Projet Forrisk : Etude des attaques de fomes sur le douglas dans le Tarn

Lucile Laget

▶ **To cite this version:**

Lucile Laget. Projet Forrisk : Etude des attaques de fomes sur le douglas dans le Tarn. Sciences de l'environnement. 2014. hal-01837104

HAL Id: hal-01837104
https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01837104

Submitted on 12 Jul 2018

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

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

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

Années 2013-2014

MASTER FAGE
Biologie et Ecologie pour la Forêt, l'Agronomie et l'Environnement

Spécialité : *Bois, Forêt et Développement Durable*

Projet FORRISK :
Etude des attaques de fomes sur le douglas dans le Tarn

LAGET Lucile

Stage réalisé du 01 Février au 31 Juillet 2014

Au sein de l'Institut pour le Développement Forestier (IDF),
du Centre National de la Propriété Forestière (CNPF) de Paris

Sous la direction de :

M. Olivier PICARD, chef de service Recherche et Développement du CNPF
(Tuteur dans la structure d'accueil)
M. Benoît MARCAIS, directeur de recherche au sein de l'Equipe Ecologie des champignons pathogènes forestier à l'INRA de Nancy (Tuteur universitaire)

Mémoire de stage soutenu le 2 Septembre 2014 à Nancy

Remerciements

Avant toute chose, je tiens à remercier sincèrement toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide durant ces six mois de stage et qui ont contribué au bon déroulement du projet FORRISK, sur lequel j'ai travaillé.
J'exprime ma gratitude à M. Pascal MATHIEU (Technicien au Centre Régional de la Propriété Forestière Midi Pyrénées, et Correspondant Observateur du Département Santé des Forêts), pour m'avoir si bien accueillie, avoir su m'encadrer sur le terrain et me guider tout au long de mon stage.
Outre mon sujet de stage, il a su me faire participer aux différentes missions d'un technicien du CRPF et a pris le temps de me faire découvrir la forêt tarnaise.
Je tiens bien sûr à remercier l'ensemble des partenaires du projet qui ont contribué de près ou de loin à l'avancement de mon travail :

CNPF (Centre National de la Propriété Forestière) **:** M. Christophe DRENOU pour ses connaissances sur les racines et pour ses formations à l'utilisation d'ARCHI, M. Gregory SAJDAK pour ses photographies utilisées dans ce rapport et son aide sur le terrain, M. Jean LEMAIRE pour son aide en statistique, M. Olivier PICARD pour la logistique.

CRPF Midi Pyrénées (Centre Régional de la Propriété Forestière)**:** M. Pascal MATHIEU, Mme. Magalie MAVIEL, M. Philippe BERTRAND, M. Jean-Pierre ORTISSET pour leurs conseils et leurs connaissances du milieu forestier.

DSF (Département Santé des Forêts) **:** M. Bernard BOUTTE pour sa documentation sur le fomes et autres champignons.

Coopérative ALLIANCE BOIS : M. Idriss WACHILL, et tous les autres techniciens de la coopérative pour avoir contribué à la phase de terrain et permis le dessouchage, M. Arnaud DOUSPIS, apprenti de la coopérative avec qui j'ai partagé ce stage et l'ensemble des manipulations.

INRA (Institut National de Recherche Agronomique)**:** M. Benoit MARCAIS, Mme Anaïs GILLET pour l'analyse des échantillons de racines.

ONF- CO DSF (Office National des Forêt- Correspondant Observateur DSF)**:** Simon BLESS, Georges STAVRAKAS et les autres techniciens pour leurs contributions à la phase de terrain.

Propriétaires et gestionnaires : Mme Elisabeth BERRY pour avoir permis le déroulement d'une partie de l'étude, le dessouchage et décorticage sur l'une de ses parcelles et M. Cyril BOUSQUET pour son aide sur le terrain.
Merci également à toute l'équipe CRPF Midi Pyrénées pour la chaleur de son accueil et l'appréciable disponibilité de chacun. Merci à tous les relecteurs de ce rapport pour leurs conseils avisés.
Mes remerciements s'adressent aussi à M. Olivier PICARD pour m'avoir fait confiance et m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce projet sur le douglas dans le Tarn, un sujet très intéressant.
Je remercie également mon tuteur universitaire, M. Benoit MARCAIS, pour les réponses qu'il m'a apportées au cours du stage et pour son aide précieuse lors de la rédaction de ce rapport.
Cette expérience fut très enrichissante et renforce mon idée et mon enthousiasme pour continuer à travailler dans cette voie, la filière Forêt-Bois. Le projet FORRISK, dans sa mise en place et sa réalisation, s'est avéré pour moi un exercice très profitable de mise en situation professionnelle en prévision des futures missions de forestier qui me seront confiées.

SOMMAIRE

INTRODUTION 1

I CONTEXTE DE L'ETUDE 2

I.1 L'émergence du projet FORRISK 2
I.2 Le fomes : Heterobasidion annosum,Fr. 2
I.3 Problématique 4
I.4 Objectifs 5

I.4.1 La première étude: test de l'efficacité du ROTSTOP sur douglas 5
I.4.2 La deuxième étude : analyse des altérations du duramen 6
I.4.3 La troisième étude : fomes et dépérissement chez le douglas 6

II MATERIELS & METHODES 7

II.1 Représentation schématique générale 7
II.2 La première phase de terrain 7

II.2.1 Les sites de l'étude 7
II.2.2 Le dispositif expérimental 8
II.2.3 Le diagnostic des houppiers : la méthode ARCHI 8
II.2.4 L'évaluation du degré d'altération des souches 10
II.2.5 La typologie des taches d'altération 11

II.3 La deuxième phase de terrain 12

II.3.1 Le dessouchage 12
II.3.2 Le prélèvement d'échantillons 12
II.3.3 Le décorticage des racines 13

III RESULTATS 13

III.1 Relation entre l'aspect visuel des houppiers et les décolorations du bois au niveau des souches 14
III.2 Interprétation de la typologie des taches 16
III.3 Dissection longitudinale des racines de douglas 17

III.3.1 La distinction entre bois de cœur et bois coloré 17
III.3.2 La dynamique de colonisation du bois par le champignon 17
III.3.3 Les réponses de l'arbre 19

III.4 Relation entre l'aspect visuel des houppiers et la détérioration des racines 20

IV DISCUSSION 21

CONCLUSION 25

BIBLIOGRAPHIE 26

Liste des figures

Figure 1 : Carpophore de fomes sur souche ancienne 3
Figure 2 : Fructification de *Spiniger meineckellus* 3
Figure 3 : Rondelle de bois altérée et colorée 4
Figure 4 : Carpophores de fomes présents au pied d'un jeune plant de douglas dépérissant 4
Figure 5 : Fentes de tronc à la base du houppier 10
Figure 6 : Nécrose cambiale en bande, l'écorce est soulevée 10
Figure 7 : Décorticage d'une racine 13
Figure 8 : Propagation du fomes depuis les racines jusqu'aux souches 13
Figure 9 : Délimitation de la zone de présence du fomes 17
Figure 10 : Présence d'un carpophore de fomes au niveau d'une tache d'altération 17
Figure 11 : Racines nécrosées, porte d'entrée pour le fomes 19
Figure 12 : Zone de pourriture descendante 19
Figure 13 : Réponses d'une charpentière aux attaques de fomes 19

Liste des schémas

Schéma 1 : Mode de propagation du fomes (d'après C.Delatour, fiche DSF) 3
Schéma 2 : Les différents états d'un arbre selon la méthode ARCHI, (Drénou, 2013) 9
Schéma 3 : Estimation du pourcentage de taches 10
Schéma 4 : Typologie des taches d'altération du douglas 11
Schéma 5 : Mesures sur socle racinaire d'une souche 13
Schéma 6 : Architecture racinaire commune d'un douglas sain (Drénou, 2006) 18
Schéma 7 : système racinaire fortement altéré vu de dessous (Drénou, 2014) 18
Schéma 8 : Modélisation 3D de la dynamique de colonisation du fomes (Drénou, 2014) 18

Liste des graphiques

Graphique 1 : Etat sanitaire selon ARHI (%) sur l'ensemble des 11 chantiers 14
Graphique 2 : Relation ARCHI et déficit foliaire houppier hors concurrence 14
Graphique 3 : Types ARCHI et surface d'altération des souches 15
Graphique 4 : Proportion de souches saines et altérées sur l'ensemble des peuplements 15
Graphique 5 : Relation entre le taux de défoliation et la présence /absence de taches d'altération sur les souches 16
Graphique 6 : Pourcentage de pivots tâchés 20
Graphique 7 Pourcentage de racines tâchées en fonction du degré d'altération des souches. 20
Graphique 8 : Relation entre ARCHI et le pourcentage de racines avec/sans bois coloré 20
Graphique 9 : proportion d'aubier, de duramen et de bois coloré dans les systèmes racinaires des 3 types architecturaux de douglas 21

Liste des acronymes

ACP : Analyse en Composantes Principales
CNPF : Centre National de la Propriété Forestière
CRPF : Centre Régional de la Propriété Forestière
DSF : Département Santé des Forêts
FOGEFOR : Formation à la Gestion Forestière
IDF : Institut du Développement Forestier
INRA : Institut National de la Recherche Agronomique
ONF : Office National des Forêts
PCR : Polymerase Chain Reaction

INTRODUTION

Le fomes (*Heterobasidion annosum, Fr.)* est un champignon bien connu des forestiers depuis de nombreuses années puisqu'il provoque des pertes économiques, notamment par mortalité sur pied chez les pins (Pinus) et par pourriture de cœur chez les épicéas (Picea). Le fomes est présent probablement dans toute la France (communication B. Boutte, DSF) et des dégâts ont été observés sur d'autres essences que l'épicéa. C'est en fait un complexe de trois groupes interstériles décrits comme des espèces (*Heterobasidion annosum*, Fr ; *Heterobasidion abietinum,* Niemelä et Korhonen ; *Heterobasidion parviporum*, Niemelä et Korhonen). De nombreux travaux de recherche se sont développés à l'étranger, débutés en Grande-Bretagne par Rishbeth en 1950, qui avait montré que les souches de résineux sont des sites privilégiés d'installation du champignon à la suite de dépôt de spores au moment des éclaircies (Rishbeth, 1951; Isomäki et Kallio, 1974).
Dans le même temps, des efforts importants de vulgarisation ont été effectués et des méthodes de lutte ont été mises au point. Elles consistent à rendre les souches fraîches artificiellement non réceptives au développement du parasite. Les traitements chimiques à l'urée ou au borax, réalisés au moment de l'abattage, ont été dans un premier temps conseillés (Delatour, 1972). L'emploi de *Phlebiopsis gigantea*, un champignon antagoniste de *Heterobasidion annosum* est désormais recommandé (Rishbeth, 1963; Korhonen et al., 1993). Cette préparation biologique connue sous le nom de ROTSTOP® est d'ailleurs la seule homologuée et commercialisée en France depuis 2012.
Il existe de nombreuses études sur la recherche ou le perfectionnement des moyens de lutte contre le fomes. De même, on trouve de nombreuses publications scientifiques sur la connaissance des stations favorables à son développement (Rishbeth, 1951; Froelich et al., 1966; Schlenker, 1976) ou encore l'intégration à la gestion forestière de son impact économique. Les essences concernées sont le plus souvent l'épicéa ou les pins mais ce parasite est relativement méconnu sur le douglas (*Pseudotsuga menziesii)*. La raison à cela est que le douglas était considéré comme une essence peu sensible au pathogène avec seulement des impacts de faible ampleur. Cependant, les forestiers craignent une augmentation des dommages car le douglas est devenu la première essence de reboisement en France (CRPF, 2011). Au vu de l'importance économique de cette essence dans la région Midi Pyrénées, une étude approfondie s'imposait. Le projet FORRISK a été une opportunité précieuse pour préciser l'impact du fomes sur cette essence.
L'objectif du projet est de produire des recommandations afin d'éviter l'extension du fomes sur le douglas.
Après la sécheresse de 2003, le dépérissement du douglas dans le Tarn et l'Aveyron a engendré de vives inquiétudes. En particulier, le caractère disséminé du dépérissement dans les peuplements et le fait qu'il touche brutalement des arbres dominants, suscitent de nombreuses interrogations. Le rôle du fomes a souvent été évoqué. Dans un processus de dépérissement complexe, ce champignon se comporte en parasite actif et virulent et entraine des mortalités.
L'objectif de cette étude est d'améliorer le diagnostic de sa présence en cas de dépérissement. Dans un premier temps nous tenterons de vérifier si les signes de dépérissements visibles au niveau de l'état des houppiers sont en lien avec la présence de décolorations du bois au niveau des souches ou de détérioration éventuelle des racines.
Précisons que le douglas, relativement résistant à la pourriture de souches, est un des résineux les plus sensibles à la pourriture racinaire. Dans une deuxième partie nous évaluerons la dynamique de colonisation du bois racinaire et caulinaire par le champignon et son implication dans le dépérissement.

I CONTEXTE DE L'ETUDE

I.1 L'émergence du projet FORRISK

Le Tarn est l'un des départements les plus boisés de la région Midi- Pyrénées, avec un taux de boisement de 28 % de la surface, dont un quart en résineux (Fiche technique CRPF Midi-Pyrénées, 2010).
La plupart de ces boisements, installés depuis les années 1950 grâce au Fonds Forestier National, sont actuellement âgés de moins de 60 ans.
A partir de 1965, en raison des nombreux dépérissements touchant l'épicéa commun, celui-ci a été peu à peu abandonné et remplacé par du douglas qui représente aujourd'hui 29 % de la surface de résineux du département. Cette surface est en constante augmentation puisque le bois de douglas est considéré comme un produit d'avenir, à valeur économique intéressante pour un propriétaire forestier privé, notamment en bois d'œuvre (CRPF, 2011).
Les premiers dépérissements de peuplements adultes ont été signalés vers 1990. Depuis, des dépérissements sporadiques apparaissent, même au sein des peuplements dans lesquels les facteurs stationnels paraissent favorables. La mortalité atteint plutôt les individus dominants. La canicule de 2003 a causé la mort quasi immédiate des arbres les plus vulnérables et plus de 1 700 ha de coupes de dépérissement ont été réalisées dans les peuplements résineux pour les seuls départements du Tarn et de l'Aveyron (source : Département Santé Forêt).
Ces évènements, remettent en question la vulnérabilité du douglas face à ce pathogène : en serait-il la cause ou ferait-il partie d'un ensemble de facteurs plus complexes ?

I.2 Le fomes : Heterobasidion annosum,Fr.

Le fomes (*Heterobasidion annosum*) est un champignon largement répandu dans l'hémisphère nord, c'est d'ailleurs l'un des pathogènes les plus dévastateurs des forêts résineuses (Woodward et al., 1998). La perte annuelle pour l'Europe est estimée à 790 M € / an.
Le champignon a été à travers l'histoire décrit avec beaucoup de noms scientifiques par exemple *Polyporus annosus Fr., Trametes radicipera (*Hartig*), Fomes annosus* (Fr) Karst., mais c'est Brefeld (1888) qui a nommé *annosum* le champignon *Heterobasidion* (Fr.)
Il a été identifié comme constitué de 3 espèces distinctes, qui ont une biologie comparable et provoquent des dégâts similaires :
- *Heterobasidion annosum*, (Niemelä et Korhonen, 1998) décrite sur pin (Pinus) et bouleau (Betula), majoritaire en France sur de nombreux résineux ;
- *Heterobasidion abietinum*, (Niemelä et Korhonen, 1998) décrite sur sapin (Abies), fréquemment rencontrée sur divers résineux, notamment les sapins *(Abies alba)* et le douglas (*Pseudotsuga menziesii*);
- *Heterobasision parviporum*, (Niemelä et Korhonen, 1998) décrite sur épicéas (*Picea abies*), moins fréquente en France.
La sensibilité des essences résineuses est très variable. Le fomes est d'ailleurs bien connu des forestiers car il provoque chez les épicéas la pourriture rouge du duramen qui déprécie fortement le bois. Il cause également des mortalités en rond chez les pins.

Il est reconnaissable à son carpophore bosselé et de couleur brune à noirâtre sur la partie supérieure et blanc crème, porée sur sa partie inférieure, laissant échapper des spores tout au long de l'année (voir figure 1 page 3). Les spores sont produites et réparties à partir de ces sporocarpes lorsque la température moyenne quotidienne est supérieure à +5 ° C (Kallio, 1970).

