

Evaluation multicritère de moyens innovants de travail du sol avant plantation en contexte de blocage par la végétation concurrente.

Les projets ALTER et PILOTE.



Mémoire de dominante d'approfondissement Gestion Forestière.

Source photographie : site internet : Ecobalade, molinie bleue

Evaluation multicritère de moyens innovants de travail du sol avant plantation en contexte de blocage par la végétation concurrente.

Les projets ALTER et PILOTE.

Mémoire de dominante d'approfondissement Gestion Forestière.

Organisme d'accueil :

Office National des Forêts, pôle de Recherche Développement et Innovation de Boigny sur Bionne.

Apprentissage encadré par

Mr. Gilbert DOUZON, chargé de Recherche, Développement, Innovation au pôle de Boigny sur Bionne, maître d'apprentissage, ONF.

Tutorat assuré par

Mr. Yves EHRHART, AgroParisTech-ENGREF, département SIAFEE, tuteur pédagogique.

Résumé

Dans le passé, l'utilisation massive des herbicides était un moyen efficace et peu coûteux de se débarrasser de la végétation envahissante avant plantation, mais dans le contexte actuel, ces derniers sont amenés à disparaître des forêts. Les projets ALTER et PILOTE ont vocation à tester l'efficacité technique d'un travail du sol avant plantation dans des situations de blocage (ALTER et PILOTE), mais aussi de tester et proposer des moyens efficaces de préparation mécanique des sols avant plantation, viables sur le plan économique (PILOTE). Les résultats d'ALTER ont montré que pour lutter contre la fougère aigle, le Scarificateur Réversible monté sur mini pelle s'est montré efficace à la fois en termes de contrôle de la végétation et en termes de croissance et survie des plants. Le billonnage avec mini pelle ne semble pas nécessaire dans des contextes d'invasion par la fougère aigle, mais ce dernier apparaît primordial dans des stations hydromorphes envahies par la molinie, notamment par la mise hors d'eau que crée le billon pour les plants. En comparaison à ces modalités de préparation du sol testées, l'herbicide montre un contrôle de la végétation et une survie des plants proche, mais permet une croissance en hauteur et en diamètre supérieure, ce qui peut remettre en cause l'efficacité du décompactage sur le plus jeune âge. Malgré leur efficacité, les outils montés sur mini-pelle s'avèrent très chers : entre 1700 et 3300 €/ha pour le Scarificateur Réversible et il faut rajouter entre 2000 et 4000 €/ha pour le billonnage. Comparé à cela, le coût d'un herbicide ne semble pas dépasser les 500 € (avec deux interventions). Pour une utilisation dans le cadre de la gestion, réduire les coûts est donc nécessaire. Le Culti3B, tracté par un tracteur, apparaît donc comme une solution viable, puisqu'il permet une décompactation en profondeur ainsi que la formation d'un billon en surface, et son coût technique à l'hectare ne semble pas dépasser les 400 €.

In the past, massive use of herbicides was an effective and cheap way to get rid of intrusive vegetation before planting, but in the current context, they are no longer going to be used in the forests. The ALTER and PILOTE projects aim at testing the technical efficiency of soil preparation before planting in places where the vegetation is intrusive (ALTER and PILOTE), but also to test and to propose effective ways of mechanically preparing the soil in an economically viable way (PILOTE). The results obtained by ALTER showed that to get rid of *Pteridium aquilinum*, the « Scarificateur Reversible » mounted on a compact excavator is also effective in terms of vegetation control and in terms of growth and survival of plants. Ridging with a compact excavator doesn't seem necessary in contexts of fern invasion, but seems essential in hydromorphics forest stations covered by *Molinia caeruleae*, in particular by the topping out of plants created by the ridge and the vegetation control. In comparison to these methods of soil preparation, the weed killer shows a rather similar vegetation control and seedling survival, but enables a superior growth, which can put into question the efficiency of decompression on young plants. In spite of their efficiency, tools mounted on compact excavators are very expensive: from 1700 to 3300 €/ha for the Scarificateur Reversible, and it is necessary to add 2000 to 4000 €/ha for ridging. In comparison, the cost of a weed killer doesn't seem to exceed 500 € (for two uses). For use in forest management, reducing the cost is necessary. The Culti3B, towed by a tractor, appears to be a viable solution because it enables one to decompress the soil in depth and to form a ridge, and its technical cost per hectare doesn't seem to exceed 400 €.

Remerciements

Tout d'abord, je tiens particulièrement à remercier l'Office National des Forêts pour les 3 années que j'y ai passé en tant qu'apprenti, et notamment le pôle de Recherche Développement et Innovation de Boigny, dans lequel j'ai évolué durant ces trois années. Je pense notamment à ses membres actuels ou anciens, à savoir Quentin Girard, qui a été mon maître d'apprentissage en première année, avant son départ à l'arboretum des Barres, à Gilbert Douzon, qui a assuré mon encadrement à l'ONF les années suivantes et m'a appris tant de choses par son expérience, à Lucie Arnaudet, la chef du pôle, qui m'a encadré de manière remarquable, mais aussi Daniel Devanne, avec qui j'ai beaucoup ri, Alexandre Durin et Aurore Calas, récemment arrivée. Je tiens aussi à remercier particulièrement Catherine Collet et Noé Dumas ainsi que le reste de l'équipe du pôle RENFOR (ancien pôle MGVF) de l'INRA de Nancy, pour leur accueil et leur encadrement durant la majeure partie de ces 6 derniers mois d'apprentissage. J'ai en effet travaillé en étroite relation avec le pôle RENFOR de Nancy au sein même de leurs bâtiments durant la majeure partie de mes 6 derniers mois. Je tiens aussi à remercier l'ensemble des collègues de la recherche qui ont pu m'aider de près ou de loin dans la réalisation de ce rapport. Je pense notamment à Erwin Ulrich, Jérôme Piat, Claudine Richter, Christine Deleuze, Vincent Boulanger, Jean Pierre Renaud.

J'adresse aussi mes remerciements tout particulièrement à Mr Yves Ehrhart, qui a été mon tuteur durant mes trois années de formation à AgroParisTech, mais aussi à l'ensemble de l'équipe des enseignants et du CFA de l'école.

Ce rapport signe pour moi la fin de 3 années passées en alternance entre AgroParisTech et l'Office National des Forêts et c'est avec beaucoup d'excellents souvenirs que je vais quitter ces deux institutions. En effet, j'y ai appris énormément et vécu tant d'expériences. Je n'oublierais jamais tous ce que les personnes que j'ai citées précédemment et bien d'autres encore ont pu faire pour moi.

Table des matières

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Introduction | 1 |
| 2 | Matériel et méthode..... | 4 |
| 2.1 | Le projet ALTER..... | 4 |
| 2.1.1 | Contexte et objectifs | 4 |
| 2.1.2 | Dimension du projet | 4 |
| 2.1.3 | Expérimentation | 5 |
| 2.1.4 | Configuration des dispositifs :..... | 7 |
| 2.2 | Le projet PILOTE..... | 9 |
| 2.2.1 | Contexte et objectifs | 9 |
| 2.2.2 | Dimension du projet | 9 |
| 2.2.3 | Expérimentation | 10 |
| 2.2.4 | Configuration des dispositifs..... | 14 |
| 2.3 | Analyses dendrométriques, projet ALTER. | 14 |
| 2.3.1 | Mesures effectuées | 14 |
| 2.3.2 | Homogénéisation des données | 15 |
| 2.3.3 | Détermination des modèles à suivre..... | 16 |
| 2.3.4 | Présentation des résultats :..... | 17 |
| 2.4 | Suivi de la dynamique de la végétation, projet ALTER..... | 19 |
| 2.4.1 | Traitement des données | 20 |
| 2.5 | Analyse des temps de travail du sol et estimation des coûts PILOTE..... | 24 |
| 2.5.1 | Mesures effectuées | 25 |
| 2.5.2 | Détermination du temps productif..... | 26 |
| 2.5.3 | Détermination du coût technique..... | 27 |
| 3 | Résultats | 28 |
| 3.1 | Effet du travail du sol | 28 |
| 3.1.1 | Chênes en contexte d’envahissement pas la fougère aigle | 28 |
| | | 29 |
| 3.1.2 | Pins en contexte d’envahissement par la fougère aigle | 31 |
| | | 32 |
| 3.1.3 | Chênes en contexte d’envahissement par la molinie | 34 |
| 3.1.4 | Pins en contexte d’envahissement par la molinie | 37 |
| 3.1.5 | Conclusions transversales sur les modalités testées dans le réseau ALTER | 39 |
| 3.2 | Synthèse des coûts techniques..... | 40 |
| 3.2.1 | Détermination des coûts techniques des autres outils testés dans PILOTE : | 43 |
| 3.2.2 | Synthèse sur les coûts techniques des outils PILOTE..... | 48 |
| 3.3 | Synthèse multicritère sur les modalités testées dans le cadre du projet ALTER..... | 50 |
| 3.3.1 | Représentations graphiques | 51 |

| | | |
|---|--|----|
| 4 | Discussion | 51 |
| 5 | Conclusion..... | 56 |
| | Bibliographie..... | 58 |
| | Annexe 1 : Résultats de l'ANOVA pour la comparaison de modèles..... | 60 |
| | Annexe 2 : Protocoles de suivis chronométriques..... | 61 |
| | Annexe 3 : Carnet de bord pour le suivi des temps de travail du sol par les conducteurs d'engins. | 62 |
| | Annexe 4 : Résultats de suivi des temps de plantation..... | 63 |
| | Annexe 5 : Résultats de croissance en hauteur des dispositifs ALTER par contexte..... | 67 |

Index alphabétique des sigles

ONF : Office National des Forêts

MGVF : Mission de Gestion de la Végétation en Forêt

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière.

AMM : Autorisation de Mise sur le Marché

RENFOR : RENouvellement des peuplements FORestiers

INRA : Institut National de Recherche Agronomique

ALTER : ALternative aux hERbicides

PU : Placettes Unitaires

FCBA : Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement

SF : Société Forestière

IDF : Institut pour le Développement Forestier

AIC : Critère d'information d'Akaike (indicateur statistique)

ETF : Entreprises de Travaux Forestiers

CETEF : Centres d'Etudes Techniques et Economiques Forestières

FFN : Fond Forestier National

1 Introduction

Le renouvellement des forêts par la plantation est une des clefs pour répondre aux enjeux actuels qui pèsent sur le secteur forestier, avec d'une part le contexte de changement climatique, et d'autre part l'augmentation de la demande de la filière bois. La plantation permet de mettre en place de nouvelles essences ou provenances mieux adaptées localement aux futures conditions climatiques, mais aussi pouvant permettre des cultures généralement plus productives. Parallèlement à cela, la plantation paraît être un recours efficace pour réimplanter un peuplement forestier viable dans des zones ayant subi des épisodes traumatisants engendrant un envahissement par la végétation concurrente. Actuellement en France, entre 30 000 et 40 000 hectares de forêts sont renouvelés par plantation (Agreste, 2013).

La concurrence de la végétation accompagnatrice

La végétation accompagnatrice est constituée de l'ensemble des espèces végétales présentes à côté des essences forestières destinées à la production, encore appelée essences objectifs (Frochet, 2002). Quant à elle, la strate herbacée est définie comme la végétation accompagnatrice dont la hauteur est inférieure à 2 m. Dans 36% des points de l'inventaire forestier, son recouvrement est supérieur à 70% de la surface du sol (32725 points, IGN 2014). Lors de l'ouverture des peuplements, suite à une coupe forestière ou après des épisodes climatiques tels que les tempêtes, sécheresses ou des dépérissements causés par les maladies, se met en place une strate herbacée composée de plantes ubiquistes, dominée majoritairement par des espèces héliophiles herbacées ou arbustives envahissantes (Gama, 2006). Dans les plantations hors zone forestière, comme des reboisements de terres agricoles ou en reconversion, la strate herbacée est majoritairement composée d'espèces de friche ou d'anciennes cultures, majoritairement dominées par des graminées pérennes (Gama, 2006). Cette végétation accompagnatrice est redoutablement concurrente lors de la phase juvénile des peuplements forestiers. Une fois en place, elle exerce une concurrence à la fois sur l'accès à la lumière (Gaudio, 2011), mais aussi sur la ressource en eau. Par exemple, la fougère aigle intercepterait 12% des pluies (Gash and Stewart, 1977) et un couvert de graminées 4-5% (Schnock, 1970 in Aussenac, 2000). En effet, par sa position monopoliste en surface, la strate herbacée a plus de facilité pour prélever les éléments minéraux et surtout intercepter l'eau de surface dont elle a besoin (Gama, 2006). La concurrence vis-à-vis de la lumière intervient lorsque la végétation concurrente crée un ombrage sur les plants forestiers supérieur à leur seuil de tolérance. Cela intervient majoritairement lorsque les jeunes plants ou semis sont submergés par une strate composée d'herbacées dicotylédones telle que les ronces, ou par des espèces comme la fougère aigle, ayant un fort pouvoir d'ombrage (Gama, 2006 ; Gaudio, 2011). En outre, la strate herbacée peut avoir un effet allélopathique sur les jeunes plants forestiers. Il s'agit d'un effet inhibiteur que peuvent avoir certaines espèces par le biais de composés biochimiques, pouvant, par exemple, se caractériser par un blocage de la germination et de la croissance ou une nécrose des racines courtes absorbantes et entraîner la mort des jeunes plants ou semis (Moyses, 2018).

La place des herbicides

Le contrôle de cette strate herbacée, lorsque celle-ci s'avère bloquante, est donc primordial pour permettre une bonne reprise des plantations forestières. Un des moyens qui s'est avéré efficace au cours du XXème siècle pour lutter contre la végétation envahissante a été l'utilisation des herbicides, issus de l'agriculture (Wehrlen, 2015). Pour illustration, en 2009, cette utilisation en forêt est limitée, avec environ 50 000 hectare de peuplements forestiers traités chaque année, à comparer aux 15.5 millions d'hectares que représentent la forêt française (Dodet, 2009), et ce chiffre a vocation à être encore réduit. En effet, l'utilisation des produits phytopharmaceutiques dans le secteur forestier est de plus en plus réduite et contestée. Le plan Eco Phyto, lancé en 2009, vise à réduire de 50% l'utilisation de ces produits à l'horizon 2050. L'Asulame, herbicide permettant de contrôler spécifiquement la fougère aigle, ne dispose plus de son AMM (Autorisation de Mise sur le Marché) depuis le 31 décembre 2012 (Journal Officiel de la République Française n°0285 du 06/11/2011 – NOR AGRG1129999V). Parallèlement à cela, la forêt est considérée par le public comme un des derniers sanctuaires biologiques et encore non anthropisé, la pression sociale et politique est donc forte et amène à trouver des alternatives viables aux

produits chimiques en forêt. La volonté interne de l'ONF, principal acteur forestier sur le territoire français, vise aussi à réduire, et même à ne plus utiliser les herbicides sur les forêts qu'elle gère.

Les moyens actuels de lutte contre une strate herbacée bloquante

A tort ou à raison, l'utilisation des herbicides dans le secteur forestier est compromise. Il paraît donc indispensable d'organiser la recherche pour trouver des alternatives pérennes à la fois sur le plan technique, mais aussi économique (Dodet, 2009), tout en étant respectueuses de l'environnement.

Les méthodes alternatives actuelles de lutte contre la végétation concurrente sont nombreuses et passent souvent par la mécanisation, mais la gestion courante en utilise un nombre restreint. Cela passe par l'utilisation de tracteurs, avec des outils souvent mal adaptés pour ce type de travail, ou par des interventions manuelles comme le bâtonnage de la fougère aigle. D'autres méthodes, telles que le paillage ou la mise en place d'un couvert végétal contrôlé sont encore utilisées.

Pour lutter contre la fougère aigle, le travail du sol avec des charrues à socs ou à disques est souvent utilisé et est surtout efficace dans les sols sableux. Dans des sols plus lourds, ce type d'outils d'avère moins efficace car ne permet pas un travail assez profond (Wehrle, 2015). Le système racinaire de la fougère est en effet constitué de deux niveaux de rhizomes dont le plus profond peut atteindre 60 cm sous la surface. Pour éradiquer de manière durable cette espèce, il convient donc d'utiliser des outils pouvant détruire et arracher ce réseau de rhizomes. Pour des espèces comme la molinie, présente dans des contextes stationnels souvent acides et hydromorphes, les méthodes de travail du sol avant la plantation étaient souvent lourdes et coûteuses et la préparation du terrain consistait souvent à un herbicide suivi d'un labour forestier croisé (Laybourne, 2005).

Organisation de la recherche

Pour répondre aux attentes des gestionnaires en matière de solutions de contrôle efficace de la végétation concurrente avant plantation, la recherche forestière s'est organisée. L'équipe RENFOR (RENovellement des peuplements FORestiers) de l'INRA (Institut National de Recherche Agronomique) ainsi que les pôles de recherche et développement de l'ONF, ont mis en place depuis près de 10 ans deux réseaux expérimentaux majeurs à vocation de tester et trouver de nouvelles pratiques de travail du sol dans des contextes en situation de blocage du renouvellement par la végétation concurrente.

Le projet ALTER (ALternative aux hERbicides) a pour vocation d'étudier la faisabilité technique de substituer les herbicides par un travail du sol adapté pour s'affranchir de la végétation concurrente. Pour cela, le projet dispose d'un réseau de sites expérimentaux où sont comparés de manière équivalente une modalité herbicide, une modalité témoin (sans interventions), une modalité dite locale (gestion courante), avec deux modalités de travail du sol à l'aide d'outils montés sur mini-pelle. La première modalité de travail du sol consiste à effectuer un travail à plat, en profondeur, par scarification du sol. La seconde consiste à rajouter à la première la formation d'un billon bombé en surface à l'aide d'une dent de sous solage. Les 6 dispositifs ALTER sont installés dans des contextes de blocage par la fougère aigle ou la molinie uniquement, car ces contextes sont considérés comme étant parmi les plus bloquants. ALTER ne vise à étudier que la faisabilité technique de remplacer les herbicides par un travail du sol. Par conséquent, les suivis sont effectués sur la survie, la croissance et le recouvrement de la strate herbacée. La faisabilité économique, quant à elle, n'est pas étudiée. Pour cela, le projet PILOTE a été initié en 2013 et vise à tester plus largement l'application d'outils innovants de contrôle de la végétation concurrente. L'objectif est alors de proposer et de tester de nouvelles méthodes de travailler le sol avant plantation en vue de promouvoir ces outils vers la gestion. L'étude porte donc sur la faisabilité technique des outils, mais aussi sur leur viabilité économique. Le panel d'outils testés est alors beaucoup plus large que dans ALTER, mais aussi sur des contextes de blocage plus diversifiés. L'accent est aussi mis sur des outils tractés, car moins coûteux.

Objectif de l'étude et démarche générale

L'objectif de l'étude est de proposer un état des lieux sur le contrôle de la végétation concurrente avant plantation à partir des données disponibles dans les réseaux PILOTE et ALTER. Dans un premier temps, l'objectif est de proposer un bilan technique du contrôle de la strate herbacée en contexte d'invasion par la molinie et la fougère, à partir des données de croissance, survie et recolonisation de la végétation du projet ALTER. Dans un second temps, les suivis des phases de travail du sol des outils étudiés dans PILOTE, permettront à la fois d'en établir le coût technique, mais aussi de proposer une synthèse multicritère (technique, économique et environnementale) des modalités étudiées dans ALTER.

2 Matériel et méthode

Les projets ALTER et PILOTE ont la spécificité d'avoir été mis en place en réseaux. Leur objectif est de répondre aux problématiques locales autour des différents dispositifs, mais aussi d'apporter des réponses plus générales quant à l'utilisation du travail du sol pour contrôler la végétation concurrente et permettre une bonne reprise des plantations, tout en étant viable économiquement. La partie méthodologie qui va suivre abordera la manière dont ont été utilisées les données disponibles pour fournir des résultats interprétables. Elle détaillera aussi comment des problèmes relatifs à l'expérimentation forestière (années de gel, homogénéisation dans les prises de mesure, etc) ont pu être pris en compte dans les analyses.

2.1 Le projet ALTER

2.1.1 Contexte et objectifs

Le projet ALTER a été initié en 2009 par l'ONF, en partenariat avec l'INRA, dans un contexte de volonté de réduction des herbicides en forêt par l'utilisation de travaux mécaniques innovants tout en limitant le tassement des sols. L'objectif principal est d'étudier des méthodes de gestion de la végétation concurrente avant plantation, qui soient en accord avec les contraintes actuelles de gestion, et environnementales (objectif opérationnel). Le développement de ces méthodes alternatives passe par l'étude des effets compétitifs de la végétation accompagnatrice sur la croissance et la survie des jeunes plants (objectifs scientifiques) (projet ALTER, annexe technique, 2012).

Pour étudier l'effet du travail du sol sur la survie et la croissance en contexte difficile, le projet ALTER se focalise sur des contextes stationnels particuliers : les stations acides dominées par des végétations à base de molinie et de fougère aigle. L'aspect concurrentiel de la végétation herbacée de ces types de station est reconnu comme étant parmi les plus bloquants pour la régénération (projet ALTER, annexe technique, 2012). Ces contextes sont présents à travers tout le territoire français et représentent des surfaces importantes. Le projet a donc pour objectifs spécifiques de tester les méthodes alternatives proposées dans différentes situations qui varient selon :

- Le contexte du renouvellement : gestion courante, post tempête, peuplement déperissant.
- La végétation dominante : molinie ou fougère.
- Les essences installées : chênes ou pins.

L'ensemble de ces différents facteurs sera partiellement croisé dans le plan expérimental du projet. Les protocoles d'installation et de mesures seront communs entre les différents dispositifs expérimentaux du réseau, pour permettre des comparaisons entre sites et estimer la généralisation possible des résultats (projet ALTER, annexe technique, 2012).

2.1.2 Dimension du projet

Le projet est basé sur une série de dispositifs installés dans 4 régions et gérés conjointement par les différents partenaires. La carte ci-dessous montre la répartition sur le territoire des différents dispositifs expérimentaux. Les types de végétation étudiés dans chaque région ont été sélectionnés en fonction de l'importance des surfaces concernées et des problèmes techniques rencontrés localement (projet ALTER, annexe technique, 2012).

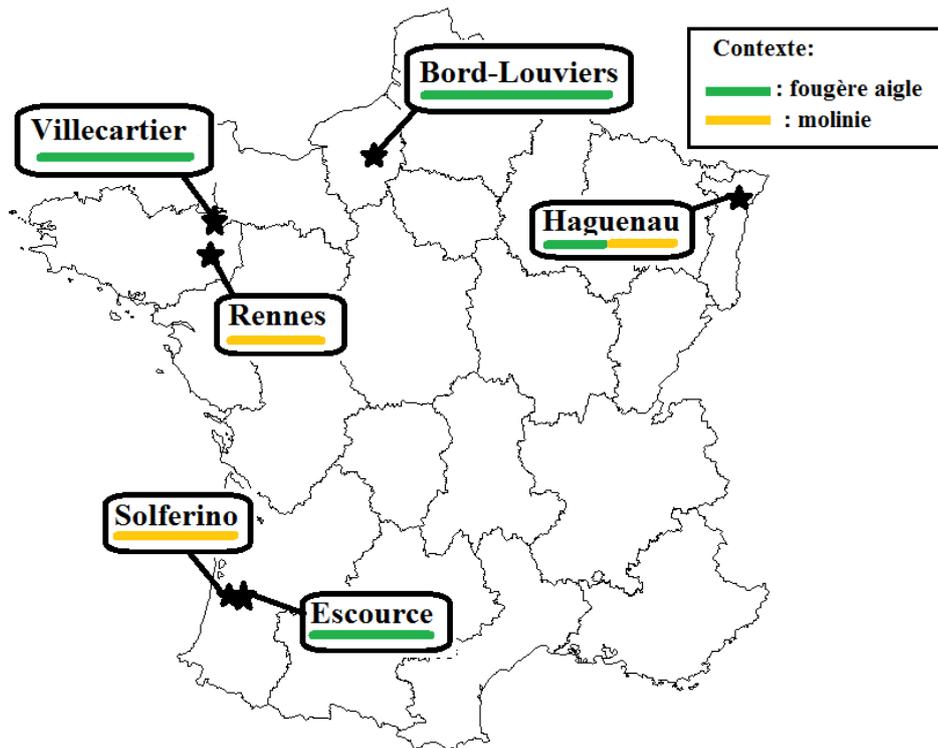


Figure 1: Carte du réseau ALTER.

Sur le site d'Hagenau, 3 dispositifs expérimentaux sont installés dans 3 parcelles différentes.

- Parcelle 150 : contexte fougère
- Parcelle 32 : contexte molinie
- Parcelle 35 : contexte mélange molinie fougère avec dominance de la molinie.

Les deux sites Aquitains ne seront pas étudiés dans la suite du projet. A Solférino, il y a eu des problèmes important de mortalité lors de la plantation (plants gelés), suivis de regarnis décalés dans le temps, ne permettant pas des suivis expérimentaux de qualité. A Escource, le dispositif a été suivi de manière trop irrégulière et certaines années n'ont pas été mesurées.

