exclusion sur sol calcaire très superficiel exposé plein sud. Il serait intéressant de suivre également ce peuplement afin de confirmer ou non ces suppositions qui peuvent jouer un rôle dans le retard de croissance observé.

Ensuite, l'état de santé des peuplements est très bon. Quelques signes de dépérissements et des cas de mortalité sont à signaler dus à des dégâts de gibier ou à un problème physiologique mais dans l'ensemble, les cèdres peuvent être qualifiés de sains. Cependant, quelques points importants concernant le monitoring doivent être pris en compte. Les observations ont été réalisées sur des arbres ayant débourré ce qui peut potentiellement camoufler différents problèmes physiologiques. C'est pourquoi, une surveillance sanitaire durant la période hivernale serait intéressante à réaliser afin de confirmer ce diagnostic. Ensuite, les différentes mesures ont été relevées sur les arbres les plus proches du centre de chaque îlot. Dès lors, les résultats sont axés sur les réussites et aucune information sur le taux de reprise n'est renseigné. De plus, ce monitoring a également permis de mettre en évidence une certaine appétence du gibier pour cette essence. Dans les peuplements purs, les dégâts observés ne sont pas à négliger (33% de dégâts de gibier). L'utilisation de protections individuelles est vivement conseillée durant les premières années comme cela a pu être observé de manière générale sur le terrain mais surtout dans les peuplements mélangés.

Finalement, les diverses nécroses rencontrées sur le terrain ne sont pas inquiétantes. Il s'agit dans la majorité des cas d'agents pathogènes secondaires pouvant s'être établis après une blessure ou un dégât quelconque. Cependant, la présence multiple de *Sphaeropsis sapinea* ne doit pas être sous-estimée. En effet, même s'il fait partie actuellement de la cohorte des agents pathogènes de faiblesse, il est également un champignon endophyte qui peut rester latent et se propager au moindre stress subi par l'arbre. Dans un contexte de changement climatique, ce champignon pourrait devenir de plus en plus fréquent dans les peuplements forestiers.

1.1.1. Retour du terrain

Ce travail a également été la chance de pouvoir rencontrer ou discuter avec les différents membres du DNF. Dans ce paragraphe, une synthèse des différentes informations qu'il a été possible de récolter sera présentée afin de compléter le monitoring avec des éléments non visibles lors des visites ou tout simplement des faits marquants constatés dans les différents peuplements.

La première information recueillie concerne la difficulté de la phase d'installation du cèdre. Les jeunes plants ne supportent pas la concurrence et la compétition avec, par exemple, la fougère qui peut leur être fatale vu son besoin de lumière. C'est pourquoi, il est primordial de contrôler la strate herbacée durant au moins les 5 premières années afin d'éviter les pertes de plants. Malheureusement, les problèmes liés à la dominance ne s'arrêtent pas là. Dans les peuplements mélangés, le cèdre se fait souvent surplomber par les autres essences. C'est pourquoi, des surcimages de douglas sont souvent rapportés mettant à mal la vitalité des cèdres. Le monitoring confirme cette croissance plus rapide pour un site. Connaissant la biologie de ce dernier, il est facile d'imaginer et de comprendre ces problèmes liés à la dominance en hauteur. Un autre bon exemple est le cas du site 8 (Tableau 8). Sur ce dernier, la hauteur moyenne des cèdres atteint 1,1 mètre ce qui est véritablement faible en comparaison avec d'autres cèdres présentant une hauteur moyenne plus élevée pour un âge inférieur. Sur cette parcelle, la régénération naturelle abondante à l'heure actuelle est la principale hypothèse qui explique ce constat.

Le deuxième élément qui revenait souvent dans les discussions sont les dégâts liés au gibier. Des sangliers retournant les jeunes plants au frottis de cervidés, différents cas se sont produits créant certaines pertes non négligeables. Cependant, cela reste un problème général et le cèdre n'est pas pour autant plus appétent qu'une autre essence selon différents témoignages.

Ces deux éléments sont révélateurs des précautions à prendre lors de plantations de cèdre. Les premières années sont certainement les plus importantes et il faut s'engager à suivre fréquemment la conduite des jeunes peuplements si des résultats concluants veulent être observés. Dans le cas contraire, des mortalités ou des arbres sans avenir seront obtenus comme cela a pu être souligné lors de la présentation des différents îlots. En effet, la diminution du nombre de parcelles mentionnée au début de la partie « Matériels & Méthodes » concernant le monitoring est due à ces deux problématiques. Une perte de quasi 25% (9 sites sur 32) est un chiffre important et doit être pris en considération si des nouvelles plantations doivent avoir lieu. Ce constat n'est pas visible dans la réalisation de ce travail car, pour rappel, seuls les cèdres encore sur pied ont été étudiés et donc, l'intégralité des données est ciblée sur les réussites de plantation. S'il est décidé de planter du cèdre, il faut être prêt à investir du temps et de l'énergie dans les premières années si l'on veut réellement valoriser cette essence.

1.2. Tests d'inoculations

Malgré les quelques plants n'ayant pas repris correctement, l'expérience d'inoculation de *S. tsugae* est un succès. Les résultats confirment la littérature scientifique en ce qui concerne la sensibilité du cèdre et du tsuga envers cet agent pathogène et dévoilent potentiellement celle d'une autre essence: le mélèze. Il est vrai que la méthode d'inoculation peut être considérée comme éloignée des conditions réelles d'infection mais elle permet d'évaluer la pathogénicité potentielle de *S. tsugae* dans la nature. Même si tous les plants de douglas présentent également une nécrose, la taille de ces dernières est relativement plus petite que celles remarquées sur les trois autres essences. Cela laisse donc présager que les dégâts rencontrés sur douglas dans des conditions réelles seront quasiment anodines comparées à ceux pouvant être produits sur les trois autres essences sensibles. C'est pourquoi, afin de confirmer ce diagnostic et les résultats obtenus, il serait plus qu'intéressant de réaliser une nouvelle expérience d'inoculation mais cette fois-ci avec différentes concentrations de spores. Cette technique permettrait de simuler une dissémination naturelle et évaluerait surtout à quel point *S. tsugae* pourrait être un problème pour le cèdre, le mélèze voire même le douglas s'il est réintroduit dans le dispositif. Le tsuga étant une essence rarement plantée en gestion forestière, l'inclure dans cette expérience serait peu pertinent. Ajouté à cela, des stress hydriques ou thermiques pourraient éventuellement être envisagés afin d'observer leurs effets sur le développement du champignon.

En ce qui concerne l'expérience d'inoculation de *S. conigenus*, les résultats sont beaucoup plus difficilement interprétables. Le douglas, utilisé comme témoin positif, n'a présenté quasiment aucune nécrose. Dès lors, différents éléments peuvent expliquer ce manque de réaction. Premièrement, la souche utilisée est une des hypothèses plausibles. Ayant été sortie d'une mycothèque, la pathogénicité et la virulence de cette dernière ont pu être diminuées. Cependant, la présence de 4 nécroses sur cèdre dont une mesurant 90 mm interpelle et réfute légèrement cette hypothèse. C'est pourquoi, la deuxième hypothèse concerne la provenance des plants. Ces derniers, venant de France tout comme le cèdre, pourraient présenter une moindre sensibilité face à cet agent pathogène.

2. Potentialités

Avec tout le background théorique et les divers travaux mis en place, il est possible de discuter plus en profondeur des potentialités et des risques du cèdre en Belgique. Il est vrai qu'historiquement, l'ensemble des essences résineuses exotiques ont été introduites pour leur grande productivité et leur croissance relativement rapide, ce qui a directement intéressé les propriétaires forestiers d'un point de vue économique. Dans le cas du cèdre, il est trop tôt pour prédire sa productivité chez nous. Malgré tout, les premières données ont l'air de tendre vers une croissance qui est meilleure que dans le sud de la France. C'est pourquoi, si malheureusement l'élévation de la température continue, le cèdre se retrouvera dans des conditions optimales de chaleur et de précipitations ce qui pourrait améliorer son développement chez nous. De cette manière, si l'on considère les simulations de la situation climatique en 2100 en Belgique, le cèdre serait dans des stations optimales quasiment sur tout le territoire. En effet, d'ici la fin du siècle, les projections montrent que la Haute-Ardenne posséderait des températures moyennes annuelles similaires à ce que le nord du sillon Sambre et Meuse connaît aujourd'hui (Himpens et al, 2017). La température augmentant et le couvert neigeux diminuant, les facteurs à risque pour le cèdre disparaîtraient progressivement si la tendance des changements climatiques que l'on connaît aujourd'hui perdure. Ces suppositions confirment donc le fait que l'aire potentielle du cèdre se trouverait bien en Belgique d'ici quelques décennies. Suite à ces évolutions futures, le cèdre serait une essence très intéressante car étant indifférent à la richesse du sol, il serait adapté à de multiples stations avec comme seule condition un sol bien meuble permettant l'ancrage en profondeur de ses racines qui est son atout biologique principal. De plus, si les étés continuent à présenter des épisodes caniculaires perturbant l'écosystème forestier belge, la tolérance à la sécheresse que possède le cèdre de part son ancrage puissant pourrait lui conférer un avantage non négligeable.