Les carpophores se développent classiquement au collet des arbres attaqués (jeunes plants), ou des souches, sous forme de consoles aplaties. Préférant les zones fraîches, ils apparaissent souvent dans des positions qui les rendent difficiles à trouver, comme à l'ombre des racines d'un chablis.

Figure 1 : Carpophore de fomes sur souche ancienne. (Photo P. Mathieu)

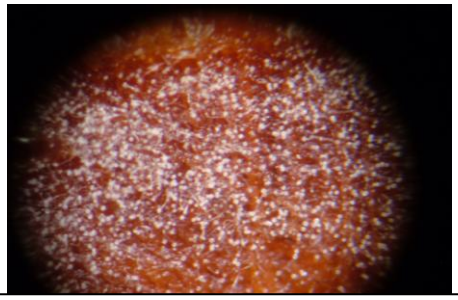
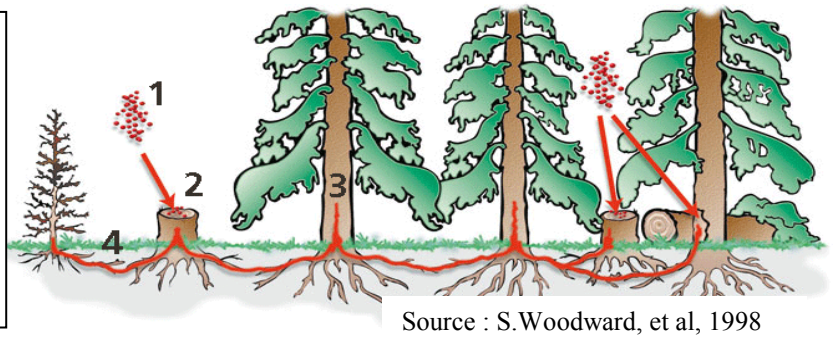


Figure 2 : Fructification de *Spiniger meineckellus*. (Photo L. Laget)

Le fomes peut se propager de deux manières différentes : sur de longues distances grâce aux émissions de basidiospores qui sont à l'origine de nouveaux foyers d'infection, ce stade de développement produisant des conidies, *Heterobasidion* est alors nommé *Spiniger meineckellus* (voir figure 2). Il se propage également de proche en proche grâce aux contacts racinaires ou anastomoses (Delatour, 1972). En effet, dès la coupe, la souche est envahie par un certain nombre de micro-organismes dont les spores sont présentes dans l'air. Très rapidement, les premiers colonisateurs dégradent leur milieu de croissance et progressent vers des sources nutritives disponibles. Le fomes est mauvais compétiteur et ne peut s'installer selon Rishbeth (1951) que dans les 15 jours qui suivent la coupe. Puis il chemine dans le sens des fibres rapidement vers les racines (environs 50 cm/an) et peut y rester pendant une durée de 40 ans. La transmission aux arbres vivants peut se faire à la faveur d'anastomoses racinaires (voir schéma 1).

Schéma 1 : Mode de propagation du fomes (d'après C.Delatour, fiche DSF)

1 : Dissémination aérienne de spores
2 : Infection primaire des basidiospores sur souches d'éclaircie ou blessures
3 : Infection secondaire qui se poursuit dans le tronc
4 : Transmission par contacts racinaires de l'infection à la génération suivante



Source : S.Woodward, et al, 1998

La bonne conduite des peuplements résineux nécessite des éclaircies régulières mais c'est au cours de ces opérations et lors de la coupe finale que le fomes risque de contaminer les peuplements. Toutes les essences résineuses sont justifiables d'un traitement préventif contre le fomes, bien que leur sensibilité soit très variée et que les risques de maladie dépendent aussi des conditions du milieu (déficit hydrique, altitude trop basse).
Dans les peuplements indemnes, les souches fraîches sont la seule voie possible de pénétration pour le fomes. Les traitements chimiques étaient jusqu'alors utilisés avant d'être remplacés par le ROTSTOP®. Parmi les agents chimiques, l'urée était appliquée plutôt en Europe alors que le borax était préféré en Amérique du Nord (Pratt et al., 1998).

Ils consistaient en l'application de diverses substances à effet d'écran ou fongitoxiques ou encore agissant par stimulation de certains saprophytes. En 1952, Rishbeth a découvert le potentiel de *Phlebiopsis gigantea* (Fr.), un champignon présent naturellement en forêt (Rishbeth, 1952).
Seul ce traitement biologique (ROTSTOP®), une spécialité phytopharmaceutique, est actuellement homologué pour cet usage en France.
Chez le douglas, les cas de mortalité et dépérissement paraissent souvent liés à un affaiblissement préalable des arbres. Le fomes provoque des pourritures racinaires qui apparaissent au niveau du collet comme des taches d'altération, à la limite du bois de cœur et de l'aubier (ONF, 2007) (voir figure 3).
Les jeunes plantations affectées de malformations racinaires dues à une mauvaise technique de plantation (chignon ou crosse), peuvent subir des dégâts non négligeables. Des carpophores s'installent au niveau du collet du plant (voir figure 4).

Figure 3 : Rondelle de bois altérée et colorée (Photo L. Laget)

Figure 4 : Carpophores de fomes présents au pied d'un jeune plant de douglas dépérissant (Photo P. Mathieu)

I.3 Problématique

Il n'est pas possible de parler de la place actuelle du douglas dans le Tarn sans considérer le rôle éventuel des problèmes sanitaires dans les dépérissements observés. Le fomes n'a que peu fréquemment été associé à des dépérissements ou des mortalités de douglas adultes, comme cela est le cas sur plusieurs espèces de pins.
Pourtant, ce champignon paraît impliqué de façon certaine dans au moins 40 % des mortalités recensées dans des futaies de douglas du Tarn depuis le début des années 1990.
En 1994, les premières mortalités sont signalées sur de jeunes plantations succédant à des pessières contaminées, le taux de mortalité atteignant 20% des plants (Mathieu, 2005). Des fructifications de fomes sont souvent trouvées au niveau du collet des plants morts.
Depuis 2004, un premier bilan des dépérissements sur les plantations de douglas a été réalisé par le CRPF en partenariat avec le DSF grâce à l'installation et au suivi de placettes représentatives dans le Tarn et en Aveyron. Ce réseau donne une bonne image de l'évolution de l'état sanitaire des douglasaies suite aux canicules, mais les causes ne sont pas étudiées.
L'observation des chablis causés en 2009 par la tempête Klaus sur le Tarn, l'Aude et l'Aveyron, a montré que la majorité des arbres déracinés avaient le système racinaire pourri, le fomes ayant été identifié sur la plupart d'entre eux (DSF - CRPF, 2012).
Un projet mené par M. Drénou (IDF) sur l'enracinement du douglas en Midi- Pyrénées en 2010, a conclu que les dommages occasionnés par le fomes sont des altérations et des pourritures du bois au centre des racines.
Il nous a donc paru intéressant de voir comment évolue l'état sanitaire d'un douglas à l'aide de trois éléments d'observation : l'état du houppier, la présence d'altérations au niveau des souches et l'état du système racinaire. Le but est de trouver un lien entre ces trois sources d'observation afin d'améliorer le diagnostic de la présence du fomes en cas de dépérissement.

I.4 Objectifs

Le Centre National de la Propriété Forestière (CNPF) est partie prenante d'un projet européen (INTERREG SUDOE) intitulé FORRISK : réseau pour l'innovation dans les sylvicultures et les systèmes de gestion intégrée des risques en forêt du Sud-Ouest de l'Europe, qui a été retenu à la fin de 2012. Coordonné par l'EFI Atlantic (bureau régional Sud Ouest Atlantique de l'European Forest Institute) avec des régions espagnoles, françaises et portugaises de la façade atlantique, il doit permettre d'améliorer la gestion de leurs forêts. Ce projet est né du constat que les risques (climatique, sanitaire, tempête, feu, dégâts de gibier…) qui pèsent sur la forêt ne connaissent pas de frontières. Il est donc nécessaire de faire le point sur l'ensemble des mesures qui peuvent être prises de manière concertée entre des pays et des régions voisines pour éviter l'expansion de certains dégâts forestiers.

FORRISK cherche donc à faire émerger de nouveaux moyens de lutte contre les risques biotiques et abiotiques en forêt. En effet, il vise à identifier, dans chacune des régions participantes, les mesures qui sont prises de manière concrète pour la gestion des risques identifiés et prévisibles, et à proposer des innovations en matière de gestion sylvicole pour intégrer ces menaces.

Pour la partie française, deux volets ont été retenus :

- Une enquête effectuée auprès de propriétaires forestiers du Tarn, de l'Aveyron et du Limousin sur leurs comportements face aux risques, réalisée par le CRPF/IDF Limousin ;
- Un projet intitulé : « le fomes sur douglas », pour l'évaluation des attaques de fomes (*Heterobasidion sp.)* sur douglas et l'actualisation des moyens de lutte, comportant 3 phases. Celui-ci, mené par le CRPF/IDF Midi Pyrénées, en collaboration avec le Département de la Santé des Forêts (DSF), l'institut national de la Recherche Agronomique (INRA) ainsi que la coopérative Forestarn (Alliance Bois) sera développé ci-dessous.

L'objectif est de produire des recommandations pour les propriétaires et les gestionnaires afin d'éviter l'extension du fomes sur le douglas. Au cours de ce stage, j'avais en charge la rédaction du rapport final des deux premières phases ainsi que la mise en place et l'accomplissement de la dernière phase.

I.4.1 La première étude: test de l'efficacité du ROTSTOP sur douglas

La première phase du projet a débuté au printemps 2013. Par ordre de priorité, il a été proposé d'expérimenter l'efficacité du ROTSTOP® sur douglas, homologué comme produit phytopharmaceutique (2012).
En effet, l'urée et le bore, autrefois préconisés comme lutte préventive contre le fomes, ne sont plus utilisables dans un but de protection phytosanitaire, car ce sont avant tout des matières fertilisantes d'après le Code Rural. Cette directive est parue dans la note de service de la Direction Générale de l'Alimentation en avril 2013.

Aujourd'hui, le ROTSTOP®, constitué d'une suspension de spores d'un champignon antagoniste (*Phlebiopsis gigantea)*, apparaît donc comme la meilleure alternative dans la lutte contre le fomes. Il s'agit d'un champignon saprophyte commun qui pousse sur les matières mortes et en décomposition issues de conifères (Vainio, 2008) et provoque une pourriture blanche comme *Heterobasidion annosum.*
L'avantage de ce champignon est sa grande compétitivité vis-à-vis du fomes d'une part et sa capacité à assurer une décomposition rapide de la souche et des racines d'autre part, car les souches fraîches sont la principale voie de pénétration pour le fomes (Rishbeth, 1952).

Dans le cas présent, le projet FORRISK était basé sur une volonté affichée de « démonstration » de l'efficacité du ROTSTOP® sur le douglas :

- par un suivi de parcelles traités ou non puis contaminées artificiellement. Précisons que l'efficacité du produit n'avait pas été testée sur le douglas lors des essais antérieurs (Soutrenon, 1994/96) ;
- par la mise en place de 2 chantiers de références afin de motiver les propriétaires à appliquer une lutte préventive avec ce produit.

Cette étude de 6 mois a montré que le ROTSTOP est un substitut satisfaisant aux produits anciennement utilisés. En effet, les 2 sites d'études présentant respectivement 50 souches traitées au ROTSTOP®, puis inoculées par une suspension de spores de fomes, ont montré une efficacité de 74% sur l'un des sites et 100% sur l'autre. Le taux d'infections des 50 souches témoins (non traitées) est de 36% (Rapport ROTSTOP, Laget, 2014).

Il faut donc traiter les souches de douglas pour lutter contre ce champignon, lors des dépressages, de toutes les éclaircies et même au moment de la coupe rase. Ce champignon est présent dans la plupart des parcelles. Il ne s'agit pas de l'éradiquer mais de limiter sa présence en traitant les souches fraîches, portes d'entrée pour le pathogène.
En France, les traitements de souches sur épicéas et notamment le traitement au ROTSTOP® n'ont pas pris une grande ampleur par rapport aux pays scandinaves depuis les années 1990 (Delatour et al., 1998). Il existe des freins à son application, qui poussent les gestionnaires à la négliger, comme le coût d'application des traitements, qui vient s'ajouter au coût d'exploitation pour le propriétaire : soit entre cinq centimes et un euro par m3. L'intendance associée au traitement est également importante avec la gestion de citernes d'eau, la préparation des solutions, les incidents liés aux buses bouchées…Cela implique une adaptation rapide de la filière forestière à ce nouveau mode de traitement.

I.4.2 La deuxième étude : analyse des altérations du duramen

Pour motiver les propriétaires à traiter, une deuxième étude réalisée à l'été 2013 avait pour but d'évaluer l'impact du fomes sur des peuplements de douglas en éclaircie ou en coupe rase, grâce à un examen de souches fraîches, afin de quantifier les pertes économiques liées à ce champignon. En effet, sur dix chantiers d'éclaircie pris au hasard, soit 500 souches au total, la présence de purges et de pourritures a été recherchée et les altérations du duramen sur les souches ont été relevées. La présence de purges liées au fomes est peu fréquente. Par contre l'évaluation du degré d'altération des souches a montré une fréquence préoccupante de taches à la base des billes de pied. En effet, sur les dix premiers chantiers d'éclaircie, **64 %** de souches présentent des taches, avec **44 %** de souches altérées au niveau du duramen. Face à ce résultat, le Centre National de la Propriété Forestière a cherché à approfondir cette étude en réalisant un examen plus précis de ces modifications du bois. A la suite d'observations plus détaillées, M. Drénou (IDF), M. Moore (Expert-Atelier de l'arbre), M. Mathieu (CRPF) ont produit une typologie prenant en compte 4 types de taches d'altération qui semblent apparaitre de manière récurrente sur les souches (Drénou et al., 2013)

I.4.3 La troisième étude : fomes et dépérissement chez le douglas

La troisième phase du projet vise à améliorer le diagnostic de la présence du fomes dans le cas de dépérissement. Dans ce but, une étude a été réalisée au printemps 2014, pour faire le lien entre :
- les symptômes de dépérissement des houppiers,
- la présence d'altérations au niveau des souches,
- l'état du système racinaire.

Plus précisément, il s'agit de répondre à différentes questions :

- Existe-t-il une corrélation entre l'aspect visuel des houppiers et :

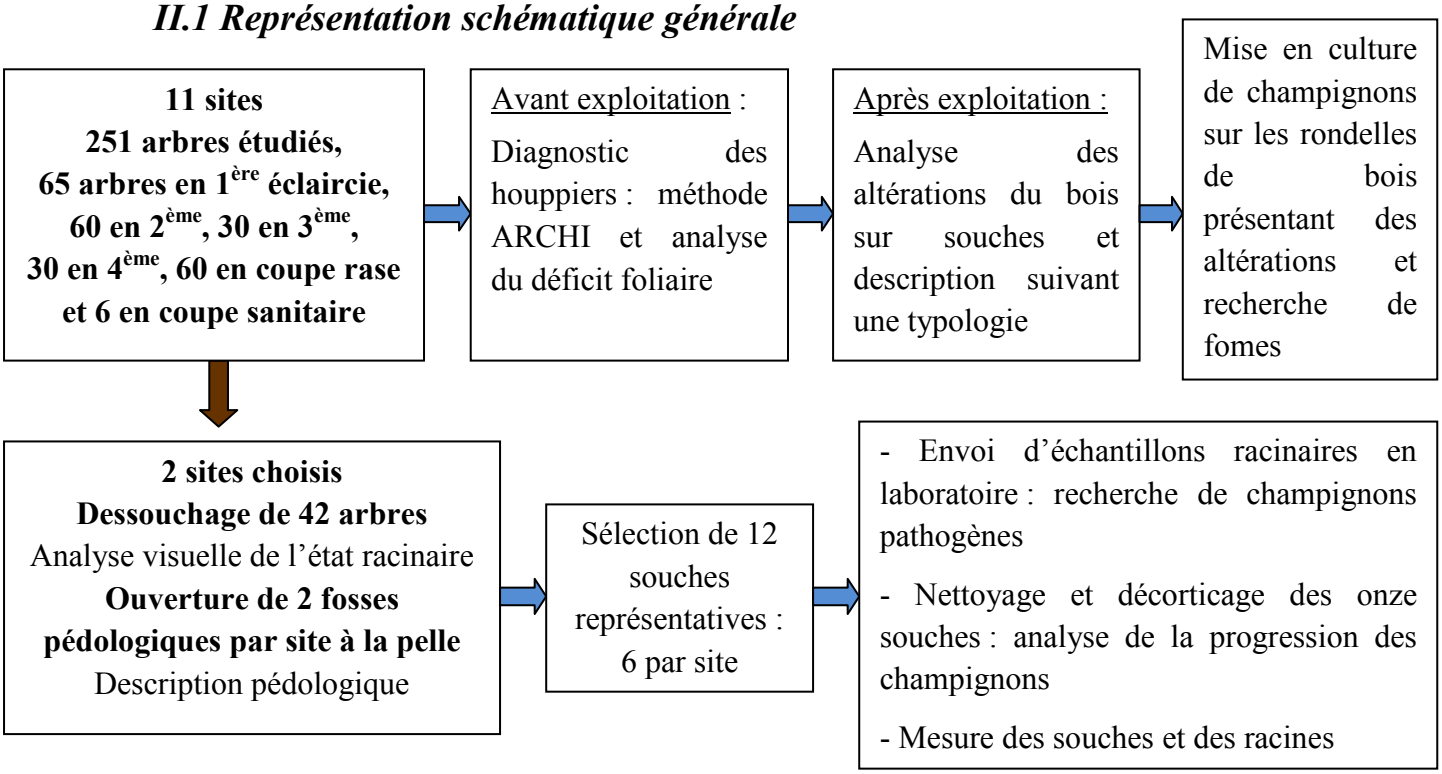
- les décolorations du bois au niveau des souches ?
- la détérioration éventuelle des racines ?