2.1.3 Expérimentation

Sur l'ensemble des dispositifs ALTER, les modalités testées sont communes, avec 2 essences par site (pin et chêne). Les différentes modalités testées sont :

| Modalité | Caractéristiques techniques | Travail/Résultat attendu | Photo |
|---|--|---|---|
| Témoin « TE » | - aucune intervention mécanique de travail du sol - | Broyage des frondes sèches avant plantation sur la ligne de plantation. | |
| Sol nu, Herbicide « H » | -Avant la plantation : traitement à l'Asulame (sites en contexte fougère) ou au glyphosate (sites en contexte molinie). -Année suivant la plantation : traitement au Glyphosate. | Sol traité chimiquement la première année puis maintenu à nu par des traitements chimiques ou manuels les autres années. | |
| Scarificateur réversible « SR » | -Outil adaptable sur mini-pelle. -Composé de différentes dents sur support de 75 cm de large : -trois dents principales de 40 cm avec obus de sous solage aux extrémités. -deux dents secondaires intercalées de 20 cm. | Elimine la végétation par arrachage et réalise ensuite un travail du sol sur 40 cm de profondeur par griffage ou sur 60 cm par bêchage. <i>(Photo : Projet PILOTE, 2017)</i> |  |
| Sous Soleur multifonction (suite au Scarificateur Réversible) (« SR+3B ») | -Outil adaptable sur mini-pelle. -Peigne désherbeur large de 60 cm. -Deux ailettes triangulaires biseautées de part et d'autre de la dent. -Obus central de sous solage à l'extrémité de la dent. | Technique qui consiste à travailler le sol en profondeur et à constituer en surface un billon surélevé d'environ 30 cm. <i>(Photo : Projet PILOTE, 2017)</i> |  |
| Technique Locale « LO » | Site | Détail de la modalité « Technique Locale » | |
| | Bord-Louviers | -Traitement Asulame contre la fougère en été. -Broyage de la fougère à 10 cm du sol avant la plantation. | |
| | Haguenau | Broyage de la molinie en septembre, suivi d'un labour forestier croisé avec une charrue à disques. | |
| | Villecartier | Broyage puis travail superficiel du sol au cover-crop forestier (outil à disques léger de type pulvériseur). | |
| | Rennes | -Mise en andain de la végétation. - Travail superficiel du sol au cover-crop forestier (outil à disques léger de type pulvériseur). | |

Tableau 1 : Description des modalités ALTER.

Une modalité « Couverture Végétale » a aussi été mise en place sur tous les dispositifs, excepté Escource et Solférino. Elle consiste à installer un mélange de plantes agricoles commerciales auquel du sarrasin et de l'avoine est ajouté. La végétation présente est éliminée au Scarificateur Réversible avant la plantation. Au printemps suivant la plantation, le mélange de graines est semé manuellement à la volée (semis de surface) et un griffage manuel léger est pratiqué pour recouvrir les graines.

Dans l'ensemble des dispositifs où elle a été testée, cette modalité a été abandonnée dans les mesures au bout de 2 ans. Cette modalité ne sera donc pas étudiée par la suite.

2.1.4 Configuration des dispositifs :

Chaque dispositif expérimental est constitué de 3 blocs, sauf à Haguenau où il y en a uniquement 2. Chaque bloc contient une répétition des différentes modalités, les PU (Placettes Unitaires), et chaque PU est constitué d'une moitié chêne et d'une moitié pin, et comporte une zone de mesure centrale avec une zone tampon autour.

Le schéma ci-dessous (figure 2) montre la configuration d'un PU sur le site de Bord Louviers. D'un site à l'autre, l'espace entre les lignes peut changer, mais la configuration générale reste la même (présence d'une zone tampon et PU séparé en deux essences chêne et pin est commun). La partie 'Plan d'échantillonnage' du tableau 2 présente le plan d'échantillonnage sur les différents dispositifs.

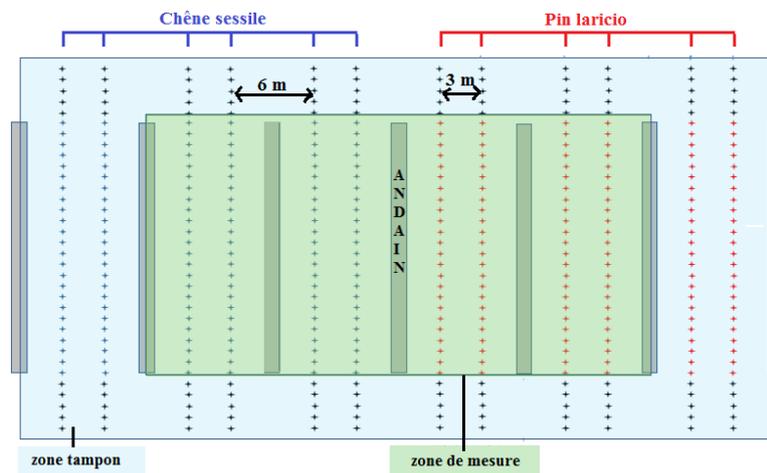


Figure 2 : Plan d'un plateau unitaire (PU) des dispositifs ALTER (CRI Bord Louviers, Piat, 2011).

| Région | Site | Contexte stationnel | | | Plants | | | Plan d'échantillonnage | | | |
|-----------|----------------|--|--------------|-------------------|---------------|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|----------------------|----------------|
| | | Sol | Hydromorphie | Végétation | Essence | Installation initiale | Replantation | Nb blocs | Nb plants/PU | Nb plants mesurés/PU | Surface totale |
| Normandie | Bord Louviers | limono-argileux, charge grossière faible à moyenne | non | fougère | chêne sessile | Nov 2010 | Mars 2013 | 3 | 204 | 96 | 3.4 |
| | | | | | pin laricio | Nov 2010 | non | | | | |
| Alsace | Haguenau P 150 | sableux | non | fougère | chêne sessile | Nov 2011 | Dec 2012 | 2 | 204 | 96 | 4.69 |
| | Haguenau P 35 | sableux | oui | fougère - molinie | | | | | | | |
| | Haguenau P 32 | sableux | oui | molinie | pin sylvestre | Mars 2012 | non | | | | |
| Bretagne | Villemartier | ? | non | fougère | chêne sessile | Déc 2011 | non | 3 | 204 | 96 | 4.62 |
| | | | | | pin sylvestre | Mars 2012 | non | | | | |
| | Rennes | ? | oui | molinie | chêne sessile | Déc 2011 | non | | | | |
| | | | | | pin sylvestre | Mars 2012 | non | | | | |

Tableau 2 : Principales caractéristiques des sites ALTER installés (projet ALTER, 2012).

2.2 Le projet PILOTE

2.2.1 Contexte et objectifs

Initié en 2013, le projet PILOTE est issu d'une collaboration étroite entre des équipes de recherche et développement (INRA, ONF, FCBA, IDF), des équipes de gestion (ONF, Société Forestière, Alliance Forêt Bois) et des concepteurs d'outils, dans le but de répondre à l'attente des gestionnaires forestiers en vue de réussir les plantations.

Ces derniers sont en effet en attente de nouvelles méthodes de travail du sol en contexte difficile pour réussir les plantations. Pour être utilisées, ces méthodes doivent être viables à la fois sur le plan technique (assurer un taux élevé de survie et une bonne croissance), économique (être moins cher que les méthodes précédentes) et environnemental (contrôle de la végétation herbacée en minimisant les impacts sur le milieu). Le projet a pour but la création et le développement technique de méthodes de préparation de sites, leur évaluation économique, technique et environnementale, puis leur diffusion dans le monde professionnel (Projet PILOTE, 2017).

Le projet repose sur une approche expérimentale, mettant en place un réseau de chantier de plantation sur l'ensemble du territoire. Les chantiers sont installés dans des contextes stationnels reconnus comme difficiles pour les plantations (sols engorgés ou compactés, végétation herbacée concurrente difficile à contrôler) ou bien dans des itinéraires en place historiquement pouvant bénéficier d'une amélioration. La durée totale de suivi expérimental des dispositifs est de 6 à 10 ans, en fonction de la rapidité d'installation des plantations. L'objectif est de couvrir la période allant de la préparation mécanique du site jusqu'à l'acquisition effective de la plantation, c'est-à-dire lorsque les plants dépassent 3 m de hauteur (Projet PILOTE, 2017).

2.2.2 Dimension du projet

Le projet est basé sur une série de dispositifs installés sur l'ensemble du territoire et gérés conjointement par les différents partenaires. La carte ci-dessous montre la répartition sur le territoire des différents dispositifs expérimentaux. Les sites sont installés dans des contextes stationnels représentant de forts enjeux localement (fortes surfaces concernées, problèmes techniques associés, ...)

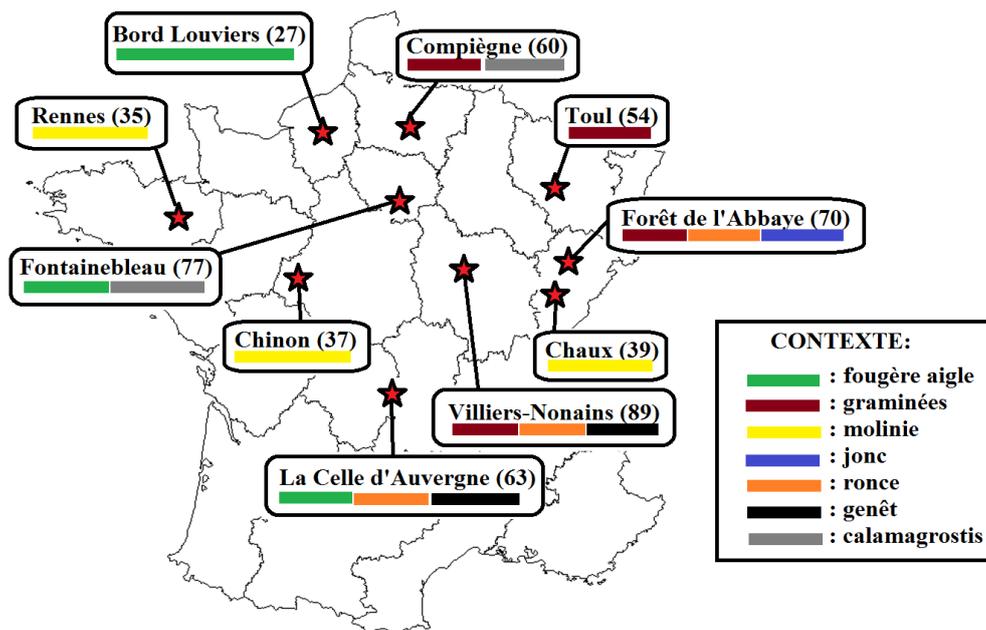


Figure 3 : Carte du réseau PILOTE. (Réalisation personnelle).

Sur le site de Compiègne, 2 dispositifs sont installés, sur les parcelles 9072 et 5251.

2.2.3 Expérimentation

Le projet PILOTE vise à tester et étudier une large gamme d'outils mécaniques, conçu en partenariat entre la recherche et les concepteurs d'outils, ou bien issus de la gestion mais dont les performances techniques et économiques n'ont pas encore été évaluées. Une partie de ces outils innovants sont testés sur chaque dispositif en fonction des problématiques locales de gestion et de la situation bloquante. Le tableau 3 présente les différents outils testés dans le réseau PILOTE. Une modalité témoin a aussi été réalisée sur chaque dispositif. Elle correspond à l'absence de travail du sol. Un broyage des lignes de plantation a cependant souvent été réalisé pour permettre le passage des planteurs.

Différentes essences ont été testées dans PILOTE en fonction du contexte stationnel du dispositif et des enjeux de production locaux pour répondre directement aux problématiques du terrain. Le tableau 4 présente les principales caractéristiques des dispositifs PILOTE installés.

| Nom de l'outil | Caractéristiques techniques | Travail attendu | Photo |
|---|--|--|---|
| Culti3B « <i>Culti3B</i> » | <ul style="list-style-type: none"> -Outil tracté par un tracteur de 140 à 200ch. -Dent de sous solage à l'avant haute de 87 cm avec ailettes triangulaires biseautées de part et d'autre de la dent, à la même hauteur. -Deux paires de disques (Ø 810 mm) indépendants et non motorisés. | Décompactation et fracturation des sols jusqu'à une profondeur de 40 à 60 cm (action de la dent de sous solage) et réalisation d'un billon (action des disques). |  |
| Bident Maillard « <i>DMA</i> » | <ul style="list-style-type: none"> -Outil adaptable sur pelle mécanique de 20 à 24 tonnes. -Deux dents de sous solage de 1 m de hauteur, biseautées à l'avant, espacées de 1 m et munies de trois paires d'ailettes. -Peigne désherbeur de 1.80 m de large. | Décompactation et fracturation des sols jusqu'à une profondeur de 70 à 90 cm, sur une largeur minimale de 1.5m. Il permet également de déblayer le sol des obstacles et de la végétation concurrente. |  |
| Sous Soleur MultiFonction « <i>SSMF</i> » | <ul style="list-style-type: none"> -Outil adaptable sur mini-pelle. -Peigne désherbeur large de 60 cm. -Deux ailettes triangulaires biseautées de part et d'autre de la dent. -Obus central de sous solage à l'extrémité de la dent. | Décompactation et fracturation des sols jusqu'à une profondeur de 60 cm. En préalable de ce travail, il permet d'éliminer la strate herbacée et les différents obstacles. |  |
| Scarificateur Réversible « <i>SR</i> » | <ul style="list-style-type: none"> -Outil adaptable sur mini-pelle. -Composé de différentes dents sur support de 75 cm de large : <ul style="list-style-type: none"> -trois dents principales de 40 cm avec obus de sous solage aux extrémités. -deux dents secondaires intercalées de 20 cm. | Élimine la végétation par arrachage et réalise ensuite un travail du sol sur 40 cm de profondeur par griffage ou sur 60 cm par bêchage. (Photo : Projet PILOTE, 2017) |  |
| RazHerb « <i>RH</i> » | <ul style="list-style-type: none"> -Outil adaptable sur mini-pelle. -Godet au fond plat. -Fond du godet traversé par 4 chaînes pour éviter l'accumulation de débris. | Élimine la strate de végétation herbacée en rasant le sol sous la partie racinaire de la couche végétale. Action effectuée avant un travail du sol . (Photo : Projet PILOTE, 2017) |  |

| | | | |
|---|--|--|---|
| <p>Charrue Bidisque motorisée « <i>CBD</i> »</p> | <ul style="list-style-type: none"> -Outil tracté par un tracteur. -deux disques motorisés à l'avant de plus de 1m de diamètre. -distributeur motorisé de micro-granulés. -puissant rouleau motorisé. | <p>Fonction de labour du sol (2 disques motorisés) avec possibilité d'amender le sol (distributeur motorisé) puis d'émiettage du sol et de tassement (rouleau motorisé). (CAFSA, 2011)</p> |  |
| <p>Charrue DeltaSol « <i>DeltaSol</i> »</p> | <ul style="list-style-type: none"> -Outil tracté par un tracteur. -2 disques de 800 mm en opposition -1 dent de sous solage de 1.2 m. -rouleau tasseur émietteur motorisé. | <p>Décompacte le sol sur 80 cm de profondeur en créant un émiettage en surface ainsi que la création d'un billon. (Alliance infos, 2017)</p> |  |
| <p>Sous Soleur déporté « <i>SS déporté</i> »</p> | <ul style="list-style-type: none"> -Outil tracté derrière un tracteur. -Dent de sous solage de 80cm décalée de l'axe du tracteur de 20 cm. | <p>Décompacte le sol sur 70 cm, passage en aller-retour.</p> |  |
| <p>Sous Soleur simple « <i>SS simple</i> »</p> | <ul style="list-style-type: none"> -Outil tracté derrière un tracteur. -Dent de sous solage seule avec ailettes de 80cm. | <p>Décompacte le sol jusqu'à 70 cm de profondeur, sur un sillon d'environ 24 cm.</p> |  |
| <p>DB 10 « <i>DB10</i> »</p> | <ul style="list-style-type: none"> -Outil adaptable sur une pelle de 9 tonnes. -Peigne intégré -Dent de sous solage -Paire de disque | <p>Réalise un décapage de la végétation (peigne) puis un décompactage du sol sur près de 70 cm (dent de sous solage) et créé un billonnage (paire de disques).</p> |  |

Tableau 3 : Présentation des différents outils testés dans le cadre du projet PILOTE (Photos et sources : Projet PILOTE, 2017 ; Alliance infos, 2017 ; maquinariagardell.com ; CAFSA, 2011).

| Site | Essence testée | Surface (ha) | Sol | Hydromorphie | Végétation concurrente | Outils testés |
|----------------------------|----------------|--------------|------------------|----------------------------------|------------------------------|--|
| Bord Louviers | Chêne sessile | 6.9 | Limono-sableux | Frais | Fougère aigle | CBD, Culti3B, SR, Culti3B, SS simple |
| Compiègne | Chêne sessile | 7.7 | Sablo-limoneux | Sec | Calamagrostis, graminées | Culti3B, SSMF, RH + SS tracté, SS simple |
| Toul | Pin sylvestre | 3.5 | Argileux | engorgement temporaire dès 30cm | Graminées | DMA, Module D, DB 10, SS déporté |
| Forêt de l'Abbaye | Douglas | 7.7 | Limoneux | engorgement temporaire dès 40cm | ronces, joncs, graminées | Culti3B, SR, Bident Maillard |
| Chaux | Chêne sessile | 10 | Limoneux | engorgement temporaire dès 40cm | molinie | Culti3B, RH, SSMF, Meri-Crusher |
| Villiers Nonains | Douglas | 5.6 | Sablo-argileux | ? | ronces, genêt, graminées | SSMF, DMA, SS déporté |
| La Celle d'Auvergne | Douglas | 5 | Limoneux-sableux | - | molinie | Culti3B, SSMF, DeltaSol, dent Bertrandie, SS double tracté |
| Chinon | Pin maritime | 9.8 | Limono-sableux | engorgement temporaire dès 25 cm | fougère aigle, calamagrostis | Culti3B, RH, SSMF |
| Fontainebleau | Chêne sessile | 3.8 | Sablo-limoneux | sec | molinie | CBD, RH, SR |
| Rennes | Pin maritime | 6 | Limono-argileux | engorgement temporaire dès 10 cm | | CBD, RazHerb, Sous Soleur multifonctions sur minipelle, Râteau Pompéi |

Tableau 4 : Principales caractéristiques des dispositifs PILOTE installés.

2.2.4 Configuration des dispositifs

Contrairement aux dispositifs ALTER, il n'y a pas de répétition des modalités dans chaque dispositif PILOTE. Chaque modalité n'est représentée qu'une seule fois, mise à part la modalité « Témoin », qui, sur certains dispositifs, est divisée dans différents endroits de la parcelle où un travail du sol aurait été compliqué pour des raisons diverses (accessibilité, proximité d'accès, etc). La surface des différentes modalités varie d'un site à l'autre, mais est en général comprise entre 0.2 et 1 hectare.

2.3 Analyses dendrométriques, projet ALTER.

2.3.1 Mesures effectuées

Sur l'ensemble des dispositifs ALTER installés, une partie des mesures effectuées relève d'un protocole commun : il s'agit des mesures de survie et croissance des plants ainsi que le suivi de la composition de la flore (projet ALTER, 2012). En plus de ces suivis communs à tous les dispositifs, d'autres paramètres, notamment environnementaux, ne sont caractérisés que sur certains sites. Dans le cadre de ce rapport, nous nous intéresserons uniquement aux suivis de croissance, survie et dynamique de la végétation concurrente.

Sur l'ensemble des dispositifs, nous disposons de 4 années de mesure pour les chênes et de 3 années de mesure pour les pins. La différence vient du fait que les chênes ont été mesurés l'année de plantation et non les pins. Cette différence ne pose pas de problème dans les analyses puisque nous nous intéresserons principalement aux résultats de croissance et de survie de la dernière année de mesure.

- Mesure de la hauteur et du diamètre : (projet ALTER, 2012)

L'ensemble des plants des blocs de mesure ont été numérotés et sont suivis individuellement chaque année.

- Hauteur : mesure de l'altitude par rapport au sol de la base du bourgeon à un niveau proche du niveau de plantation. La lecture se fait au centimètre le plus proche.
- Diamètre au collet : mesure au pied à coulisse à montre du diamètre de l'axe initial du plant (ou du rejet le plus haut le cas échéant). Le diamètre est mesuré à 5 cm du sol et l'axe du pied à coulisse est dirigé dans l'axe de la ligne de plantation. La lecture se fait au mm le plus proche.

- Evaluation de l'état sanitaire : (projet ALTER, 2012)

Lors des mêmes campagnes de mesures, l'état sanitaire de chaque plant est évalué selon les critères suivants :

- Chêne, classement en 4 types :
 - Mort,
 - Plant sec mais présentant des rejets vivants,
 - Plant vivant mais présentant une cime sèche qui a modifié l'accroissement en hauteur de la saison,
 - Plant sain.
- Pin, classement en 3 types :
 - Mort,
 - Plant vivant mais présentant des symptômes de dépérissement (jaunissement aiguilles, dessèchement de pousses),
 - Plant sain.

2.3.2 Homogénéisation des données

Les protocoles de mesures dendrométriques ont beau être communs entre les sites, il en résulte que des divergences persistent dans la manière de noter les résultats. Pour ce qui est de la mesure de croissance en hauteur et en diamètre, les résultats n'ont pas été modifiés, mis à part une correction de quelques erreurs de frappe lors des prises de mesures. Le principal travail d'homogénéisation a eu lieu au niveau de la survie des plants, et plus particulièrement lorsque l'état sanitaire est noté, au-delà de mort ou vif. Il a fallu regrouper l'ensemble des mesures dans une de ces deux catégories et corriger quelques aberrations. En effet, cet aspect qualitatif n'a pas été évalué et/ou noté de la même manière sur les différents dispositifs.

➤ Voici les modifications apportées :

- Les plants annotés comme « vif », « dépérissant », « ayant cime sèche » ou bien « sec mais présentant des rejets vivants », ont été considérés comme vivants.
- Les plants annotés comme « non retrouvé » ont été considérés comme :
 - Vivant s'ils ont été retrouvés vivant l'année suivante.
 - Mort s'ils ont été retrouvés mort l'année suivante, s'ils n'ont pas été retrouvés ou bien s'ils sont annotés « non retrouvé » la dernière année de mesure (car pas de moyens de contrôler l'année suivante).
- Les plants annotés comme « morts » une année puis comme « vif », « dépérissant », « ayant cime sèche » ou bien « sec mais présentant des rejets vivants » l'année suivante ont été considérés comme vif.

➤ Particularité du site d'Haguenau :

Sur le site d'Haguenau, des dispositifs expérimentaux ont été mis en place sur 3 parcelles différentes (parcelles 150, 32 et 35). Les dispositifs des parcelles 32 et 35, compte tenu de leur proximité et de leur contexte qui est le même (molinie), sont considérés comme un seul ensemble. Le dispositif de la parcelle 150 est quant à lui considéré comme un dispositif à part entière (contexte fougère). Une autre particularité du site d'Haguenau est qu'un épisode de froid l'année de la plantation (hiver 2011), a provoqué une forte mortalité, obligeant des replantations. Seuls les chênes sessiles sont concernés.

-Dispositif de la parcelle 150 :

- 23/11/2011 : plantation de l'intégralité des modalités.
- Hiver 2011 : mortalité importante sur l'ensemble des modalités.
- 04/12/2012 : replantation de l'intégralité des modalités (uniquement les chênes).

Par conséquent, les analyses seront portées uniquement sur la deuxième génération de plants.

-Dispositifs des parcelles 32 et 35 :

- 23/11/2011 : plantation de l'intégralité des modalités.
- Hiver 2011 : forte mortalité, notamment sur la modalité 3B.
- 04/12/2012 :
 - replantation complète de la modalité 3B
 - création d'une modalité herbicide de 100 plants (une par parcelle), pour servir de témoin à la modalité 3B replantée.

Dans la suite des analyses, vont être considérés séparément les deux ensembles de modalités ayant été plantés avec une année de décalage. Il n'est en effet pas possible de regrouper la modalité 3B avec celles qui n'ont pas été replantées, compte tenu du décalage d'un an dans la date de plantation.

2.3.3 Détermination des modèles à suivre

Les données dendrométriques du réseau ALTER se présentent en deux catégories : les mesures de hauteur et diamètre sont des variables quantitatives, alors que les mesures de survie sont des variables qualitatives binomiales avec uniquement 2 valeurs possibles (mort ou vivant).

Les modèles utilisés seront donc différents. Pour l'analyse statistique des variables quantitatives (hauteur et diamètre), nous utiliserons un modèle linéaire et pour l'analyse statistique de la mortalité, nous utiliserons un modèle généralisé.

➤ Détermination du modèle linéaire pour la croissance :

L'objectif ici est de déterminer quel est le meilleur modèle linéaire à utiliser pour exploiter les données et révéler des différences significatives de la hauteur ou du diamètre entre les différentes modalités.

Les dispositifs expérimentaux étudiés ont pour but de comparer différentes modalités de travail du sol. L'effet travail du sol sera donc considéré comme l'effet fixe dans le modèle.