De plus, il ne faut pas oublier que le bois de cèdre est réputé pour sa qualité et sa grande durabilité. Il est apprécié pour diverses transformations même s'il est à éviter pour des travaux de charpentes vu son bois cassant, un des seuls défauts de ce type de bois. En effet, ajouté à ses propriétés technologiques, le fait qu'il soit imputrescible lui évite de passer par les procédés chimiques habituels. L'autre défaut lié à son bois est sa branchaison pour laquelle il est obligatoire de réaliser des élagages artificiels afin de valoriser ce matériau. De ce côté, pour rappel, il est possible de limiter l'expansion de ses branches avec une sylviculture adaptée. Des interventions précoces seront nécessaires afin de diminuer le plus possible leur développement. Il en va de même concernant les éclaircies. Le bois de cèdre y réagit très bien et la précocité de ce type d'opération est également vivement conseillé. Comme dis précédemment, il ne faut pas oublier que la densité du bois est corrélée à la largeur du cerne et des éclaircies précoces lui seront bénéfiques. C'est pourquoi, avec ce type de sylviculture dynamique qui doit être instaurée afin de valoriser au mieux le bois de cèdre, la sylviculture d'arbres-objectifs lui conviendrait parfaitement.

Maintenant, pour revenir sur l'aspect économique qui fait partie intégrante de l'équation, le cèdre a toute sa place sur le marché. Même si aujourd'hui, il est difficile de trouver des données concernant les prix de ventes des grumes, les prix de 2007 de l'ONF en France étaient assez satisfaisants (Figure 37). Même si ce paramètre est imprévisible, le bois de cèdre est toujours apprécié et est présent sur les marchés bien qu'il s'agisse d'un marché de niche pour le moment.

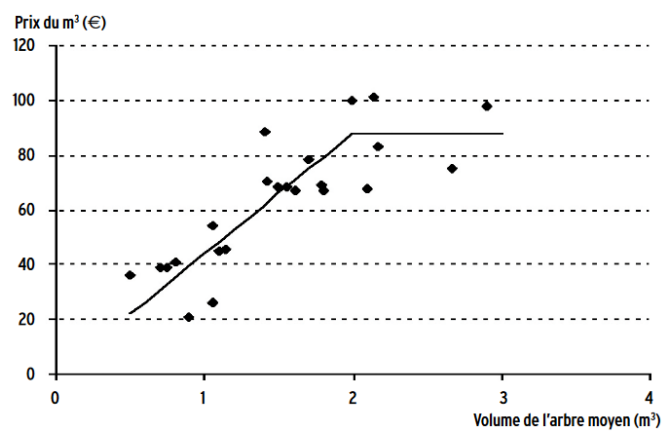


Figure 37 : Variation du prix de vente sur pied en fonction du volume de l'arbre moyen (Courbet et al, 2012)

3. Risques

Les atouts du cèdre sont très attrayants vu les différentes problématiques rencontrées dans les peuplements forestiers. Malgré tout, l'utilisation antérieure des essences exotiques doit pousser à la vigilance et un ensemble de risques doit être pris en compte et être analysé afin de ne pas aggraver la situation.

Premièrement, le risque d'invasivité est une notion très importante dans l'écosystème forestier. La résilience d'une forêt est liée à sa biodiversité et à l'ensemble des essences forestières qu'elle peut contenir. Il serait donc complètement contradictoire d'introduire une essence dont le but est d'améliorer ce paramètre alors qu'elle pourrait jouer le rôle inverse. Ces dernières années, certaines ont fait parler d'elles mettant en danger la biodiversité forestière ainsi que les conditions stationnels en général : *Prunus serotina*, *Robinia pseudoacacia*, *Tsuga heterophylla*, etc. Il est donc obligatoire de prendre en compte ce facteur quand on veut introduire une nouvelle espèce car à côté du risque environnementale, la gestion des espèces invasives coûte énormément. Une espèce est considérée comme invasive lorsqu'elle s'est naturalisée, c'est-à-dire qu'elle est capable de se régénérer seule sans une intervention anthropique et présentant une dynamique d'expansion, c'est-à-dire qu'une régénération viable est visible à plus de 100 mètres des semenciers dans un laps de temps de 50 ans après l'introduction de l'espèce (Richardson et al., 2000). En Belgique, la régénération du cèdre n'est pas encore visible. En effet, les peuplements sont beaucoup trop jeunes et cette dernière est viable seulement à partir de 40 ans. Cependant, une discussion autour de ses caractéristiques biologiques et des éléments permettant une potentielle invasivité pourrait peut-être souligner des composantes importantes à prendre en compte à l'avenir. Les invasions biologiques sont des phénomènes complexes reliant trois facteurs principaux (Figure 38) (Catford et al., 2009) : l'abondance de propagules, c'est-à-dire tout élément permettant la reproduction de l'espèce (arbres et graines compris), des caractéristiques abiotiques, l'ensemble des conditions environnementales de façon générale et des caractéristiques biotiques, les autres interactions entre les différents acteurs du monde vivant.



Figure 38 : Schéma des facteurs expliquant une invasion biologique (adapté de Catford et al., 2009)

Abondance de propagules : ce premier facteur est certainement un des plus importants. En effet, il est aisé de comprendre que si une espèce est introduite massivement, ses chances de colonisation grandissent. Ajouté à cela une production de graines abondante et toutes les conditions du premier facteur sont remplies avec succès. Concernant le cèdre, en prenant en compte uniquement les forêts publiques, la superficie actuelle est très faible. Mais ce constat pourrait changer si de nouvelles plantations viendraient à survenir suite aux qualités prometteuses de cette essence face au changement climatique. Concernant la production de graines, il est difficile de pouvoir tirer un constat parce qu'elle est corrélée au nombre de cônes produits et désarticulés qui dépend lui-même de conditions climatiques particulières. En effet, la désarticulation des cônes est une étape importante pour permettre la viabilité de la régénération naturelle du cèdre. Comme mentionné dans la partie théorique, les périodes de gel-dégel et les premières chaleurs printanières sont primordiales pour que cette étape soit une réussite. En Belgique, toujours selon les prévisions futures, les hivers deviendront plus cléments et les périodes de gel diminueront (Himpens et al, 2017). Dès lors, il serait intéressant de suivre cet événement au moment propice afin de pouvoir quantifier un nombre de graines produit et ainsi se pencher plus en profondeur sur la question.

Caractéristiques abiotiques : le deuxième facteur est la suite directe du premier. Une régénération naturelle est viable si les graines peuvent trouver les moyens de germer. Ces dernières ont donc besoin de conditions stationnelles particulières. En ce qui concerne les conditions climatiques, pour le cèdre, la levée de la dormance est induite par le froid et ne nécessite pas l'action de la lumière (Toth, 1978 ; M'Hirit O. & Benzyane M., 2006). Ensuite, les plantules ne seront viables que si elles arrivent rapidement à développer leurs systèmes racinaires, condition nécessaire à leurs survies. Elles auront donc besoin d'aller chercher l'humidité du sol durant le printemps (Van Lerberghe, 2007). Mais attention, comme mentionné dans la partie d'introduction, durant les premières années, les plantules ne tolèrent pas les sécheresses estivales ainsi que le gel tardif (M'Hirit O. & Benzyane M., 2006 ; Van Lerberghe, 2007). Dès lors, avec l'augmentation des épisodes de sécheresses prédite pour le futur, ce premier stade important pourrait être fatal pour le cèdre. À côté de ces paramètres climatiques, les conditions édaphiques sont plutôt favorables au cèdre. En effet, même si sa grande amplitude écologique peut être vue comme une potentialité, elle peut également être vue comme un risque puisqu'elle permettrait une régénération naturelle sur à peu près tous les types de sols tant qu'ils sont assez meubles pour permettre l'ancrage des racines en profondeur. En considérant que tous ses paramètres stationnels permettent l'établissement des plantules, une condition nécessaire pour la croissance du cèdre est donc son grand besoin en lumière. Ce paramètre est important à prendre en compte car il pourrait limiter fortement la régénération si le couvert végétal de la strate arborée est développé. Mais attention, le changement climatique fragilisant de plus en plus les arbres composants les forêts (Seidl et al., 2017), ces perturbations de la canopée sont également une composante qui pourraient profiter aux espèces invasives (Catford et al., 2009 ; Dodet et Collet, 2012). Cependant, les interactions biotiques décrites ci-après pourront certainement jouer un grand rôle. **Caractéristiques biotiques** : ce dernier facteur regroupe les caractéristiques propres à l'espèce lui permettant d'être potentiellement invasive et des interactions avec les autres organismes présents dans une forêt. Afin de discuter autour des caractéristiques, certains traits spécifiques aux espèces forestières invasives décrits par Dodet et Collet (2012) seront utilisés : une forte production de graines, une vitesse de croissance rapide, un tempérament tolérant à l'ombrage et la possibilité d'hybridation. La production de graines a été discutée précédemment mais il est possible de compléter cette thématique avec quelques notions intéressantes. Les graines étant assez grosses (Toth, 1978),