- Est-ce bien le fomes qui provoque les taches d'altération au niveau du duramen ?
- L'absence de fomes au niveau du collet ou des racines principales sur des arbres dépérissants suffit-elle à écarter sa présence au niveau racinaire ?
- Quels sont les champignons impliqués et quels sont leurs spécificités en terme de colonisation ?
- Quelle est la dynamique de colonisation du bois racinaire et caulinaire par les champignons ?

Les pages suivantes de ce rapport présentent les méthodes mises en œuvre pour tenter de répondre à ces questions ainsi que les résultats obtenus. Ces derniers seront discutés en terme de conséquences pratiques, économiques et sylvicoles.

II MATERIELS & METHODES

II.1 Représentation schématique générale



II.2 La première phase de terrain

II.2.1 Les sites de l'étude

L'étude a été conduite sur 11 sites répartis sur les massifs forestiers des Monts de Lacaune et de la Montagne noire dans le département du Tarn (voir carte annexe 1). Cette répartition recouvre bien la diversité des stations rencontrées sur le territoire.
Les caractéristiques des peuplements de douglas recherchés ont été les suivantes :
- chantiers d'éclaircies ou de coupe finale,
- présence de 30 arbres par chantier avec des aspects de houppiers différents (environs 10 sains, 10 stressés, 10 irréversibles),

- les arbres repérés doivent être dominants ou co-dominants,
- les arbres sont exploités pendant la période de l'étude.

J'ai recherché les 11 parcelles d'expérimentation en liaison avec les techniciens de la coopérative Alliance, ceux de l'Office National des Forêts et de la Direction Départementale des Territoires ainsi que les conseillers CRPF du département. Au vu du temps imparti, je n'ai pas pu expérimenter plus de parcelles.

II.2.2 Le dispositif expérimental

La sélection des 11 parcelles s'est faite en fonction de la volonté des gestionnaires et propriétaires à exploiter les peuplements de douglas, pendant les mois de mars et d'avril. Les parcelles sélectionnées devaient contenir au minimum 30 arbres exploitables. Ceux-ci étaient au préalable martelés ou marqués par les gestionnaires forestiers dans un objectif sylvicole.
Les 251 arbres répartis sur l'ensemble des 11 chantiers retenus ont été repérés à la peinture blanche et marqués individuellement à l'aide d'une plaquette numérotée et clouée au collet des souches. Ce dispositif permet la prise de données tout au long de l'étude sur le même échantillon d'arbres. On peut distinguer deux phases dans la prise de mesures sur le terrain : celle effectuée sur le peuplement et celle réalisée au niveau des souches.
Sur chaque site d'étude, des données dendrométriques relatives aux peuplements ont été prises :

- La localisation de la parcelle (coordonnées Lambert 93),
- Le type de coupes,
- Le diamètre moyen,
- L'âge du peuplement (par comptage de cernes sur souches),
- La hauteur dominante (mesurée au dendromètre Suunto).

Ces données ont permis d'apprécier par la suite la fertilité, la stabilité du peuplement et de corréler certains de ces facteurs avec la présence d'altérations ou de pourritures.

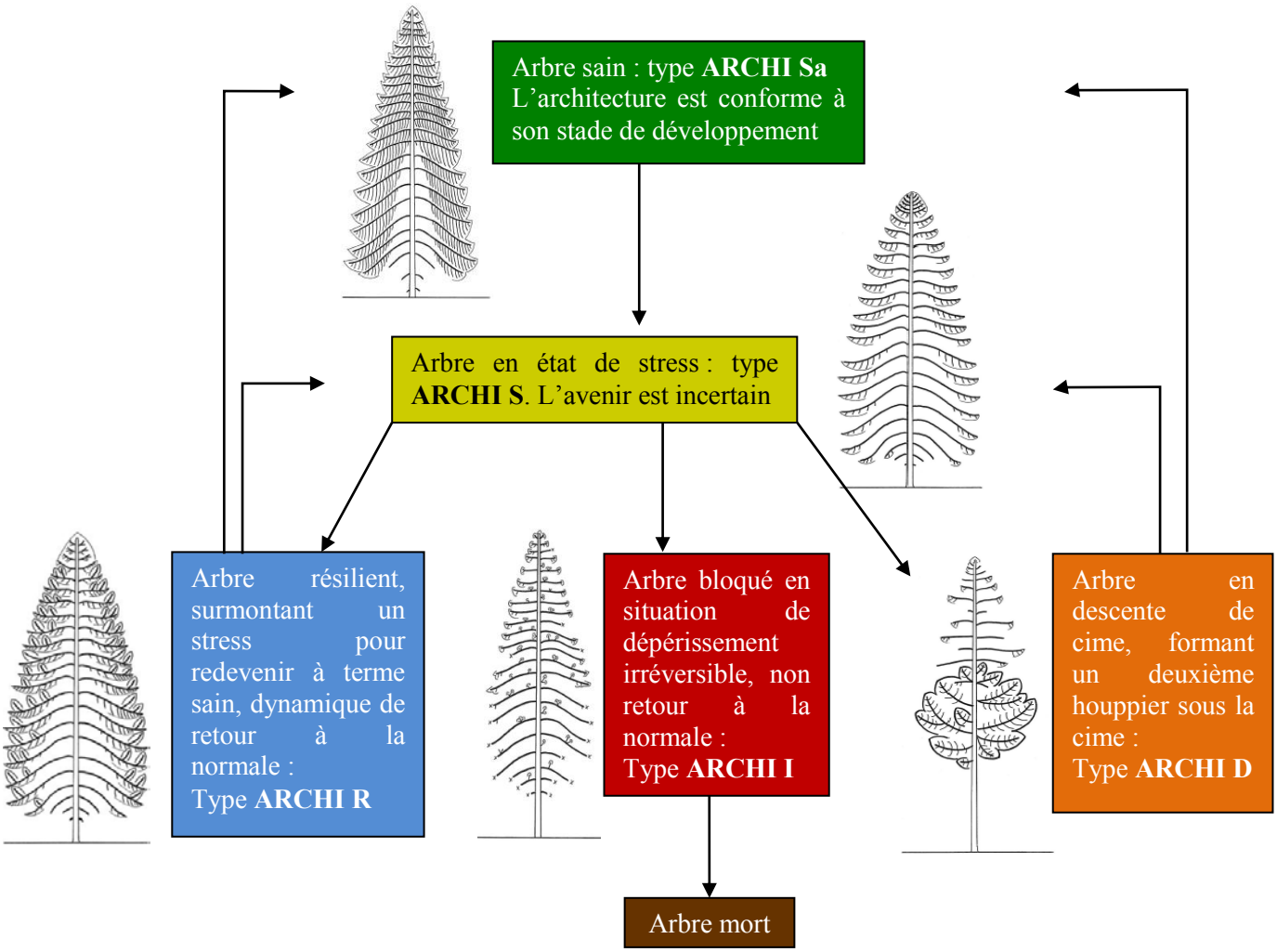
II.2.3 Le diagnostic des houppiers : la méthode ARCHI

Les symptômes de dépérissement des houppiers ont été observés avant exploitation grâce au diagnostic ARCHI mis en place par M. Drénou (IDF), (Drénou et al, 2014).
« ARCHI » est un diminutif « d'architecture » car la méthode s'appuie sur la lecture de l'architecture des arbres dominants ou co-dominants, c'est-à-dire sur une analyse de toute la partie aérienne. Elle a été élaborée dans un premier temps sur le chêne pédonculé puis appliqué au sapin pectiné et au douglas. Son principe repose sur deux séries d'observations. La première concerne les symptômes de dégradation du houppier hors concurrence et la deuxième porte sur les potentiels de restaurations au niveau de l'arbre entier (Drénou et al, 2014). En effet, le dépérissement d'un arbre est un phénomène complexe caractérisé par une détérioration générale et graduelle pouvant, soit être suivie d'une phase de récupération, soit aboutir à la mort.
Face à un stress, en fonction de son état initial, un arbre peut s'orienter vers différentes voies.

- Un douglas au feuillage dense, de couleur normale, dont le tronc n'est pas visible, ne présentant pas de mortalité anormale de branches, est jugé sain. Il n'a pas subi de stress important.
- Certains arbres réagissent en produisant des gourmands. La voie de la résilience, traduite par la production de gourmands, est un moyen de réaction rapide et efficace qui permet la restauration du houppier. On voit alors apparaitre des gourmands orthotropes (direction de croissance verticale), signe de vigueur, et/ou des gourmands plagiotropes (axe oblique) qui sont produits lorsqu'un houppier est dégarni par la chute des rameaux.

Dans le cas d'une réaction plus faible de l'arbre, ce sont des gourmands agéotropes (en touffe, peu vigoureux) qui se mettent en place (voir schéma 2 et annexe 2).
Afin de faciliter les démarches de diagnostic sur le terrain, une clé de détermination des types architecturaux a été mise en place (voir annexe 2). Elle reprend l'ensemble des observations sous forme de question oui/non et conduit à six types possibles. Dans le cadre de cette étude, ma formation à son utilisation fut nécessaire et réalisée lors de rencontres sur le terrain entre CRPF Tarn et Aveyron et IDF. Ces sorties ont permis sa finalisation et sa publication dans « Forêt entreprise » de mai 2014.

Schéma 2 : Les différents états d'un arbre selon la méthode ARCHI, (Drénou, 2013).



La notation ARCHI a été enrichie par un relevé du pourcentage de déficit foliaire du houppier hors concurrence. Cette méthode utilisée par le réseau des correspondants observateurs du Département Santé des Forêts (DSF), propose de noter les peuplements de douglas selon leur défoliation. La défoliation est exprimée en pourcentage de perte d'aiguilles par rapport à un individu sain de référence (0% de défoliation), la notation est donnée par intervalles de 10%. Nous avons également noté la présence de colorations anormales, de fentes de tronc (voir figure 5 page 10), de nécroses (voir figure 6 page 10) et de branches mortes dans le houppier hors concurrence. L'ensemble de ces données permet une description plus approfondie de l'état sanitaire des houppiers.

Figure 5 : Fentes de tronc à la base du houppier
(Photo P.Mathieu)

Figure 6 : Nécrose cambiale en bande, l'écorce est soulevée. Présence d'un bourrelet cicatriciel.
(Photo P.Mathieu)

Pour toutes les parcelles, la fertilité (hauteur dominante à un âge donné) et stabilité (hauteur/ diamètre) ont été calculés afin que les facteurs concernant les caractéristiques des peuplements n'entrent pas en compte. Globalement, les peuplements se situaient en classe de production A (très bonne) ou B (bonne) (CRPF Midi Pyrénées, 2011). Dans chaque cas, le H/D reflétait une bonne stabilité. De plus, la réserve utile (RU) a été estimée sur deux sites et s'élève à 150-200 mm. Cela montre que les paramètres stationnels sont favorables à la culture du Douglas.

II.2.4 L'évaluation du degré d'altération des souches

Suite à l'exploitation des arbres marqués, une analyse de la présence de taches d'altération à été entreprise sur les souches. Afin de réaliser cette opération, il est essentiel que les souches aient été fraîchement coupées. Si ce n'est pas le cas, un rafraichissement à la tronçonneuse et une hydratation s'avèrent nécessaire. La description des souches s'opère en distinguant les taches présentes dans le duramen de celles présentes dans l'aubier. Une échelle d'altération a été mise au point en 1993 par M. Gagneux (correspondant observateur du DSF de l'Aveyron) dans le cadre d'une étude sur « l'efficacité du traitement à l'urée dans la lutte contre le fomes annosus ».Une notation pour chaque souche s'effectue d'après les critères suivant :

✓ **Duramen**

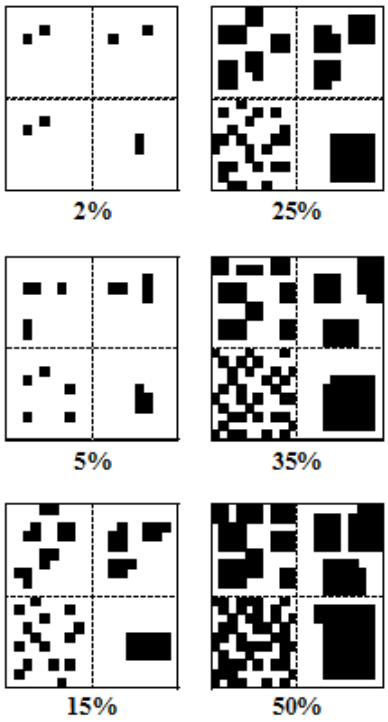
Etat 0 : souche saine
Etat 1 à 3 : Bois taché sans pourriture (dureté au couteau identique à celle du bois sain)

Stade 1 : taches < 25% de la surface de la souche
Stade 2 : taches de 25 à 75 % de la surface de la souche
Stade 3 : taches >75% de la surface de la souche

Etat 4 à 6 : Pourriture (dureté au couteau plus faible que celle du bois sain)
Stade 4 : pourriture < 25% de la surface de la souche
Stade 5 : pourriture de 25 à 75 % de la surface de la souche
Stade 6 : pourriture >75% de la surface de la souche

L'estimation du pourcentage de taches est possible grâce au schéma 3. Les carrés noirs sont représentatifs du pourcentage de taches susceptibles d'être présentes sur le bois.

Schéma 3 : Estimation du pourcentage de taches



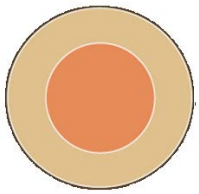
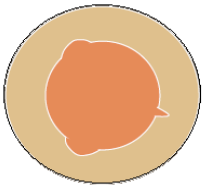
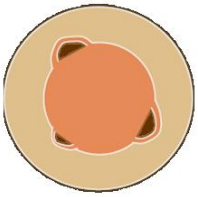
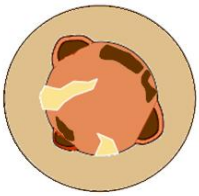
✓ **Aubier :**

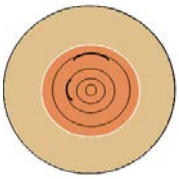
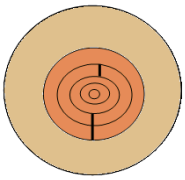
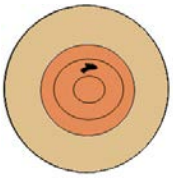
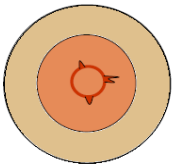
Sain : pas de taches
Taché : quelle que soit la/les taches et l'étendue
Pourri : quelle que soit la/les pourritures et l'étendue

II.2.5 La typologie des taches d'altération

Les taches d'altérations rencontrées au niveau du collet, à la limite entre le cœur et l'aubier ont été décrites pour chaque souche suivant une typologie. Celle-ci, produite lors de la deuxième phase du projet FORRISK met en évidence la présence de plusieurs types de taches sur les souches de douglas. Cette typologie, qui comportait 4 types, a par la suite été enrichie et modifiée lors de son utilisation au début de cette étude. Elle présente maintenant 8 types schématisés ci-dessous (voir schéma 4) et illustrés en annexe (voir annexe 3).