Un modèle linéaire peut être simple (effet fixe uniquement), ou mixte (effets aléatoires en plus). Les effets aléatoires permettent de prendre en compte, notamment, l'effet de répétition, entrant dans la définition de la variance. Dans le cadre d'ALTER, les dispositifs expérimentaux sont découpés en blocs, dans lesquels chaque modalité est répétée une fois. Il y a en général 3 blocs par site, chaque bloc étant à son tour divisé en placette unitaire (PU), entité représentant la répétition d'une modalité.

L'objectif de ce raisonnement est de déterminer la structure générale du modèle, à savoir modèle simple ou mixte, et notamment, dans le cas d'un modèle mixte, quels vont être les effets aléatoires à prendre en compte. Nous choisirons le chêne sessile pour déterminer cette structure et nous nous basons sur ses mesures de hauteur.

- Modèle linéaire simple:

```
mod_lin_simple = lm( haut ~ mod, data = data1 )
```

- Modèle linéaire mixte avec bloc en effet aléatoire :

```
mod_lin_mixte_bloc=lme(haut ~ mod, data=data1, random=~1|bloc,  
weights = varIdent(form = ~1|mod))
```

Ce modèle prend en considération l'effet « bloc ».

- Modèle linéaire mixte avec bloc/PU en effet aléatoire :

```
mod_lin_mixte_bloc.PU=lme(haut~mod, data=data1,  
random=~1|bloc/PU, weights = varIdent(form = ~1|mod))
```

➔ Ce modèle considère l'effet « PU » au sein de chaque « bloc ».

Pour comparer ces différents modèles entre eux, nous utilisons une ANOVA avec R dont les résultats sont présentés dans l'Annexe 1. L'objectif est d'optimiser le modèle en étudiant quels effets aléatoires

permettent de minimiser l'AIC (Akaike Information Criterion), qui utilise le maximum de vraisemblance tout en pénalisant les modèles comportant trop de variables (Baudot, 2008). Les résultats de l'ANOVA montrent que dans l'ensemble des sites, le modèle considérant chaque PU au sein de chaque bloc permet d'avoir un modèle significativement plus performant que le modèle linéaire simple (sans effets aléatoires) est autant (site de Bord Louviers) voire plus performant que le modèle ne prenant en considération que les différents blocs.

➤ Détermination du modèle généralisé pour la survie :

De la même manière que pour le modèle linéaire, il s'agit maintenant de déterminer quel est le meilleur modèle généralisé pour analyser les données de survie et montrer des différences ou non entre les différentes modalités. Le modèle généralisé peut être simple (effet fixe uniquement), ou mixte (avec des effets aléatoires). Voici les différents modèles testés :

- Modèle généralisé simple :

```
mod_gen_simple=glm(mort~mod, data=data1)
```

- Modèle généralisé mixte avec bloc en effet aléatoire :

```
mod_gen_mixte_bloc=glmer(mort~mod + (1|bloc), data=data1,  
family=binomial)
```

- Modèle généralisé mixte avec bloc/PU en effet aléatoire :

```
mod_gen_mixte_bloc.PU=glmer(mort~mod + (1|bloc/PU),  
data=data1, family=binomial)
```

➔ Ce modèle considère l'effet « PU » au sein de chaque « bloc ».

Comme pour le modèle linéaire, un test ANOVA va permettre de déterminer quel modèle permet d'optimiser le modèle en minimisant l'AIC. Les résultats de l'ANOVA sont présentés en Annexe 1. Ils montrent que pour tous les sites mis à part à Haguenau parcelle 150, considérer en effet aléatoire l'effet PU au sein de chaque bloc permet d'optimiser le modèle. Pour le dispositif d'Haguenau parcelle 150, l'AIC du modèle « bloc/PU » est très légèrement supérieur à l'AIC du modèle « bloc ». Cependant, compte tenu de cette faible différence mais aussi du fait que la structure des effets aléatoires soit commune pour le reste des sites, cette différence ne sera pas prise en compte et le même modèle sera utilisé pour le site d'Haguenau parcelle 150.

2.3.4 Présentation des résultats :

➤ Croissance en hauteur et en diamètre :

L'objectif est de mettre en évidence les effets des différentes modalités testées sur le développement et la survie des plants. Pour la croissance, uniquement l'évolution du diamètre sera représentée et analysée dans ce rapport pour des questions de conclusion et de clarté.

Pour les représentations graphiques de la croissance et de la survie, le logiciel R est utilisé avec le package « ggplot2 ». Pour mettre en évidence les effets significatifs des différentes modalités entre elles sur la croissance en diamètre et la survie, l'étude portera sur la 4^{ème} année de mesure, permettant d'avoir le plus de recul. Pour la croissance, le modèle linéaire mixte établi préalablement est utilisé avec le package « lme », suivi d'un test de Tuckey, permettant de comparer les modalités deux à deux. Pour la survie, le modèle généralisé mixte choisi préalablement est utilisé avec le package « lme4 », également suivi d'un test de Tuckey.

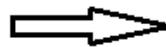
Les résultats seront représentés graphiquement (évolution de la croissance et de la survie de 0 à 4 ans après la plantation). Pour la croissance, un cercle regroupera les modalités ne présentant pas de différence significative à 4 ans. Pour la survie, il s'agira d'une lettre regroupant les modalités ne montrant pas de différence significative de la survie à 4 ans. Les figures 4 et 5 montrent les résultats du test de Tuckey à partir du modèle choisi, ainsi que la représentation graphique correspondante, pour l'évolution du diamètre et de la survie des chênes sessiles à Bord Louviers.

Résultats du test de Tuckey (comparaison 2 à 2) :

| site | Âge | CompMod | diff | pvalue |
|---------------|-----|---------|-------|--------|
| Bord Louviers | 4 | 3B · HE | -6.42 | 0.007 |
| Bord Louviers | 4 | 3B · LO | 1.58 | 0.497 |
| Bord Louviers | 4 | 3B · SR | 2.02 | 0.259 |
| Bord Louviers | 4 | 3B · TE | 6.13 | 0.001 |
| Bord Louviers | 4 | HE · LO | 8.00 | 0.001 |
| Bord Louviers | 4 | HE · SR | 8.44 | 0.001 |
| Bord Louviers | 4 | HE · TE | 12.55 | 0.000 |
| Bord Louviers | 4 | LO · SR | 0.44 | 0.981 |
| Bord Louviers | 4 | LO · TE | 4.55 | 0.005 |
| Bord Louviers | 4 | SR · TE | 4.11 | 0.006 |

Simplification de la table :
(les modalités dans le même groupe ne montrent pas de différences significatives au niveau du diamètre à 4 ans)

| mod | Bord Louviers à 4ans |
|-----|----------------------|
| TE | a |
| SR | b |
| LO | b |
| 3B | b |
| HE | c |



 : pvalue < 0.05, différence significative du diamètre entre les modalités.

Représentation graphique de l'évolution du diamètre pour le Chêne sessile à Bord Louviers.

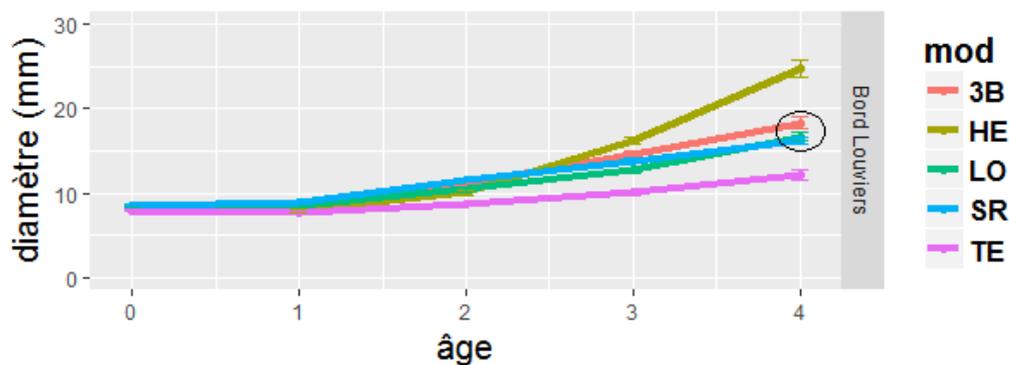


Figure 4 : Exemple de résultats de l'analyse statistique et de représentation graphique pour le diamètre des Chênes sessiles à Bord Louviers.

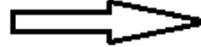
Résultat du test de Tuckey (comparaison 2 à 2) :

| site | Name | diff | pvalue |
|---------------|---------|-------|--------|
| Bord Louviers | HE - 3B | 0.04 | 1.0000 |
| Bord Louviers | LO - 3B | 1.17 | 0.0202 |
| Bord Louviers | LO - HE | 1.14 | 0.0291 |
| Bord Louviers | SR - 3B | 0.00 | 1.0000 |
| Bord Louviers | SR - HE | -0.04 | 1.0000 |
| Bord Louviers | SR - LO | -1.17 | 0.0202 |
| Bord Louviers | TE - 3B | -0.64 | 0.1168 |
| Bord Louviers | TE - HE | -0.68 | 0.0811 |
| Bord Louviers | TE - LO | -1.81 | 0.0000 |
| Bord Louviers | TE - SR | -0.64 | 0.1168 |

Simplification de la table :

(les modalités dans le même groupe ne montrent pas de différences significatives au niveau de la survie à 4ans).

| mod | group Bord Louviers an |
|-----|------------------------|
| 3B | a |
| HE | a |
| LO | b |
| SR | a |
| TE | a |



□ : pvalue < 0.05, différence significative du diamètre entre les modalités.

Représentation graphique de l'évolution de l'état sanitaire des Chêne sessile à Bord Louviers :

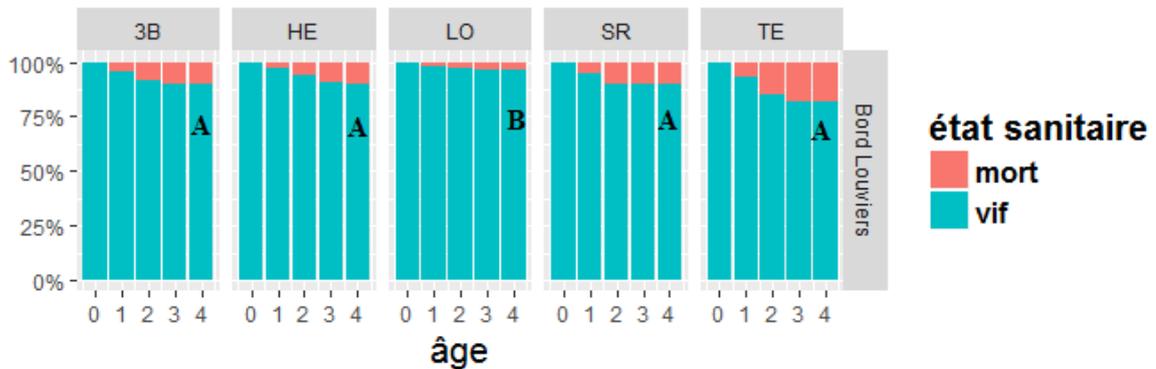


Figure 5 : Exemple de résultats de l'analyse statistique et de représentation graphique pour l'état sanitaire des Chênes sessiles à Bord Louviers.

2.4 Suivi de la dynamique de la végétation, projet ALTER

Chaque année après la plantation, des inventaires floristiques sont réalisés sur chaque dispositif pour suivre la recolonisation de la végétation sur les différentes modalités. L'objectif est de représenter la recolonisation de la végétation concurrente suite aux différentes modalités testées à partir des données de recouvrement total de la végétation et des données de recouvrements spécifiques des différentes espèces.

Lors de la première année de mesure, sont matérialisés des placeaux d'inventaire floristique, alors présents pour l'ensemble de la durée du projet.

Disposition des placeaux d'inventaire :

- Modalités SR + 3B et SR :

Ces deux modalités entraînent la création d'un andain par le passage du Scarificateur Réversible qui dégage la ligne de plantation de la strate herbacée et des rémanents. Sur chaque PU, 8 placeaux d'inventaire floristique sont disposés sur la ligne de plantation et 3 sur les andains. Etant donné que nous nous intéressons uniquement au retour de la végétation sur la ligne de plantation (lien direct sur la croissance et la survie des plants), les mesures effectuées sur les andains ne sont pas prises en compte. De plus, cela permet une comparaison homogène avec les autres modalités, dans lesquelles il n'y a pas eu de relevés en dehors des lignes de plantation.

- Modalités HE, LO et TE :

Ces trois modalités étant réalisées en plein, il n'y a pas de formation d'andains entre les lignes de plantation. Ainsi, sur chaque PU, 8 placeaux d'inventaire floristique sont disposés uniquement sur les lignes de plantation.

Chaque placeau d'inventaire floristique est matérialisé par une jalonnette et lors des mesures, un carré d'inventaire (cadre en acier d'1 m²) est disposé au sol pour effectuer les mesures.

Mesures effectuées dans le carré d'inventaire : (CRI Bord Louviers, 2011, Piat)

- Hauteur moyenne de la végétation.
- Pourcentage de recouvrement global de la végétation.
- Inventaire floristique avec identification des différentes espèces présentes et attribution d'un pourcentage de recouvrement par espèce.

2.4.1 Traitement des données

- Recouvrement d'espèce inférieur à 15% par placeau :

Sur chaque placeau de relevé floristique, les espèces ayant un recouvrement inférieur à 15% ont été supprimées. Ce choix a été fait car il permet de faire ressortir les espèces concurrentes majoritaires et permet de ne pas prendre en compte tout un cortège d'espèces ne présentant pas de concurrence localement et surchargeant les représentations graphiques et les analyses pour très peu d'informations apportées.

- Regroupement des espèces concurrentes majoritaires :

Plus de 140 espèces différentes ont été relevées sur l'ensemble des dispositifs ALTER au cours des différentes années de mesure. Pour un souci de simplification et de clarté, les espèces ont soit été regroupées, soit laissées indépendantes pour celles étant reconnues comme concurrentes dans les dispositifs. Voici les différentes espèces ou groupes conservés :

- *Pteridium aquilinum*
- *Rubus fruticosus*
- *Molinia caerulea*
- *Cytisus scoparius*
- *Calluna vulgaris* / *Erica cinerea*
- Groupe des graminoides (famille des *Poaceae*, des *Cyperaceae* et des *Juncaceae*)
- Autres

- Choix dans la représentation graphique du recouvrement floristique :

Suite aux quelques modifications et arrangements des bases de données mentionnés préalablement, les données brutes permettent de fournir 2 types de représentation graphique :

- Représentation du recouvrement total moyen : exemple du site d'Haguenau, parcelle 35.

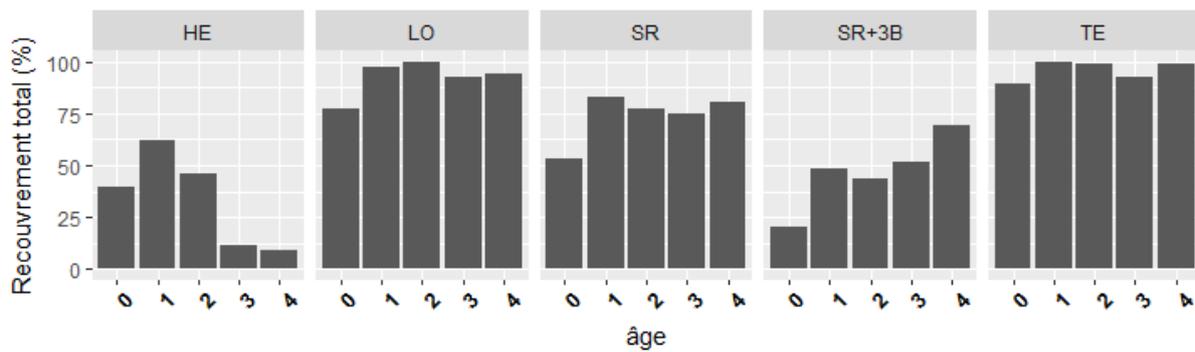


Figure 6 : Recouvrement floristique total moyen sur le site d'Haguenau, parcelle 35.

Cette représentation graphique du recouvrement floristique total a pour avantage de mettre en avant l'incidence du travail du sol sur la couverture végétale et sa reconquête (avec ainsi une première idée de la concurrence des espèces végétales avec les plants). Cependant, le principal inconvénient est que cette représentation ne permet pas de discerner quelles sont les espèces présentes. Mais il paraît intéressant de connaître l'impact des outils testés sur la réduction ou non de l'espèce concurrente principale ou bien de savoir s'il y a eu une substitution par d'autres espèces, potentiellement concurrentes à leur tour.

- Représentation du recouvrement floristique :

Cette représentation graphique montre le recouvrement moyen de chaque espèce. La somme de ces recouvrements peut donc dépasser les 100%, car plusieurs strates de végétation peuvent se superposer.

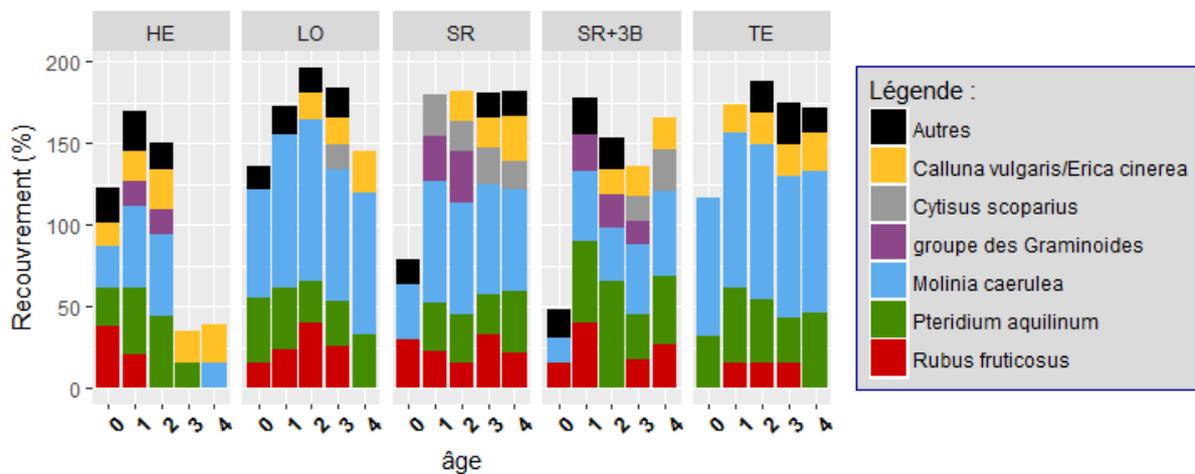


Figure 7 : Recouvrement floristique spécifique moyen sur le site d'Haguenau, parcelle 35.

Les avantages de ce graphique sont que chaque espèce/groupe est représentée ainsi que son recouvrement spécifique. Il permet bien de cerner la répartition en strates de la végétation. Cependant, cette méthode de représentation est réductrice quant aux modalités avec une espèce concurrente fortement présente, et amplificatrice quant aux modalités avec une faible concurrence floristique. En effet, une espèce en particulier peut monopoliser le recouvrement au sol (figure 6, exemple de la molinie dans la modalité Témoin), avec une forte densité et un très gros pouvoir concurrentiel et son recouvrement ne pourra dépasser les 100%, bloquant cependant le développement d'autres espèces. A l'inverse, une modalité permettant le développement d'un panel plus large d'espèces, chacune ayant un recouvrement relativement important sans pour autant être concurrentiel (occupation du sol sans vigueur), montrera au total une somme des recouvrements importante en comparaison avec le témoin, alors que ce dernier montre une concurrence de la végétation bien plus importante. Les figures 6 et 7 permettent de bien illustrer ces propos avec la comparaison du témoin et de la modalité SR+3B à 1 an.

La figure 7 montre que le témoin présente un recouvrement total de près de 100% alors qu'il n'est que de 50% chez le SR+3B. Cela se traduit par une strate herbacée dense et fortement concurrente chez le témoin, à l'inverse de la modalité SR+3B, où le travail du sol semble réduire la concurrence. Quant à elle, la figure 7 montre que la somme des recouvrements spécifique de chaque espèce est semblable chez les modalités témoin et SR+3B, à savoir proche des 175%, ce qui peut amener à penser qu'il y a le même aspect concurrentiel chez le témoin que suite au passage du SR+3B.

Par conséquent, cette méthode de représentation graphique ne peut être utilisée dans la mesure où elle permet difficilement de discerner l'aspect concurrentiel de la strate herbacée dans les différentes modalités. Le recouvrement floristique va donc être représenté en combinant les deux informations disponibles (recouvrement total et recouvrement spécifique).

- Méthode de représentation du recouvrement :

La technique utilisée se base sur le fait que la valeur de recouvrement total doit être égale à la somme des recouvrements spécifiques des différentes espèces, et que les proportions des différents recouvrements spécifiques sont conservées.

Illustrons cela avec un exemple (site d'Haguenau parcelle 35, modalité SR+3B) :

| site | âge | mod | espece2 | rec_flo | rec_tot | tot_rec_flo | rec_flo_spe |
|--------------|-----|-------|--------------------------------|---------|---------|-------------|-------------|
| Haguenau_P35 | 4 | SR+3B | Calluna vulgaris/Erica cinerea | 20.0 | 69.5 | 165.5 | 8.4 |
| Haguenau_P35 | 4 | SR+3B | Rubus fruticosus | 26.7 | 69.5 | 165.5 | 11.2 |
| Haguenau_P35 | 4 | SR+3B | Molinia caerulea | 52.2 | 69.5 | 165.5 | 21.9 |
| Haguenau_P35 | 4 | SR+3B | Pteridium aquilinum | 41.7 | 69.5 | 165.5 | 17.5 |
| Haguenau_P35 | 4 | SR+3B | Cytisus scoparius | 25.0 | 69.5 | 165.5 | 10.5 |

Tableau 5 : Extraction table R de détermination du recouvrement.

Signification des colonnes :

- rec_flo : recouvrement spécifique de l'espèce
- rec_tot : recouvrement total
- tot_rec_flo : somme des recouvrements spécifiques de chaque espèce (pour une année et une modalité, ici en 2013 pour la modalité SR+3B).
- $rec_flo_spe = \frac{rec_tot * rec_flo}{tot_rec_flo}$: proportion de recouvrement de l'espèce rapporté au couvert global. Correspond à la valeur de recouvrement utilisée dans la représentation graphique.

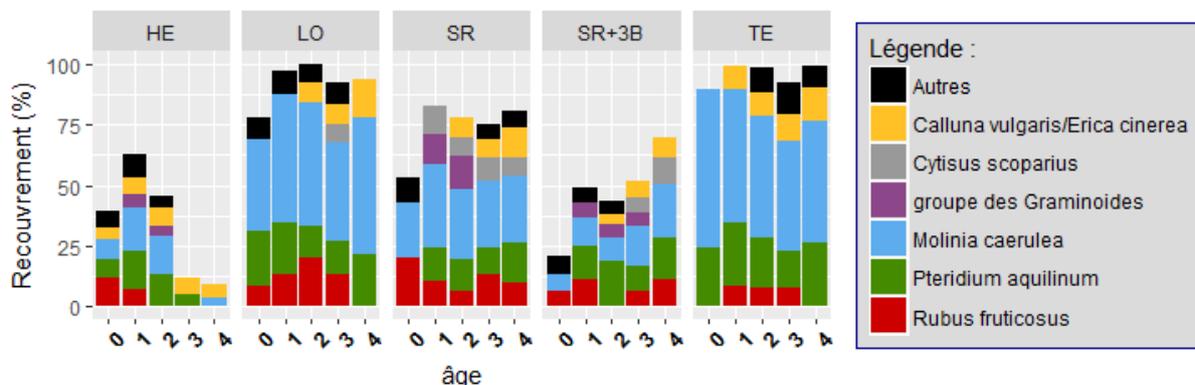


Figure 8 : Recouvrement floristique sur le site d'Haguenau, parcelle 150.

Pour comprendre visuellement, la hauteur des barres correspond au recouvrement total (figure 6) et les proportions des différentes espèces sont les mêmes que sur la figure 7.

L'avantage de représenter le recouvrement de cette manière est qu'il est visuellement intuitif de cerner l'aspect concurrentiel de la strate herbacée tout en voyant quelle(s) espèce(s) en est (sont) responsable(s) (ou dans quelles proportions).

➤ Mise en place d'un indicateur floristique :

La représentation graphique du recouvrement floristique est un bon moyen visuel, donc qualitatif, d'appréhender l'efficacité des différents outils sur le contrôle de la végétation concurrente. Il a été nécessaire de développer un indicateur permettant de représenter ce contrôle de la végétation pour comparer les modalités de manière objective.

L'objectif est donc de créer un indicateur qui représente sur une échelle de 0 à 1 « l'efficacité » de la modalité, sa capacité à réduire durablement le recouvrement floristique et notamment le recouvrement de l'espèce cible (concurrente majoritaire vers laquelle les travaux sont dirigés).

• Qualités nécessaires à cet indicateur :

- Devra représenter un « indice de performance » du contrôle de la végétation de la modalité **par rapport** au témoin, pour refléter l'efficacité de l'intervention sur le contrôle de la végétation par rapport à une non-intervention.
- Devra être pondéré par des coefficients pour notamment donner plus de poids à la capacité de se débarrasser de l'espèce concurrente cible.
- Devra être situé entre 0 et 1.