le vent les disperse sur une distance de 30 à 60 mètres voire plus si le vent est favorable (Courbet et al., 2012). Par définition d'une espèce invasive, le cèdre serait donc bien en deçà des 100 mètres. De plus, étant une essence anémochore, il n'y a pas de risque de dispersion par divers animaux comme ça peut être le cas de *Quercus rubra* (Merceron et al., 2017). Ensuite, en ce qui concerne le deuxième trait spécifique, le cèdre montre bien une augmentation de sa vitesse de croissance due aux changements climatiques et aux différences stationnelles comme la Figure 35 l'a montré auparavant. Cependant, la sensibilité à la concurrence du cèdre pourrait jouer un rôle limitant considérablement sa régénération. Dès lors, la présence de la strate herbacée ou d'autres essences forestières plus compétitive pourrait diminuer l'efficacité de sa régénération ou de sa croissance. En effet, si l'on suit les itinéraires sylvicoles français et les courbes de productivités déjà présentées, à 40 ans, âge où la régénération naturelle est viable, les cèdres auront déjà subi leur première éclaircie, voire même, entameront leur deuxième selon la fertilité des stations (Courbet et al., 2012). Dès lors, le sylviculteur joue un grand rôle car il permettra de part ses opérations d'ouvrir le peuplement et ainsi de laisser la chance à d'autres essences de venir coloniser le bas étage en plus de la strate herbacée. De cette manière, il permettra de diversifier la forêt et le cèdre aura plus de difficulté à se faire une place vu sa sensibilité à la concurrence. En ce qui concerne le troisième trait spécifique aux espèces invasives, le cèdre ne présente pas ce type de tempérament. Etant une essence héliophile, il a de grands besoins en lumière dès son jeune âge. De ce fait, en comparaison avec le tsuga qui se régénère sous un couvert forestier par exemple, la densité de la régénération des cédraies sera fonction de la disponibilité en lumière dans la strate herbacée. Finalement, connaissant les essences forestières qui composent les peuplements wallons, le risque d'hybridation est minime. A côté de ces traits, la présence de *Sirococcus tsugae* ou la pression du gibier pourrait également prendre part à tous ces critères. Contrairement à *Prunus serotina* qui s'est répandu, entre autre, par une faible pression de gibier (Jacquemart et al., 2010 ; Vanhellemont et al., 2010), le cèdre pourrait être beaucoup plus touché vu son appétence. La discussion de ces différents traits spécifiques montrent bien que prédire une potentielle invasivité est une tâche difficile avec de nombreuses incertitudes concernant le cèdre. Même si quelques paramètres permettraient de limiter sa régénération et donc, indirectement, de limiter une potentielle invasivité, il est primordial de suivre attentivement la régénération de cette essence chez nous. Si le cèdre trouve en Belgique l'ensemble des conditions afin d'assurer sa régénération et que l'environnement global lui permet de se développer, alors des études supplémentaires devront être entreprises afin de s'assurer que son expansion ne soit pas trop importante. En effet, si cette essence viendrait à prononcer un caractère invasif, il est important de repérer très tôt ce comportement afin d'appliquer un mode de gestion adéquat. En attendant l'âge fatidique de 40 ans chez nous, il serait intéressant de se tourner vers les peuplements français plus âgés afin de potentiellement déjà tirer certaines conclusions concernant ce problème.

L'introduction de nouveaux agents pathogènes ou ravageurs exotiques fait également partie des grands risques à prendre en compte lors de l'introduction de nouvelles essences dans un territoire (Ghelardini et al., 2016 ; Ennos et al., 2019). Malheureusement, le cas de la chalarose du frêne est un très bon premier exemple. L'importation de frênes exotiques en Pologne au milieu des années 90 a permis la propagation de l'agent pathogène *Hymenoscyphus fraxineus* à travers tout le continent décimant littéralement les frênaies européennes (Husson, 2018). Deuxièmement, un second exemple se produit en ce moment même depuis quelques années : le cas du douglas. Cette essence exotique décrite comme arbre d'avenir dans le passé, surpassant l'épicéa dans sa croissance,

montre des signes de perte de vitalité très inquiétants aujourd'hui. La cécidomyie (*Contarinia pseudotsugae*), la rouille suisse (*Nothophaeocryptopus gaeumannii*) et la brûlure des pousses provoquée par *Sirococcus conigenus* citée auparavant dans ce travail, sont tous les trois des grands agents de dépérissement non indigènes mettant le doute sur cette essence « providentielle » (Schmitz et al., 2016). Cet exemple montre bien que, même si les essences exotiques sont écartées de leurs bioagresseurs naturels via leurs introductions dans une nouvelle zone géographique, d'autres agents causals exotiques peuvent faire leur apparition via les nombreux échanges commerciaux mondiaux. En ce qui concerne le cèdre, le risque zéro n'existe bien évidemment pas. En effet, *Sirococcus tsugae*, agent pathogène venu d'Amérique, est présent en Belgique. De plus, son introduction en France a déjà prouvé que quelques ravageurs lui étant inféodés (*Epinotia cedricida*, *Cedrobium laportei*, *Cinara cedri*, *Megastigmus schimitscheki*) ont pris refuge dans les cédraies (Nageleisen, 2007). Même si le climat belge pourrait ne pas leur être favorable actuellement, de telles introductions doivent être absolument évitées sans savoir l'impact que pourrait avoir ces ravageurs en absence de prédateurs potentiels présents dans les forêts belges. De plus, vu l'évolution du climat belge d'ici la fin du siècle, ces ravageurs pourraient *in fine* trouver refuge chez nous. C'est pourquoi, des contrôles sanitaires et des mesures préventives concernant le matériel de plantation et les importations commerciales doivent être absolument respectées afin de ne pas introduire ces facteurs à risque.

Ensuite, l'introduction du cèdre et donc l'augmentation de sa présence sur notre territoire, pourrait également avoir un impact sur la propagation d'agents pathogènes ou d'insectes déjà présents en Belgique. En effet, comme l'expérience réalisée dans ce travail l'a prouvé, si le cèdre vient à se retrouver de plus en plus dans nos forêts, la propagation de *Sirococcus tsugae* pourrait être facilitée, permettant ainsi de potentiellement toucher les mélèzes. Cette essence, possédant déjà un grand risque lié à *Phytophthora ramorum*, pourrait être témoin d'une nouvelle menace.

Avec cela, une grande inconnue pourrait être le plus grand risque lié à l'introduction du cèdre : le manque de co-évolution (Thompson, 2005 cité par Ennos et al., 2019). Comme dit précédemment, en intégrant dans nos peuplements de nouvelles essences, elles sont dissociées de leurs ravageurs et agents pathogènes habituels. Grandissant dans un contexte nouveau, plantés dans des stations optimales, elles ne présentent pas de signes d'attaques quels qu'ils soient dans les premières années. C'est seulement quand l'adaptation et les premiers liens biologiques se sont créés que les problèmes commencent. Les espèces indigènes à la zone d'introduction peuvent se transférer vers ces essences exotiques. Plusieurs cas de ce type de transfert causant au passage des dégâts importants sont référencés : en Suède, le chancre scléroderrien (*Gremmeniella abietina*), agent pathogène endémique à l'Europe, a provoqué un grand taux de mortalité sur des pins exotiques (*Pinus contorta*) (Karlman et al., 1994) ; En Grande-Bretagne, la même essence a été sujette à des pullulations importantes d'un papillon indigène, la Noctuelle du pin (*Panolis flammea*) (Hicks et al., 2001); Le chêne rouge d'Amérique (*Quercus rubra*) présente une plus grande sensibilité envers *Gymnopus fusipes* que les autres chênes indigènes d'Europe (Marçais & Caël, 2000) et est en général un hôte fréquent de ce champignon (Piou et al., 2002). C'est pourquoi, avec le cèdre, il est primordial de ne pas retomber dans le même schéma. Pour le moment, comme le monitoring peut le renseigner, aucun problème phytosanitaire majeur n'a été retrouvé. Cependant, les peuplements sont trop jeunes pour tirer des conclusions et un suivi est obligatoire. Une attention toute particulière doit être portée aux

bioagresseurs du sapin car ces derniers pourraient être les premiers à se transférer sur le cèdre vu sa proximité phylogénétique (Du Merle et al., 1989 cité par Nageleisen, 2007).