Schéma 4 : Typologie des taches d'altération du douglas

 **Type 1**	 **Type 2**	 **Type 3**	 **Type 3+**
Sain : duramen et aubier circulaires et distincts	Excroissance sur le pourtour du duramen	Colorations plus foncée des excroissances autour du duramen	Taches intégrées au duramen et décolorations blanchâtres

 **Type 4**	 **Type 5**	 **Type 6**	 **Type 7**
Taches imbibées de résines dans le sens des cernes	Taches imbibées de résine radiales (un ou plusieurs cernes)	Taches inhibées de résine non liées à un cerne	Coloration en flamme au centre (liée à un cerne)

Par ailleurs, sur chaque chantier d'étude, 10 rondelles de bois ont été prélevées (100 en tout) afin d'observer ou non la présence de fructifications de spores de fomes sur les différentes taches.
L'objectif est de déterminer quel type de tache est causé par le fomes. Sur chaque souche, 2 rondelles de 2.5 cm d'épaisseur ont été découpées à la tronçonneuse. La première a été abandonnée sur place pour éviter d'observer des fructifications dues à une contamination aérienne postérieure à l'abattage. La seconde a été mise en culture comme développé ci après (le numéro de la souche a été inscrit sur la face supérieure). Les rondelles ont été emballées dans du papier et en sac plastique pour l'incubation en conditions humides. Cette incubation a eu lieu à température constante de 15°C pendant 10 à 15 jours. Il est important d'attendre suffisamment longtemps pour que le champignon ait le temps de se développer.
Après ce délai, les fructifications asexuées de fomes (*Spiniger meineckellus)* (voir figure 2, page 3) ont été recherchées sous loupe binoculaire (X40) sur la face inférieure de chaque rondelle. Les zones contaminées ont été repérées et délimitées au stylo feutre noir.

II.3 La deuxième phase de terrain

II.3.1 Le dessouchage

A l'issue de la première phase de terrain, deux chantiers ont été sélectionnés parmi les précédents. Ils ont été choisis pour les raisons suivantes :

- Il s'agissait de deux coupes rases. Le dessouchage est plus facile à mettre en œuvre que sur une parcelle en éclaircie où le reste du peuplement est encore sur pied. Le propriétaire est donc plus facilement consentant car il n'y a pas de risques de blessures et de déstabilisation du peuplement par la pelleteuse.
- Les deux parcelles étaient différentes sur le plan géologique et pédologique puisque l'une se situait sur schistes et l'autre sur granite. L'adaptation du système racinaire était donc d'autant plus intéressante à étudier.
- Par manque de moyens et de temps, nous nous sommes concentrés sur ces deux chantiers.

Avec l'aide d'une entreprise sous-traitante de la coopérative forestière Alliance, nous avons procédé à l'arrachage de 20 souches marquées précédemment sur chacun des deux sites. Bien que par la suite, toutes les souches n'aient pas été examinées ni décortiquées, nous avons choisi de les dessoucher toutes afin d'éviter un biais et de sélectionner celles représentatives du peuplement.
Le dessouchage s'est effectué sur 2 jours à l'aide d'une pelleteuse de 9 tonnes. Un fossé de 3 mètres de côté a été réalisé autour de la souche afin de conserver un maximum de racines lors de l'arrachage. Nous avons procédé à un diagnostic rapide de l'état du système racinaire (pourri/sain) afin de sélectionner 12 souches à décortiquer par chantier parmi les 20. Le choix de ces 12 arbres/chantiers s'est fait d'après les critères suivant :

- Des souches tachées : de type 2, 3, 3+, pour observer la progression des taches ;
- Des souches non tachées mais au système racinaire pourri afin d'analyser l'extrémité supérieure de la pourriture ;
- Des souches tachées au système racinaire pourri pour voir comment s'effectue la connexion entre les deux.

Les 12 souches sélectionnées ont été positionnées bord de route afin de faciliter le nettoyage et décorticage. Afin de définir la station, deux fosses pédologiques ont été creusées à la pelle mécanique sur chacun des deux chantiers, l'une dans la partie amont et l'autre dans la partie aval des parcelles. Les profils de sol ont été décrits et la réserve utile calculée selon la méthode de Jamagne (RU par horizon = Coefficient textural x épaisseur de l'horizon x [(100 - % éléments grossiers)/100]). La RU du sol équivaut à la somme des RU de chaque horizon.

II.3.2 Le prélèvement d'échantillons

Dix huit échantillons de racines ont été prélevés sur onze souches des deux chantiers et envoyés au laboratoire de Nancy (Interaction Arbre-Microorganismes), à l'équipe « écologie des champignons pathogènes forestiers ». Les racines relevées provenaient préférentiellement des zones de la souche nécrosées ou présentant des pourritures et altération du bois. L'objectif consiste à réaliser un inventaire le plus exhaustif possible des champignons présents. La présence des différentes espèces d'*Heterobasidion* (fomes), et de champignons comme *Phaeolus* de Schweinitz (Phaeole), *Sphaeropsis sapinea, Armillaria* (Armillaire) a été recherchée par Polymerase Chain Reaction (PCR), suite à une mise en chambre humide et extraction. Les résultats seront disponibles début Septembre.

II.3.3 Le décorticage des racines

Onze souches sur les douze amenées bord de route ont ensuite été nettoyées minutieusement à l'aide d'un nettoyeur haute pression (la douzième n'a pas pu être nettoyée, son système racinaire était trop enchevêtré). Le décorticage s'est effectué sur 2 jours en présence de William Moore, spécialiste en pathologies et gestion de l'arbre (Atelier de l'arbre), ainsi que de l'ensemble des partenaires du projet : CNPF (IDF), CRPF Midi-Pyrénées, DSF, Alliance Bois (Figure 7 et 8). Une dissection longitudinale des racines de douglas a été réalisée afin de répondre aux questions suivantes :

- Quels sont les symptômes de la présence d'*Heterobasidion* dans les racines ?
- De quelle façon se propage le champignon depuis les racines jusqu'aux souches ?
- La duraminisation du bois concerne-t-elle les racines ?
- Comment expliquer les zones non colorées dans le duramen de certaines souches ?
- Comment interpréter la typologie des taches réalisée en octobre 2013 et utilisé dans l'étude ? Toutes les taches sont-elles dues à *Heterobasidion* ?

Toutes les souches ont été schématisées par Christophe Drénou (CNPF-IDF) afin de comparer l'état des systèmes racinaires. Différents paramètres quantitatifs ont également été relevés pour permettre d'évaluer l'importance du fomes et l'ampleur des dégâts sur les systèmes racinaires :

- d'une part sur les souches : nombre de charpentières primaires (I), secondaires (II), nombre de pivots (IV), nombre de racines tardives (III) (voir schéma 5).
- et d'autre part sur les racines d'un diamètre compris entre 4 et 14 cm (charpentière ou pivot) : mesure en croix des diamètres (D1, D2) de la racine, ainsi que les diamètres en croix de deux ellipses imbriqués correspondant respectivement au duramen et bois altéré.

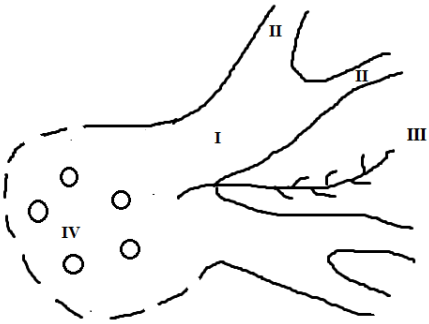


Schéma 5 : Mesures sur socle racinaire d'une souche

Figure 7 : Décorticage d'une racine (Photo G. Sajdak)

Figure 8 : Propagation du fomes depuis les racines jusqu'aux souches (Photo G. Sajdak)

III RESULTATS

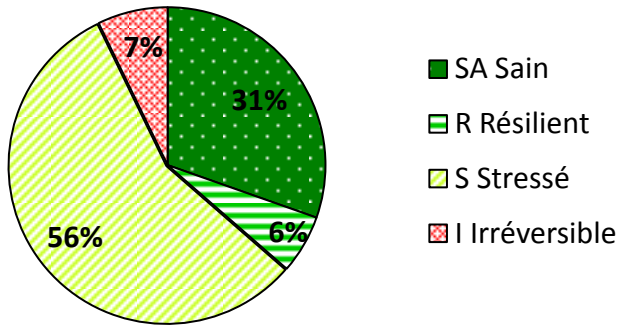
Dans un premier temps, nous avons cherché à établir un lien entre l'état sanitaire des houppiers et la présence de taches d'altération sur les souches. Puis nous avons essayé d'interpréter la typologie des taches d'altération utilisée sur le terrain. Nous avons appréhendé la spécificité et la dynamique de colonisation du bois racinaire et caulinaire par le fomes. Pour finir nous avons tenté de corréler la méthode ARCHI et la détérioration des racines.

III.1 Relation entre l'aspect visuel des houppiers et les décolorations du bois au niveau des souches

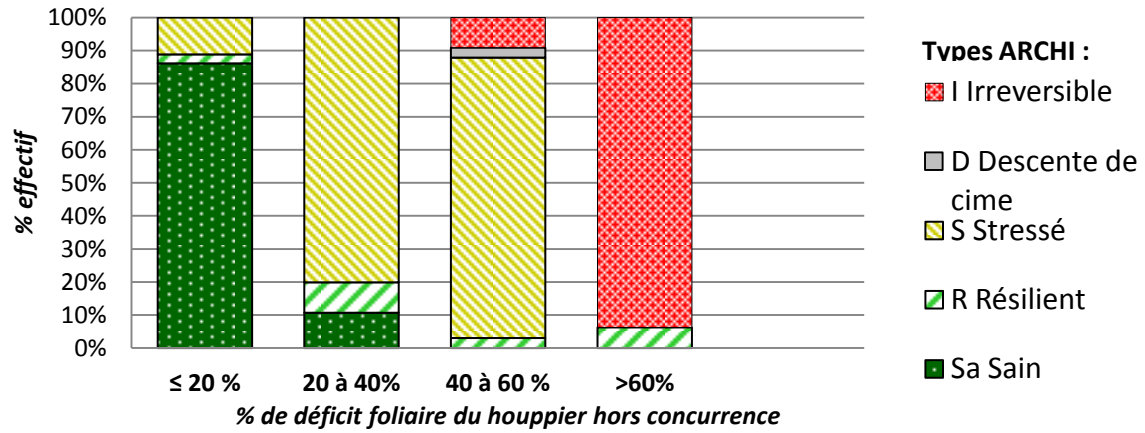
Après avoir retiré les arbres morts, le bilan de l'état sanitaire des houppiers a été effectué sur l'ensemble des 11 chantiers soit 251 arbres. Il faut rappeler que ces arbres sont assez bien représentatifs de la Douglasaie tarnaise.

La population étudiée présente beaucoup d'arbres en état de stress. 69% des arbres montrent qu'ils ont subi un stress, et parmi eux, 6% ont réagi suffisamment pour revenir à un état presque normal (ce sont les résilients), tandis que 7% continuent à se dégrader (ce sont les irréversibles). Pour les 56% qui demeurent stressés, on peut considérer qu'ils sont en d'attente d'un évènement qui les fera se diriger vers l'une ou l'autre voie (voir graphique 1). Sur l'ensemble des peuplements, la présence de branches mortes, de nécroses cambiales et de fentes de troncs reste inférieure à 10 % du nombre d'arbres.

Graphique 1: Etat sanitaire selon ARHI (%) sur l'ensemble des 11 chantiers



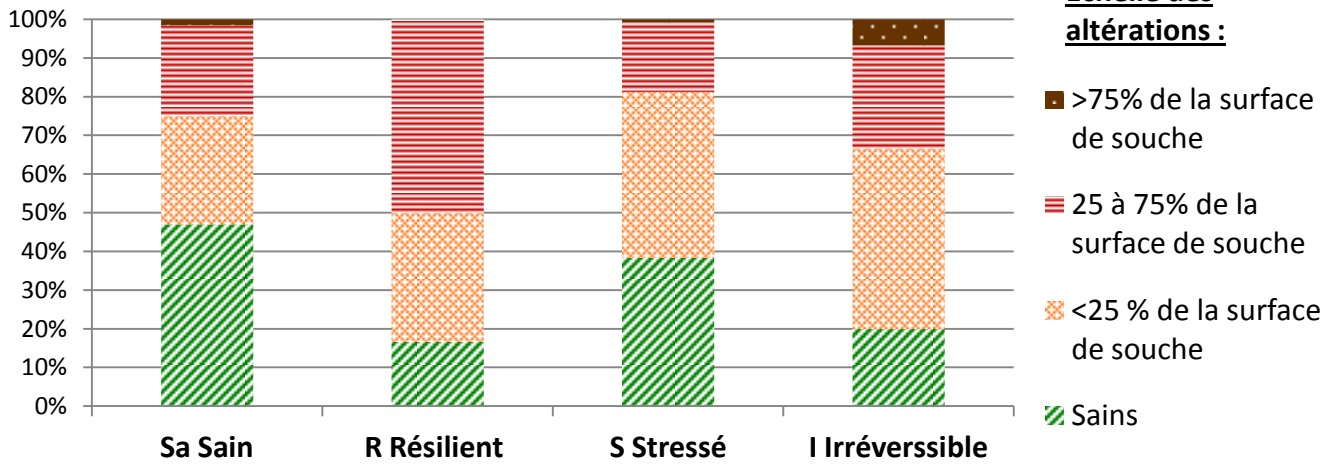
Graphique 2 : Relation ARCHI et déficit foliaire houppier hors concurrence



Les différents types ARCHI ont été mis en relation avec le pourcentage de déficit foliaire du houppier hors concurrence, condensé ici en quatre classes. On observe qu'ARCHI et le déficit sont corrélés pour les arbres sains, qui présentent un houppier dense avec moins de 20% de déficit foliaire. On trouve également une relation pour les individus stressés, dont le houppier est souvent clair à très clair. Les individus avec un taux de défoliation élevé (> à 65%) sont jugés irréversibles puisque leur houppier, transparent, n'assure plus correctement la photosynthèse (voir graphique 2).

On remarque que les résilients avec un taux de défoliation compris entre 20 et 40% s'orientent vers le type sain. Alors que ceux avec un pourcentage supérieur à 40 % basculent vers un type irréversible.