➤ Méthode :

Cet indicateur sera établi à partir des données résultant de la combinaison du recouvrement total et du recouvrement spécifique. Il ne sera établi que sur les relevés floristiques de la 3^{ème} année, car cette année semble être le bon compromis entre recolonisation de la végétation concurrente et le moment où les plants peuvent commencer à « prendre le dessus ».

○ Etape 1 : Classification du niveau de concurrence

Par site, on sélectionne l'espèce concurrente cible, principale. Cette espèce est définie dans les comptes rendus d'installation des sites. Cependant, il est possible qu'une espèce soit fortement représentée alors qu'elle n'a pas été indiquée dans les comptes rendus d'installation. Ainsi, si une espèce a un recouvrement de plus de 30% dans le témoin la 3^{ème} année de mesure, elle est alors considérée comme concurrente principale. Les autres espèces concurrentes présentes sont considérées comme des concurrentes secondaires. La catégorie « Autres », regroupant un panel d'espèces faiblement représentées, est considérée comme des concurrentes tertiaires.

| Site | Concurrentes principales | Concurrentes secondaires | | Concurrente tertiaire |
|-------------------------------|---|---|---|-----------------------|
| Bord Louviers | <i>Pteridium aquilinum</i> | -graminoïdes - <i>Rubus fruticosus</i> | - <i>Cytisus scoparius</i> - <i>Calluna vulgaris/Erica cinerea</i> | |
| Haguenau (parcelle 32) | - <i>Pteridium aquilinum</i> - <i>Molinia caerulea</i> | -graminoïdes - <i>Rubus fruticosus</i> | - <i>Cytisus scoparius</i> - <i>Calluna vulgaris/Erica cinerea</i> | |
| Haguenau (parcelle 35) | <i>Molinia caerulea</i> | -graminoïdes - <i>Rubus fruticosus</i> - <i>Pteridium aquilinum</i> | - <i>Cytisus scoparius</i> - <i>Calluna vulgaris/Erica cinerea</i> | Autres |

| | | | | |
|------------------------------------|--------------------------------|---|---|--------|
| Haguenau (parcelle 150) | <i>Pteridium aquilinum</i> | -graminoïdes - <i>Rubus fruticosus</i> - <i>Molinia caerulea</i> | - <i>Cytisus scoparius</i> - <i>Calluna vulgaris/Erica cinerea</i> | Autres |
| Rennes | <i>Molinia caerulea</i> | -graminoïdes - <i>Rubus fruticosus</i> - <i>Pteridium aquilinum</i> | - <i>Cytisus scoparius</i> - <i>Calluna vulgaris/Erica cinerea</i> | Autres |
| Villecartier | <i>Pteridium aquilinum</i> | -graminoïdes - <i>Rubus fruticosus</i> - <i>Molinia caerulea</i> | - <i>Cytisus scoparius</i> - <i>Calluna vulgaris/Erica cinerea</i> | Autres |

Tableau 6 : Classification du niveau de concurrence des espèces par site ALTER.

○ Etape 2 : Application du coefficient

Le recouvrement spécifique de chaque espèce ou groupe présent à la 3^{ème} année de mesure, par modalité, est multiplié par un coefficient correspondant à sa catégorie. On nommera cette variable « indice_spécifique ».

- Concurrente principale : coefficient 3.
- Concurrente secondaire : coefficient 2.
- Concurrente tertiaire : coefficient 1.

indice spécifique = recouvrement spécifique * coefficient de concurrence

○ Etape 3 : Somme par modalité

Pour chaque modalité, les résultats obtenus sont sommés. Disons que ce résultat s'appelle « indice_total ».

indice total = \sum indice spécifique

○ Etape 4 : comparaison par rapport au témoin

Calcul du ratio de l'indice_total de chaque modalité par rapport à l'indice_total du témoin.

Indicateur floristique_{modalité} = $1 - \frac{\text{indice total}_{\text{modalité}}}{\text{indice total}_{\text{témoin}}}$

Plus cet indicateur est proche de 1, meilleur est le contrôle de la végétation concurrente par la modalité.

2.5 Analyse des temps de travail du sol et estimation des coûts PILOTE

Le suivi des temps de travail du sol par les outils testés sur le réseau PILOTE a vocation à déterminer le coût technique au km linéaire travaillé lorsque les engins travaillent en ligne, ou le coût à l'hectare lorsqu'ils effectuent un travail en plein. Le Sous Soleur Multifonctions peut aussi être utilisé pour faire un travail en potets, il s'agira donc aussi de déterminer un coût technique pour ce type de travail.

Le coût technique correspond à un coût hors marge, donc uniquement le coût de fonctionnement de l'engin. Il comprend l'amortissement du coût de la machine, le salaire de la personne (coût employeur), les entretiens réguliers, l'usure des pièces, l'intérêt des crédits, les assurances, etc. Ce coût est obtenu en multipliant le temps productif de passage des engins (au km linéaire travaillé, à l'hectare ou au nombre de potets) par le coût technique horaire des engins.

Etant donné que les engins testés dans PILOTE sont nouveaux ou récents, il n'y a pas de recul pour établir le coût technique de fonctionnement de ces engins à l'heure. Cependant, des référentiels internes de l'ONF proposent des coûts techniques de fonctionnement horaire d'engins aux caractéristiques très

proches, à savoir l'engin porteur (tracteur, pelle ou mini pelle) avec un outil de conception proche. Ces référentiels sont établis à partir de milliers d'heures de fonctionnement et permettent donc de proposer des coûts techniques horaires fiables.

2.5.1 Mesures effectuées

Les dispositifs PILOTE sont suivis de près et des campagnes de mesure sont organisées annuellement. Des protocoles communs de mesures sont mis en place pour bénéficier de l'aspect réseau, mais des suivis plus spécifiques peuvent aussi être effectués en fonction des attentes des gestionnaires de site, de la demande locale ou des spécificités des dispositifs.

Compte tenu du fait que la majorité des sites ont récemment été mis en place, ce rapport abordera uniquement les chronométrages du travail du sol et de la phase de plantation dans le but d'obtenir des coûts techniques des engins, mais d'autres suivis sont effectués, tels que :

- Suivi annuel de la croissance en hauteur et de la survie.
- Inventaires floristiques annuels.
- Mesure de compactation du terrain à l'aide d'un pénétromètre.
- Réalisation de profils pédologiques.

Les mesures de chronométrage de la phase de travail du sol et de la phase de plantation sont abordées et traitées pour l'ensemble des dispositifs PILOTE présentés dans le tableau 4, mis à part pour le site de la Forêt de l'Abbaye.

➤ Chronométrage des engins de travail du sol :

Le protocole complet de suivi des temps de passage des machines est en Annexe 2.

La partie de chronométrage du travail du sol par les outils testés est importante car elle va permettre d'établir à terme un coût technique des différents outils et ainsi permettre aux gestionnaires de mieux appréhender leurs utilisations.

Voici les différentes sources de mesures :

- Chronométrage des différentes phases du travail du sol : Il s'agit d'un suivi précis du fonctionnement des outils par un mesureur qui suit le travail pendant un minimum d'une heure par outil, en différenciant les phases (travail du sol, pause, déplacements, etc).
 - Carnet de bord : Il s'agit d'un tableau de suivi de chantier par le conducteur d'engin, qui note son heure d'arrivée sur le chantier, son heure de départ ainsi que les principaux temps de pause (préparation, déjeuner, réparations, entretien). L'Annexe 3 présente la structure de ce carnet de bord.
 - Horamètre engin : certains engins disposent à leur bord d'un compteur d'heure. Lorsque cette fonctionnalité est disponible, les conducteurs d'engins doivent indiquer sur le carnet de bord l'heure de début et de fin du chantier.
 - Pour les sites PILOTE suivis par le pôle de recherche ONF de Fontainebleau, à savoir les sites de Compiègne, Fontainebleau et Bord Louviers, une estimation du temps de travail du sol effectif est proposée pour l'ensemble des modalités dans les comptes rendus d'installation. Cette information a été indiquée par les gestionnaires des sites à partir des relevés chronométriques et des observations personnelles.
- Chronométrage des plantations : lors de la phase de plantation, chaque planteur est chronométré pendant au moins une heure par modalité avec les différentes phases suivantes de détaillées :
- Phase HABI : **habillage** des plants.
 - Phase DEPCHA : **déplacement** sur le **chantier**.

- Phase PLANT : **plantation** proprement dite (avec comptage à posteriori du nombre de plants plantés).

Les résultats du suivi des temps de plantation sont présentés en Annexe 4.

2.5.2 Détermination du temps productif

Ce temps est déterminé à partir des diverses sources disponibles d'évaluation des temps de travail du sol. A l'origine du projet, ce temps devait être calculé à partir du carnet de bord rempli par le conducteur d'engin (Annexe 3) sur chaque modalité et avec chaque outil. L'avantage est que cette prise de mesures est effectuée sur la durée totale du chantier, permettant d'avoir une vision large et globale du travail effectué sur la durée. Malheureusement, les carnets de bords n'ont été remplis que sur peu de sites et uniquement pour quelques modalités. Il n'est donc pas possible de n'utiliser que cette source d'information. Par conséquent, l'ensemble des sources disponibles de mesure des temps de travail du sol ont été utilisées. N'étant pas destinées à cela, elles ont dû être travaillées pour en ressortir un temps au plus proche du temps productif.

➤ Suivi chronométrique :

L'avantage de cette source est qu'elle a été réalisée sur l'ensemble des modalités et des outils pour tous les dispositifs étudiés, et c'est la seule. De plus, la distance travaillée correspondant au travail chronométré est directement renseignée. Son principal inconvénient est qu'elle n'est effectuée que sur une très courte période par rapport à la durée totale du chantier. Le moindre incident ou difficulté pendant le relevé peut avoir de grosses répercussions lors de l'extrapolation jusqu'au coût technique. Si par exemple l'engin est chronométré lors de son passage dans une veine de terre plus argileuse ou pierreuse, le travail du sol peut être considérablement ralenti.

Traitement des suivis chronométriques :

L'objectif est de se rapprocher au plus du temps productif à partir de cette source d'information. Par conséquent :

- Les pauses de plus de 5 minutes sont retirées.
- Les incidents techniques sont retirés.
- Les entretiens sont retirés.

➤ Carnets de bord (Annexe 3) :

Cette mesure possède le gros avantage de prendre en compte l'ensemble du chantier. Malheureusement, peu de carnets de bord ont été remplis. La distance travaillée est parfois directement renseignée sur le carnet de bord, sinon elle doit être estimée à partir de l'espacement entre les lignes et la longueur des parcelles.

Traitement des carnets de bord :

Le temps productif est ici obtenu en soustrayant les temps de pause, de repérage et d'entretien ou réparation à la durée totale passée sur le chantier. Le temps restant correspond donc, théoriquement, au temps passé à travailler le sol proprement dit.

➤ Horamètre de la machine :

Dans quelques cas, l'horamètre de la machine a été noté dans le carnet de bord en début et en fin de chantier. Cette donnée possède le gros avantage de correspondre directement au temps où la machine était en marche, donc en train de travailler. Ce temps est directement relié au temps productif.

➤ Comptes rendus des sites suivis par le pôle RDI ONF de Fontainebleau :

Sur l'ensemble des sites PILOTE suivis par le pôle de recherche de l'ONF de Fontainebleau, le temps productif à l'hectare est indiqué pour chaque modalité et chaque outil. Etant donné qu'il s'agit du

temps à l'hectare, le résultat est obtenu en multipliant par la distance linéaire travaillée par hectare. Cette information concerne les sites de Bord Louviers, Fontainebleau et les deux dispositifs de Compiègne (parcelles 5152 et 9072).

Ce résultat a été estimé à partir des suivis chronométriques et des observations sur le terrain. Cette information peut paraître peu fiable car elle a été estimée de manière informelle pour donner un ordre d'idée du temps productif dans les comptes rendus. Cependant, elle doit être conservée, car compte tenu du manque important de carnets de bord, chaque source d'information est primordiale à conserver.

2.5.3 Détermination du coût technique

Une fois le temps productif au km linéaire, à l'hectare ou au potet calculé par les différentes manières disponibles, ce temps est multiplié par le coût horaire issu des référentiels travaux ONF.

Coût technique = Temps productif (/ha, /km linéaire ou /100 potets) * Coût horaire

Voici, pour les différents outils, le coût technique horaire utilisé, issu du référentiel interne de l'ONF :

| outil | coût à l'heure |
|--|-----------------------|
| mini pelle + razherb | 75 |
| mini pelle + rateau scarificateur | 75 |
| mini pelle + SSMF | 75 |
| pelle 23T + rateau_fleco | 138 |
| pelle 23T + dent Bertrandie (à vérifier) | 138 |
| pelle 23T + dent Maillard | 138 |
| pelle 10T + DB10 | 87 |
| pelle 10T + module D | 87 |
| tracteur + sous soleur déporté (Grenier Franco déporté) | 82 |
| tracteur + sous soleur 2 rangs Bertrandie | 82 |
| tracteur + sous soleur simple | 82 |
| tracteur + deltasol | 82 |
| tracteur + culti3B | 85 |
| tracteur + meri crusher | 90 |
| tracteur + charrue bi disque | 100 |

Tableau 7 : Coûts horaires estimés pour les différents outils du réseau PILOTE (référentiel interne ONF).

3 Résultats

3.1 Effet du travail du sol

3.1.1 Chênes en contexte d'envahissement pas la fougère aigle

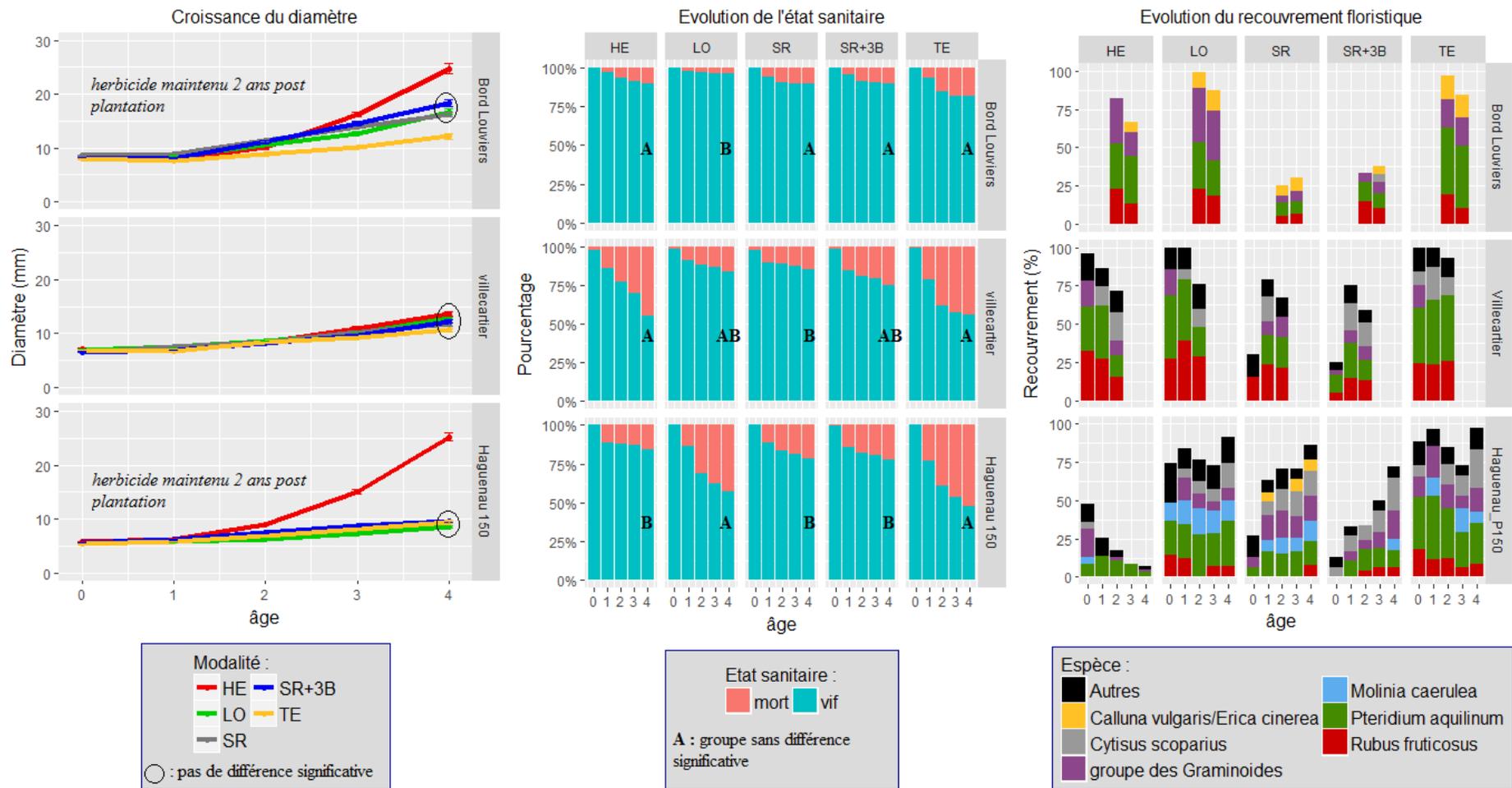


Figure 9 : Résultats pour les chênes en contexte d'invasion par la fougère aigle.

La figure 9 montre les résultats dendrométriques (croissance radiale et survie) ainsi que les résultats floristiques pour le chêne, obtenus sur les différents sites en contexte d'envahissement par la fougère aigle.

| mod | HE | LO | SR | SR+3B | TE |
|----------------------|------|------|------|-------|------|
| Bord Louviers | 0.18 | 0.03 | 0.75 | 0.67 | 0.00 |
| Villecartier | 0.34 | 0.28 | 0.35 | 0.43 | 0.00 |
| Haguenau P150 | 0.78 | 0.13 | 0.25 | 0.57 | 0.00 |

Tableau 8 : Indicateurs floristiques pour les différents sites en contexte fougère.

Pour rappel, la méthode pour obtenir l'indicateur floristique est présentée dans la partie « Matériel et méthode » de ce mémoire.

➤ Modalité témoin (« TE ») :

Les résultats de recouvrement floristique confirment bien que ne pas intervenir laisse une végétation abondante mais aussi une mortalité élevée (près de 50% à 4 ans à Villecartier et Haguenau) ainsi qu'une croissance radiale faible.

➤ Modalités de travail du sol avec Scarificateur Réversible (« SR » et « SR+3B ») :

Dans un contexte d'envahissement par la fougère aigle, le passage du Scarificateur Réversible était attendu comme étant efficace pour lutter contre cette espèce par l'arrachage de ses rhizomes en profondeur. L'évolution du recouvrement floristique montre que cet outil a bien permis un bon contrôle de la végétation en comparaison avec les autres modalités. Sur les sites de Bord Louviers et Villecartier, les modalités SR et SR+3B présentent les meilleurs indicateurs floristiques. A Haguenau 150, seule la modalité herbicide semble permettre un meilleur contrôle de la végétation. La création d'un billon à l'aide du SSMF suite au scarificateur réversible (modalité SR+3B) semble montrer un meilleur contrôle de la végétation remarquable uniquement sur le site d'Haguenau 150. Cependant, les suivis dendrométriques (diamètre et survie) ne permettent pas de mettre en évidence l'efficacité du billon suite au passage du Scarificateur Réversible. Une croissance significativement supérieure au témoin n'est remarquable que sur le site de Bord Louviers, où le contrôle de la fougère semble avoir le mieux fonctionné. Pour la survie, les deux modalités nécessitant le Scarificateur Réversible montrent de bons résultats, avec une mortalité ne dépassant pas les 25% à la 4^{ème} année sur l'ensemble des sites. La faible mortalité dans le témoin à Bord Louviers ne permet pas de mettre en évidence l'efficacité d'une intervention avec le Scarificateur Réversible, mais cette dernière est prouvée sur les 2 autres sites, où la mortalité est proche de 50% à 4 ans dans le témoin. La création d'un billon à l'aide du SSMF suite au scarificateur réversible (modalité SR+3B) ne montre, dans aucun des cas étudiés, des résultats dendrométriques significativement meilleurs que le SR seul. Le billonnage pour le chêne ne semble donc pas, à ce stade, nécessaire pour lutter contre la fougère aigle.

➤ Modalité herbicide (« HE ») :

Sur ces sites envahis par la fougère aigle, un traitement à l'Asulame (désherbant spécifique de la fougère aigle) a été appliqué l'année précédant la plantation. Son action étant censée durer entre 3 et 4 ans (Gama, 2006), elle n'a pas été reconduite par la suite. Néanmoins, l'année suivant la plantation, un traitement au glyphosate a été réalisé pour contrôler les frondes de fougère aigle résiduelles et les espèces colonisatrices arrivant.

Sur le site de Villecartier, le suivi de la végétation concurrente montre que cette dernière a mal été contrôlée dans la modalité herbicide. Cela peut s'expliquer par le fait que le traitement a été mal appliqué ou dans de mauvaises conditions. Sur le site d'Haguenau 150, l'herbicide semble avoir très bien fonctionné et montre un bon contrôle de la végétation concurrente et surtout de la fougère. Parallèlement, une croissance du diamètre largement supérieure aux autres modalités (25 mm de diamètre à 4 ans en moyenne contre autour de 9 mm pour les autres modalités) ainsi qu'une bonne survie, avec moins de

20% de mortalité contre plus de 50% chez le témoin. A Bord Louviers, autre site où l'herbicide a été efficace, le contrôle de la végétation est moins bon qu'à Haguenau et l'indicateur floristique est inférieur à celui de Villecartier où l'herbicide a été inefficace. Néanmoins, la croissance radiale est significativement supérieure aux autres modalités et la survie est bonne. A Villecartier, ce mauvais contrôle de la végétation semble se traduire par une mortalité proche de celle du témoin (50% à 4 ans) et une croissance significativement égale au témoin.

➤ Modalité locale (« LO ») :

La modalité locale étant différente dans les 3 sites, il n'est pas possible d'apporter de conclusions transversales. Cependant, nous pouvons noter que l'utilisation du labour forestier à Haguenau 150 ne permet qu'un très faible contrôle de la végétation, ce qui se traduit par une faible croissance et une mortalité proche des 50%, comme dans le témoin. A Villecartier, le travail superficiel au cover crop semble permettre un léger contrôle de la végétation (indicateur floristique de 0.28) ainsi qu'une mortalité de moins de 20% à 4 ans mais une croissance similaire au témoin. A Bord Louviers, le traitement chimique de la fougère et le broyage, montre, à 2 ans, une réduction de la fougère mais cette dernière est remplacée par des graminoides, l'indicateur floristique est donc proche de 0. Cependant, la survie est bonne et la croissance similaire aux interventions avec le Scarificateur Réversible.

Points à retenir pour le chêne en contexte fougère :

- Le principal facteur contraignant semble être la concurrence de la fougère aigle et non la compaction du sol.
- Le Scarificateur Réversible est efficace pour contrôler la fougère aigle et la création d'un billon ne semble pas nécessaire.
- Le hachage du sol (cover crop ou labour à la charrue à disque) ne semble pas efficace pour contrôler la fougère aigle et permettre une bonne installation des plants.