Globalement, l'ensemble de ces risques liés à la relation avec des bioagresseurs peut être visible à une plus grande échelle. En effet, Desprez-Loustau et al. (2016) montraient grâce à la base de données du Département de la Santé des Forêts (DSF) construite à partir des signalements de leurs correspondants-observateurs que ce sont bien les essences exotiques qui font l'objet de la majorité des problèmes signalés (Figure 39). L'argument de l'augmentation de la résilience d'une forêt grâce aux essences exotiques est donc fortement atténué.

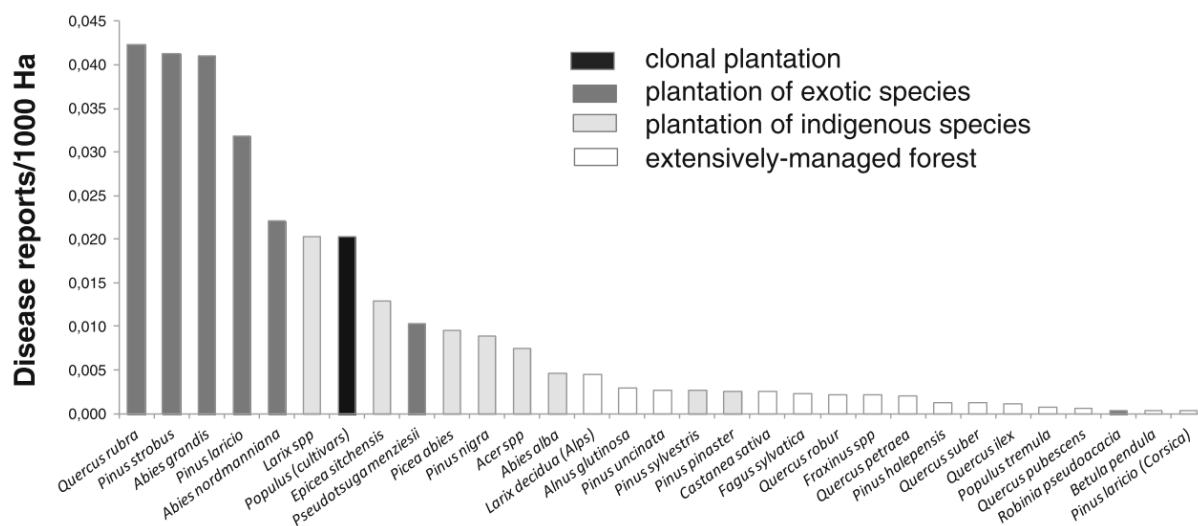


Figure 39 : Taux de signalements des correspondants-observateurs du DSF en fonction du type de gestion forestière. Ils permettent de mettre en évidence les différents agents pathogènes ou d'autres agents causals qui affectent les forêts françaises. La base de données représente 60 000 signalements datant de 1984 à 2014 (Desprez-Loustau et al., 2016)

Cependant, concernant le cèdre, il est intéressant de voir le verre à moitié plein plutôt que l'inverse. En effet, depuis l'introduction de cette essence en France, très peu de problèmes sanitaires sont à répertorier. Les lettres du DSF, qui sont des synthèses des différents problèmes sanitaires rencontrés au printemps et à l'hiver de chaque année, sont des bons indicateurs qui montrent que le cèdre n'a pas été tant touché par des problèmes sanitaires majeures. Sur les 34 rapports disponibles remontant jusque l'année 2000, 8 contiennent des informations concernant le cèdre et sont résumés dans le Tableau 12. Les quelques problèmes cités représentent des situations locales ne permettant pas de généraliser des perturbations majeures dans les cédraies françaises. Ce constat est également visible dans la Figure 39. Cependant, le fait que le cèdre est moins représenté en terme de superficie, comparé aux autres essences, pourrait expliquer cette constatation.

Tableau 12 : Résumé des signalements du Département de la Santé des Forêts sur cèdres en France

Date :	Signalement(s) :	Source :
Décembre 2006	<ul style="list-style-type: none"> Quelques mortalités dans le Lot dû à la présence d'armillaire 	(DSF, 2006)
Décembre 2007	<ul style="list-style-type: none"> Présence de dépérissements sur des stations acides filtrantes ou à basse altitude 	(DSF, 2007)

Décembre 2011	<ul style="list-style-type: none"> • Présence de <i>Megastigmus schimitscheki</i> dans le sud-est de la France 	(DSF, 2011)
Décembre 2012	<ul style="list-style-type: none"> • Dégâts dûs au gel tardif • Présence d'une cochenille : <i>Dynaspidiotus regnieri</i> ; les dégâts observés sont mineurs 	(DSF, 2012)
Décembre 2016	<ul style="list-style-type: none"> • Problèmes physiologiques dans le Gard et le Lot • Légère expansion de la cochenille <i>D. regnieri</i> dans le sud de la France ; les attaques sont considérés comme « impressionnantes » 	(DSF, 2016)
Décembre 2017	<ul style="list-style-type: none"> • Problèmes physiologiques sans dégâts majeurs en Bretagne, dans le Lot et dans l'Aude • Expansion de <i>D. regnieri</i> 	(DSF, 2017)
Janvier 2019	<ul style="list-style-type: none"> • Problèmes physiologiques dans des cédraies mal entretenues voire hors station dans l'Aude • Présence de <i>D. regnieri</i> dans la vallée de la Durance avec quelques dégâts mineurs 	(DSF, 2019)
Janvier 2020	<ul style="list-style-type: none"> • Problèmes physiologiques sans mortalités dans le Tarn, l'Aveyron et en Côte-d'Or • Attaques inédites de la mineuse du cèdre (<i>Epinotia cedricola</i>) dans le Lubéron et les Monts du Vaucluse sur 1000 hectares 	(DSF, 2020)

La sensibilité à la dominance pourrait réellement être une grande contrainte et indirectement un risque. En effet, ce problème pousse à se demander si les peuplements mélangés ne sont pas impossibles avec le cèdre. L'investissement mis dans ces plantations pourrait être réduit à néant si des cas de surcimage devenaient fréquent. Dans un contexte où les monocultures sont à proscrire, des plantations en purs peuvent être à double tranchant sans connaître l'acclimatation du cèdre dans le futur. Dès lors, parmi les essences résineuses les plus souvent plantées, seul le pin sylvestre pourrait être un bon candidat. Sa physiologie, sa croissance et les précautions de plantation concernant cette essence s'accordent avec celles du cèdre. Mais c'est là que le bât blesse. L'association pin-cèdre pourrait apporter un gros problème sanitaire dans le futur : la processionnaire du pin. L'expansion de cet insecte décrit au début de ce travail progresse légèrement année après année et il pourrait être un facteur de risque non négligeable. La proximité de ces deux essences sensibles augmenterait le risque d'attaques et donc de défoliations. Ce stress majeur pourrait également être la porte d'entrée pour *Sphaeropsis sapinea*, agent pathogène de faiblesse également commun à ces deux essences. Un suivi des différentes plantations en mélange serait intéressant afin de confirmer ces problématiques. C'est pourquoi, des associations avec des essences feuillues telles du chêne voire pourquoi pas du bouleau seraient intéressantes à tester dans le futur afin de voir si ce mode de gestion est possible.

Finalement, le risque d'acidification des sols est également à prendre en compte. Les résineux sont réputés pour avoir une fane acidifiante liée à la décomposition lente de leurs aiguilles. Dès lors, des phénomènes de lessivages sont observés diminuant la fertilité des sols forestiers. Avec le cèdre, une nouvelle fois, la sylviculture pourrait diminuer ce risque. En effet, de part les éclaircies fortes et précoces et son couvert végétal modéré, les peuplements de cèdres seront assez ouverts ce qui permettra l'établissement d'essences feuillues colonisatrices améliorant la fane au sol. C'est pourquoi, des plantations de cèdres mélangées avec des chênes devraient être testées dans le futur. Cette association est connue dans son aire d'origine et pourrait limiter ce type de risque. De plus, ce mélange procure une biodiversité végétale et animale importante (Demarteau et al, 2007) ce qui pourrait être considéré comme une potentialité non négligeable.