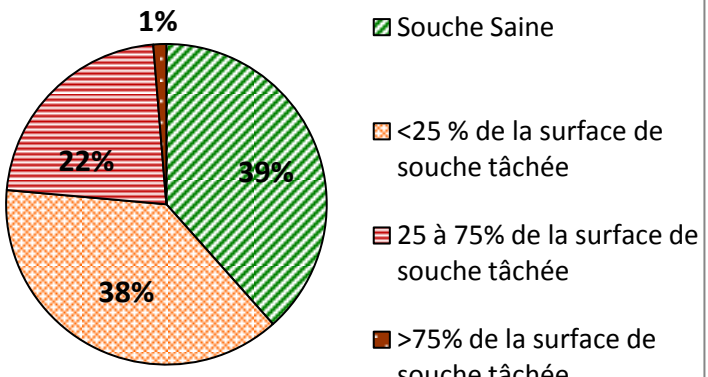
Graphique 3 : Types ARCHI et surface d'altération des souches



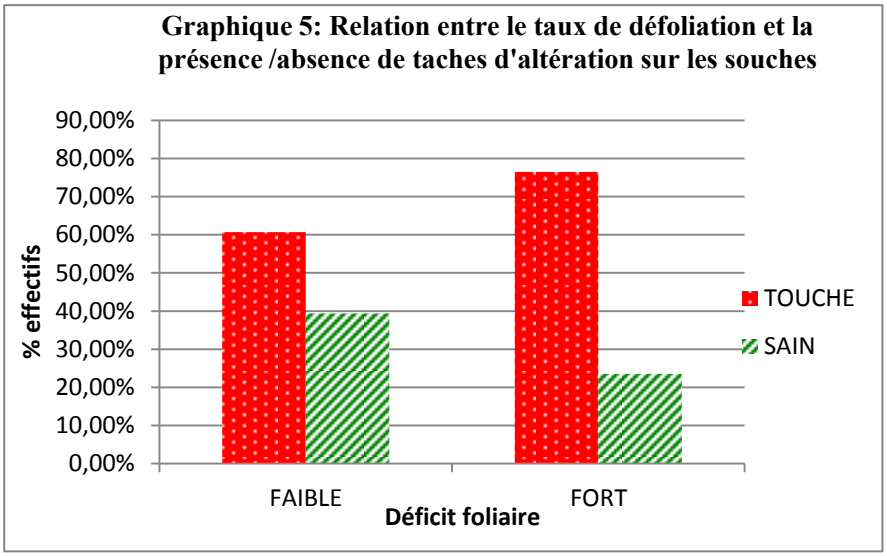
Afin de faciliter le traitement statistique et pour avoir des échantillons plus importants, les types ARCHI R1et R2, S1 et S2, I1et I2, ont été respectivement regroupés en R, S et I.
Le graphique 3 nous permet de répondre à une des problématiques posées dans le cadre de cette étude, à savoir s'il existe une relation entre l'état sanitaire du houppier et la présence de taches d'altération au niveau des souches. En effet, on aurait pu penser qu'un arbre atteint par un agent pathogène entre son duramen et son aubier pouvait refléter cette attaque à travers l'état de son houppier. Or on observe, que les arbres présentant un houppier sain ne sont pas indemnes de taches : 53% des arbres ont des souches altérées. Il en est de même pour les arbres de type irréversible, dont 20% des individus ont une souche saine. Les quatre degrés d'altération ont également été retrouvés parmi les arbres stressés. Ce résultat a été conforté par analyse statistique en composante principale (ACP), qui n'a pas montré de relation entre ARCHI et le degré d'altération des souches.
Par manque d'effectifs, l'évaluation de degré de pourriture du duramen par rapport au type ARCHI n'a pas donné de résultats concluants.

Sur les 251 arbres étudiés, la proportion de souches saines ou présentant différents degrés d'altération figure dans le graphique 4. Lorsque la souche est tachée, dans 38% des cas, les altérations sont inférieures à 25 % de la surface de la souche, et 22% des souches sont plus fortement tachées. Le pourcentage d'arbres comptant plus de 75% de sa surface de souche tachée est négligeable. Mais au total, près de **60%** des souches offrent différents degrés d'altération entre l'aubier et le duramen et seulement 39% de arbres sont indemnes de taches (voir graphique 4).

Graphique 4: Proportion de souches saines et altérées sur l'ensemble des peuplements



De plus, la réalisation d'une ACP a permis de montrer une corrélation positive entre le diamètre, l'âge (ces deux données étant liées) et le degré d'altération. Plus les arbres ont un diamètre élevé et un âge avancé, plus le degré d'altération est fort.
Nos résultats montrent que les arbres avec des souches altérées (« touché » dans le graphe) présentaient très majoritairement un fort déficit foliaire avant abattage (voir graphique 5).



Les arbres ont été classés suivant leur déficit foliaire. Afin d'équilibrer l'échantillonnage, le seuil de déficit foliaire a été fixé à 40%. On observe que près de **80%** des individus présentant des taches d'altération sur leurs souches ont un déficit foliaire supérieur à 40%.
On trouve deux fois plus d'arbres avec des souches saines lorsque leur taux de défoliation est faible (<40%) que lorsqu'il est fort.
Nous avons également trouvé un lien entre le déficit foliaire, la présence/absence de taches d'altération et l'âge des peuplements. Les arbres de moins de 40 ans avec un faible taux de déficit foliaire semblent les moins touchés par le fomes. Ils présentent moins de 50% de souches altérées. Ceux de plus de 40 ans apparaissent les plus atteints par le champignon (plus de 80% des individus), qu'ils aient un déficit foliaire fort ou faible.

En résumé :

- **69%** des arbres montrent qu'ils ont subi un stress (méthode ARCHI)
- Pas de relation entre ARCHI et le degré d'altération des souches.
- **80%** des individus présentant des taches d'altération sur leurs souches ont un déficit foliaire supérieur à 40%.
- On trouve deux fois plus d'arbres aux souches saines lorsque leur taux de défoliation est faible. (< 40%)
- Les arbres de moins de 40 ans avec un faible taux de déficit foliaire semblent les moins touchés par le fomes.
- **60%** des souches offrent différents degrés d'altération

III.2 Interprétation de la typologie des taches

L'analyse à la loupe binoculaire des 100 rondelles de bois prélevées sur les 11 chantiers, a montré la présence récurrente de fructification asexuée de fomes (*Spiniger meineckellus)* sur certains types de taches. En effet, les altérations du bois représentées dans la typologie des taches ne sont pas toutes dues au fomes. Sur toutes les souches présentant des taches de type 2, 3 ou 3+ (voir schéma 4 page 11), l'existence du fomes a été confirmée (voir figure 9 page 17). Pour conforter ce résultat, des rondelles de bois comportant un carpophore de fomes ont été prélevées sur d'anciennes souches d'éclaircies. On a ainsi pu observer le développement du champignon à l'envers d'une rondelle présentant le type 3 (voir figure 10 page 17). Ces deux résultats montrent bien que les taches de type 2, 3, 3+, résultent de l'existence d'*Heterobasidion* dans le bois.

Figure 9 : Délimitation de la zone de présence du fomes (Photo L. Laget)

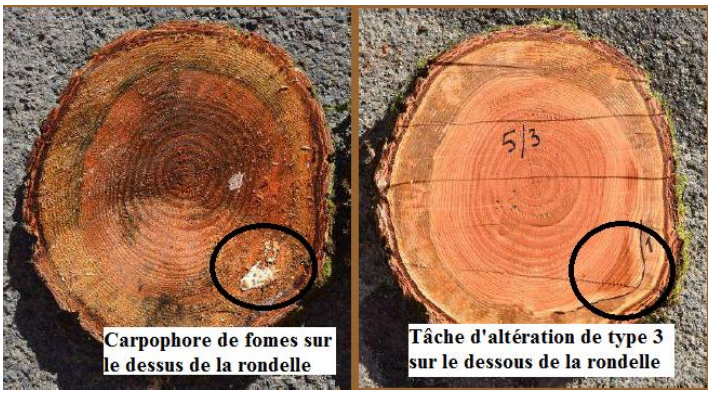


Figure 10 : Présence d'un carpophore de fomes au niveau d'une tache d'altération (Photo P. Mathieu)

III.3 Dissection longitudinale des racines de douglas

III.3.1 La distinction entre bois de cœur et bois coloré

Dans un premier temps, nous avons essayé de comprendre jusqu'où descendait le duramen dans les racines afin de ne pas le confondre au bois altéré par le champignon. Pour cela, nous avons examiné l'anatomie d'un bois sain lors du décorticage des souches. Le douglas présente un duramen coloré en rose. L'aubier compte entre 15 et 20 cernes de couleur claire. La forme du duramen est approximativement conique au centre du tronc, mais sa périphérie ne correspond pas toujours à la forme des cernes (certains cernes ne se duraminisent qu'en partie). Nos observations montrent qu'au niveau du collet, la couleur rosée du duramen s'estompe peu à peu en taches et laisse place à un jaune pâle, la couleur du duramen racinaire. Ce résultat est à mettre en lien avec la typologie des taches d'altération. Le type 3+ présente des taches intégrées au duramen et des décolorations blanchâtres (voir schéma 4 page 11). Au niveau de la souche, il s'agit simplement d'un entremêlement des deux couleurs de duramen. Les racines peuvent présenter deux types de bois :

- un duramen, jaune pâle, composé de cellules mortes,
- un bois coloré, brun foncé, qui se colore avant de se dégrader sous l'action de l'agent pathogène. On peut retrouver ce bois altéré au centre de la racine, lorsque celle-ci ne présente pas de bois de cœur ou autour du duramen sous forme circulaire (voir figure 11).

III.3.2 La dynamique de colonisation du bois par le champignon

Sur l'ensemble des onze souches, nous avons retrouvé l'architecture racinaire classique, se caractérisant par deux réseaux de racines ligneuses : un réseau plongeant et un réseau traçant. Deux compartiments se distinguent : le compartiment central autour du collet et le compartiment périphérique (Lucot, 1994) (voir schéma 6 page 18).
Sur l'une des deux parcelles où a été réalisé le dessouchage, l'architecture des souches était largement perturbée par les contraintes imposées par la roche mère (schiste). En moyenne, nous avons retrouvé 14 pivots et 7 charpentières par souche. Plus de la moitié des souches présentaient un système racinaire fortement altéré. En effet, 71 % de pivots secondaires et 78% de charpentières comportent du bois coloré. La majorité des pivots atteints se situent au centre du socle racinaire. L'arbre conserve ses fonctions conductrices grâce à la mise en place de nouveaux pivots secondaires vers l'extérieur de la zone touchée ainsi que grâce à la formation de racines tardives qui recolonisent l'espace perdu dans le compartiment central (voir schéma 7 page 18).

Schéma 6 : Architecture racinaire commune d'un douglas sain (Drénou, 2006).

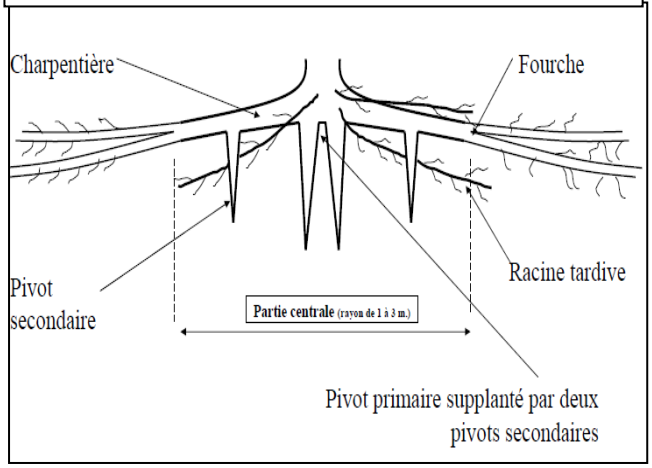
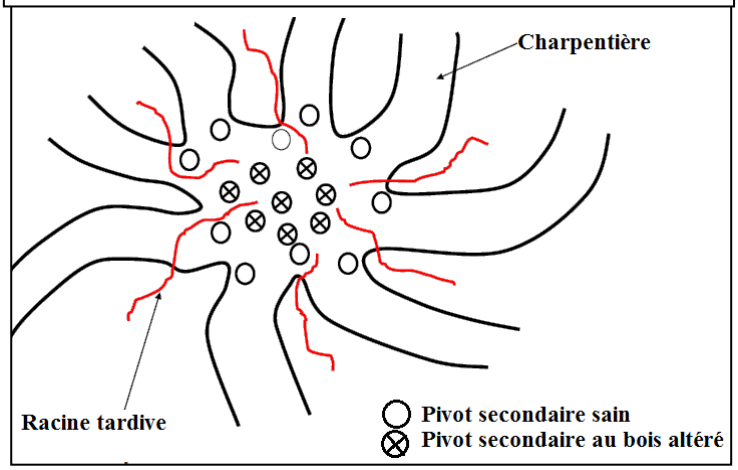


Schéma 7 : système racinaire fortement altéré vu de dessous (Drénou, 2014).

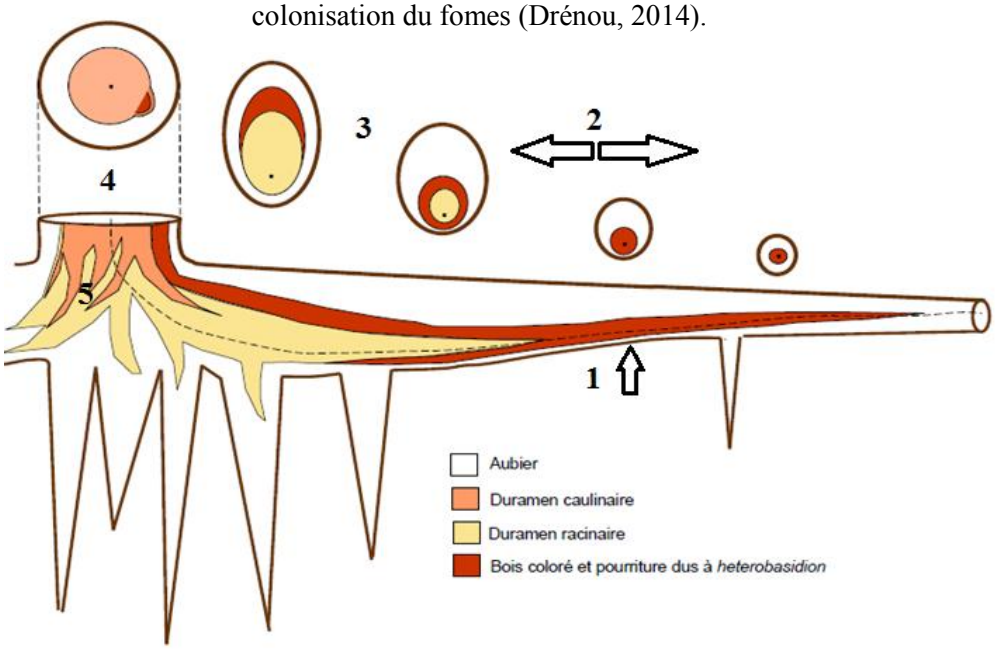


Les coupes longitudinales des racines charpentières jusqu'au collet ont permis le repérage des voies d'entrée et l'analyse de la progression des champignons. Suite aux observations réalisées sur le terrain, une « modélisation » en trois dimensions des décolorations racinaires a été produite par M. Drénou (IDF) (voir schéma 8).

Le fomes ne peut vivre que sur du bois et provoque des pourritures fibreuses. Sa spécificité en terme de colonisation est différente de l'armillaire, qui peut coloniser le sol grâce à ses rhizomorphes (elle forme par ailleurs des pourritures de cœur cubiques). *Heterobasidion* pénètre dans l'arbre à travers de l'écorce. Cette pénétration pourrait être favorisée par des micro-fissures provoquées par le frottement des racines contre des blocs de roche, ces frottements étant dus à l'effet de balancier des arbres sous l'effet du vent. En effet, on observe de nombreuses racines blessées, mise à nu et nécrosées (voir figure 11 page 19). Ces blessures peuvent parfois aussi être causées par le passage des engins dans la parcelle.

La transmission peut être favorisée par les greffes racinaires et anastomoses. Le champignon se déplace ensuite longitudinalement en suivant un compartiment de cerne, il monte ou descend à partir du point d'insertion. En réaction, l'arbre émet une zone de barrage, appelée bois coloré, dans les cernes situés de part et d'autre de la surface colonisée. Celle-ci finit ensuite par pourrir. Le haut de la zone altérée se termine par une tache au niveau du collet entre le duramen et l'aubier, qui remonte souvent peu dans le tronc. La colonisation vers le bas finit en pointe, au centre de la racine (voir figure 12 page 19).

Schéma 8 : Modélisation 3D de la dynamique de colonisation du fomes (Drénou, 2014).



1 : Zone d'entrée du champignon, zone de blessure.

2 : Progression longitudinale du fomes dans le bois.

3 : Bois coloré, brun foncé, croissant ou circulaire autour du bois de cœur de la racine

4 : Remontée du bois coloré dans le collet, formation d'une tache.

5 : Zone d'entremêlement du bois de cœur racinaire et du duramen rosé du tronc.

Figure 11 : Racines nécrosées, porte d'entrée pour le fomes (Photo P.Mathieu)

Figure 12 : Zone de pourriture descendante (Photo G. Sajdak)

Nous avons donc observé que les colorations brunes de type 2, 3 et 3+ sont dues aux altérations des racines par le fomes qui remontent dans le collet. Entre ces 3 types, il y a une progression de l'intensité de l'altération. En effet, la tache de type 3+, de couleur brune, montre un état plus évolué de dégradation du bois que le type 2. En revanche, sur l'un des deux chantiers, certaines racines présentaient des dégradations au cœur du duramen correspondant au type 7, qui semblent être causées par un autre champignon qu'*Heterobasidion* comme l'*Armillaire*. L'analyse en laboratoire de 18 échantillons de racines prélevées sur les 11 souches viendra étayer ce résultat en septembre, grâce à une détermination des champignons impliqués dans la détérioration des racines.