3.1.2 Pins en contexte d'envahissement par la fougère aigle

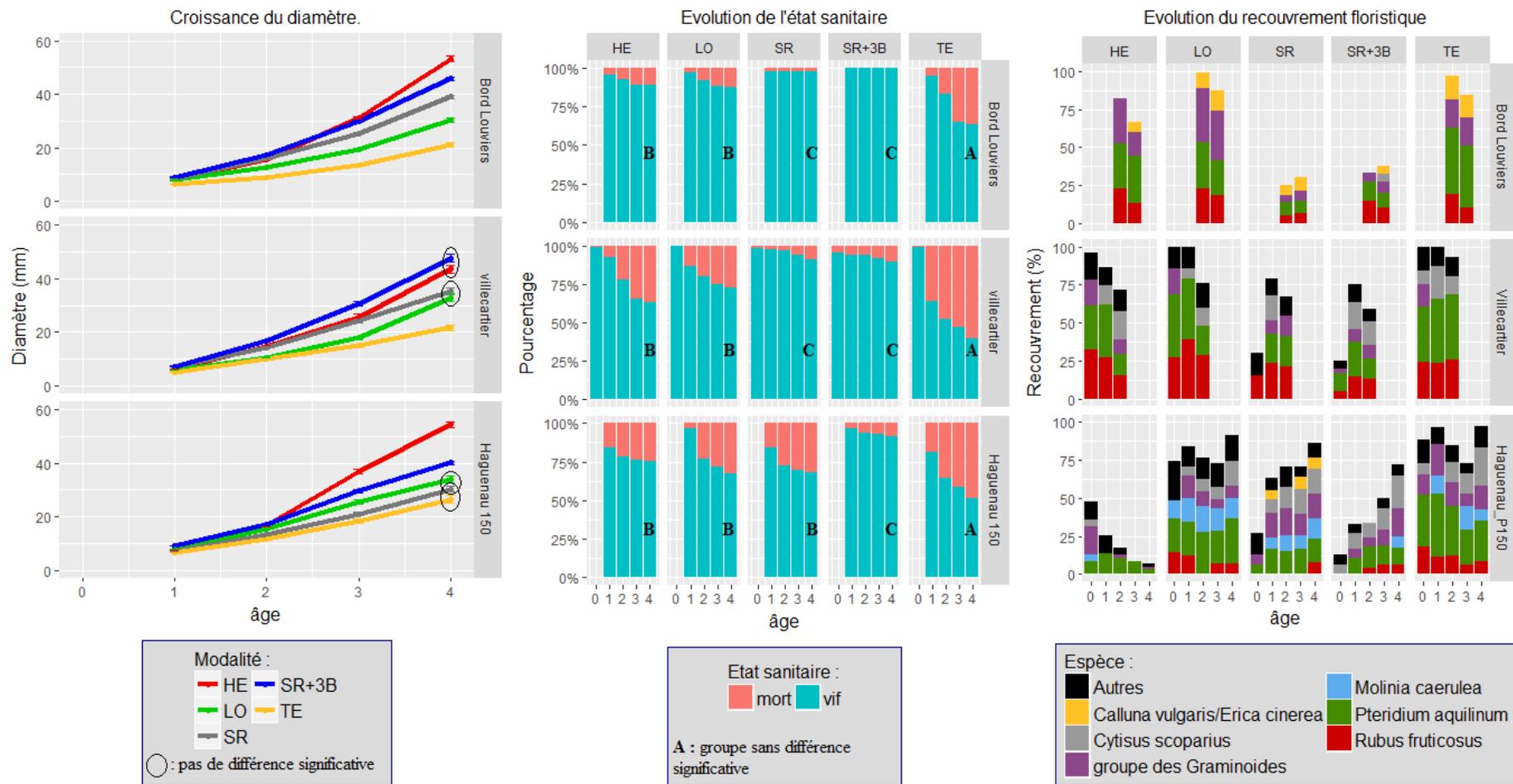


Figure 10 : Résultats pour les pins en contexte d'invasion par la fougère aigle.

La figure 10 montre les résultats dendrométriques (croissance radiale et survie) ainsi que les résultats floristiques pour le pin, obtenus sur les différents sites en contexte d'invasion par la fougère aigle.

| mod | HE | LO | SR | SR+3B | TE |
|----------------------|------|------|------|-------|------|
| Bord Louviers | 0.18 | 0.03 | 0.75 | 0.67 | 0.00 |
| Villecartier | 0.34 | 0.28 | 0.35 | 0.43 | 0.00 |
| Haguenau P150 | 0.78 | 0.13 | 0.25 | 0.57 | 0.00 |

Tableau 9 : Indicateurs floristiques pour les différents sites en contexte fougère.

Pour rappel, l'essence plantée à Bord Louviers est du Pin laricio alors qu'il s'agit du Pin sylvestre à Villecartier et Haguenau 150. Compte tenu de la proximité écologique de ces deux essences, nous faisons l'hypothèse que l'espèce (*sylvestris et nigra*) n'intervient pas dans la croissance du jeune âge.

- Modalité témoin (« TE ») :

Dans les 3 sites étudiés, n'ayant aucun moyen de contrôle de la végétation, le recouvrement total dans la modalité témoin est supérieur à 80% dans les 3 sites sur toutes les années mesurées, avec une forte présence de la fougère aigle. Cette forte concurrence de la strate herbacée et l'absence de travail du sol se traduit par une mortalité élevée sur les 3 dispositifs d'étude, à savoir près de 50% à 4 ans. La croissance radiale quant à elle est significativement la plus faible parmi les 5 modalités étudiées avec des plants ne dépassant pas les 20 mm de diamètre 4 ans après la plantation.

- Modalités de travail du sol avec Scarificateur Réversible (« SR » et « SR+3B ») :

Les deux modalités ayant nécessité l'intervention du Scarificateur Réversible montrent un bon contrôle de la fougère aigle et de la strate herbacée en général. L'indicateur floristique est en effet le plus élevé pour ces deux modalités, mis à part sur le site d'Haguenau 150 où l'herbicide montre un meilleur contrôle de la végétation.

Les résultats les plus satisfaisants du scarificateur réversible s'observent sur la survie et la croissance radiale des plants. Pour la survie, elle est significativement supérieure aux 3 autres modalités, avec moins de 10% de à 4 ans. Cependant, il est remarquable que la modalité SR+3B montre une croissance radiale significativement supérieure à la modalité SR dans les 3 sites étudiés ainsi qu'une survie nettement meilleure à Haguenau 150 (moins de 10% de mortalité contre plus de 25% à 4 ans). Le billonnage semble donc favoriser la croissance du pin et permettre une meilleure survie dans certains cas.

- Modalité herbicide (« HE ») :

La modalité herbicide montre un très bon contrôle de la végétation sur le site d'Haguenau 150 avec un recouvrement total de moins de 10% la 4^{ème} année. A Bord Louviers et Villecartier, ce contrôle est moins bon avec des indicateurs floristiques respectivement de 0.18 et 0.34, contre 0.78 à Haguenau 150. Le traitement à l'herbicide montre une survie insuffisante (sous le seuil des 80% de vivants à 4 ans) sur les sites d'Haguenau 150 et Villecartier. A Bord Louviers la survie est convenable (seulement 12% de mortalité), mais comparée aux modalités avec le scarificateur réversible, elle est significativement inférieure. Néanmoins, il est important de noter que la croissance radiale est excellente dans les 3 sites et domine les autres modalités (mis à part sur le site de Villecartier où la modalité SR+3B est semblable).

- Modalité locale (« LO ») :

A Bord Louviers, le labour forestier ne permet pas un bon contrôle de la végétation, qui semble être semblable à la modalité témoin (indicateur floristique proche de 0). La croissance radiale est faiblement supérieure à celle du témoin et la mortalité supérieure à 20%. Cette technique ne semble donc pas être adaptée pour lutter localement contre les invasions par la fougère aigle.

A Villecartier, le travail superficiel au Cover Crop permet un contrôle limité de la végétation concurrente. La mortalité à 4 ans est proche des 25% et la croissance radiale proche de celle du témoin et bien inférieure à la modalité SR+3B ayant bien fonctionné (près de 47 mm de diamètre contre 32 mm). Cette technique ne semble pas non plus être adaptée pour permettre l'installation des plants de Pin en contexte d'invasion par la fougère.

Points à retenir pour le pin en contexte fougère :

- Le Scarificateur Réversible est efficace pour contrôler la fougère aigle et la création d'un billon permet une meilleure croissance et semble pouvoir améliorer la survie.
- Un décompactage du sol en profondeur améliore nettement la survie mais ne semble pas influencer sur la croissance radiale (comparaison des modalités SR et SR+3B avec l'herbicide).
- Le hachage du sol (cover crop ou labour à la charrue à disque) ne semble pas efficace pour contrôler la fougère aigle et permettre une bonne installation des plants.

3.1.3 Chênes en contexte d'invasion par la molinie

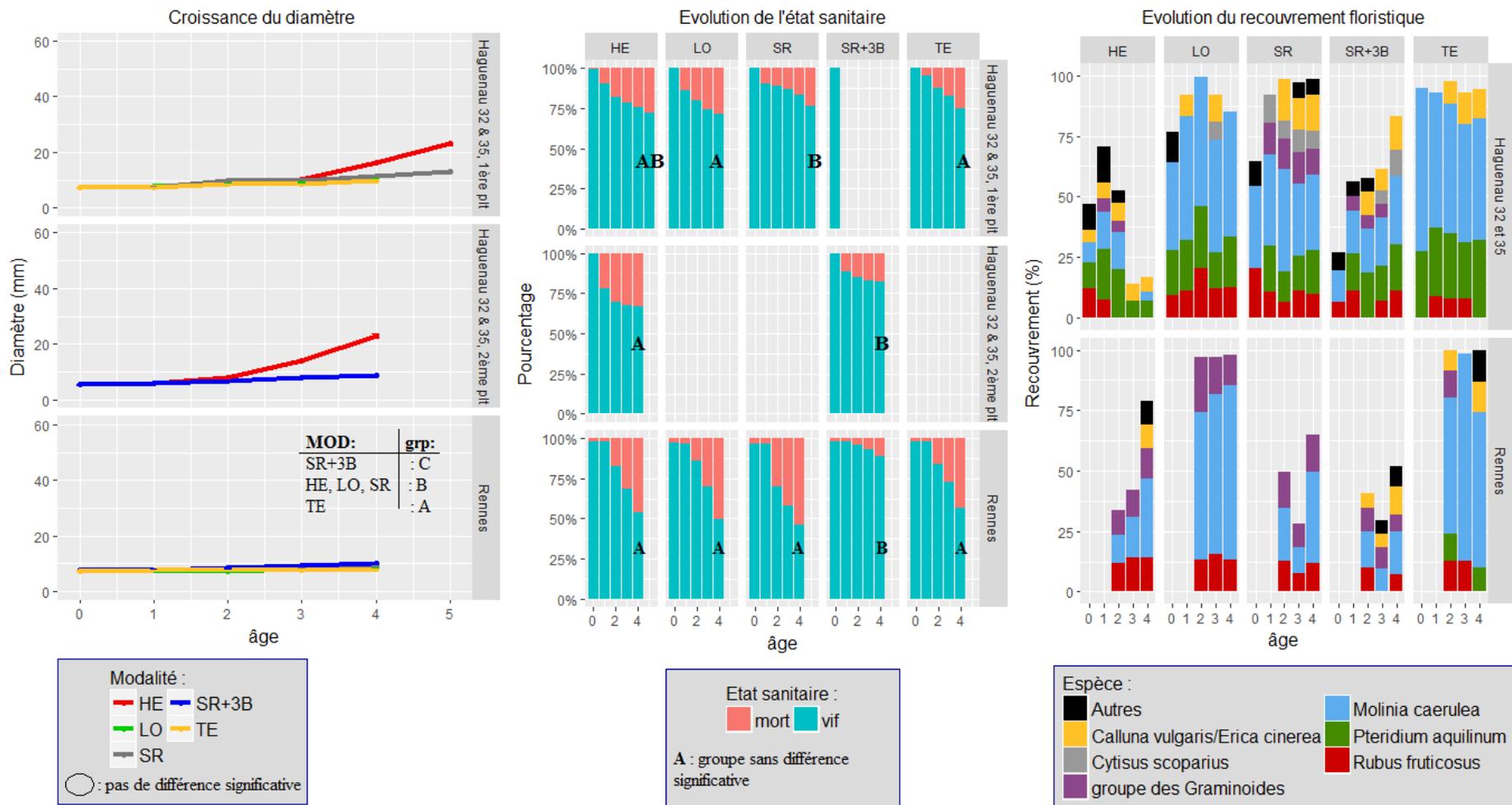


Figure 11 : Résultats pour les chênes en contexte d'envahissement par la molinie.

La figure 11 montre les résultats dendrométriques (croissance radiale et survie) ainsi que les résultats floristiques pour le chêne, obtenus sur les différents sites en contexte d'invasion par la molinie.

| mod | HE | LO | SR | SR+3B | TE |
|--------------------|------|-------|------|-------|------|
| Rennes | 0.69 | 0.00 | 0.53 | 0.62 | 0.00 |
| Haguenau P32 et 35 | 0.56 | -0.07 | 0.08 | 0.51 | 0.00 |

Tableau 10 : Indicateurs floristiques pour les différents sites en contexte molinie.

A Haguenau, dans les parcelles 32 et 35, la modalité SR+3B a été replantée l'année suivant la plantation pour cause de gel. Lors de la replantation, une modalité Herbicide avec 100 plants a été mise en place pour servir de référence. Les graphiques de croissance radiale et de survie présentent bien de manière distinguer ces deux situations (1^{ère} plantation et 2^{ème} plantation).

Les dispositifs des parcelles 32 et 35 ont été regroupés comme un seul dispositif compte tenu de leur proximité géographique, du fait qu'ils aient été implantés la même année et que le contexte stationnel est semblable.

➤ Modalité témoin (« TE ») :

La modalité témoin montre un recouvrement total de près de 100% avec plus de 75% de molinie. La mortalité engendrée chez les jeunes plants de chênes est alors de plus de 25% à la 4^{ème} année à Haguenau et de près de 50% à Rennes. Le diamètre, quant à lui, ne montre aucune augmentation en 4 ans. Une intervention s'avère donc primordiale pour permettre la bonne installation des plants.

➤ Modalités de travail du sol avec Scarificateur Réversible (« SR » et « SR+3B ») :

A Rennes, les modalités utilisant le Scarificateur Réversible montrent un bon contrôle de la végétation et surtout une bonne réduction du recouvrement de la molinie, dont la valeur est d'environ 30% dans la modalité SR et 15% dans la modalité SR+3B, contre plus de 80% dans le témoin à la 3^{ème} année. A Haguenau, la modalité SR+3B montre un bon contrôle de la végétation (indicateur floristique de 0.51) tandis que la modalité SR ne semble permettre qu'un faible contrôle (indicateur floristique de 0.08). A Haguenau, le billonnage semble donc nécessaire pour maintenir un sol dégagé.

A Haguenau, le SR montre une survie légèrement meilleure que le témoin, mais cette dernière dépasse les 20% de mortalité. La modalité SR+3B replantée, quant à elle, montre une meilleure survie avec une mortalité ne dépassant pas les 20%. A Rennes, la modalité SR montre une mortalité équivalente à celle du témoin avec plus de 50% de morts à 4 ans. Quant à elle, la modalité SR+3B montre une bonne survie avec moins de 15% de mortalité. Cela peut s'expliquer par l'effet du billonnage. En effet, le dispositif de Rennes est placé dans une zone très hydromorphe avec une nappe d'eau dépassant la surface du sol durant l'hiver. Le Scarificateur Réversible crée alors une légère dépression dans le sol en retirant la couche de molinie et l'épaisseur racinaire, créant un effet cuvette retenant l'eau (voir photo). Quant à lui, le billonnage surélève le plant par rapport au sol, le protégeant alors de l'asphyxie.



Figure 13 : Ligne de plantation travaillée au Scarificateur Réversible à Rennes (ONF).



Figure 12 : Ligne de plantation travaillée au Scarificateur Réversible puis billonnage à Rennes (ONF).

La mortalité plus élevée dans la modalité SR peut ainsi s'expliquer par l'asphyxie engendrée par la nappe d'eau, alors que la création d'un billon permet de limiter ce phénomène.

➤ Modalité herbicide (« HE ») :

A Rennes, la modalité herbicide montre un bon contrôle de la végétation concurrente les 3 premières années suivant la plantation avec une forte réduction de la molinie. Cependant, la mortalité reste élevée (50% à 4 ans) et le diamètre des plants n'a pas évolué depuis la plantation. A Haguenaou, l'herbicide montre un bon contrôle de la végétation, notamment de la molinie, principale concurrente. La mortalité est cependant proche des 25% à 4 ans, mais replacé au milieu des autres modalités, elle est significativement semblable aux autres. Néanmoins, l'herbicide montre les meilleurs, voire les seuls résultats d'une véritable croissance comparé aux autres modalités.

➤ Modalité locale (« LO ») :

A Rennes et à Haguenaou, les modalités locales n'ont absolument pas fonctionnées sur le contrôle de la molinie et des autres espèces concurrentes. Le cover crop et le labour forestier ne semblent donc pas efficaces dans des contextes d'envahissement par la molinie.

Points à retenir pour le chêne en contexte molinie :

- Le Scarificateur Réversible est efficace pour contrôler la molinie, mais la formation d'un billon apparaît nécessaire dans les terrains les plus hydromorphes pour sauver les plants de l'envahissement.
- Le travail du sol semble limiter le développement des plants.
- Le hachage du sol (cover crop ou labour à la charrue à disque) n'est pas efficace pour contrôler la molinie et permettre une bonne installation des plants.

3.1.4 Pins en contexte d'envahissement par la molinie

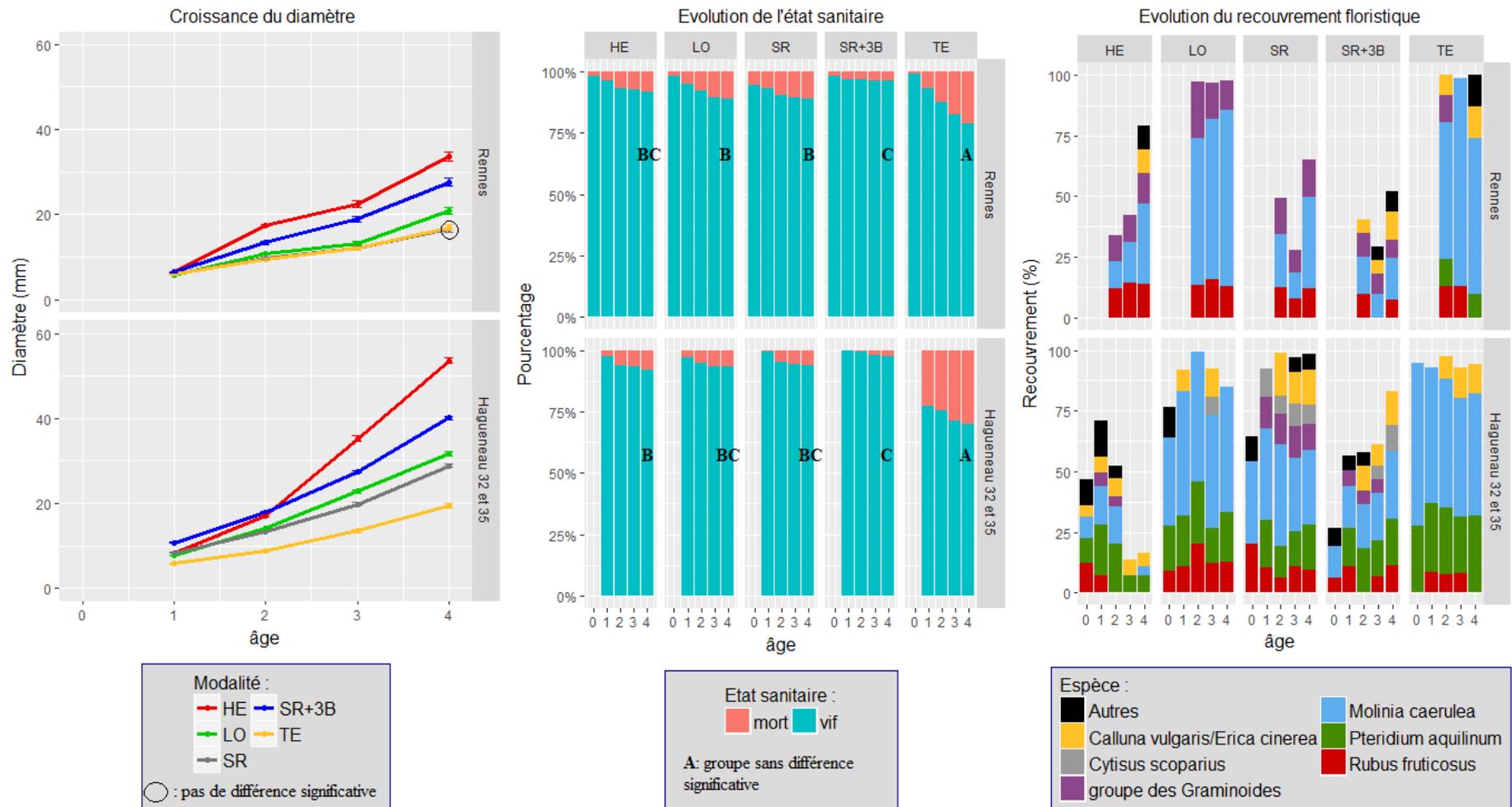


Figure 14 : Résultats pour les Pins en contexte d'invasion par la molinie

La figure 14 montre les résultats dendrométriques (croissance radiale et survie) ainsi que les résultats floristiques pour le pin, obtenus sur les différents sites en contexte d'invasion par la mouline.

| mod | HE | LO | SR | SR+3B | TE |
|--------------------|------|-------|------|-------|------|
| Rennes | 0.69 | 0.00 | 0.53 | 0.62 | 0.00 |
| Haguenau P32 et 35 | 0.56 | -0.07 | 0.08 | 0.51 | 0.00 |

Tableau 11 : Indicateurs floristiques pour les différents sites en contexte mouline.

- **Modalité témoin (« TE ») :**

Les résultats de recouvrement floristique montrent que le recouvrement total est proche de 100% dans le témoin et que la mouline est présente à plus de 75%. Cette modalité présente donc un contexte de concurrence par la strate herbacée très élevée. Dans les deux sites, la mortalité est significativement supérieure aux autres modalités avec près de 30% de morts à 4 ans. La croissance radiale est, à Haguenau, inférieure à l'ensemble des autres modalités et à Rennes uniquement la modalité SR montre un résultat de croissance aussi faible.

- **Modalités de travail du sol avec Scarificateur Réversible (« SR » et « SR+3B ») :**

A Rennes, les modalités SR et SR+3B montrent un bon contrôle de la mouline et de la strate herbacée en général avec un recouvrement total n'excédant pas les 60% et des indicateurs floristiques respectivement de 0.53 et 0.62 (le contrôle de la végétation est donc sensiblement meilleur avec le billonnage). A Haguenau, la modalité SR+3B montre un meilleur contrôle de la végétation.

Dans les deux sites étudiés, la modalité SR+3B montre de meilleurs résultats de croissance et de survie que la modalité SR.

- **Modalité herbicide (« HE ») :**

Dans les deux sites, la modalité herbicide montre un bon contrôle de la végétation concurrente avec des indicateurs floristiques de 0.69 et 0.56 pour les sites de Rennes et Haguenau. La mortalité est faible (environ 10%) et la croissance radiale est la meilleure parmi l'ensemble des modalités testées.

- **Modalité locale (« LO ») :**

Sur les deux sites, le contrôle de la végétation concurrente est très faible (indicateur floristique proche de 0). Cependant, la survie et la croissance sont significativement meilleures que dans le témoin et la mortalité ne dépasse pas les 15% à 4 ans.

Points à retenir pour le pin en contexte mouline :

- Le Scarificateur Réversible est efficace pour contrôler la mouline, et la formation d'un billon favorise la survie et la croissance.
- Le travail du sol semble limiter le développement des plants en comparaison à l'herbicide.
- Le hachage du sol (cover crop ou labour à la charrue à disque) n'est pas efficace pour contrôler la mouline et permettre une bonne installation des plants.

3.1.5 Conclusions transversales sur les modalités testées dans le réseau ALTER

L'ensemble des résultats de croissance, survie et suivi du recouvrement floristique effectués dans le cadre du réseau ALTER, montre qu'il n'est pas possible d'obtenir une bonne reprise des plants dans des contextes d'invasion par la fougère aigle ou la mouline si cette dernière n'est pas contrôlée de manière efficace. En effet, la modalité témoin montre dans l'ensemble des cas une mortalité élevée et

une croissance radiale très faible. Parallèlement, un traitement chimique ou mécanique efficace sur le contrôle de la strate herbacée induit une amélioration de la survie et/ou de la croissance radiale, à la fois chez le pin et le chêne.

Les résultats montrent de manière transversale entre les différents contextes et les différentes essences que l'utilisation des herbicides, lorsqu'elle est bien réalisée et est efficace (bonne réduction de la concurrence herbacée), permet une croissance radiale nettement supérieure aux autres modalités dans la majorité des cas. Cependant, dans un contexte de plantation, la survie est d'autant plus importante que la croissance. Or, malgré cette croissance supérieure, la survie peut être inférieure à une modalité efficace de travail du sol.

De manière générale, le Scarificateur Réversible montre de bons résultats de contrôle de la végétation concurrente. Le billonnage ne semble pas plus efficace qu'une utilisation simple du scarificateur réversible dans un contexte d'envahissement par la fougère aigle pour permettre un meilleur contrôle de la fougère et une meilleure survie. Néanmoins, chez le pin, le billonnage semble permettre une meilleure survie et une meilleure croissance. Pour le chêne, cela n'est pas visible à 4 ans, mais il s'agit d'une essence à croissance plus lente. Dans un contexte d'envahissement par la molinie avec une hydromorphie marquée, le billonnage semble nécessaire à la fois pour mieux contrôler la végétation concurrente mais aussi pour surélever les plants lors des remontées d'eau et éviter l'effet cuvette que peut avoir la simple scarification.

3.2 Synthèse des coûts techniques

A partir des différentes sources de relevés chronométriques et des coûts techniques horaires disponibles dans la base interne de l'ONF, il a été déterminé les coûts techniques des différents outils testés dans le projet PILOTE. Ces résultats vont permettre, premièrement, d'établir le coût technique des modalités testées dans le réseau ALTER et ainsi permettre de proposer un bilan à la fois technique (survie et croissance) mais aussi économique de ces modalités.