4. Recommandations sylvicoles

Après cette dissertation sur l'ensemble des composantes à prendre en compte lors de l'utilisation d'essences exotiques, il en ressort que cet acte ne doit pas être sous-estimé et les conséquences doivent être connues et murement réfléchies. Cependant, compte tenu du contexte actuel, il est légitime que certains gestionnaires forestiers veuillent tester cette essence dans leurs peuplements. C'est pourquoi, avant d'entamer ce qu'il faudrait mettre en place afin d'approfondir l'étude de cette essence, diverses recommandations sylvicoles seront citées afin de donner les grandes lignes à respecter dans la sylviculture du cèdre :

- La plantation dans des stations optimales doit être préconisée. Pour le cèdre, des stations chaudes bien alimentées en eau toute l'année avec un sol meuble sont les seules conditions à bien respecter. Malgré le fait que certains essais sur sol calcaire superficiel ont été réussis, la croissance est nettement moindre sur ce type de sol.
- Au vu des risques présentés ci-dessus, chaque gestionnaire devra limiter la superficie de ses plantations.
- Selon la pression de gibier présente au sein de chaque massif forestier, des protections individuelles sont fortement conseillées.
- Les mélanges ont présenté certains problèmes mais ne doivent pas être oubliés et doivent être testés. Ces derniers doivent être bien pensés et sont liés au caractère héliophile du cèdre et au risque de dominance potentielle. Le pin semble être un bon accompagnateur mais le risque de la processionnaire du pin dans les années futures doit être considéré. Chez les feuillus, des associations avec le chêne semblent intéressantes mais des essais doivent être mis en place.
- Jusqu'à ce que plus d'informations soient récoltées, les mélanges avec le mélèze sont à éviter au vu du risque de sensibilité à *Sirococcus tsugae*.
- Une grande attention doit être portée à la phase d'installation. Comme répété à plusieurs reprises dans ce travail, le cèdre ne résiste en aucun cas à la dominance. C'est pourquoi, durant les 5 premières années, des dégagements sont inévitables afin de limiter la pression de la strate herbacée ou d'une strate ligneuse concurrente tel du bouleau par exemple.
- Vu la branchaison du cèdre qui peut être importante et l'élagage naturel inexistant, les élagages artificiels sont obligatoires. Les sylviculteurs français conseillent les premiers élagages sur 3 mètres dès que la hauteur dominante atteint les 8 mètres. Arrivé à une hauteur comprise entre 12 et 15 mètres, le deuxième élagage prélevant 3 mètres supplémentaires peut débuter (Courbet et al., 2012 ; Ladier et al., 2012).

- Le tempérament du cèdre oblige le sylviculteur à effectuer des éclaircies fortes et précoces. Les premières éclaircies peuvent commencer en même temps que le dernier élagage (Courbet et al., 2012 ; Ladier et al., 2012).
- Finalement, au vu du type de sylviculture qui doit être mis en place, celle des arbres-objectifs semble être la plus favorable. En effet, ayant recours dans tous les cas à l'élagage artificiel et à un suivi particulier, cette technique permettrait de valoriser au maximum le potentiel du cèdre en visant la production de grumes de grande qualité.

5. Perspectives d'avenir

Ce travail a pu mettre en évidence les qualités mais surtout de grosses incertitudes sur ce que pourrait engendrer une introduction massive du cèdre. Afin de tirer des conclusions sur ces dernières, un suivi de leur développement et diverses études supplémentaires devront être établis afin de pouvoir juger de leur futur sur notre territoire. En ce qui concerne le cèdre, il faut profiter de ces îlots de faible superficie en les utilisant comme parcelles sentinelles afin d'étudier son développement et sa croissance en Belgique.

C'est pourquoi, une des premières opérations à réaliser est l'établissement de placettes permanentes. Ce type de dispositif est indispensable afin de suivre la croissance des peuplements. Pour tous les sites où la hauteur des arbres a déjà atteint les 3-4 mètres, des placettes peuvent être placées selon la morphologie des différents peuplements. De plus, un protocole sanitaire pourrait y être incorporé afin de toujours avoir un œil sur l'état de santé et ainsi peut être observer les premiers facteurs de risque.

Toujours dans la même idée, il serait très intéressant de lancer une enquête à travers la Wallonie afin de connaître les propriétaires forestiers privés qui ont planté du cèdre dans leurs peuplements. Ensuite, avec leur accord, un dispositif similaire à ce qui a été utilisé dans ce travail de fin d'étude pourrait être bénéfique afin d'augmenter le jeu de données et de confirmer ou réfuter ce qui a été constaté durant le monitoring.

Le principal atout du cèdre est tout de même sa tolérance aux sécheresses. C'est pourquoi, une étude dendrochronologique serait très intéressante afin d'étudier la largeur des cernes et ainsi analyser l'impact des différences climatiques sur la croissance des cèdres en Belgique. Par exemple, dès que la première éclaircie sera effectuée dans le site 9 relatif au monitoring réalisé, il serait souhaitable de prélever quelques tiges afin d'y effectuer une analyse dendrochronologique si cela est déjà possible.

Parmi les risques que présentent l'introduction d'une essence exotique, un élément qui fait couler beaucoup d'encre est sans doute le risque d'invasivité. Vu l'âge moyen des peuplements en Belgique, il n'est pas encore possible d'observer une régénération naturelle. Cependant, d'autres types de peuplements peuvent apporter quelques éléments de réponses : les arboretums. A l'instar de ce qu'a mis en place Aurore Fanal, doctorante à l'université de Gembloux Agro-Bio Tech, le suivi des régénérations autour des arboretums présentant des cèdres serait une très bonne manière de quantifier le potentiel invasif de cette essence en Belgique.

Finalement, à l'heure actuelle, une grande incertitude concerne tout de même *Sirococcus tsugae*. Dès lors, des études complémentaires peuvent être imaginées afin de tirer des conclusions concernant cet agent pathogène. Premièrement, des tests de croissance sous différentes températures peuvent être mis en place afin de connaître le tempérament de ce champignon. En effet, si *S. tsugae* présente des signes de thermophilie, la situation pourrait être inquiétante dans un contexte de changement climatique. Deuxièmement, comme mentionné auparavant, une seconde expérience d'inoculation avec cette fois-ci des concentrations de spores serait légitime afin de

confirmer, dans des conditions d'infection plus proches de la réalité, la pathogénicité de ce champignon sur les différentes essences résineuses présentes dans nos peuplements. Troisièmement, un stress hydrique ou thermique pourrait également être ajouté à l'expérience afin de constater ou non des différences éventuelles.

V. Conclusion finale

Ce travail de fin d'études avait pour but de montrer les potentialités et les risques que peut apporter une essence exotique, le cèdre de l'Atlas, dans une gestion forestière. Son caractère thermophile et sa résistance aux sécheresses sont des qualités attrayantes au vu du contexte actuel qui met à mal la vitalité des peuplements forestiers. De plus, le cèdre semble pour le moment montrer une bonne productivité avec un état sanitaire global très bon. Mais attention, malgré des caractéristiques biologiques fort intéressantes, la précaution et la prudence doivent être de mise.

A l'heure actuelle, *Sirococcus tsugae* est la plus grande incertitude concernant le cèdre. L'expérience d'inoculation réalisée dans ce mémoire a permis de confirmer la littérature scientifique sur la pathogénicité qu'il présente envers le tsuga et le cèdre et a mis en évidence la sensibilité d'une nouvelle essence: le mélèze. A côté de ce champignon, les événements d'hier et d'aujourd'hui renseignent sur de nombreux risques à prendre en compte et qui malheureusement ne peuvent pas être évalués pour le moment concernant le cèdre vu son jeune âge en Wallonie.

Malgré tout, la faible présence du cèdre en Belgique est une chance à saisir et des études supplémentaires sont nécessaires afin de tirer de réelles conclusions sur les avantages ou les inconvénients qu'il pourrait apporter. Il faut profiter de ces îlots afin d'approfondir la question et de tester cette essence qui a montré de très bons résultats dans d'autre pays et plus particulièrement en France.