III.3.3 Les réponses de l'arbre

La racine tente de résister aux agressions en mettant en place un processus de compartimentation interne (voir figure 14). Les coupes transversales des racines nous ont montré qu'à chaque attaque du pathogène, la racine crée une zone de barrage interne. Une racine peut subir plusieurs attaques et créer plusieurs zones de réaction. Au moment de la blessure, le cambium produit un bois modifié, spécialisé dans la protection de la racine, composé de cellules subérifiées (1). Cette barrière permet de protéger le bois formé après l'infection. L'arbre cicatrise en tentant d'entourer la zone d'écorce nécrosée et met en place un bourrelet cicatriciel (3). De plus, la formation du bois coloré est une réaction de défense de l'arbre qui tente de ralentir l'évolution du champignon (2). Lorsque la racine présente du bois de cœur, celui-ci ne semble pas attaqué car il est composé de cellules riches en composés phénoliques qui empêchent sa dégradation (4) (Figure 13).

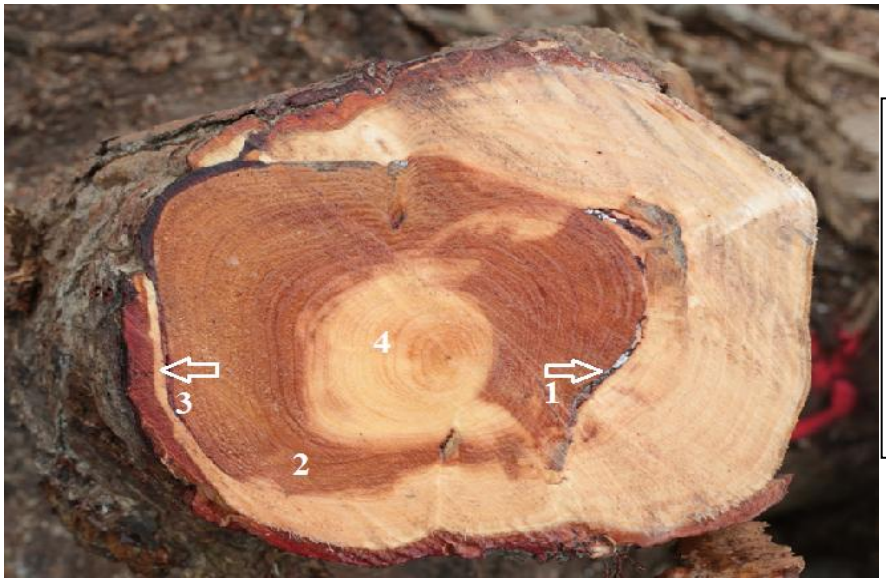


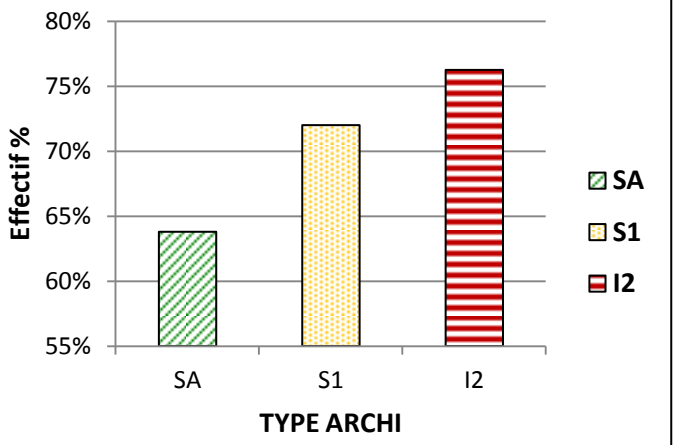
Figure 13 : Réponses d'une charpentière aux attaques de fomes (photo G. Sadjak).

1 : Barrière de compartimentation.
2 : Bois coloré, altéré.
3 : Bourrelet cicatriciel.
4 : Bois de cœur, jaune pâle.

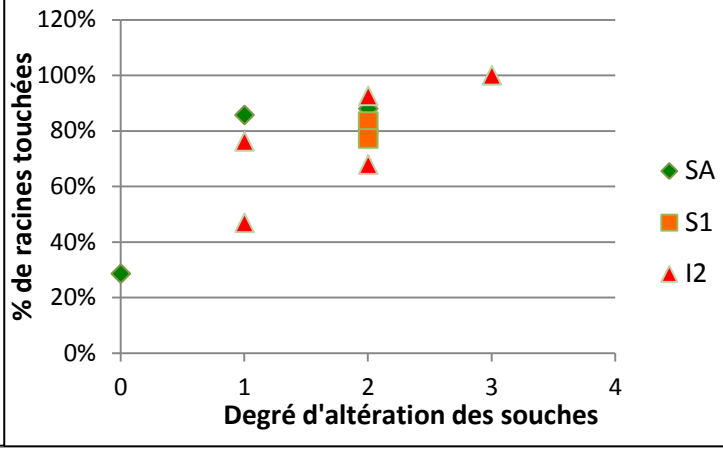
III.4 Relation entre l'aspect visuel des houppiers et la détérioration des racines

Grâce aux mesures dendrométriques relevées sur les racines, nous avons pu calculer la surface du bois coloré pour chaque racine à l'aide de la formule de l'aire d'une ellipse : $A= (D_1/2) \times (D_2/2) \times \pi$. De la même manière nous avons obtenu la surface du duramen et de l'aubier racinaire. Les douze souches ont ensuite été regroupées par type ARCHI des houppiers correspondants afin d'avoir un échantillon plus important. Nous avons donc 4 souches de type sain, 2 de type stressé et 5 de type irréversible.

Graphique 6 : Pourcentage de pivots tâchés



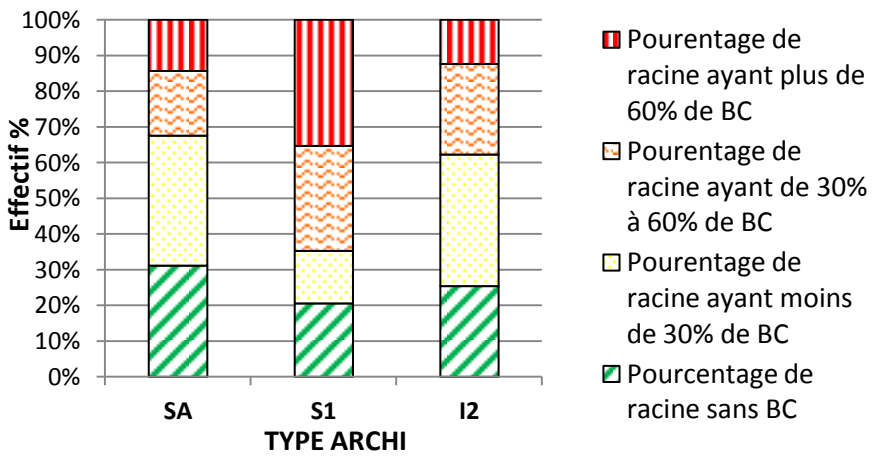
Graphique 7: Pourcentage de racines tâchées en fonction du degré d'altération des souches



Nous avons dans un premier temps regardé le pourcentage de racines présentant du bois coloré en fonction du type ARCHI. Ce sont les types S1 et I qui possèdent le plus de racines tachées. Chez les arbres stressés, le pathogène est présent dans 80% des racines. On peut noter que le fomes est très actif dans les systèmes racinaires étudiés puisque plus de la moitié des racines sont touchées (voir graphique 6). Le graphique 7 montre que les arbres irréversibles ont plus de 75% de leurs pivots affectés.

On observe une augmentation du nombre de pivots touchés avec l'évolution du dépérissement du houppier. **Il semble exister donc un lien entre l'aspect visuel des houppiers et la détérioration des racines.** Le graphique 9 met en lien le pourcentage de racines tachées par type ARCHI et le degré d'altération des souches (0 = sain, 1 = taché à moins de 25% de la surface, 2 = taché entre 25% et 75% et 3 = taché à plus de 75 % de la surface). On note que l'état de dégradation de la souche semble dépendre de son nombre de racines infectées. Une souche altérée à plus de 25% traduit une dégradation de 80% de ces racines.

Graphique 8 : Relation entre ARCHI et le pourcentage de racines avec/sans bois coloré (BC)



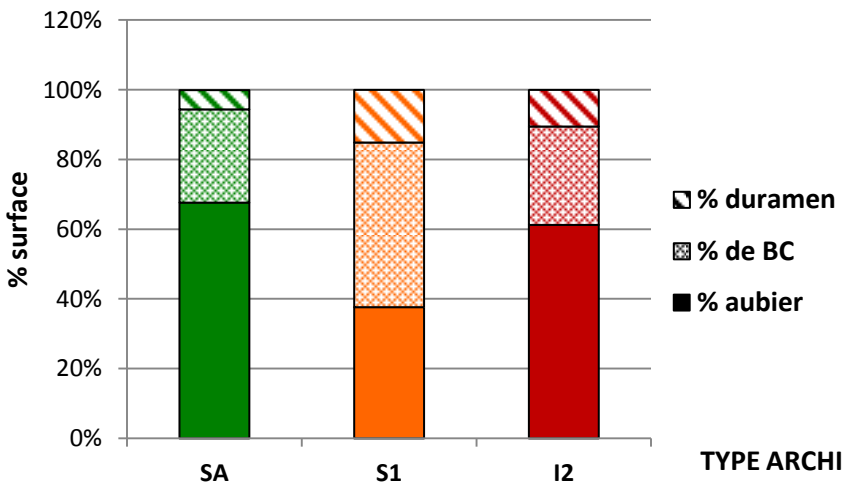
La proportion de bois coloré a été calculée sur chaque racine puis nous avons établi 4 classes représentant différents degrés surfaciques de bois coloré (Graphique 8). Le pourcentage de racines a été évalué dans chaque classe et pour les 3 types ARCHI.

Les arbres sains présentent le plus de racines sans bois coloré (30%), les individus de type S1 20 % et 25 % dans le cas de I2. Les racines ayant plus de 60% de bois coloré sont davantage présentes chez les individus de type S1 (35 %) que chez les sains et les dépérissants irréversibles (15 % environ).

La surface totale de bois coloré a ensuite été recensée sur l'ensemble des racines de chaque souche (11 en tout d'âge différent) et étudié en fonction des types ARCHI. A partir des mesures prises sur l'ensemble des racines, la surface d'aubier de chaque système racinaire a été évaluée. Nous avons ainsi pu établir un pourcentage de bois coloré (surface totale de bois coloré / surface totale des racines) et un pourcentage d'aubier en fonction de l'état sanitaire des houppiers.

On note que l'ensemble des racines des arbres stressés sont les plus touchées avec 45% de surface tachée (voir graphique 9). De même, la surface de la section d'aubier des systèmes racinaires entiers chez ces individus reste la plus petite avec moins de 40%. Ce sont les arbres de type sain qui possèdent le moins de surface de bois coloré (25%) et le plus d'aubier avec 65% de la surface. Cette relation établie entre l'état des houppiers et le pourcentage de bois coloré sur l'ensemble des systèmes racinaires n'est pas vérifiée pour le type irréversible. Ils présentent plus de surface d'aubier que de bois altéré par le champignon.

Graphique 9 : proportion d'aubier, de duramen et de bois coloré dans les systèmes racinaires des 3 types architecturaux de douglas



IV DISCUSSION

Lors d'une étude réalisée en 2002, par le CRPF Midi Pyrénées, sur 41 peuplements, soit 150 hectares de douglasaies tarnaises représentatives du territoire, 46% d'entre eux présentaient du fomes sur des souches après une éclaircie (Mathieu, 2005). Dans 53% des parcelles présentant des dépérissements ou des mortalités, le fomes était présent.
Cela indique que le fomes n'est certainement pas responsable de l'ensemble des dépérissements observés dans les peuplements de Douglas du Tarn, qu'il pourrait être impliqué dans un certain nombre d'entre eux.
Dans l'étude : « Enracinement du douglas en région Midi-Pyrénées » menée par le CNPF en 2010, l'auteur fait l'hypothèse que le fomes participe au processus de dépérissement du douglas (Drénou, 2010). Cependant, dans cette étude, le rôle du champignon dans l'état des arbres « dépérissants » ou « sain » n'a pas pu être évalué précisément dans la mesure où il aurait fallu pouvoir observer son éventuel impact sur l'ensemble du système racinaire de ces arbres (Aumonier, 2010).

Dans ce projet, nous avons analysé les relations entre les symptômes visibles de dépérissement des houppiers, la présence de décolorations du bois au niveau des souches et l'état sanitaire du système racinaire.
Cela permettra peut-être une meilleure prise de conscience de la part des forestiers et propriétaires sur le réel danger provoqué par le fomes sur le douglas dans le Tarn. Nous n'avons pas établi de lien entre l'aspect visuel des houppiers et les décolorations du bois au niveau des souches puisque la moitié des arbres classés « sains » par la méthode ARCHI présentent après abattage, des souches tâchées.
En revanche, dans notre étude, l'importance des tâches sur les souches de douglas est davantage liée au déficit foliaire. Néanmoins, la seule notation de ce paramètre, ne permet pas d'apprécier les causes du dépérissement.
La méthode ARCHI ne semble pas avoir suffisamment de poids par rapport au taux de défoliation. En effet, le déficit foliaire d'un individu stressé peut varier de 20 à 60 % : l'arbre a un avenir incertain, mais n'est pas considéré comme dépérissant.

Rappelons que la méthode ARCHI est un outil de diagnostic visuel basé sur l'observation des gourmands qui permet d'apprécier la dynamique de réaction des arbres après un stress et le caractère réversible ou non de l'évolution architecturale de leur houppier (Drénou, 2014). Destinée à aider à prendre objectivement une décision d'intervention en forêt : désignation de tiges d'avenir, marquage d'éclaircie. La méthode pas adaptée pour rechercher la cause d'un dépérissement, ou les différences de comportement (résilience ou mortalité) mais présente l'avantage de prédire le caractère évolutif d'un dépérissement, l'observation des gourmands transforme le diagnostic statique en pronostic dynamique (Forêt entreprise, 2014).
Compléter le diagnostic ARCHI par une notation de déficit foliaire (protocole DSF) permettrait de mieux caractériser l'état sanitaire d'un peuplement.

Nos résultats concernant la proportion de souches saines et tachées sont en adéquation avec ceux exposés dans la deuxième phase du projet FORRISK intitulée « analyses des altérations du duramen ». En effet, on retrouve 60% d'arbres dans différents degrés d'altération entre l'aubier et le duramen : le champignon est donc omniprésent. Cependant, moins de 1% des arbres sont altérés à plus de 75% de la surface de souches ce qui confirme le fait que peu de purges des billes de pied sont pour le moment effectuées à cause du fomes. Ce résultat conforte les conclusions émises sur le faible impact économique que provoque actuellement la dégradation du bois par le champignon. De plus, nous avons montré que le degré d'altération de la souche était corrélé positivement avec l'âge de l'arbre. L'incidence et la sévérité de la maladie augmente probablement au cours temps en partie à cause de la longévité du fomes dans le bois. Les grands arbres avec de grands systèmes racinaires ont une probabilité plus élevée d'infection par *Heterobasidion*.
Cette probabilité augmente avec l'âge du peuplement et la taille des arbres (Morrison et al., 2001).
Il existe peu d'études quantifiant l'importance des maladies racinaires à l'échelle nationale. Selon Low, (2002) les pertes dues à la pourriture des racines peuvent facilement passer inaperçues ou être attribuées à d'autres facteurs de milieu sans qu'on pense qu'elles sont une conséquence directe de la destruction à long terme du système racinaire. Il n'y a rien d'étonnant à ce qu'une cause aussi masquée que celle-ci reste ignorée; les forestiers sont habitués, en matière de pathologie, à des symptômes bien visibles.
En fait, parmi les quatre effets des attaques de fomes, seule la mort est nettement apparente et c'est probablement la forme d'attaque qui est la moins fréquente. Cependant, les observations menées en 2009 sur les chablis de douglas révèlent qu'a minima le développement du fomes amoindrit et désorganise le système racinaire des arbres infectés.