➤ Scarificateur Réversible

Dans le cadre du projet PILOTE, le Scarificateur Réversible a été testé sur les sites de Fontainebleau et de Bord Louviers. A Bord Louviers, ce dernier a été testé en réalisant des bandes de 2 largeurs différentes : 1.5m et 2m. Voici, à partir des informations disponibles, les résultats de l'estimation des coûts techniques :

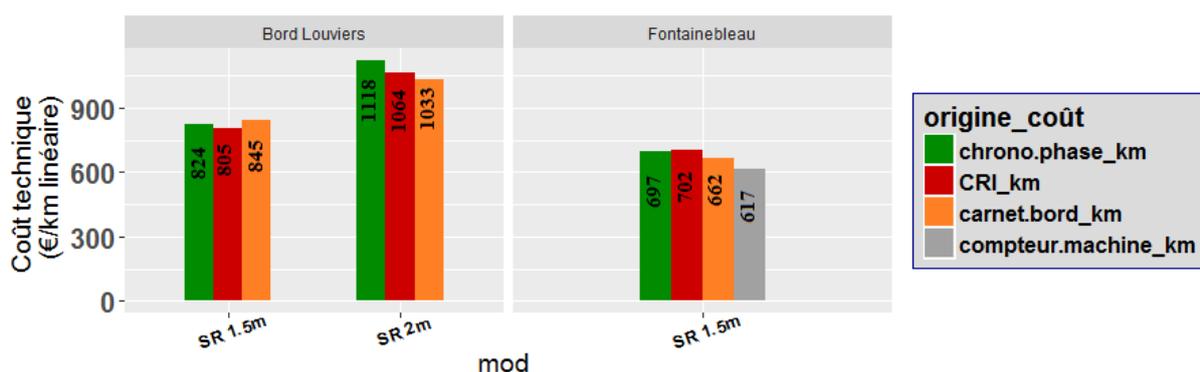


Figure 15 : Estimation des coûts techniques du Scarificateur Réversible.

La figure 15 montre, que pour les 2 modalités testées sur chaque site, les estimations du coût technique sont relativement proches. En effet, pour chaque modalité (sur chaque site), la différence entre la valeur maximum et la valeur minimale n'excède pas 12% de la valeur maximale. Compte tenu des nombreuses estimations et approximations faites, nous pouvons faire l'hypothèse que cette valeur est acceptable et qu'il est possible de calculer une moyenne entre les différentes sources d'estimation. Le tableau 12 montre les résultats obtenus :

| | Bord Louviers | Fontainebleau |
|--------------------------------------|--------------------|-------------------|
| Scarificateur Réversible 1.5m | 824 €/km linéaire | 670 €/km linéaire |
| Scarificateur Réversible 2m | 1071 €/km linéaire | - |

Tableau 12 : Moyenne des estimations des coûts techniques du Scarificateur Réversible.

Les résultats montrent que le coût technique du Scarificateur Réversible en bande de 1.5 m est compris entre 670 et 824 €/km linéaire travaillé. Lorsque ce dernier est passé en bande de 2m, son coût technique est légèrement plus élevé, à savoir près de 1071 €/km linéaire travaillé.

➤ Sous Soleur Multifonction

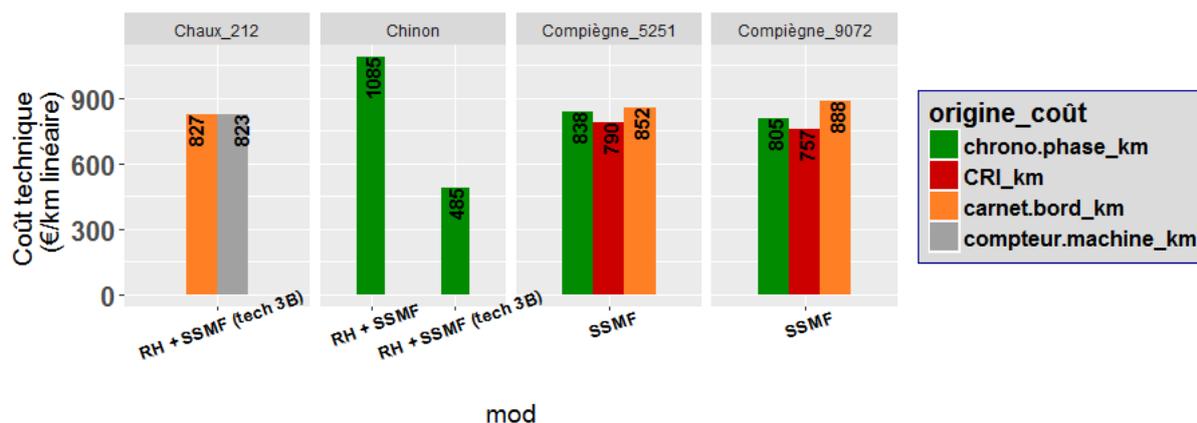


Figure 16 : Estimation des coûts techniques du Sous Soleur Multifonction.

Lorsqu'il y a une présence importante de débris végétaux ou une strate herbacée épaisse, le Sous Soleur Multifonction (SSMF) est utilisé suite au passage d'un outil permettant de dégager le terrain. Dans le cadre d'ALTER, le Scarificateur Réversible a permis cette action. Pour PILOTE, le dégagement du sol a été réalisé par le RazHerb (noté RH dans la figure ci-dessus) sur les sites de Chaux et Chinon.

Pour les sites de Chaux et les deux sites de Compiègne, les différentes sources de chronométrage permettent d'établir des coûts techniques proches. Il sera donc possible, pour ces 3 sites, de proposer une moyenne. A Chinon, le SSMF a été utilisé de 2 manières différentes : premièrement en sous solage simple et deuxièmement en sous solage avec création d'un billon (technique 3B). Logiquement, la création d'un billon aurait dû prendre plus de temps, se répercutant ainsi sur le coût. C'est cependant l'inverse qui est observé, avec un coût divisé par 2, ce qui ne paraît absolument pas possible. Il y a cependant une explication : la modalité SSMF avec création d'un billon a été réalisée sur une très courte distance (50m) et par conséquent chronométrée que durant 30 minutes, contre près de 3 heures de mesure pour la modalité SSMF en simple décompactage. Ce temps trop court de mesure ne permet pas de considérer dans son ensemble l'utilisation de l'outil. Ainsi, ce résultat de ne peut rentrer en compte dans le calcul du coût technique de l'utilisation du Sous Soleur Multifonction. Le tableau 13 montre les résultats de l'estimation des coûts du Sous Soleur Multifonction :

| | Chaux 212 | Chinon | Compiègne 5251 | Compiègne 9072 |
|----------------------------|-------------------|--------|----------------|----------------|
| SSMF (technique 3B) | 825 €/km linéaire | - | - | - |

| | | | | |
|-------------|---|--------------------|-------------------|-------------------|
| SSMF | - | 1085 €/km linéaire | 827 €/km linéaire | 817 €/km linéaire |
|-------------|---|--------------------|-------------------|-------------------|

Tableau 13 : Moyenne des estimations des coûts techniques du Sous Soleur Multifonction.

Au vu des résultats, la création d'un billon à l'aide du Sous Soleur Multifonction ne semble pas montrer un coût supérieur à l'utilisation simple de l'outil, dont le coût technique revient entre 817 et 1085 €/km linéaire travaillé.

➤ Bilan sur la modalité SR+3B du projet ALTER :

Rappelons que la modalité SR+3B correspond au passage du Scarificateur Réversible puis du Sous Soleur Multifonction avec formation d'un billon. Par conséquent, le coût technique global de la modalité correspond au passage de ces deux appareils. Dans ce calcul, nous utiliserons les résultats du passage du Scarificateur Réversible sur une bande de 1.5m.

Au vu des résultats précédemment fournis, la modalité SR+3B à un coût technique compris entre 1487 et 1909 €/km linéaire travaillé. Soit une valeur centrale d'environ 1700 €/km linéaire travaillé.

➤ Modalité Herbicide (HE) :

Déterminer le coût de la modalité Herbicide ne pourra se faire de la même manière que les modalités de travail du sol. Un traitement à l'Asulame a bien été effectué sur le dispositif PILOTE de Bord Louviers, mais il s'agit d'un trop faible échantillonnage pour en estimer un coût. De plus, le suivi de ce traitement n'a été que partiel et les informations disponibles sont incomplètes. Par conséquent, le coût des herbicides sera déterminé à partir de sources bibliographiques.

Sur les dispositifs envahis par la fougère aigle (Bord Louviers, Haguenau 150 et Villectartier), il a été effectué un traitement à l'Asulame, spécifique contre la fougère aigle, avant la plantation puis un traitement au glyphosate l'année suivant la plantation pour maintenir le sol à nu. Sur les dispositifs envahis par la molinie, il a été effectué 2 traitements au glyphosate : un avant la plantation et un l'année suivante.

Pour établir le coût des herbicides, seront utilisés les guides de sylviculture de l'ONF de la « Chênaie atlantique » et des « Pineraies des plaines du Centre et du Nord-Ouest » ainsi qu'un guide pratique « Utilisation des herbicides en forêt et gestion durable » d'Antoine Gama. Il s'agira des coûts d'application des herbicides à dos à l'aide d'une rampe. Les guides de sylviculture de l'ONF indiquent le prix à l'hectare des herbicides, à savoir prix avec la marge effectuée par l'entreprise. Pour obtenir le coût technique, 30% seront retirés à ce prix, correspondant globalement à la marge.

| | Glyphosate | | Asulame | |
|----------------------------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| | Prix, avec marge | Coût technique | Prix, avec marge | Coût technique |
| Guide Chêne, ITTS 3.CHS.1 | 220 | 154 | - | - |
| Guide Pin, ITTS 3.PM.2 | 180 | 126 | 450 | 315 |
| Guide pratique d'A.Gama | - | 130 | - | 377 |

Tableau 14 : Présentation des coûts techniques à partir de différentes sources (Jarret, 2004 ; Chabaud, 2009 ; Gama, 2006).

Signification des Itinéraires Techniques de Travaux Sylvicoles (ITTS) des guides de sylviculture de l'ONF :

- ITTS 3.CHS.1 : Régénération artificielle de chêne sessile sans accompagnement feuillu naturel avec végétation d'accompagnement herbacée ou semi-ligneuse envahissante : fougère, molinie et callune (Jarret, 2004).
- ITTS 3.PM.2 : Plantation de pin maritime (Chabaud, 2009).

Les différentes sources montrent un certain écart dans les estimations du coût technique des herbicides, mais cela permet néanmoins de donner une gamme de prix où l'ordre de grandeur est proche.

➤ Modalités Locales (LO) :

Les modalités locales testées dans le cadre du réseau ALTER ayant été réalisées avec des outils endémiques tels que le broyeur, la charrue forestière ou encore le cover crop, les coûts à l'hectare de ces outils vont être estimés à partir des guides de sylviculture de l'ONF (Jarret, 2004 ; Chabaud, 2009). Le coût du traitement à l'Asulame à Bord Louviers est proposé à partir des résultats déjà acquis précédemment.

| Site | Type de travail | Coût (€/ha) | Coût total site (€/ha) |
|----------------------|--------------------------------------|-------------|------------------------|
| Bord Louviers | traitement fougère à l'Asulame | 346 | 516 |
| | Broyage à 10cm du sol | 170 | |
| Haguenau | Broyage | 170 | 420 |
| | labour forestier (charrue à disques) | 250 | |
| Villecartier | Broyage | 170 | 340 |
| | Cover crop | 170 | |
| Rennes | Mise en andain de la végétation | 130 | 300 |
| | Cover crop | 170 | |

Tableau 15 : Estimation des coûts technique des modalités Locales ALTER (Chabaud, 2009).

3.2.1 Détermination des coûts techniques des autres outils testés dans PILOTE :

Le projet ALTER a eu pour principale vocation de tester et de comparer l'efficacité d'un travail du sol sur la végétation concurrente pour permettre un bon contrôle de cette dernière, mais aussi permettre la bonne installation des plants. Les résultats ci-dessus montrent, que d'un point de vue économique, les itinéraires testés sont coûteux. Les outils testés dans PILOTE ont pour but d'être notamment viable économiquement. Voici les résultats des calculs de coût technique de ces outils.

➤ Outil Culti3B :

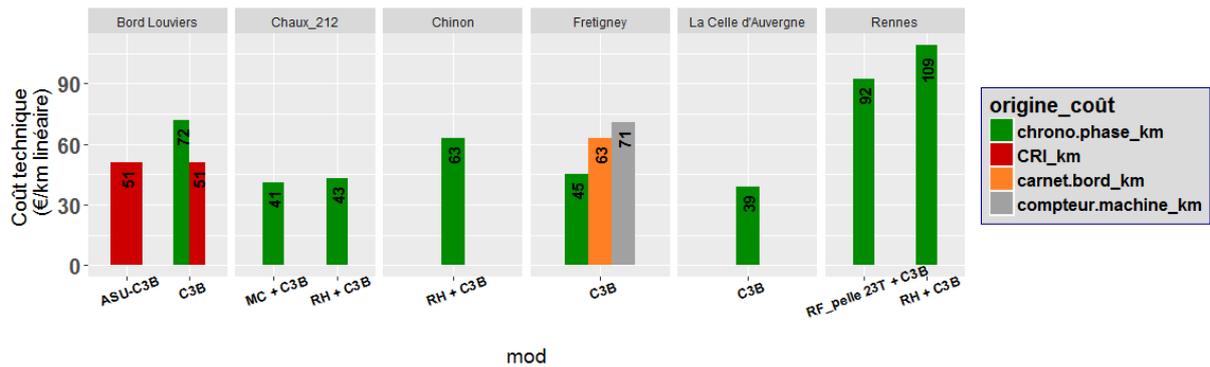


Figure 17 : Estimation des coûts techniques du Culti3B.

Les résultats ci-dessus présentent les estimations du coût technique du Culti3B dans les différents contextes dans lesquels il a été utilisé. Il a en effet été utilisé en passage simple (Frétagne) ou suite à un outil préalable de dégagement de la végétation concurrente et/ou des débris, comme le Râteau Fléco (RF_pelle 23T), le RazHerb (RH) ou encore le Mery Crusher (MC) qui est un gros broyeur forestier. Compte tenu des différents contextes de sol et des facilités de passage de l'outil (présence de souches, etc), et au vu des résultats, il est difficile de présenter différents prix en fonction du travail du sol précédant le passage du Culti3B. Néanmoins, à La Celle d'Auvergne, préalablement à l'ensemble des modalités, a été effectué un dessouchage et une mise en andain des rémanents avec une dent de dessouchage. La photo ci-dessous montre le niveau de préparation du sol à La Celle d'Auvergne avant le passage des différents outils testés, qui laisse un terrain nettement dégagé et déjà largement décompacté. Cela explique en effet les faibles coûts observés sur ce site.



Figure 18 : Préparation du terrain à l'aide d'une dent de dessouchage à La Celle d'Auvergne (Vidal, CNPF-IDF).

A partir des résultats ci-dessus et compte tenu du nombre de répétitions de l'utilisation du Culti3B, il est possible de présenter une gamme de coûts pour l'outil, dont voici les estimations pour un km linéaire travaillé.

- Conditions favorables :
 - Estimé à partir des moyennes des coûts des sites de Bord Louviers, Chaux, Chinon, Frétagne et La Celle d'Auvergne.
 - Correspond à un terrain dégagé, par l'utilisation préalable d'un outil et/ou car il s'agit d'un terrain naturellement sain (ancien champs, absence de souches ou rémanents, etc)
- Conditions défavorables :
 - Estimé à partir de la moyenne des coûts du site de Rennes, très hydromorphe.

- Correspond à un terrain non dégagé, très hydromorphe ou très compacté, nécessitant des arrêts fréquents du tracteur.

| | Conditions favorables | Conditions défavorables |
|---------------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Coût technique (€/km linéaire) | 52 | 100 |

Tableau 16: Estimation du coût technique du Culti3B.

➤ Charrue bi-disques

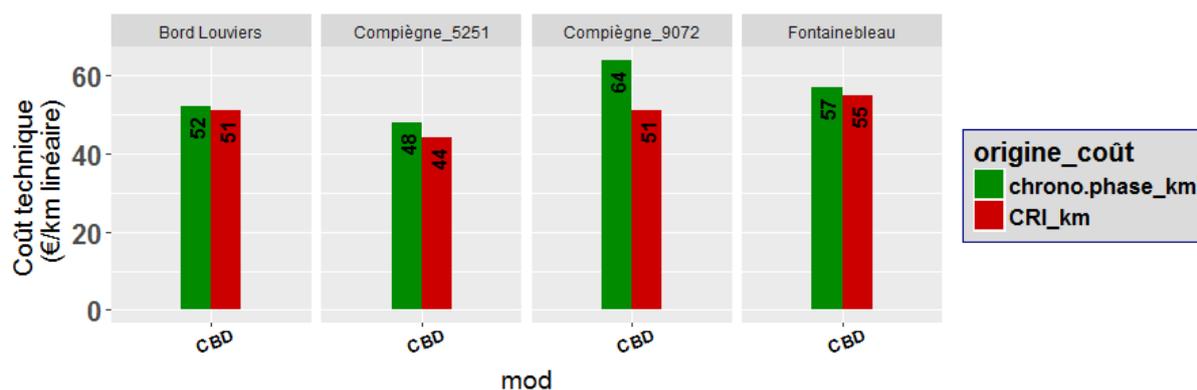


Figure 19 : Estimation des coûts techniques de la Charrue bi-disques.

Les résultats montrent que le coût technique de la charrue bi-disques varie entre 44 et 64 €/km linéaire travaillé.

➤ RazHerb :

Par son action de décapage de la strate herbacée, le RazHerb est généralement utilisé au préalable d'un outil de travail du sol plus en profondeur, tel que le Culti3B ou un sous solage.

Voici les résultats des estimations des coûts techniques de cet outil :

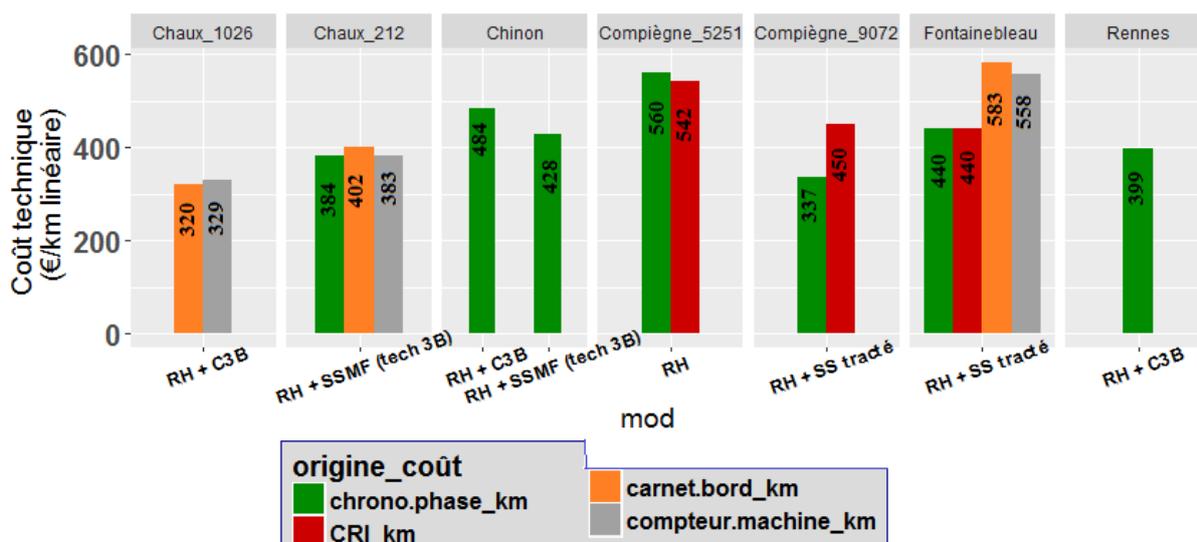


Figure 20 : Estimation des coûts techniques du RazHerb.

La figure ci-dessus montre les différentes estimations de coût réalisées à l'aide des données disponibles. Par site, ces différentes estimations sont relativement proches, ce qui permet d'en calculer la moyenne, dont les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

| | Chaux 1026 | Chaux 212 | Chinon | Compiègne 5251 | Compiègne 9072 | Fontaine-bleau | Rennes |
|---------------------------------------|------------|-----------|--------|----------------|----------------|----------------|--------|
| Coût technique (€/km linéaire) | 325 | 390 | 456 | 551 | 394 | 505 | 400 |

Tableau 17: Estimation des coûts techniques du RazHerb.

Le RazHerb montre des coûts relativement différents d'un site à l'autre, allant de 325 €/km linéaire à 551 €/km linéaire. Cette importante différence peut s'expliquer par divers facteurs, tels que la nature du sol (tassement, présence de débris végétaux, de souches, etc), la qualité et la résistance de la strate herbacée à décaper, mais aussi par le conducteur de la mini-pelle.

➤ Dent Maillard :

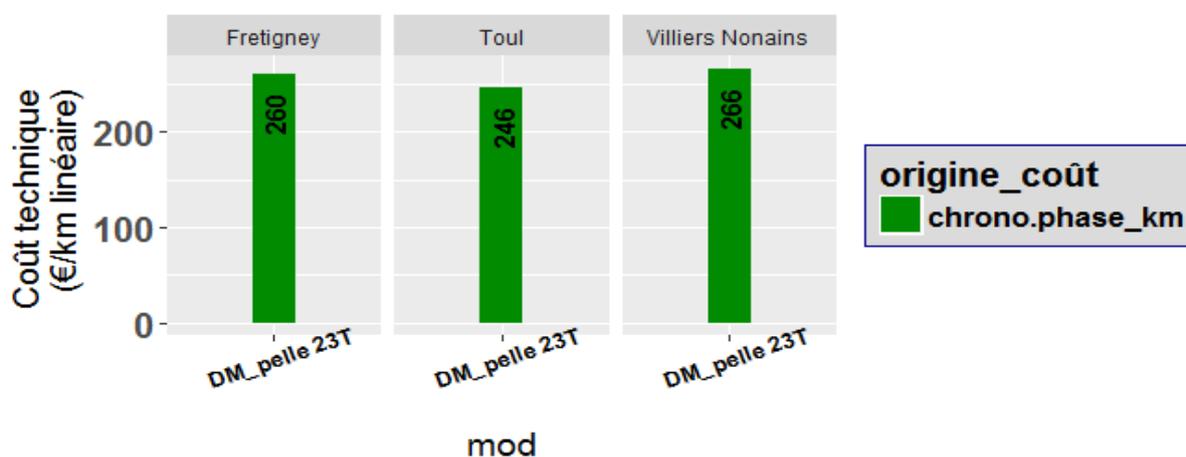


Figure 21 : Estimation des coûts techniques de la Dent Maillard.

Sur les différents sites où elle a été testée, les estimations du coût technique de la Dent Maillard sont très proches : entre 246 et 266 €/km linéaire travaillé.

➤ Sous Soleur tracté :

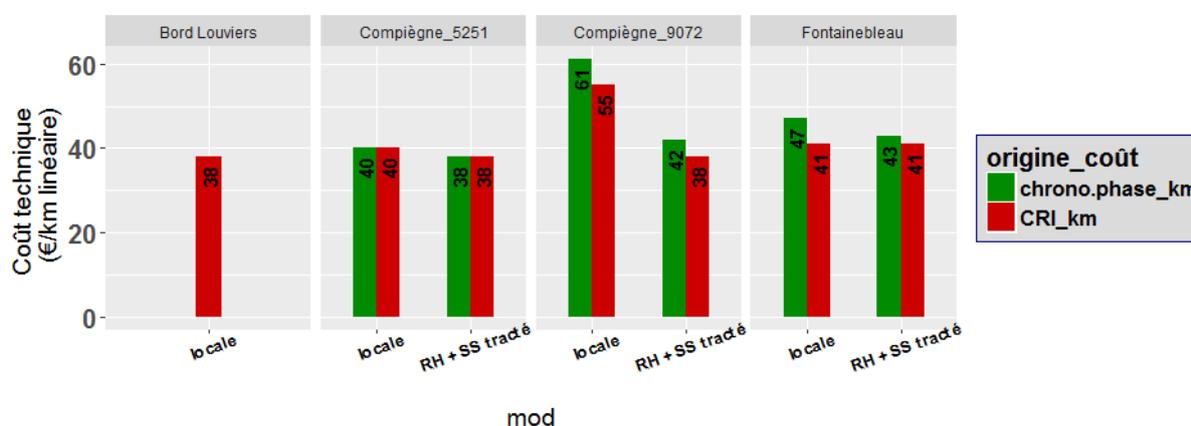


Figure 22 : Estimation des coûts techniques du Sous Soleur tracté.

Les résultats montrent que dans la majorité des estimations, le coût du Sous Soleur simple au km linéaire travaillé varie entre 38 et 47 €. Seule la modalité locale sur le site de Compiègne 9072 montre un coût légèrement plus élevé. Cette modalité correspond à un passage direct du Sous Soleur, sans retirer la végétation au préalable comme dans l'autre modalité sur ce site (passage du RazHerb avant). Cette différence de prix peut donc être expliquée par le gêne occasionné par la strate herbacée.