En conclusion, le cèdre possède effectivement des avantages face au changement climatique mais malgré la situation de crise que le monde forestier vit en ce moment, la lucidité et la patience doivent être préconisées. Beaucoup de risques existent et doivent être pris en compte afin de ne pas accentuer le problème. C'est pourquoi, seul le temps pourra apporter des réponses en étudiant l'acclimatation et la naturalisation du cèdre en Wallonie.

VI. Bibliographie

- Aerts R. et al., 2017. Invasion by the alien tree *prunus serotina* alters ecosystem functions in a temperate deciduous forest. *Front. Plant Sci.*, **8**(February), 1–11.
- Allen C.D. et al., 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *For. Ecol. Manage.*, **259**(4), 660–684.
- Allen C.D., Breshears D.D. & McDowell N.G., 2015. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere*, **6**(8), 1–55.
- Ashton I.W et al., 2005. Invasive species accelerate decomposition and litter nitrogen loss in a mixed deciduous forest. *Ecol. Appl.*, **15**, 1263–1272.
- Aussenac P.G., 1984. Le cèdre, essai d'interprétation bioclimatique et écophysiological. *Bull. la Soc. Bot. Fr. Actual. Bot.*, **131**(2–4), 385–398.
- AWAC, 2011. L'adaptation au changement climatique en région wallonne. Rapport final. Région wallonne et Agence wallonne de l'air et du climat, Groupement Ecoresc-Tec.
- Badeau V., Dupouey J.-L., Cluzeau C. & Drapier J., 2007. Aires potentielles de répartition des essences forestières d'ici 2100. *Rendez-vous techniques de l'ONF, Hors série n°3*, 62–66.
- Battisti, A. et al., 2005. Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecol. Appl.*, **15**, 2084–2096.
- Bolte A. et al., 2009. Adaptive forest management in central Europe: Climate change impacts, strategies and integrative concept. *Scand. J. For. Res.*, **24**(6), 473–482.
- Brunetti M., De Capua E.L., Macchioni N. & Monachello S., 2001. Natural durability, physical and mechanical properties of Atlas cedar (*Cedrus atlantica* Manetti) wood from Southern Italy. *Ann. For. Sci.*, **58**(6), 607–613.
- Candau J.-N., 2008. Impacts du changement climatique sur les insectes ravageurs des forêts méditerranéennes. *Forêt Méditerranéenne*, **29**(2), 145–154.
- Catford J.A., Jansson R. & Nilsson C., 2009. Reducing redundancy in invasion ecology by integrating hypotheses into a single theoretical framework. *Divers. Distrib.*, **15**(1), 22–40.
- Copernicus, 2020. Surface air temperature for February 2020. <https://climate.copernicus.eu/surface-air-temperature-february-2020>, (15/02/2020).
- Courbet F., Courdier J.-M., Mariotte N. & Courdier F., 2007. Croissance, production et conduite des peuplements de cèdre de l'Atlas. *Forêt-entreprise*, **174**(3), 40–44.

- Courbet F. et al., 2012. Le cèdre en France face au changement climatique : bilan et recommandations.
- Demarteau M., François L., Cheddadi R. & Roche E., 2007. Réponses de *Cedrus atlantica* aux changements climatiques passés et futurs. *Geo-Eco-Trop*, **31**, 105-146.
- Département de la Santé des Forêts (DSF), 2006. *La Lettre du DSF n°34 – Décembre 2006*. <https://agriculture.gouv.fr/archives-en-sante-des-forets>, (21/07/20).
- Département de la Santé des Forêts (DSF), 2007. *La Lettre du DSF n°36 – Décembre 2007*. <https://agriculture.gouv.fr/archives-en-sante-des-forets>, (21/07/20).
- Département de la Santé des Forêts (DSF), 2011. *La Lettre du DSF n°43 – Décembre 2011*. <https://agriculture.gouv.fr/archives-en-sante-des-forets>, (21/07/20).
- Département de la Santé des Forêts (DSF), 2012. *La Lettre du DSF n°45 – Décembre 2012*. <https://agriculture.gouv.fr/archives-en-sante-des-forets>, (21/07/20).
- Département de la Santé des Forêts (DSF), 2016. *La Lettre du DSF n°50 – Décembre 2016*. <https://agriculture.gouv.fr/bilans-annuels-en-sante-des-forets>, (21/07/20).
- Département de la Santé des Forêts (DSF), 2017. *La Lettre du DSF n°52 – Décembre 2017*. <https://agriculture.gouv.fr/bilans-annuels-en-sante-des-forets>, (21/07/20).
- Département de la Santé des Forêts (DSF), 2019. *La Lettre du DSF n°53 – Janvier 2019*. <https://agriculture.gouv.fr/bilans-annuels-en-sante-des-forets>, (21/07/20).
- Département de la Santé des Forêts (DSF), 2020. *La Lettre du DSF n°55 – Janvier 2020*. <https://agriculture.gouv.fr/bilans-annuels-en-sante-des-forets>, (21/07/20).
- Desprez-Loustau M.L. et al., 2016. An evolutionary ecology perspective to address forest pathology challenges of today and tomorrow. *Ann. For. Sci.*, **73**(1), 45–67.
- Dodet M. & Collet C., 2012. When should exotic forest plantation tree species be considered as an invasive threat and how should we treat them? *Biol. Invasions*, **14**(9), 1765–1778.
- Dubois H., Latte N. & Claessens H., 2017. Les peuplements à bouleau en forêt wallonne : reflet de la sylviculture du 20e siècle. *Forêt.Nature*, **142**(0), 57–66.
- Ducrey M., 1994. Adaptation du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) au climat méditerranéen : aspects écophysologiques de sa réaction à la sécheresse. *Ann. Rech. For. Maroc*, **27**, 156-171.
- Ehrenfeld J.G., 2003. Effects of Exotic Plant Invasions on Soil Nutrient Cycling Processes. *Ecosystems*, **6**(6), 503–523.
- El Azzouzi K. & Keller R., 1998. Propriétés technologiques du bois de cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti). *Forêt méditerranéenne*, **19**(1), 11–33.

- Ennos R., Cottrell J., Hall J. & O'Brien D., 2019. Is the introduction of novel exotic forest tree species a rational response to rapid environmental change? – A British perspective. *For. Ecol. Manage.*, **432**(October 2018), 718–728.
- Fabre J.-P., 1999. Le point sur certains ravageurs du Cèdre de l'Atlas en Afrique du Nord, en France et en Europe. *Forêt méditerranéenne*, **20**(4), 203–2018.
- Fang Z.Q., Bao W.K., Yan X.L. & Liu X., 2014. Understory structure and vascular plant diversity in naturally regenerated deciduous forests and spruce plantations on similar clear-cuts: Implications for forest regeneration strategy selection. *Forests*, **5**(4), 715–743.
- Felton A., Boberg J., Björkman C. & Widenfalk O., 2013. Identifying and managing the ecological risks of using introduced tree species in Sweden's production forestry. *For. Ecol. Manage.*, **307**, 165–177.
- Fichier écologique des essences (FEE), 2020. Le cèdre de l'Atlas. <https://www.fichierecologique.be>, (01/03/20).
- Finkelstein D., 1981. Influence des conditions d' alimentation hydrique de jeunes plants de Cèdres (*Cedrus atlantica* Manetti) cultivés en serre. *Ann.Sci.forest*, **38**(4), 513–530.
- Gaudry J. & Laubray S., 2018. Le front d'expansion de la chenille processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa*) progresse toujours. Pôle Nord-Ouest de la santé des Forêts.
- Ghelardini L. et al., 2016. Drivers of emerging fungal diseases of forest trees. *For. Ecol. Manage.*, **381**, 235–246.
- GIEC, 2014. Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161.
- Gillner S., Rüger N., Roloff A. & Berger U., 2013. Low relative growth rates predict future mortality of common beech (*Fagus sylvatica* L.). *For. Ecol. Manage.*, **302**, 372–378.
- Girard S., Lemaire J. & Améglio T., 2018. *Comprendre et agir contre le dépérissement du cèdre de l'Atlas en Ardèche verte*. Rapport final. Centre National de la Propriété Forestière.
- Goudet M., Saintonge F.-X. & Nageleisen L.-M., 2018. Quantifier l'état de santé de la forêt, méthode simplifiée d'évaluation. Département de la santé des forêts.
- Hainry D. & Colombet M., 2009. Bilan des introductions et perspectives d'utilisations du Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) en Bretagne. Centre Régional de la Propriété Forestière de Bretagne.
- Hicks B.J. et al., 2001. The history and control of the pine beauty moth, *Panolis flammea* (D. & S.) (Lepidoptera: Noctuidae), in Scotland from 1976 to 2000. *Agric. For. Entomol.*, **3**(3), 161–168.