En Grande Bretagne, le douglas apparait comme le plus sensible aux chablis, conséquence directe de la pourriture des racines. Même de très jeunes arbres ont les pivots complètement pourris (Woodward et al., 1998).
Nous avons retrouvé ces mêmes résultats sur l'ensemble de nos 11 souches dont 71% des pivots observés était infectés. Ceux-ci se localisaient surtout au centre du socle racinaire. Les arbres de type irréversible semblent les plus enclin à présenter le plus de pivots tachés. De plus, il faut noter que beaucoup de racines n'ont pas pu être observées car elles se sont brisées dans le sol lors du dessouchage à cause de leur état trop avancé de pourriture. D'après Low (2002), le douglas émet un grand nombre de racines secondaires, la croissance de l'arbre est ainsi peu affectée. Nous avons même observé la présence de pivots sains vers l'extérieur de la souche ainsi que de nombreuses racines adventives colonisant l'espace libre. Il est cependant certain que ces dégâts causés au niveau des racines se traduisent par une perte de stabilité de l'arbre. Le fomes semble donc affecter essentiellement la fonction d'ancrage de l'arbre. Nous avons vu que la présence de taches ne perturbe à priori pas l'état physiologique de l'arbre. Néanmoins, la localisation de ces altérations entre aubier et duramen pourrait troubler la fonction de réserve. D'après Ghazil (2010), la conduction de la sève brute n'a souvent lieu que dans les couches les plus externes de l'aubier. Les sapins et épicéas comptent en général moins de 5 cernes d'aubier actif. Le reste de la zone d'aubier est composé de cellules de parenchymes vivantes qui servent de stockage de réserve (amidon). Celles-ci sont utiles lors de périodes de sécheresse et permettent à l'arbre de surmonter le stress pour un certain temps.
Or, en réponse à l'attaque du champignon, l'arbre mobilise ses réserves et les transforme en phénols et terpènes. Il devient alors plus vulnérable aux épisodes de stress, notamment hydrique. Une étude semblable à la nôtre menée par Wang et al. (2013) sur le pin sylvestre démontre que l'accroissement du volume annuel des arbres diminue avec l'augmentation en pourcentage du volume de racines infectées. D'après eux, la baisse de la croissance en volume des arbres infectés pourrait être attribuée à une perte de fonctionnalité d'une partie du système racinaire. L'induction des mécanismes de défenses provoque une diminution de l'allocation des assimilats nécessaires à la croissance de l'arbre, (Oliva et al., 2012), qui doit alors choisir entre défense et croissance.

Les données qualitatives et quantitatives relevées sur les 11 souches étudiées ont permis de connaitre la dynamique de colonisation du bois racinaire par le champignon.
Nous avons montré grâce à l'étude anatomique comparant le bois de racine et le bois duraminisé d'un tronc, que les racines sont pourvues d'un bois de cœur. Or cette question divise les chercheurs (Drénou, 2006). Pour le biologiste Shigo (1993), les racines n'ont pas de bois de cœur et peuvent ainsi utiliser toute leur masse pour la conduction de sève et l'accumulation de réserves, alors que Gebauer et Martinkovà (2005) affirment le contraire. Selon Gould et Harrington (2008), les racines de douglas présentent du duramen à proximité de la souche, qui se raréfie en s'en éloignant (seulement 51% des racines au diamètre inférieur à 8 cm en possèdent). Nos observations montrent que la couleur du duramen racinaire, jaune pâle, est différente de celle du tronc. Au niveau de la souche, les deux couleurs s'entremêlent en dessinant des flammes irrégulières. Les décolorations blanchâtres illustrées dans le type 3+ de la typologie des taches ne correspondent pas à des décolorations dues à l'action du champignon sur le bois mais bien au duramen racinaire.
L'impact du fomes a été relevé sur la plupart des racines du fait d'une forte présence de bois coloré soit au cœur, soit de forme circulaire ou en croissant autour du duramen. Les racines sont donc fortement altérées, n'ayant parfois même plus d'aubier sain. Nous avons vu que les voies d'entrées du champignon sont les blessures, ou nécroses, fréquentes au contact des cailloux ou de la roche mère. Certaines racines semblent résister aux agents pathogènes en

mettant en place une barrière de compartimentation ou « CODIT » (Compartimentalization of Decay In Trees) autour de la zone altérée.
D'après Drénou (2006), trois types de barrières s'opposent aux attaques de maladies : le manteau mycélien des mycorhizes, l'écorce, et le processus de compartimentation. Selon Shigo (1991 et 1993), l'efficacité de la compartimentation racinaire est supérieure à celle des troncs en raison d'un pourcentage plus élevé de cellules vivantes.
La formation de bois coloré est une réaction de défense de l'arbre. Les réserves d'amidon sont transformées en phénols et terpènes qui ralentissent l'évolution du champignon, isolant ainsi les tissus malades. Ces composés sont fongistatiques vis-à-vis du fomes in vitro (Cobb et al., 1968) : la structure du bois a plusieurs attributs qui permettent de prévenir la propagation de la pourriture dans le sens axial (les trachéides s'obstruent), radial et tangentiel (les rayons ligneux s'inhibent de substances antiseptiques) (Shigo et Marx, 1977). De plus, au moment de l'attaque, le cambium produit un bois modifié, spécialisé dans la protection de la racine appelé zone de barrage. Cette barrière permettra de protéger le bois formé après l'infection (Drénou, 2006).
Malgré l'effectif réduit des souches décortiquées et analysées, les observations réalisées sur les systèmes racinaires ont permis de mieux comprendre la dynamique de colonisation du bois par *Heterobasidion.* Même si ces observations ne sont pas validées statistiquement, elles permettront peut être par la suite de réfléchir sur la mise en place de nouvelles études dans la continuité du projet FORRISK.
En conclusion, les maladies racinaires sont difficiles à diagnostiquer et leur impact est souvent sous-estimé. La lutte curative est généralement impossible et il convient d'appliquer les luttes préventives quand celles-ci existent. Dans le cas du fomes, on peut prévenir la maladie de différentes manières. Une exploitation soignée, sans blessures aux arbres restants, ni tassement du sol est recommandée. Cela permet d'éviter que le fomes pénètre par les blessures ou les racines nécrosées (Hodges, 1968). Le DSF préconise de mettre en place une densité de plantation plus faible, en mélanges d'espèces. Une sylviculture adaptée permet de diminuer le nombre des éclaircies, car d'après Delatour (1975), éclaircir équivaut souvent a introduire le fomes. De plus, Rishbeth (1949) montre que c'est aussi grâce aux contacts racinaires que se propage le fomes. Il est recommandé de privilégier des essences adaptées à la station et au changement climatique. On peut supposer qu'au cours de leur phase de résilience post-sécheresse, les Douglas restent fragiles, notamment au niveau racinaire et sont donc plus sensibles aux attaques d'*Heterobasidion* et d'autres champignons comme l'armillaire. Les résultats de cette étude ont été mis en lien avec une carte des risques de mortalité suite à un stress hydrique basé sur le modèle de pluviométrie de 2003, réalisé par le CNPF. Cette analyse logistique montre que 87% des arbres touchés ont une probabilité supérieure à 33% d'être affecté par de la mortalité. Cela met en relief que des épisodes intenses de canicule comme 2003 affaiblissent les fonctions de l'arbre, qui peut devenir plus sensible aux attaques de fomes. Plus le peuplement est âgé, plus la probabilité d'être affecté par de la mortalité augmente.
Reste à élucider pourquoi certains douglas meurent de façon brutale sur certaines parcelles.
L'application du traitement est une solution pratique qui permet de lutter efficacement et biologiquement contre l'implantation et le développement du champignon.
Cette pratique largement répandue dans les pays scandinaves a montré des résultats concluants notamment au niveau racinaire. Oliva et al (2008) ont réalisé une étude sur 15 ans afin de montrer l'effet du traitement à l'urée sur l'épicéa. Les conclusions prouvent que sur les parcelles traitées, seulement 3% de pourritures racinaires ont été observées. Les parcelles inoculées avec du fomes présentent 68% de pourriture contre 43% dans les parcelles où le fomes est présent naturellement.

L'enquête conçue par le CNPF et réalisée par le CREDOC, dans le cadre du projet FORRISK sur le comportement des propriétaires forestiers face aux risques a permis d'interroger des propriétaires forestiers en région Midi Pyrénées et Limousin. Les premiers résultats montrent que peu d'entres eux se soucient des risques liés aux maladies et ravageurs (fomes, hylobes). En effet, seulement 24% des propriétaires craignent le risque lié au fomes (Rapport FORRISK DRAFT 2014). Cependant, leur perception est aussi liée à l'implication du propriétaire dans sa forêt. La plupart d'entre eux ne connaissent même pas l'existence du fomes sur douglas.
Il est donc important de recueillir des éléments tangibles et objectifs (démonstration de l'efficacité du traitement ROTSTOP®, diagnostic de la présence du fomes dans les parcelles par le gestionnaire, compréhension de la dynamique de colonisation du bois racinaire par le champignon, ...) afin de « motiver » les propriétaires à la mise en œuvre du traitement préventif, pratique peu usitée actuellement. Les trois études entreprises dans le cadre du projet FORRISK répondent toutes à cet enjeu. Les onze souches étant restées sur le terrain, les conclusions présentes dans ce rapport seront expliquées aux propriétaires lors d'un stage de vulgarisation FOGEFOR (formation à la gestion forestière) prévu en septembre. Ils pourront ainsi se rendre compte de l'impact du fomes sur les systèmes racinaires.

CONCLUSION

Les recherches sur les relations entre les systèmes racinaires, état physiologiques des arbres et présence d'un agent pathogène sont rares, surtout sur des arbres adultes du fait des contraintes matérielles, de temps, de coût et des difficultés techniques. Cette présente étude exploratoire a tenté d'y parvenir afin de trouver des solutions faces aux interrogations des propriétaires et des forestiers sur le diagnostic de la présence du fomes sur le douglas.
Inévitablement, *Heterobasidion annosum* fait partie intégrante des douglasaies gérées dans le Tarn et il n'y a aucune chance d'éradiquer complètement ce champignon des forêts. Le fomes ne peut pas être considéré comme seul responsable de l'ensemble des dépérissements du Douglas. C'est un parasite opportuniste, qui profite de la conjonction de plusieurs facteurs : plantation après une première génération d'épicéa, climat favorable à son développement, absence de traitements préventifs des souches et accidents climatiques provoquant l'affaiblissement de la douglasaie. Le plus souvent, il détruit lentement les systèmes racinaires mais ces signes de faiblesse ne sont pas très visibles au niveau des houppiers. Les arbres sont donc plus vulnérables au vent et au stress hydrique. La mise en place d'outils comme la typologie des taches permet au gestionnaire d'évaluer l'état d'altération de son peuplement pour envisager le traitement des souches au ROTSTOP®.
Des études antérieures suggèrent que la prise en compte des symptômes au niveau du houppier et la présence de carpophores sous-estiment grandement la présence réelle de la maladie (Bradford et al, 1978; Kurkela, 2002; Rönnberg et al, 2006). Il existe d'autres paramètres importants à considérer pour le gestionnaire comme la connaissance des problèmes de pourriture racinaire.
La connaissance de l'emplacement des infections, de la dynamique de colonisation du bois racinaire et caulinaire par le champignon développée dans cette étude peut être utile pour la modification de modèles de propagation de *Heterobasidion* dans les racines, par exemple « RotStand » (Pukkala et al, 2005). Ce modèle, applicable aux peuplements d'épicéa et pin sylvestre permet d'incorporer l'impact de la maladie dans la planification forestière.
Son adaptation aux peuplements de douglas sera possible grâce à la connaissance de paramètres du développement du champignon dans les racines.
Le projet FORRISK a donc été une bonne opportunité pour parfaire les acquis dans ce domaine.

BIBLIOGRAPHIE

- Angelier A., 2007. *Guide des sylviculteurs : Douglasaies françaises.* Office National des Forêts., Paris, 1-296.
- Aumonier T., 2010. *Recherche des champignons pathogènes dans les racines ligneuses.* Rapport final, 1-5.
- CRPF Midi-Pyrénées., 2011. Le douglas en futaie régulière. *Guide pratique de sylviculture*, Auzeville-Tolosane, 1-44.
- Delatour C., 1972. Essai de traitement d'un peuplement de pins maritimes contre le *Fomes annosus* a l'aide du *Peniophora gigantea*. *Revue Forestière Française*, Vol.XXI, 3, 1-2.
- Delatour C., 1972. Le *Fomes annosus*. *Revue Forestière Française*, Vol.XXIV, 1, 1-19.
- Delatour C., 1975. Comment lutter contre le *Fomes annosus* dans les enrésinements de première génération. *Revue Forestière Française*, Vol.XXVII, 1, 1-5.
- Delatour C. et al., 1998. Vingt ans de traitements de souches à l'urée contre *Heterobasidion annosum* en France. *Revue Forestière Française*, Vol. L, 3, 1-14.
- Département de la Santé des Forêts, 2013. Le fomes des résineux. *Information Santé des Forêts,* Paris, 1-6.
- Drénou C., (coord.) 2006. *Les racines, face cachée des arbres.* IDF édit., Paris, 1-335.
- Drénou C., Bouvier M., Lemaire J., 2011. La méthode de diagnostique ARCHI. *Forêt entreprise,* 200, 4-15.
- Drénou C., Rosa J., 2014. Comment le douglas réagit-il aux sécheresses ? *Forêt entreprise,* 216, 6-17.
- Gould P.J., Harrington C.A., 2008. Extending sapwood-Leaf area relationships from stems to roots in Coast Douglas-fir. *Annals of Forest Science*, 65, 1-8.
- Gori Y., et al., 2013. Fungal root pathogen (*heterobasidion parviporum*) increases drought stress in norway spruce stand at low elevation in the Alps. *European Journal of Forest Research,* 132, 607-619.
- Laget L., 2014. Test de l'efficacite du traitement ROTSTOP sur douglas dans le tarn. Rapport FORRISK, 1-28.
- Legrand P., 2006. L'importance de diagnostiquer le fomes. *La forêt privée*, 288, 29-33.
- Kallio, T., 1970. Aerial distribution of the root-rot fungus *Fomes annosus* (Fr.) Cooke in Finland. *Acta Forestalia Fennica* 107, 1-55.
- Korhonen K et al., 1994. Control of Heterobasidion annosum by stump treatment with "Rotstop", a new commercial formulation of Phlebiopsis gigantea. In: Johansson, M., Stenlid, J. (eds.) *Proceedings of the 8th international conference on root and butt rots*, August 9-16, 1993, Wik, Sweden and Haikko, Finland. INFO/REPRO, Uppsala, 675-683.
- Low J.D., 2002. *Fomes annosus*. *Forestry Commission*. Royaume – Uni, 1-4.
- Mathieu P., 2005. La place du douglas dans de Tarn. CRPF Midi-Pyrénées, 1-20.
- Niemelä, T. & Korhonen, K., 1998. Taxonomy of the genus *Heterobasidion*. Chapter 2, in: Woodward, S.; Stenlid, J.; Karjalainen, R.; Hüttermann, A., (eds.). *Heterobasidion annosum: Biology, ecology, impact and control*. CAB International, 1-589
- Oliva J., Samils N., Johansson U., Bendz-Hellgren M., Stenlid J., 2008. Urea treatment reduced *Heterobasidion annosum* s.l. root rot in Picea abies after 15 years. *Forest Ecology and Management,* 255, 2876-2882.
- Pratt, J.E., Johansson, M., Hütterman, A., 1998. Chemical control of *Heterobasidion annosum*. In: Woodward, S., *et al* (eds.) *Heterobasidion annosum: Biology, Ecology, Impact and Control*, 259-282. CAB International, Wallingford, UK.