➤ Sous Soleur Multifonction, travail en potets :

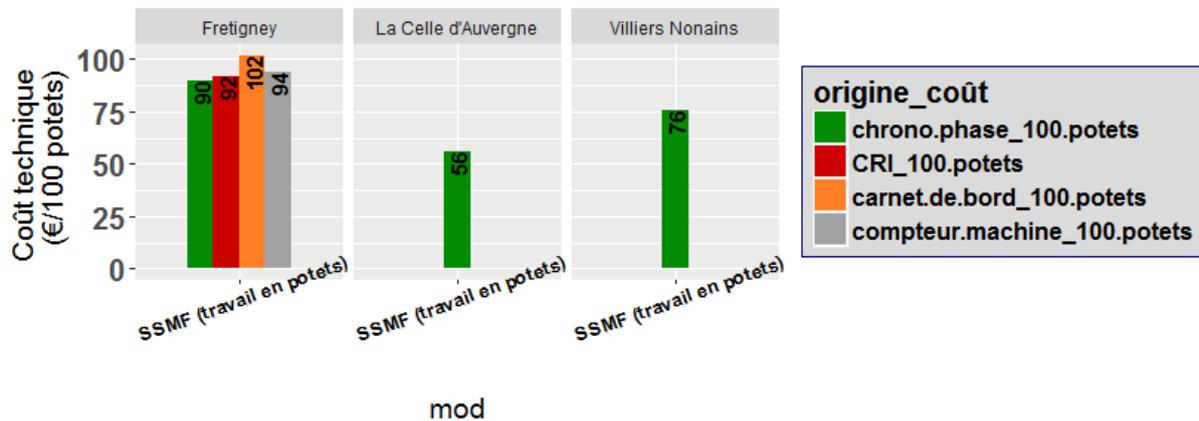


Figure 23 : Estimation des coûts techniques pour réaliser 100 potets avec le Sous Soleur Multifonction.

Le Sous Soleur Multifonction, monté sur une mini-pelle, peut être utilisé pour réaliser des potets travaillés sur lesquels un seul plant sera mis. Cette modalité a été testée dans PILOTE et la figure ci-dessus présente les résultats des estimations du coût pour réaliser 100 potets. A La Celle d'Auvergne, comme pour le Culti3B, le terrain avait été particulièrement dégagé et décompacté avec une dent de dessouchage (voir figure 18), ce qui peut expliquer le faible coût sur ce site, comparé aux autres.

Au vu des résultats, le coût technique pour réaliser 100 potets avec le SSMF varie de 56€ en terrain préalablement très préparé à 95 € en condition plus courante.

➤ Autres outils :

D'autres outils ont été testés dans le cadre du projet PILOTE, mais de manière plus locale sur certains sites. Il n'y a donc pas eu de répétitions de ces outils sur plusieurs sites. Les résultats vont donc être présentés dans un tableau.

| Outil | Site | Origine coût | Coût technique |
|--------------------------------------|---------------------|--------------|-------------------|
| Charrue Deltasol tractée | La Celle d'Auvergne | Chrono.phase | 32 €/km linéaire |
| Grenier-Franco déporté tracté | Villiers Nonains | Chrono.phase | 183 €/km linéaire |
| Grenier-Franco simple tracté | Villiers Nonains | Chrono.phase | 78 €/km linéaire |
| DB 10 sur pelle 10T | Toul | Chrono.phase | 513 €/km linéaire |
| Module D sur pelle 10T | Toul | Chrono.phase | 905 €/km linéaire |
| Dent Bertrandie sur pelle 23T | Frétingney | Chrono.phase | 260 €/km linéaire |
| | Toul | Chrono.phase | 246 €/km linéaire |
| Râteau Fleco sur pelle 23T | Rennes | Chrono.phase | 455 €/ha |
| Sous Soleur déporté tracté | Toul | Chrono.phase | 93 €/km linéaire |

Tableau 18: Estimation des coûts techniques d'outils PILOTE.

3.2.2 Synthèse sur les coûts techniques des outils PILOTE

Estimer le coût technique des outils au km linéaire travaillé permet d'avoir une unité homogène et universelle ne dépendant pas d'un schéma de plantation. En effet, ces outils travaillant en ligne, il est facilement extrapolable un coût à l'hectare. Le tableau 19 résume l'ensemble des coûts techniques des outils PILOTE et présente les résultats pour deux schémas de plantation : le premier avec des interlignes de 2.50m et le second pour des interlignes de 4m. Cela permettant d'avoir une idée plus intuitive des coûts à l'hectare que peuvent avoir les différents outils. Pour le Sous Soleur Multifonction utilisé pour la création de potets, nous faisons l'hypothèse que l'espace entre les potets sur la ligne de plantation est de 2m.

| Engin porteur | Outil | Coût estimé | Coût à l'ha (interligne 2.5m) | Coût à l'ha (interligne 4 m) |
|----------------------------|---|------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Mini-pelle | Scarificateur Réversible | 670-824 €/km linéaire | 2680 – 3296 € | 1675 - 2060 € |
| | Sous Soleur Multifonction (décompactage linéaire) | 817-1085 €/km linéaire | 3268 - 4340 € | 2042 - 2712 € |
| | Sous Soleur Multifonction (création de potets) | 56-94.5 €/100 potets | 1120 - 1890 € | 700 - 1181 € |
| | RazHerb | 325-551 €/km linéaire | 1300 - 2204 € | 813 - 1377 € |
| Tracteur | Culti3B | 52-100 €/km linéaire | 208 - 400 € | 130 – 250 € |
| | Charrue bi-disques | 44-64 €/km linéaire | 176 - 256 € | 110 – 160 € |
| | Sous Soleur déporté | 93 €/km linéaire | 372 € | 233 € |
| | Grenier-Franco simple | 78 €/km linéaire | 312 € | 195 € |
| | Charrue Dellasol | 32 €/km linéaire | 128 € | 80 € |
| | Grenier-Franco déporté | 183 €/km linéaire | 732 € | 458 € |
| | Sous Soleur tracté | 38-58 €/km linéaire | 152 - 232 € | 95 – 145 € |
| Pelle 23T | Dent Maillard | 246-266 €/km linéaire | 984 - 1064 € | 615 – 665 € |
| | Dent Bertrandie | 246-260 €/km linéaire | 984 - 1040 € | 615 – 650 € |
| | Râteau Fleco | 455 €/ha | 455 € | 455 € |
| Pelle 10T | Module D | 905 €/km linéaire | 3620 € | 2263 € |
| | DB 10 | 513 €/km linéaire | 2052 € | 1283 € |
| Pulvérisateur à dos | Herbicide Glyphosate | 126 – 154 €/ha | 126 – 154 €/ha | 126 – 154 €/ha |
| Pulvérisateur à dos | Herbicide Asulame | 315 – 377 €/ha | 315 – 377 €/ha | 315 – 377 €/ha |

Tableau 19: Synthèse des coûts techniques des outils PILOTE.

3.3 Synthèse multicritère sur les modalités testées dans le cadre du projet ALTER

Il s'agit, dans cette partie, de mettre en place un outil intuitif de synthèse multicritère des modalités étudiées dans le cadre du réseau ALTER. Il a notamment pour vocation d'être synthétique en vue d'une vulgarisation des résultats obtenus, notamment à destination de la gestion forestière. Il représente, pour chaque modalité testée et dans les différents contextes (chêne ou pin et envahissement par la molinie ou la fougère), le coût technique de la modalité, son impact sur la survie et la croissance mais aussi son contrôle de la végétation. Pour la forme, il s'agit d'un schéma type radar où chacune des branches représente un de ces paramètres. Les points suivants vont présenter la manière dont seront calculés ces différents paramètres.

- Synthèse sur la survie :

Pour chaque modalité, ce paramètre sera estimé à partir de la moyenne de la survie des différents sites étant dans le même contexte. L'axe du graphique radar de la survie sera gradué de 0 à 1, représentant le pourcentage moyen de plants vivant à 4 ans.

- Synthèse pour la croissance radiale :

Etant donné que la valeur numérique du diamètre moyen à 4 ans ne représente intuitivement pas grand-chose et ne permet pas de situer une modalité par rapport aux autres, la valeur du paramètre à chaque modalité sera calculée à partir de la formule suivante :

$$\frac{\text{Diamètre observé} - \text{Diamètre minimum essence}}{\text{Diamètre maximum essence} - \text{Diamètre minimum essence}}$$

Pour chaque valeur observée, les valeurs maximales et minimales correspondent aux valeurs des modalités ayant, à 4 ans, le diamètre maximum ou minimum pour la même essence (chêne ou pin), contextes confondus. Cela est important, car va permettre de comparer les croissances d'un contexte à l'autre pour une même essence. L'ensemble des valeurs obtenues sera donc compris entre 0 et 1, ce qui permettra de les représenter de manière uniforme sur le graphique radar. Ce mode de représentation permet de situer chaque modalité par rapport aux autres pour une essence donnée, notamment par rapport au témoin, qui, dans l'ensemble des cas, montre la croissance radiale la plus faible.

- Synthèse sur le contrôle de la végétation concurrente :

Le paramètre de contrôle de la végétation concurrente sera représenté sur une échelle de 0 à 1, en faisant, par contexte et par essence, la moyenne des indicateurs floristiques pour chaque modalité.

- Synthèse sur le coût technique :

Pour chaque modalité, le coût technique sera représenté de la même manière que la croissance radiale, permettant de « classer » les coûts des différentes modalités dans un intervalle de 0 à 1.

- Synthèse sur la perturbation du milieu :

Par l'utilisation d'un traitement chimique ou du travail du sol, la végétation en place est perturbée. Le but est de représenter ceci par un indice de perturbation de la flore. Il est reflété par le pourcentage d'augmentation du nombre moyen d'espèces inventoriées par modalité dans les deux contextes (fougère et molinie) par rapport au témoin. Pour cela, nous faisons l'hypothèse que la modalité témoin ne subit aucune perturbation de la flore en place puisqu'aucun travail du sol n'est réalisé et aucun herbicide n'est appliqué. Cet indice est calculé par la formule suivante :

$$\frac{\text{Nombre moyen d'espèce modalité} - \text{Nombre moyen d'espèce témoin}}{\text{Nombre moyen d'espèce témoin}}$$

3.3.1 Représentations graphiques

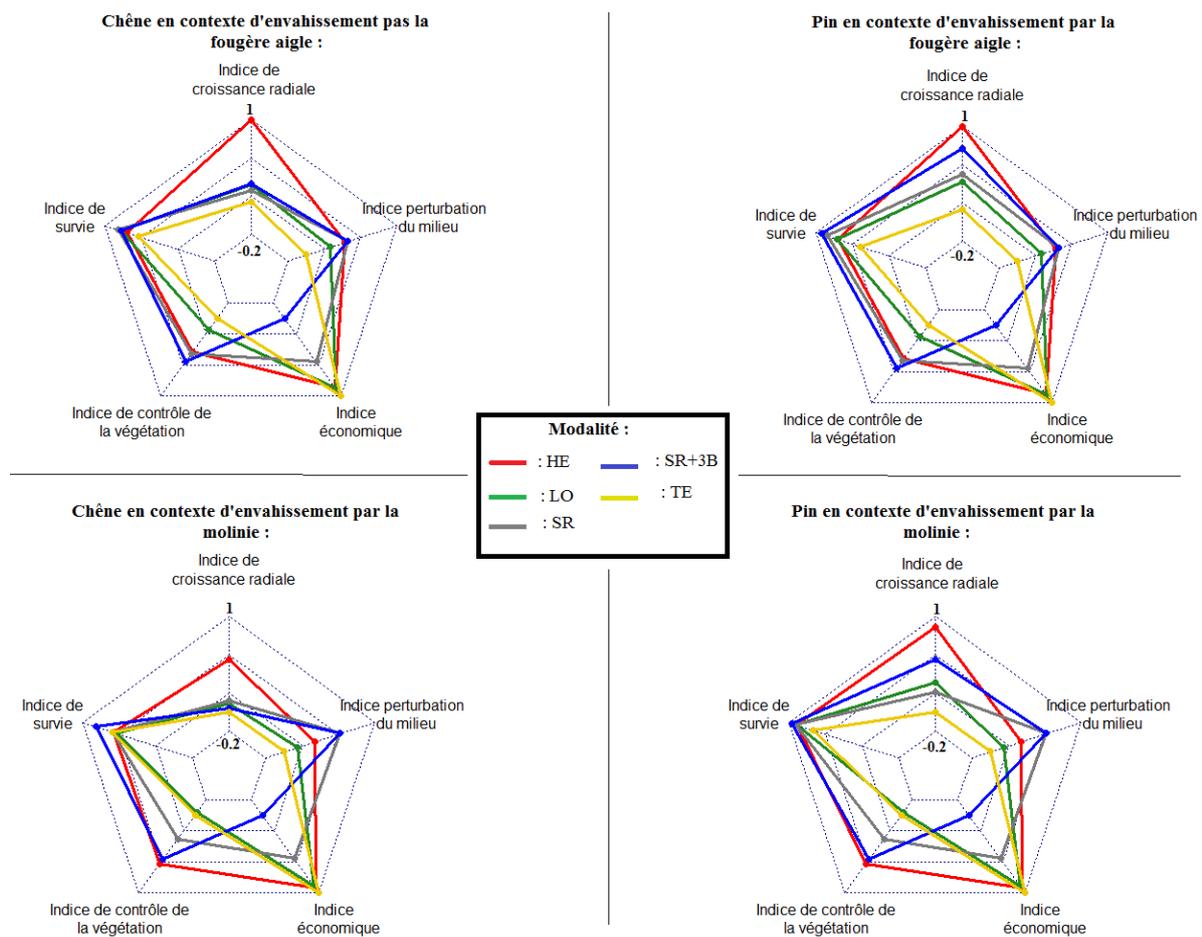


Figure 24 : Diagrammes de synthèse des modalités ALTER.

Ces représentations graphiques mettent en évidence l'hypothèse précédente, mais elles permettent surtout de comparer l'efficacité des modalités dans les différents domaines de manière transversale entre les contextes et les essences, puisque chaque axe est gradué de -0.2 à 1 (commence à -0.2 pour une question de lisibilité). Par ailleurs, un autre avantage de ce mode de représentation est son aspect synthétique, permettant une approche ludique pour confronter l'herbicide avec les autres modalités de travail du sol étudiées dans ALTER.

4 Discussion

Des travaux pour lutter contre la végétation concurrente bénéfiques, mais devant évoluer et à adapter au contexte.

La molinie et la fougère aigle sont deux espèces à caractère fortement concurrentiel. Les résultats dendrométriques ALTER montrent en effet que lorsque ces espèces ne sont pas contrôlées par une intervention mécanique ou chimique (modalité témoin), la survie est nettement diminuée et la croissance presque absente pour les deux essences étudiées. Il apparaît donc nécessaire d'intervenir pour permettre un contrôle durable de la végétation concurrente et ainsi une bonne installation des plants. Cependant, les résultats mettent en avant que selon le contexte et l'essence implantée, le choix du type d'intervention a un effet positif sur la survie et/ou la croissance, mais peut aussi s'avérer néfaste.

Les résultats soulignent qu'en matière de gestion de la végétation concurrente, les pratiques doivent évoluer. En effet, l'ensemble des résultats des modalités « locales », utilisées en gestion

courante, montre les pires niveaux de croissance et taux de survie. Des pratiques telles que le labour ou le cover crop semblent inefficaces pour lutter contre la molinie et la fougère aigle lorsque ces dernières sont installées. En effet, ces techniques ne permettent pas d'atteindre les importants réseaux de rhizomes de la fougère pour la ralentir de manière significative. Contre la molinie, lorsque cette dernière est constituée en un épais réseau souterrain, les lames de la charrue ne font que fragmenter ce dernier en mottes, réduisant à peine son action néfaste.

Le Scarificateur Réversible

Le Scarificateur Réversible s'est montré être un outil particulièrement efficace là où il était attendu, c'est-à-dire pour lutter contre la fougère aigle. Son action d'arrachage des rhizomes en profondeur et de dégagement du sol sur une bande entre 1,5 et 2 m permet de limiter fortement le retour de la fougère durant au moins les 4 premières années et permet un bon développement des plants. Cependant, les résultats ont montré que son utilisation est à proscrire dans les contextes les plus hydromorphes, comme sur le site de Rennes. Il a pour inconvénient de créer une légère dépression sur le sol pouvant se transformer en un bassin de rétention d'eau sur les sols les moins perméables, entraînant l'ennoyage des plants et leur mort.

L'apport du billonnage

Dans un contexte d'envahissement par la fougère aigle, l'apport du billonnage après le Scarificateur Réversible ne semble pas apporter d'effets visibles à 4 ans sur la croissance ou la survie. Pour le pin, le billonnage permet une croissance légèrement supérieure et n'améliore la survie à 4 ans que sur le site d'Haguenau 150. Dans un contexte d'envahissement par la fougère aigle, l'utilisation de cet outil supplémentaire au Scarificateur Réversible doit être remise en question, notamment en raison de son coût non négligeable, dépassant les 2000€ de l'hectare, venant s'ajouter aux 1800 €/ha du Scarificateur Réversible. De plus, dans ce contexte où la formation du billon ne semble pas primordiale, elle peut aussi être néfaste. En effet, dans les parcelles 32 et 35 du site d'Haguenau, les chênes de la modalité SR+3B ont dû être replantés ayant gelé lors du premier hiver, alors que ceux des autres modalités ont résisté. Il est donc possible de penser que le billon, en surélevant les plants, les expose plus aux forts épisodes de froid.

A contrario, dans des contextes d'envahissement par la molinie, le billonnage montre un effet significatif sur la survie et la croissance et permet un bien meilleur contrôle de la strate herbacée. De plus, dans les contextes où la molinie est associée à une hydromorphie élevée, le billonnage permet de surélever les plants et d'éviter que leur système racinaire ne soit noyé durant les périodes où la nappe d'eau remonte proche de la surface du sol.

L'apport du billonnage semble donc être bénéfique dans des contextes très hydromorphes et semble de manière générale être une solution efficace pour lutter contre la végétation herbacée. Cependant, le problème majeur de cette modalité, réalisée avec deux outils différents montés sur une mini-pelle, est son coût. Il faut en effet compter près de 4000 €/ha pour obtenir ces résultats avec de tels outils. Un parallèle peut alors être fait avec l'outil Culti3B, tracté derrière un tracteur, dont le coût n'est alors qu'entre 130 et 400 €/ha. Le travail effectué avec cet outil est en effet sensiblement le même : décompactage profond et formation d'un billon surélevé.

Un travail du sol indispensable ?

Dans cette étude, le maintien d'un sol nu à l'aide d'un herbicide permet des résultats de croissance nettement supérieurs pour les pins dans les différents contextes. Pour le chêne, il semble que c'est même l'unique modalité permettant un réel démarrage de la croissance durant les 4 années suivant la plantation. Que le sol soit compacté ou non, il semble bien que dans les contextes étudiés, le principal frein au développement juvénile des plants soit bien la végétation concurrente et non la structure du sol. Cependant, il paraît intéressant de poursuivre le suivi de la croissance et de la survie pour étudier l'impact du décompactage à un âge plus élevé, qui pourrait permettre l'installation d'un système

racinaire plus en profondeur. Cela ne doit cependant pas remettre en cause l'efficacité du billonnage par son action « hors d'eau » qu'il permet dans les stations les plus hydromorphes.

Un coût technique important

Le projet ALTER a permis de mettre en évidence qu'un travail du sol adapté pouvait permettre un contrôle efficace de la végétation concurrente dans des situations de blocage. Cependant, les analyses économiques portées par le projet PILOTE ont montré que la réalisation de ces modalités avec des outils montés sur mini-pelle était économiquement peu viable. La vitesse d'avancement de ces outils est en effet très faible et les coûts à l'hectare se retrouvent peu défendables vis-à-vis des exploitants forestiers, car très élevés. Il apparaît donc important d'effectuer un parallèle entre le type de travail effectué dans ALTER (sous solage, scarification, formation d'un billon), les résultats techniques observés (croissance, survie et contrôle de la végétation) et le coût réduit que peuvent avoir des outils tractés effectuant un travail similaire.

Freins et leviers à l'innovation en matière de préparation mécanique des sols forestiers

Avant d'aborder les différents points pouvant être des freins ou des leviers en matière d'innovation dans la préparation mécanique des sols, il paraît nécessaire de définir ce que représente l'innovation, et notamment ce qui la différencie de l'invention. Cette dernière représente quelque chose de nouveau, à savoir la création d'une nouvelle technique, d'un nouvel outil ou d'une nouveauté organisationnelle, concernant des biens ou des services, alors que l'innovation concerne l'ensemble du processus social amenant une invention à être adoptée et utilisée par les différents acteurs qu'elle concerne (Norbert, 2002 ; Petit, 2015). Pour pouvoir parler d'innovation en matière de préparation mécanique des sols, les outils inventés et étudiés dans le cadre de la recherche doivent être adoptés et diffusés au sein de la communauté forestière concernée. Ainsi, l'ensemble des acteurs forestiers doit s'inscrire dans ce processus d'innovation par une mise en réseau. La mise en réseau correspond à une organisation d'acteurs qui favorise les interactions, les allers et retours permanents et les négociations en tout genre, permettant l'adaptation rapide d'une innovation (Akrich, 1988 ; Petit, 2015). La partie qui va suivre aura pour but de faire un état des lieux des différents leviers et freins rencontrés en matière d'innovation pour la préparation mécanique des sols.

L'organisation des acteurs forestiers

Un des problèmes en matière d'innovation est que la recherche forestière s'inscrit dans un milieu très incertain. Sur le plan environnemental, les forêts sont soumises aux aléas climatiques (sécheresses, tempêtes, etc), aux maladies, mais aussi sur le plus long terme, à un dérèglement climatique dont les répercussions sont encore peu connues. Sur le plan économique, la filière bois a la particularité de situer 95% des emplois et du chiffre d'affaire dans la filière aval et industrielle, ce qui dévalorise la situation économique de la production, qui est pourtant médiocre et difficile (du Peloux, 2018). En effet, la capacité des propriétaires forestiers s'est amoindrie par le fait de la stagnation des cours du bois et de l'augmentation des charges associées à la production. De plus, la fin du FFN (Fonds Forestier National) en 1999 et des aides qu'il apportait au renouvellement des peuplements complique la dynamique d'investissements matériels et intellectuels au sujet des problématiques de régénération forestière. Parallèlement, chez les différents acteurs impliqués dans les processus d'innovation en matière de plantation, chaque groupe social va avoir ses propres représentations et attentes. Par exemple, concernant des outils de préparation du sol, les ETF (Entreprises de Travaux Forestiers) ne vont pas avoir les mêmes objectifs que les gestionnaires de forêts publiques. Les attentes des différents acteurs peuvent être antagonistes, ce qui ne permet pas d'adopter un processus commun d'innovation, pouvant l'amener à passer par des phases de négociations (Petit, 2015). En foresterie, et particulièrement dans ce milieu, apparaît une scission importante entre les savoirs de « terrain » et les savoirs « technocrates ». Les ingénieurs et les preneurs de décisions sont considérés comme déconnectés du terrain par le monde ouvrier, ce qui peut créer un clivage entre ces derniers et les cadres, amenant un nouveau frein à la mise en réseau. Un des principaux destinataires finaux d'outils innovants de préparation des sols sont les ETF, car ce sont elles qui vont être amenées à les acheter et les utiliser. Mais la mise en réseau des ETF est

compliquée, dûe à une forte concurrence entre elles et à l'absence de vision commune, entravant l'adoption transversale de nouveaux outils. Par ailleurs, il s'agit souvent de petites structures, ayant de faibles capacités d'investissement et des difficultés à se projeter sur le long terme. De plus, l'acquisition d'outils spécifiques à certains contextes n'est en général pas recherchée par ce type d'entreprise, qui préfère investir dans du matériel à large spectre d'utilisation. Pour conclure sur les freins à l'innovation en forêt, le souci majeur semble être la difficulté de mise en réseau des différents acteurs intervenants dans le processus d'innovation. Il apparaît donc nécessaire de regrouper et fédérer l'ensemble des acteurs pouvant prendre part en matière d'innovation autour d'une vision commune sur le long terme. Par exemple, cela peut passer par la mise en place d'essais d'outils jugés comme innovants, regroupant un large spectre d'acteurs concernés de près ou de loin par la préparation des sols. En plus de fédérer les différents groupes sociaux autour d'un même objectif, ces essais peuvent servir de lieux de rencontre et d'échange. Dans le cadre des forêts privées, les CETEF (Centres d'Etudes Techniques et Economiques Forestières), association de propriétaires et d'acteurs forestiers de tous bords, sont perçus comme un lieu de regroupement et d'échanges, et peuvent être un levier efficace pour diffuser de nouvelles pratiques.