- Himpens S., Laurent C., Marchal D., 2017. Le changement climatique et ses impacts sur les forêts wallonnes. Recommandations aux décideurs et aux propriétaires et gestionnaires. Final report of the Working Group 'Forests and climate change'.
- Husson C., 2018. L'émergence de la chalarose en France. *Rev. For. Fr.*, **LXX**(6), 613–620.
- Institut Royal Météorologique de Belgique, 2020. Tendances climatiques observées. <https://www.meteo.be/fr/climat/tendances-climatiques-observees/a-uccle/temperature-de-lair/moyenne/annuel>, (15/02/2020).
- Institut Royal Météorologique de Belgique, 2020. Le climat à l'horizon 2100. <https://www.meteo.be/fr/climat/le-climat-a-lhorizon-2100>, (15/02/2020).
- Jacquemart A.L., Decocq G., Vanhellefont M. & Verheyen K., 2010. Faut-il lutter ou vivre avec ? Le cas de l'invasion par le cerisier tardif, *Prunus serotina*. *Silva Belgica*, **117**(3), 16-22.
- Jactel H. et al., 2012. Drought effects on damage by forest insects and pathogens: A meta-analysis. *Glob. Chang. Biol.*, **18**(1), 267–276.
- Karlman M., Hansson P. & Witzell J., 1994. *Scleroderris* canker on lodgepole pine introduced in northern Sweden. *Can. J. For. Res.*, **24**(9), 1948-1959.
- Kerr G. et al., 2015. Building resilience into planted forests: recent experience from Great Britain. *For. Congr. Durban, 7-11 Sept. 2015* (September), 7–11.
- Kjaer E.D., Myking T., Buttenschon R.M. & Hansen J.K., 2013. Introduction of exotic tree species to meet challenges from climate change in Nordic forestry – a risky business ? Introduction of exotic tree species to meet challenges from climate change in Nordic forestry – a risky business ?
- Ladier J., Rey F. & Dreyfus P., 2011. *Guide des Sylvicultures de Montagne - Alpes du Sud françaises*. Office National des Forêts.
- Latte N., Perin J., Kint V., Lebourgeois F. & Claessens H., 2016. Major changes in growth rate and growth variability of beech (*Fagus sylvatica* L.) related to soil alteration and climate change in Belgium. *Forests*, **7**(8).
- Lecomte B., 2007. Le cèdre de l'Atlas en Languedoc-Roussillon. *Forêt-entreprise*, **174**(3), 40-44.
- Lefièvre J., Carmeille J. & Mirlyaz W., 2010. Etude sur le potentiel du Cèdre de l'Atlas dans le massif Dordogne/Garonne. Centre Régional de la Propriété Forestière Aquitaine.
- Linares J.C. et al., 2013. Age-related drought sensitivity of Atlas cedar (*Cedrus atlantica*) in the Moroccan Middle Atlas forests. *Dendrochronologia*, **31**(2), 88–96.
- Loustau D., Déqué M., Ciais P. & Davi H., 2004. Modélisation des impact du changement climatique sur le bilan carbone et la production des forêts en France. Rapport final du projet Carbofor. INRA/GIP ECOFOR, 75-100.

- Marçais B. & Caël O., 2000. Comparison of the Susceptibility of *Quercus petraea*, *Q. robur* and *Q. rubra* to *Collybia fusipes*. *European Journal of Plant Pathology*, **106**, 227–232.
- Meason D.F. & Mason W.L., 2014. Evaluating the deployment of alternative species in planted conifer forests as a means of adaptation to climate change - Case studies in New Zealand and Scotland. *Ann. For. Sci.*, **71**(2), 239–253.
- Menzel A. et al., 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Glob. Chang. Biol.*, **12**(10), 1969–1976.
- Merceron N.R. et al., 2017. Removal of acorns of the alien oak *Quercus rubra* on the ground by scatter-hoarding animals in Belgian forests», *BASE* [En ligne], **21**(2), 127-130. URL : <https://popups.uliege.be:443/1780-4507/index.php?id=13613>.
- Messier C., Bigué B. & Bernier L., 2003. Using fast-growing plantations to promote forest ecosystem protection in Canada. *Unasylva*, **54**(214–215), 59–63.
- M’Hirit O. & Benzyane M., 2006. *Le Cèdre de l’Atlas : Mémoire du temps*. Paris : Mardaga.
- Nageleisen L.-M. , 2007. Les problèmes phytosanitaires du cèdre en France. *Forêt-entreprise*, **174**(3), 27-31.
- Nageleisen L.-M., Piou D., Saintonge F.X. & Riou-Nivert P. (2010). *La santé des forêts : Maladies, Insectes, accidents climatiques. Diagnostic et prévention*. Paris : IDF.
- Navarro-Cerrillo R.M. et al., 2019. The decline of Algerian *Cedrus atlantica* forests is driven by a climate shift towards drier conditions. *Dendrochronologia*, **55**(January), 60–70.
- Pérez-Sierra A. et al., 2015. First report of shoot blight caused by *Sirococcus tsugae* on Atlantic cedar (*Cedrus atlantica*) in Britain. *Plant Dis.*, **99**(12), 1857.
- Pimentel D., Zuniga R. & Morrison D., 2005. Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States. *Ecol. Econ.*, **52**, 273-288.
- Piotrowska M.J., Riddell C., Hoebe P.N. & Ennos R.A., 2018. Planting exotic relatives has increased the threat posed by *Dothistroma septosporum* to the Caledonian pine populations of Scotland. *Evol. Appl.*, **11**(3), 350–363.
- Piou D., Delatour C. & Marçais B., 2002. Hosts and distribution of *Collybia fusipes* in France and factors related to the disease’s severity. *For. Pathol.*, **32**(1), 29–41.
- Rameau J.-C., Mansion D. & Dumé G., 1989. *Flore forestière française – guide écologique illustré. Volume 1, Plaines et collines*. Paris : Institut pour le développement forestier.
- Richardson D.M. et al., 2000. Naturalization and invasion of alien plants: Concepts and definitions. *Divers. Distrib.*, **6**(2), 93–107.

- Richardson D.M. & Rejmánek M., 2011. Trees and shrubs as invasive alien species - a global review. *Divers. Distrib.*, **17**(5), 788–809.
- Ripert C. & Boisseau B., 1994. Ecologie et croissance du cèdre de l'Atlas en Provence. *Ann. Rech. For. Maroc*, **27**, 156-171.
- Ripert C., 2007. Autécologie du cèdre de l'Atlas. *Forêt-entreprise*, **174**(3), 17-20.
- Riou-Nivert P., 2007. Conseils simples. *Forêt-entreprise*, **174**(3), 59.
- Robinet C. et al., 2013. Are heat waves susceptible to mitigate the expansion of a species progressing with global warming? *Ecol. Evol.*, **3**(9), 2947–2957.
- Roques A., 2015. *Processionary moths and climate change: An update*. Paris : Quae.
- Rossmann A.Y., Castlebury L.A., Farr D.F. & Stanosz G.R., 2008. *Sirococcus conigenus*, *Sirococcus piceicola* sp. nov. and *Sirococcus tsugae* sp. nov. on conifers: Anamorphic fungi in the Gnomoniaceae, Diaporthales. *For. Pathol.*, **38**(1), 47–60.
- Scalera R., 2010. How much is Europe spending on invasive alien species ? *Biol. Invasions*, **12**, 173-177.
- Schmitz S., Charlier A., Delahaye L. & Chandelier A., 2016. La santé des jeunes plantations de douglas en Wallonie : un état des lieux. *Forêt.Nature*, **138**, 56-62.
- Schmitz S., Charlier A. & Chandelier A., 2018. First report of *Sirococcus tsugae* causing shoot blight on *Cedrus atlantica* in Belgium. *New Disease Reports*, **38**, 16.
- Seidl R. et al., 2017. Forest disturbances under climate change. *Nat. Clim. Chang.*, **7**(6), 395–402.
- Smith D.R. & Stanosz G.R., 2008. PCR primers for identification of *Sirococcus conigenus* and *S. tsugae*, and detection of *S. conigenus* from symptomatic and asymptomatic red pine shoots. *Forest Pathology*, **38**, 156-168.
- Spinoni J. et al., 2018. Will drought events become more frequent and severe in Europe? *Int. J. Climatol.*, **38**(4), 1718–1736.
- Thomas P., 2013. *Cedrus atlantica*. *The IUCN Red List of Threatened Species* 2013: e.T42303A2970716. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T42303A2970716.en>, (02/07/2020).
- Toth J., 1978. *Contribution à l'étude de la fructification et de la régénération naturelle du cèdre de l'Atlas (Cedrus atlantica Manetti) dans le sud de la France*. Thèse de doctorat : Université d'Aix-Marseille (France).
- Van Lerberghe P., 2007. Réussir un boisement en cèdre de l'Atlas. *Forêt-entreprise*, **174**(3), 32-38.