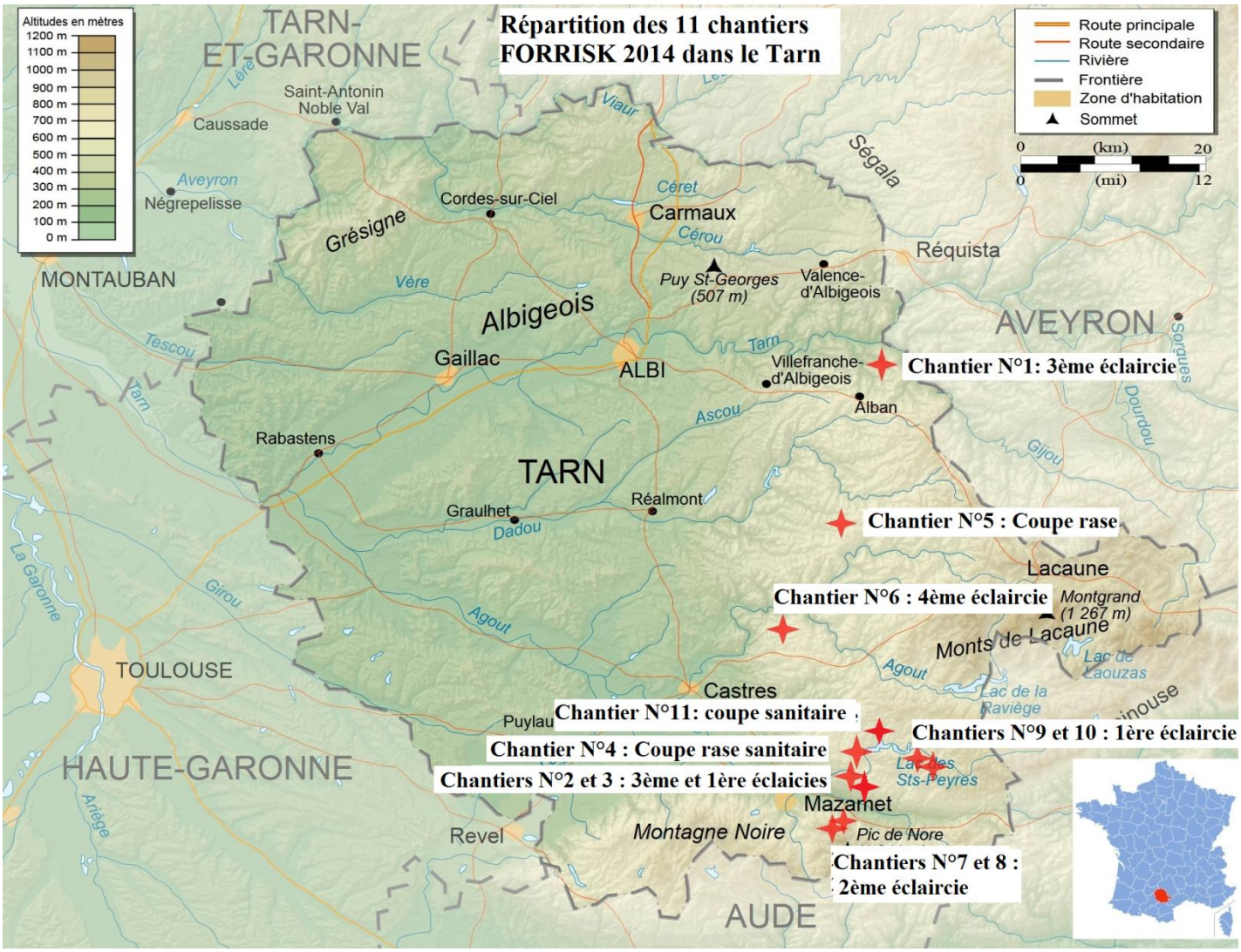
- Pukkala, T., Möykkynen, T., Thor, M., Rönnberg, J., Stenlid, J., 2005. Modeling infection andspread of *Heterobasidion annosum* in even-aged Fennoscandian conifer stands. *Canadian Journal of Forest Research* 35, 74-84.
- Rishbeth J., 1951. Observations on the biology of *Fomes annosus*, with particular reference to East Anglian pine plantations. II. Spore production, stump infection, and saprophytic activity in stumps. *Annals of Botany,* 15, 1-21.
- Rishbeth J., 1952. Contrôle de *Fomes annosus Fr*. *foresterie,* 25, 41-50.
- Soutenon A., 1994-1996. Expérimentation de lutte contre *Heterobasidion annosum* par traitement des souches. *Protocole technique*. Cemagref. Grenoble, 1-50.
- Soutrenon A et al., 1998. Evaluation de l'efficacité de trois traitements de souches contre le fomes (*Heterobasidion annosum*). *Revue Forestière Française*, Vol. L, 4, 1-11.
- Soutrenon A., et al., 2000. Efficacité de trois traitements de souches contre le fomes (*Heteroasidion annosum*) sur le Pin maritime. *Revue Forestière Française*, Vol.LII, 1, 1-10.
- Vainio E.J., 2008. Ecological impacts of *Phlebiopsis gigantea* biocontrol treatment against *Heterobasidion spp.* as revealed by fungal community profiling and population analyses. *Dissertationes Forestales* 63, 1-80.
- Woodward S., Stenlid J., Karjalainen R., Hüttermann A., 1998. *Heterobasidion annosum: Biology, ecology, impact and control*. CAB International, Wallingford, UK. ISBN-0-85199-275-7.

ANNEXES

Sommaire des annexes :

- *ANNEXE 1 : Carte de localisation des 11 sites d'étude dans le Tarn (L.Laget, 2014)*
- *ANNEXE 2 : Clé de détermination des types ARCHI pour le Douglas (Pseudotsuga menziessi) (C. Drénou, 2013)*
- *ANNEXE 3*: *Illustration de quelques types de taches (Photos C. Drénou, 2013 et L. Laget 2014)*

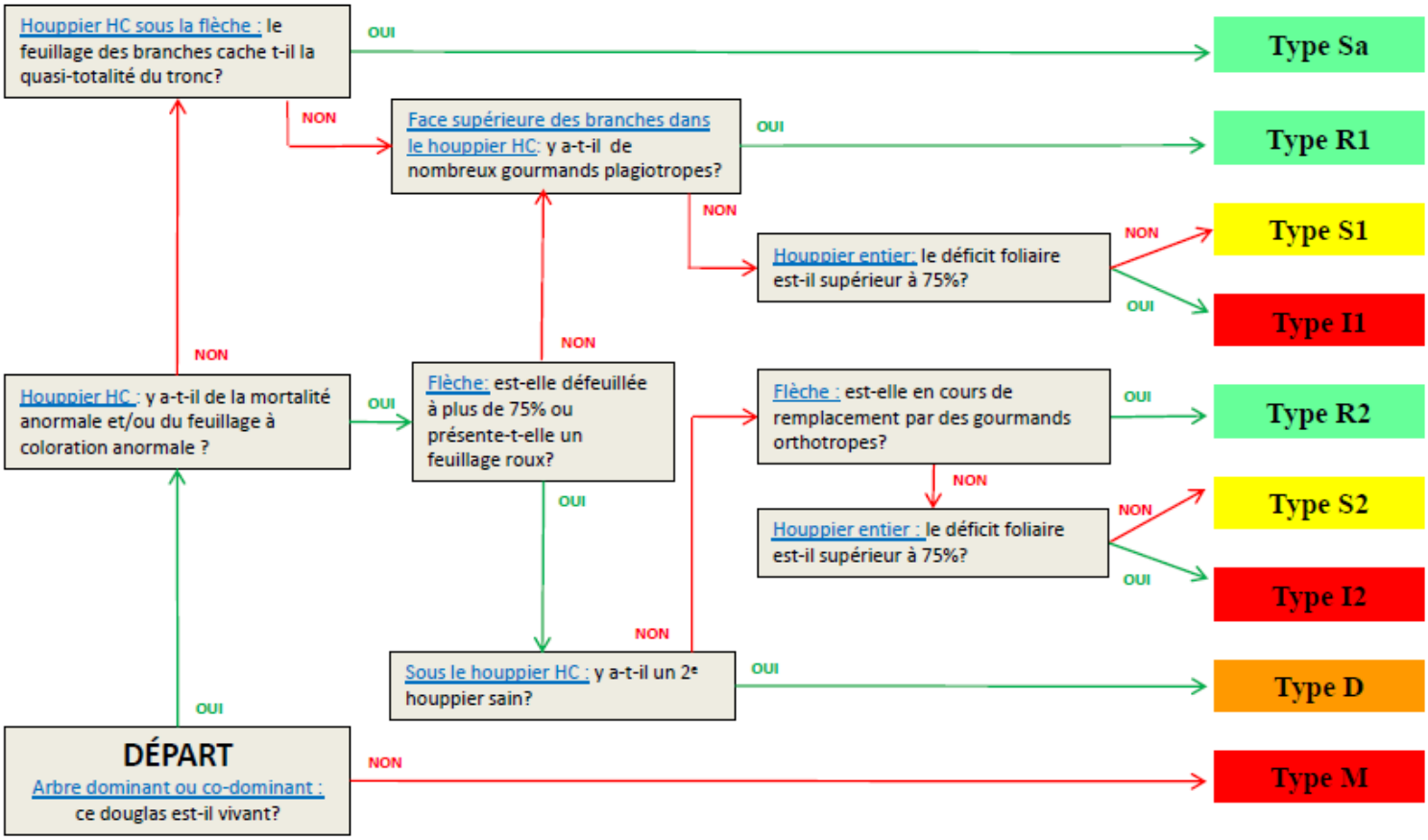
ANNEXE 1 : Carte de localisation des 11 sites d'étude dans le Tarn (L.Laget, 2014)



N° chantier	Type de coupe	Age du peuplement
1	3ème éclaircie	45
2	3ème éclaircie	38
3	1ère éclaircie	21
4	Coupe rase	70
5	Coupe rase	50
6	4ème éclaircie	56
7	2ème éclaircie	36
8	2ème éclaircie	38
9	1ère éclaircie	30
10	1ère éclaircie	30
11	Coupe sanitaire	47

ANNEXE 2 : Clé de détermination des types ARCHI pour le Douglas (Pseudotsuga menziessi) (C. Drénou, 2013)

Clé de détermination des types ARCHI chez le Douglas (*Pseudotsuga menziesii*)



Type Sa: sain; **Type R1 et R2:** résilient; **Type S1 et S2:** stressé; **Type I1 et I2:** dépérissement irréversible; **Type D:** descente de cime; **Type M:** mort
Houppier HC ou houppier Hors Concurrence : partie du houppier excluant les zones inférieures ou latérales soumises à des phénomènes de concurrence.
Flèche : partie sommitale du tronc comprenant les six derniers étages de branches.
Nombreux gourmands plagiotropes : gourmands plagiotropes présents sur plus de 50% des A2 et les recouvrant sur plus du quart de leur longueur.
2e houppier : structure constituée de branches et de gourmands vigoureux, ces derniers étant hiérarchisés entre eux (soit dominants, soit dominés).

Juillet 2013

Type sain : Sa

Type R1: le développement de gourmands plagio sur la face supérieure des branches permet à celles-ci de reconstituer leur feuillage. A noter la présence de gourmands insérées directement sur le tronc. Ce dernier se retrouve donc caché par du feuillage!

Type S1

Les branches sans draperies ne cachent pas le tronc. Il ya des gourmands plagio sur la face supérieure des branches mais peu nombreux.

Type I1

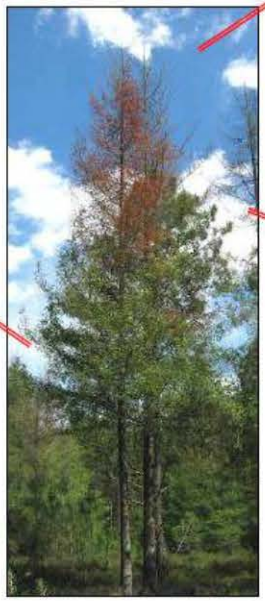
Pas de mortalité ni de coloration anormale, mais une transparence à plus de 75% de déficit foliaire. Quasi-absence de gourmand.

Type R2

Flèche en cours de remplacement par un gourmand ortho

Type D

Typique d'un milieu ouvert: les branches basses se redressent et, avec les gourmands ortho du tronc, forment un nouvel houppier



Type S2

Flèche rouge, mais déficit foliaire du houppier entier inférieur à 75%

Type I2

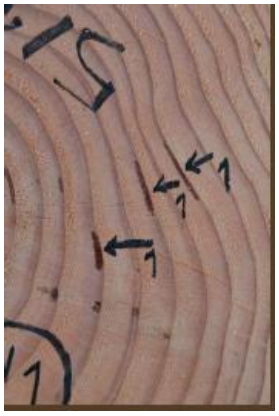
ANNEXE 3 : Illustration de quelques types de taches (Photos C. Drénou, 2013 et L. Laget 2014)

Type 1 : sain

Type 2 : excroissance en flamme sur le pourtour du duramen

Type 3 : Altérations brunes en flamme sur le pourtour du duramen

Type 3 +: Altérations brunes intégrées au duramen + décolorations blanchâtres



Type 5 : Taches imbibées de résines dans le sens des cernes

Type 8 : Coloration en flamme au centre (liée à un cerne)

Résumé

Le fomes (*Heterobasidion annosum, Fr.*) cause de graves dégâts dans les forêts de nombreux pays. On connaît depuis longtemps les pertes sévères qu'il peut occasionner dans les peuplements d'épicéas. Les forestiers s'inquiètent de son extension actuelle et des dommages qu'il peut provoquer sur les essences qui ont supplanté l'épicéa comme le douglas. Le projet FORRISK a été une opportunité pour préciser son impact sur cette essence.
L'objectif de cette étude est d'améliorer le diagnostic de présence du champignon en cas de dépérissement. Pour cela, les signes de dépérissements visibles au niveau de l'état des houppiers ont été étudiés et mis en liens avec la présence de décolorations du bois au niveau des souches ou de détériorations éventuelle des racines. Suite à un dessouchage et un décorticage nous avons tenté de comprendre la dynamique de colonisation du bois racinaire et caulinaire par le champignon et les dégâts qu'il provoque sur le système racinaire.
La corrélation entre état sanitaire des houppiers et présence de décolorations au niveau des souches n'a pas été établit. La présence du champignon dans le bois ne perturbe à priori pas l'état physiologique de l'arbre. Nous avons vu par la suite que le fomes est omniprésent puisque 60 % de souches étudiées présentaient des tâches d'altération. Même si chez le douglas, ce champignon provoque pour l'instant un faible impact économique au niveau la dégradation du bois, il est primordial de mieux appréhender son action sur le système racinaire. Sur les 11 souches étudiées 71% des pivots observés était infectés par le fomes. Or, les racines ligneuses d'un arbre ont trois rôles principaux : l'ancrage mécanique au sol, le stockage de réserves et la conduction de l'eau chargée d'éléments minéraux. Les dégâts dus à *Heterobasidion* ont vraisemblablement des conséquences négatives sur ces trois fonctions entraînant alors un affaiblissement général de l'arbre.

Mots clés **:** Douglas vert (Pseudotsuga menziesii), Midi-Pyrénées, Heterobasidio annosum (Fr.) dépérissement, diagnostic visuel, altérations des souches, pourriture racinaire, traitement des souches.

Abstract

Fomes (*Heterobasidion annosum, sl*) causes severe damage to forests in many countries. It has long known the severe losses that may result in spruce stands. Foresters are afraid of its current expansion and the damage it can cause to trees that have supplanted as Douglas-fir.
The project FORRISK was an opportunity to clarify its impact on this species.
The aim of this study is to improve the diagnosis of the presence of the fungus in the event of dieback. For this, the visible signs of dieback at the crown condition were studied and put in links with the presence of discoloration of wood at the stem or damage on roots. Following a stumping and shelling, we tried to understand the dynamics of colonization of the root and wood by the fungus and the damage it causes to the root system.
The correlation between health status and presence of crown discoloration at the stem has not been established. The presence of the fungus in the timber does not disturb to the physiological state of the tree. Next, we saw that fomes is ubiquitous because 60% of the strains studied showed alteration tasks. While in Douglas, this fungus causes yet little economic impact on the degradation of wood, it is essential to better understand its effect on the root system. On the 11 strains studied, 71% roots observed were infected by fomes. However, woody roots of a tree have three main roles: the mechanical ground anchor, storage of reserves and the conduction of water containing minerals. Damages due to *Heterobasidion* likely have a negative impact on these three functions which causing a general weakening of the tree.
Keywords*:* Douglas-fir (Pseudotsuga menziesii), Midi-Pyrenees, *Heterobasidion annosum sl*., dieback, visual diagnoses, alteration of stumps, root rot, stump treatment.