Wilhelm G.J. & Rieger H., 2017. *Stratégie QD*. Belgique: Forêt.Nature.

Légende de la carte des sols de Wallonie :

[illegible]

Source : https://www.fichierecologique.be/resources/LCNSW_TableauSimplifie.pdf

Définition des sous-secteurs radiatifs :

La situation topographique d'une station peut dans certains cas influencer les conditions climatiques locales. Ainsi, par rapport à une situation de plat ou de faible pente, les versants marqués se caractérisent par un surplus ou un manque de lumière selon leur orientation par rapport au soleil. D'autre part, dans les fonds de vallées encaissées, l'ombrage et la stagnation de froid et d'humidité produisent des conditions microclimatiques potentiellement dangereuses pour certaines essences sensibles (gelées, manque de chaleur, brouillards).

Partant de ces constats, quatre positions topographiques ont été différenciées en regard de leurs effets importants sur le microclimat.

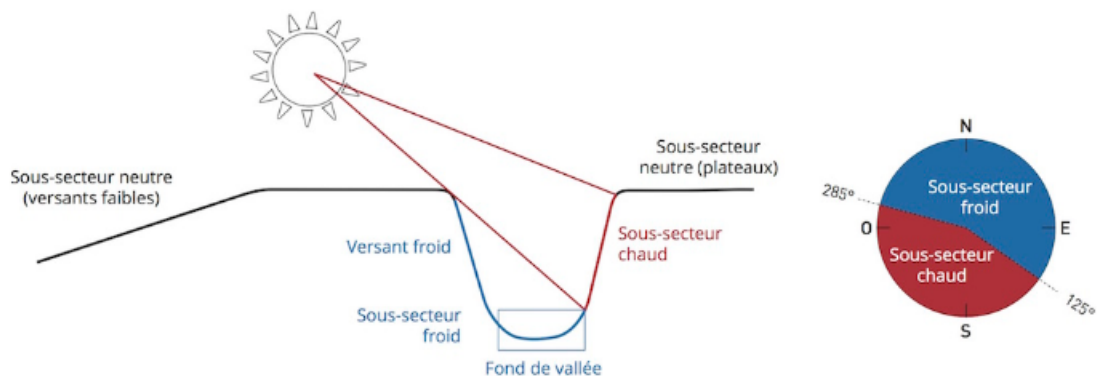
Les plaines, plateaux et faibles pentes (sous-secteur neutre). Ces situations, qui n'induisent pas de microclimats particuliers, sont considérées sans effets.

Les versants chauds (sous-secteur chaud). Les versants présentant une pente marquée ($>12^\circ$, soit 20%) orientés vers le Sud (125° à 285°) reçoivent un surplus de radiation qui se traduit par une atmosphère plus chaude et sèche, ainsi que par des écarts de températures plus marqués entre le jour et la nuit. On note également sur ces stations une évaporation plus importante qui vide plus rapidement les sols de leur réserve hydrique.

Les versants froids (sous-secteur froid). A l'inverse des versants chauds, les versants pentus ($>12^\circ$, soit 20 %) orientés vers le Nord (285° à 125°) présentent une atmosphère plus fraîche, plus humide et plus tamponnée. Cette situation est plutôt favorable aux espèces à caractère montagnard.

Les fonds de vallées encaissées (sous-secteur froid). Dans les vallées encaissées, le fond de vallée est généralement ombragé. De plus, il est sujet à l'accumulation et à la stagnation du froid (qui peut provoquer de sévères gelées tardives) et de l'humidité, à l'origine de fréquents brouillards.

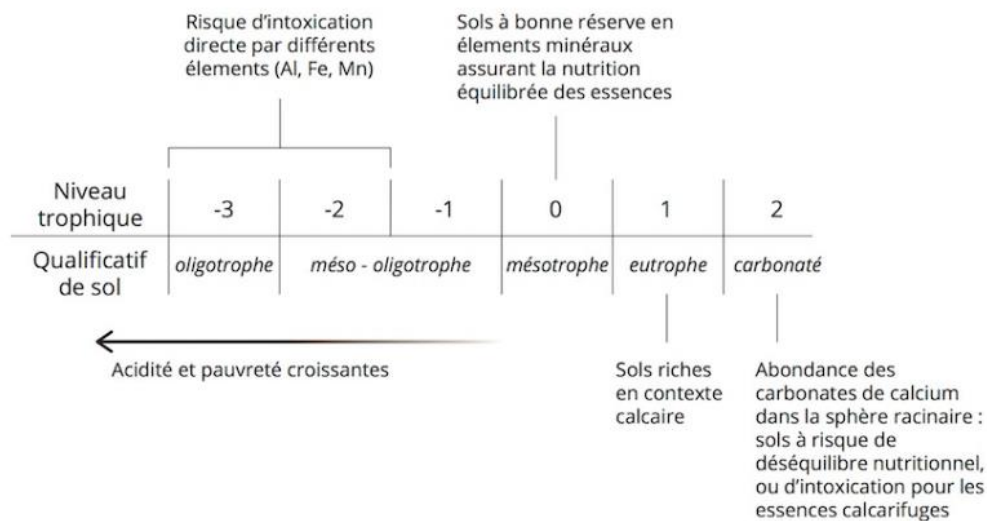
Une attention particulière doit également être apportée aux situations topographiques qui provoquent des accumulations d'air froid, communément appelées « trous à gelées ». Ces situations ne sont pas formalisées sur la coupe topographique car elles peuvent être très diverses et relèvent de l'expérience locale (dépressions, plateaux, concavités, etc.) ; il est néanmoins essentiel d'identifier ces situations en regard de la sensibilité des essences aux gels hors saisons. Enfin, outre ces considérations purement microclimatiques, on note que bien souvent, les situations de pentes fortes s'accompagnent d'une profondeur de sol réduite (bien que ceci ne soit pas systématique), induisant de ce fait un risque pour les espèces à fort besoin en eau.



Source : <https://www.fichierecologique.be/resources/help/fr/help18.pdf>

Interprétation du niveau trophique :

Le niveau trophique traduit la disponibilité des ressources en éléments minéraux de la station. Il est évalué grâce à une clé dichotomique qui repose sur les caractéristiques du sol.



Pour en savoir plus :

« Clé de détermination du niveau trophique des sols »

« Cartographie de la disponibilité en eau et en éléments nutritifs des stations forestières de Wallonie », Forêt.Nature n° 143

Source : <https://www.fichierecologique.be/resources/help/fr/help19.pdf>

Interprétation du niveau hydrique :

Le niveau hydrique traduit la disponibilité des ressources en eau de la station. Dans le cas des sols humides, il exprime également le manque d'oxygénation du sol. L'évaluation du niveau hydrique faite par le Fichier écologique des essences repose sur une échelle de 13 niveaux. Il est évalué grâce à une clé dichotomique qui repose sur les caractéristiques du sol et la position de la station.

Qualificatif de sol	Niveau hydrique	
<i>Xérique</i>	5	↑ Sécheresse croissante
<i>Sec</i>	4	
<i>Plutôt sec</i>	3	
<i>Mésique</i>	2	
	1	
<i>Frais</i>	0	→ Appr ovisionnement régulier en eau du sol, l'aération restant satisfaisante
	-1	
<i>Humide</i>	-2	↓ Humidité et anaérobiose croissantes
	-3	
<i>Marécageux</i>	-4	

<i>Régime hydrique alternatif</i>	-1 RHA	↓ Sols hydromorphes liés à un profil ou horizon peu perméable en position topographique de plateau ou de faible pente (<10 %) ; ils sont plus ou moins gorgés d'eau en hiver et au début du printemps et plus ou moins secs en été. Plus la valeur du niveau hydrique est basse, plus la nappe d'eau remonte à proximité de la surface pendant les périodes humides.
	-2 RHA	
	-3 RHA	

Pour en savoir plus :

« Clé de détermination du niveau hydrique des sols »

« Cartographie de la disponibilité en eau et en éléments nutritifs des stations forestières de Wallonie », Forêt.Nature n° 143

Source : <https://www.fichierecologique.be/resources/help/fr/help20.pdf>