L'organisation de la recherche

Actuellement, la recherche forestière est majoritairement portée par des acteurs publics tels que les services recherche de l'ONF et l'INRA, en partenariat avec des acteurs des forêts privées tels que les CRPF, le FCBA ou la Société Forestière et des constructeurs d'outils comme l'entreprise Becker. Les expérimentations mises en place sont orientées sur des problématiques rencontrées localement ou plus généralement sur le terrain et sont portées presque intégralement par les équipes de recherche, agissant en partenariat ou de manière individuelle. Les projets ALTER et PILOTE ont en effet été mis en place suite à une nécessité de fournir des réponses à la gestion pour s'affranchir de l'utilisation des herbicides avant plantation. Une fois les problématiques identifiées et les projets de recherche mis en place, les travaux sont effectués par les équipes de recherches et les avancées sont transmises aux gestionnaires via des journées de démonstration « planter autrement », des formations, la mise en place de clefs de décision (clef fougère) et la parution d'écrits. Ce moyen de diffusion de la recherche permet certes d'informer les utilisateurs finaux, mais ne permet pas de les intégrer directement aux réseaux de recherche. Fédérer une palette plus large d'acteurs dans la recherche forestière pourrait permettre d'impliquer plus fortement les gestionnaires et les destinataires d'outils innovants, facilitant alors la diffusion de ces nouvelles pratiques. Cela permettrait aussi d'élargir les surfaces d'études, en faisant tester à plus large échelle des outils par des gestionnaires ou des ETF. Séduits par certaines techniques, ils pourraient les utiliser dans le cadre de la gestion, accompagné par des équipes de recherche effectuant un suivi plus léger. Ce nouveau mode d'approche de la recherche serait un moyen de constituer et développer un réseau complet d'acteurs du milieu forestier autour de nouvelles pratiques. De plus, il pourrait permettre de tester à plus large échelle les outils tout en facilitant à terme leur diffusion à l'ensemble des acteurs concernés.

Dans le cadre des projets ALTER et PILOTE, l'étude réalisée a montré quelques limites dans l'organisation du partenariat entre les différents organismes de recherche impliqués. En effet, au début du stage, un temps important aura été consacré à simplement récupérer et homogénéiser les bases de données disponibles. En effet, les protocoles n'ont pas été suivis ou interprétés totalement de la même manière d'un site expérimental à l'autre, notamment lorsque les équipes en charge des sites étaient différentes. Cela s'est particulièrement observé pour les données de suivi chronométriques PILOTE, où même au-delà d'un souci d'homogénéisation des données, il y avait d'importants manques d'informations. Dans certains cas, les mesures n'ont peut-être pas été effectuées, mais dans d'autres un temps a été consacré à l'acquisition des données mais ces dernières ont été perdues car non numérisées ou égarées dans un bureau. Je pense qu'à terme, pour éviter cela, des réunions de calibration de suivi des protocoles devraient être organisées, sur le terrain de préférence, pour homogénéiser la prise de mesure entre les différents opérateurs. Parallèlement à cela, lors de la mise en place de projets de recherche tels que ALTER et PILOTE, il devrait y avoir une équipe ou même une personne en charge de collecter l'ensemble des données du réseau afin de les homogénéiser et de les concaténer. Cela permettrait à la fois de révéler immédiatement toute dérive dans la façon de noter et/ou relever les

données, mais éviterait aussi de perdre tout bonnement l'information au retour des campagnes de mesure, car il y aurait une entité physique à qui les transmettre.

L'acceptation du public

De nos jours, les forêts sont de plus en plus perçues par le grand public comme un des derniers espaces naturels encore peu anthropisés. Les forêts ont un rôle multifonctionnel et l'intérêt croissant du grand public envers le milieu forestier amène les gestionnaires à prendre en considération ses attentes et à en adapter la gestion. Cette pression sociale et politique, parallèlement à une prise de conscience des gestionnaires forestiers, a amené l'usage des herbicides à disparaître de nos forêts car leur impact sur l'environnement a été reconnu et est particulièrement visible (disparition ou inversion de la flore). Comme il l'a longuement été présenté précédemment, dans les contextes les plus difficiles de végétation concurrentielle, les herbicides peuvent être remplacés par des moyens mécaniques de travail du sol. Cependant, le travail du sol a aussi un impact non négligeable sur l'environnement. En effet, il présente des effets directs, tels que la perturbation de la végétation spontanée qui se met en place naturellement et la déstructuration des horizons du sol, altérant alors la biodiversité (Collet, 2016). Parallèlement à cela, la préparation mécanique des sols engendre des effets secondaires sur l'environnement, tels que le tassement des sols, l'augmentation des ruissellements et des émissions de gaz à effet de serre. Il s'agit donc de réduire ces impacts secondaires, néfastes pour l'environnement. Des travaux sont actuellement en cours à l'INRA sur l'étude de profils culturaux pour étudier l'impact du travail du sol sur la déstructuration des horizons des différents outils testés dans PILOTE. Le choix de l'engin porteur peut permettre de réduire les tassements, avec l'utilisation de mini pelles dont le poids est réparti sur l'ensemble de la surface des chenilles en caoutchouc. Un moyen efficace de réduire les effets est de limiter le travail du sol aux lignes de plantation, évitant ainsi le travail en plein. Cela permet de laisser des zones intactes, préservant le sol et permettant à la biodiversité d'évoluer. Un autre moyen de réduire les impacts sur l'environnement est de limiter le nombre d'interventions nécessaires à la préparation du sol. L'utilisation d'outils combinés, tels que le Culti3B (décompactage en profondeur + billonnage) monté sur tracteur ou du Sous Soleur Multifonction (décapage + décompactage + éventuellement billonnage) montés sur mini pelle présente de bonnes alternatives pour réduire les impacts causés par les portes outils (Collet, 2016), car limitant le nombre d'interventions.

Pour conclure sur cette partie, la préparation mécanique du sol intervient en remplacement des herbicides, notamment parce que ces derniers sont voués à disparaître car considérés comme néfastes pour l'environnement et cela est admis du grand public depuis plusieurs décennies. L'avancée des recherches sur la préparation mécanique des sols présente de bonnes alternatives techniques en remplacement de ces herbicides, mais elles présentent aussi de nombreux impacts néfastes sur l'environnement. Actuellement, ces impacts sont peu connus du grand public, mais des répercussions futures peuvent être à craindre, notamment autour des problèmes de déstockage de carbone via le travail du sol. L'initiative « 4 pour 1000 », lancée en France le 1^{er} décembre 2015 lors de la COP 21, vise à augmenter le taux de carbone dans les sols de 0,4% par an pour stopper l'augmentation de la concentration en CO₂ liée aux activités humaines dans l'atmosphère (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation). Les sols forestiers constituant un important réservoir de carbone terrestre, le projet CAPSOL, porté par l'INRA, a vocation à étudier la dynamique du carbone après travail du sol et à proposer des compromis entre amélioration technique des performances (croissance, survie) et le déstockage de carbone engendré par le travail du sol.

Le coût de la préparation mécanique du sol avant plantation

Comme l'a montré l'étude, la préparation mécanique des sols peut s'avérer coûteuse, notamment avec l'utilisation d'outils montés sur mini pelle, dont le rendement horaire n'est pas très élevé. Cependant, le coût technique direct de l'utilisation des outils ne doit pas uniquement être pris en compte dans le choix de la méthode utilisée pour préparer le terrain avant plantation. En effet, il est important de regarder le coût de l'ensemble de l'itinéraire permettant de sauver une plantation, et non uniquement le coût de(s) intervention(s) pré plantation. Le Scarificateur Réversible, par exemple, à un coût technique pouvant dépasser les 3000 €/ha, mais il permet, dans des contextes d'invasion par la fougère aigle,

de contrôler cette dernière pendant au moins les 4 années suivant la plantation, évitant ainsi jusqu'à 4 dégagements. Parallèlement à cela, lors du choix des interventions à réaliser pour l'installation du peuplement, il est important d'avoir une vision à plus long terme, comme sur la valeur des bois pouvant être récoltés, notamment dans des contextes hydromorphes où la qualité est souvent faible. De plus, il est important de prendre en compte que, pour la réussite d'une plantation, un travail du sol efficace permettra d'éviter un échec qui conduirait un propriétaire à une seconde intervention mécanisée, voire à une seconde plantation.

Réduire le coût de la préparation mécanique des sols peut se faire sous différents angles. Améliorer les performances techniques des outils est déjà une première voie d'amélioration, notamment dans les contextes difficiles, car cela peut permettre la mise en place d'un peuplement, mais évite aussi des investissements supplémentaires en cas d'échec. Pour cela, élargir la gamme d'outils disponibles permet d'adapter le travail du sol en fonction du contexte, et donc d'améliorer les chances de succès de la plantation. Cela présente néanmoins l'inconvénient pour les ETF de petite taille de ne pas pouvoir rentabiliser les outils si ces derniers sont utilisés dans des contextes trop spécifiques. Une fois les performances techniques assurées, la réduction des coûts associés aux outils s'obtient en augmentant la productivité horaire des conducteurs lors des interventions (Collet, 2016). Pour cela, les utilisateurs doivent être formés et surtout utiliser couramment les outils.

Parallèlement à cela, une bonne préparation des sols permet d'améliorer les conditions de travail des ouvriers forestiers. En effet, cela permet de faciliter le travail des planteurs en ameublissant le sol et/ou en le dégagant des divers débris végétaux pouvant gêner la plantation. De plus, un travail efficace du sol sur le contrôle de la végétation concurrente permet d'éviter des interventions manuelles telles que le débroussaillage ou le bâtonnage durant les années qui suivent la plantation. Cette amélioration des conditions de travail est un élément à prendre en compte dans la mise en place de nouveaux itinéraires.

5 Conclusion

Dans un premier temps, ce stage a été l'occasion de faire le regroupement et l'homogénéisation de l'ensemble des données disponibles sur les suivis dendrométriques et floristiques d'ALTER et sur les données de chronométrage des dispositifs PILOTE. Cela pourra servir par la suite de base commune pour les mesures restant à effectuer, mais aussi, avec les scripts R disponibles, cela permettra d'obtenir les représentations graphiques et les analyses statistiques en implémentant les résultats des prochaines campagnes de mesure pour élargir les résultats dans le temps.

Les résultats obtenus dans cette étude vont permettre de valoriser le travail de la recherche auprès des gestionnaires forestiers, en attendant de solutions pour gérer la strate herbacée dans les contextes les plus difficiles, en leur proposant un type de travail par contexte. Ils ont permis de mettre en évidence qu'un travail du sol adéquat pouvait être une alternative viable, sur le plan technique, aux herbicides. Par exemple, la scarification du sol permet un contrôle efficace de la fougère aigle par son action d'arrachage des rhizomes. Dans les contextes d'envahissement par la molinie, le billonnage permet de s'affranchir de la concurrence herbacée et de l'hydromorphie qui lui est souvent associée. Sur une période de suivis de 4 ans après la plantation, le chêne sessile semble montrer des difficultés de croissance dans les modalités de travail du sol, à la fois dans les contextes molinie et fougère aigle et seule la modalité herbicide, lorsqu'elle est efficace sur la végétation, montre une croissance élevée. Pour le pin, l'ensemble des modalités de travail du sol montrent des résultats de croissance acceptables à 4 ans, mais la modalité herbicide présente les meilleurs résultats à la fois dans des contextes d'envahissement par la molinie et la fougère aigle. Ces résultats surprenants semblent montrer que dans ces contextes, le premier frein à la croissance des plants est la concurrence de la végétation et non la manière dont le sol est travaillé. Néanmoins, dans certains cas, un travail du sol efficace et approprié montre de meilleurs résultats de survie par rapport aux herbicides. C'est notamment le cas dans la modalité SR+3B dans la station à molinie très hydromorphe de Rennes et dans les modalités utilisant le Scarificateur Réversible (SR et SR+3B) dans les contextes d'envahissement par la fougère aigle.

En proposant des outils viables sur le plan économique, le projet PILOTE apparaît comme un tremplin direct vers de nouvelles pratiques forestières en matière de préparation mécanique des sols. La poursuite de ce projet devra s'inscrire dans une étude approfondie des résultats techniques et environnementaux des outils PILOTE dans les différents contextes d'étude, pour proposer aux gestionnaires une gamme complète d'outils de préparation mécanique des sols. Compte tenu de l'efficacité que peut avoir un travail du sol adapté dans des situations de blocage de la régénération, il apparaît primordial que ces méthodes alternatives aux herbicides soient diffusées auprès des gestionnaires, mais aussi de développer des outils plus productifs et moins cher. En effet, les pratiques habituelles utilisées localement ont montré un retard évident dans de tels contextes.

Le travail de la recherche forestière a permis d'avancer sur un des enjeux majeurs que représente le renouvellement des forêts en situation de blocage par la mise en place de méthodes innovantes de travail du sol avant plantation. Il apparaît maintenant important de préparer la suite, en recherchant des méthodes permettant de lever certains blocages pour permettre non pas la plantation, mais la régénération naturelle. Par le projet RégéBloc, la recherche forestière est en train de répondre à ce nouveau défi.

Bibliographie

Agreste, 2013 : AGRESTE – Les pépinières forestières, les graines forestières, dans : *La forêt et les industries du bois en 2013* – GraphAgriBois, édition 2013.

Akrich, 1988 : AKRICH, MADELEINE – *Comment décrire les objets techniques ?* – Edition de La Maison des Sciences de l'Homme. Technique et culture, 1887. pp 49-64.

Alliance infos, 2017 : ALLIANCE INFO, 2017 – *Le DelTa-Sol* – dans le périodique : Alliance Info, n°13, septembre 2017, page 9.

BAUDOT, 2008 : BAUDOT (Jean-Yves), novembre 2011. – *Le critère AIC* – page web : <http://www.jybaudot.fr>, consultée le 17/07/2018.

CAFSA, 2011 : COOPERATIVE AGRICOLE ET FORESTIERE SUD-ATLANTIQUE, mai 2011. – *La charrue multifonctionnelle bidisque au service du reboisement du Limousin et de Dordogne* – dans la revue : Trait d'Union, n°69.

Chabaud et al, 2009 : CHABAUD (Ludovic) et NICOLAS (Loïc), 2009 – *Guide des sylvicultures : Pineraies des plaines* – Office National des Forêts.

Collet, 2016 : COLLET (Catherine), RICHTER (Claudine), ULRICH (Erwin), BLONDET (Marieke), DELEUZE (Christine), BOULANGER (Vincent), DASSOT (Mathieu), LEGAY (Myriam), 2016 – *Une approche multiacteur et multidisciplinaire pour innover dans les pratiques de plantation forestière* – Revue forestière française LXVIII, juin 2016.

CRI Bord Louviers, 2011, Piat : PIAT (Jérôme), 15/09/2011 – *Compte Rendu d'Installation du site de Bord Louviers* – Office National des Forêts.

Dodet & al, 2009 : DODET M., FROCHOT H., WEHRLLEN L., VAST F., 2009 – *L'utilisation des herbicides en forêt : vers une disparition programmée ?* – Forêt entreprise n°188, septembre 2009.

du Peloux, 2018 : du PELOUX T., 2018 – *Revenu moyen brut et net des forêts privées. Analyses et commentaires* – Forêt entreprise n°241, juillet - août 2018.

Frochot et al, 2002 : FROCHOT H., ARMAND G., GAMA A., WEHRLLEN L., 2002 – *La gestion de la végétation accompagnatrice : état et perspectives* – Revue forestière française, vol.54, n°6, pp 505-520.

Gama, 2006 : GAMA (Antoine), 2006 – *Utilisation des herbicides en forêt et gestion durable* – Guide pratique. Edition Quae.

Gash and Stewart, 1977 : GASH (J.H.C) et STEWART (J.B), 1977 – *The evaporation from Thetford Forest during 1975* – J. Hydrol. 35, pp 385-396.

Gaudio, 2011 : GAUDIO N., BALANDIER P., PHILIPPE G., DUMAS Y., JEAN F., GINISTRY C., 2011 – *Light-mediated influence of three understorey species (Calluna vulgaris, Pteridium aquilinum, Molinia caeruleae) on the growth of Pinus sylvestris seedlings* – European Journal of Forest Research vol. 130, pp. 77-89.

Gobin, 2015 : GOBIN R., BALANDIER P., KORBOULEWSKY N., DUMAS Y., SEIGNER V., 2015 – *Une strate herbacée monopoliste : quelle concurrence vis-à-vis de l'eau pour le peuplement adulte ?* – RDV technique n°48-49, été-automne 2015, pp 17-22.

Jarret, 2006 : JARRET (Pascal), 2006 – *Guide des sylvicultures : Chênaie atlantique* – Office National des Forêts, édition Lavoisier.

Journal Officiel de la République Française n°0285 du 06/11/2011 – NOR AGRG1129999V

Laybourne, 2005 : LAYBOURNE A., NICOLAS L., MANDRET X., 2015 – *Plantation en milieu acide hydromorphe. Quelles méthodes ? Quels résultats ? Quel avenir ?* – RDV technique n°8, printemps 2015, ONF.

Ministère de l’Agriculture et de l’Alimentation : Plateforme collaborative du Ministère de l’Agriculture et de l’Alimentation, mise en place avec les membres à l’initiative de « 4 pour 1000 », site web : www.4p1000.org, consulté le 08/08/2018.

Moyses, 2018 : MOYSES (François), 2018 – *L’allélopathie en milieu forestier : impact en phase de renouvellement des peuplements*. – Forêt entreprise n°359, janvier-février 2018.

Norberty, 2002 : NORBERT, ALTER, 2002 – *Les Logiques de l’Innovation. Approche Pluridisciplinaire* – La Découverte. Recherches, 2002.

Petit, 2015 : PETIT Adrien, 2015 – *L’adoption de l’Innovation dans les pratiques forestières. Le cas des forestiers de Haute-Normandie* – Museum National d’Histoire Naturelle. Master 2 EDTS

Projet ALTER, annexe technique, 2012 : OFFICE NATIONAL DES FORÊTS, 2010 – *Projet ALTER « Alternatives aux herbicides », Annexe technique* – Version du 29/02/2010.

Projet ALTER, 2012 : COLLET (Catherine), 2012 – *Projet ALTER, Des alternatives aux herbicides : l’exemple des plantations en station acide* – Institut National de Recherche Agronomique.

Projet PILOTE, 2017 : PILOTE : CONVENTION INRA – FRANCE BOIS FORÊT DU 26 AVRIL 2017, décembre 2017 – *PILOTE : Les travaux préparatoires à la plantation. Installation d’un réseau de chantiers pilote pour développer et promouvoir des outils innovants, Rapport final du projet* – participants : Institut National de Recherche Agronomique, AgroParisTech, Office National des Forêts, Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement, Société Forestière, Alliance Forêt Bois.

Schnock, 1970 in Aussenac, 2000 : AUSSENAC G., 2000 – *Interactions between forest stands and microclimate : Ecophysiological aspects and consequences for silviculture* – Annals of Forest Science vol 57, pp. 287-301.

Wehrley & al, 2015 : WEHRLY L., COLLET C., DASSOT M., THIRION R., VAST F., 2015 – *Régénération de la forêt : enfin une alternative aux herbicides* – Phytoma n° 685 juin-juillet 2015.

Wehrley, 2015 : WEHRLY L., ULRICH E., GIBAUD G., PIAT J., VIDAL J., 2015 – *Outils pour lutter ou contrôler la fougère aigle*. – Forêt entreprise n°221, mars 2015.

Annexe 1 : Résultats de l'ANOVA pour la comparaison de modèles

ANOVA modèle linéaire Chêne sessile, hauteur à 4 ans :

| Site | Modèle | DDL | AIC | BIC | id_modelê | Test | p_value |
|--------------|------------------------|-----|-------|-------|-----------|--------|--------------|
| Bord Louvier | mod_lin_mixte_bloc | 11 | 7012 | 7061 | 1 | | NA |
| Bord Louvier | mod_lin_mixte_bloc.PU | 12 | 7012 | 7066 | 2 | 1 vs 2 | 1.585826e-01 |
| Bord Louvier | mod_lin_simple | 6 | 7051 | 7077 | 3 | 2 vs 3 | 3.928263e-09 |
| Villecartier | mod_lin_mixte_bloc1 | 11 | 10084 | 10138 | 1 | | NA |
| Villecartier | mod_lin_mixte_bloc.PU1 | 12 | 10057 | 10115 | 2 | 1 vs 2 | 5.798511e-08 |
| Villecartier | mod_lin_simple1 | 6 | 10159 | 10189 | 3 | 2 vs 3 | 2.013853e-22 |
| Haguenau 150 | mod_lin_mixte_bloc2 | 11 | 6380 | 6429 | 1 | | NA |
| Haguenau 150 | mod_lin_mixte_bloc.PU2 | 12 | 6351 | 6405 | 2 | 1 vs 2 | 2.543700e-08 |
| Haguenau 150 | mod_lin_simple2 | 6 | 6479 | 6506 | 3 | 2 vs 3 | 7.249295e-28 |
| Rennes | mod_lin_mixte_bloc3 | 11 | 8100 | 8152 | 1 | | NA |
| Rennes | mod_lin_mixte_bloc.PU3 | 12 | 8062 | 8120 | 2 | 1 vs 2 | 3.579129e-10 |
| Rennes | mod_lin_simple3 | 6 | 8121 | 8150 | 3 | 2 vs 3 | 3.121641e-13 |
| Haguenau_P1 | mod_lin_mixte_bloc4 | 9 | 11057 | 11103 | 1 | | NA |
| Haguenau_P1 | mod_lin_mixte_bloc.PU4 | 10 | 10977 | 11028 | 2 | 1 vs 2 | 1.449231e-19 |
| Haguenau_P1 | mod_lin_simple4 | 5 | 11267 | 11292 | 3 | 2 vs 3 | 1.502944e-62 |
| Haguenau_P2 | mod_lin_mixte_bloc5 | 5 | 4254 | 4274 | 1 | | NA |
| Haguenau_P2 | mod_lin_mixte_bloc.PU5 | 6 | 4238 | 4263 | 2 | 1 vs 2 | 2.956326e-05 |
| Haguenau_P2 | mod_lin_simple5 | 3 | 4611 | 4624 | 3 | 2 vs 3 | 7.970489e-82 |

ANOVA modèle généralisé mixte survie Chêne sessile à 4 a

| Site | Modèle | DDL | AIC | BIC | déviancê | id_modelê | Test | pvalue |
|--------------|------------------------|-----|--------|--------|----------|-----------|--------|--------------|
| Bord Louvier | mod_gen_mixte_bloc | 6 | 943.9 | 975.6 | 931.9 | 1 | 1 vs 1 | NA |
| Bord Louvier | mod_gen_simple | 6 | 658.5 | 690.2 | 646.5 | 2 | 2 vs 1 | 0.000000e+00 |
| Bord Louvier | mod_gen_mixte_bloc.PU | 7 | 945.9 | 982.8 | 931.9 | 3 | 3 vs 1 | 1.000000e+00 |
| Villecartier | mod_gen_mixte_bloc1 | 6 | 1538.7 | 1570.1 | 1526.7 | 1 | 1 vs 1 | NA |
| Villecartier | mod_gen_simple1 | 6 | 1632.1 | 1663.5 | 1620.1 | 2 | 2 vs 1 | 1.000000e+00 |
| Villecartier | mod_gen_mixte_bloc.PU1 | 7 | 1495.1 | 1531.7 | 1481.1 | 3 | 3 vs 1 | 4.381044e-32 |
| Haguenau 150 | mod_gen_mixte_bloc2 | 6 | 1063.8 | 1093.1 | 1051.8 | 1 | 1 vs 1 | NA |
| Haguenau 150 | mod_gen_simple2 | 6 | 1160.4 | 1189.6 | 1148.4 | 2 | 2 vs 1 | 1.000000e+00 |
| Haguenau 150 | mod_gen_mixte_bloc.PU2 | 7 | 1065.2 | 1099.3 | 1051.2 | 3 | 3 vs 1 | 6.241698e-23 |
| Rennes | mod_gen_mixte_bloc3 | 6 | 1871.1 | 1902.9 | 1859.1 | 1 | 1 vs 1 | NA |
| Rennes | mod_gen_simple3 | 6 | 1984.3 | 2016.1 | 1972.3 | 2 | 2 vs 1 | 1.000000e+00 |
| Rennes | mod_gen_mixte_bloc.PU3 | 7 | 1827.7 | 1864.9 | 1813.7 | 3 | 3 vs 1 | 2.345666e-36 |
| Haguenau_P1 | mod_gen_mixte_bloc4 | 5 | 1644.6 | 1671.3 | 1634.6 | 1 | 1 vs 1 | NA |
| Haguenau_P1 | mod_gen_simple4 | 5 | 1717.7 | 1744.3 | 1707.7 | 2 | 2 vs 1 | 1.000000e+00 |
| Haguenau_P1 | mod_gen_mixte_bloc.PU4 | 6 | 1578.2 | 1610.2 | 1566.2 | 3 | 3 vs 1 | 1.253453e-32 |
| Haguenau_P2 | mod_gen_mixte_bloc5 | 3 | 622.7 | 635.8 | 616.7 | 1 | 1 vs 1 | NA |
| Haguenau_P2 | mod_gen_simple5 | 3 | 639.4 | 652.5 | 633.4 | 2 | 2 vs 1 | 1.000000e+00 |
| Haguenau_P2 | mod_gen_mixte_bloc.PU5 | 4 | 602.1 | 619.6 | 594.1 | 3 | 3 vs 1 | 3.545733e-10 |

Annexe 2 : Protocoles de suivis chronométriques

Suivi machine :

Est réalisé un suivi par cycles chronométrés du travail de l'engin. Un suivi de chantier dure 2 heures, répété 2 fois pour chacune des modalités. Un cycle correspond à une ligne effectuée par l'engin. Au moins un cycle devra être achevé à l'issue de l'heure de suivi. En cas de conditions de travail hétérogènes (sol/obstacles très variables, difficultés d'avancement) ou d'une interruption exceptionnelle du travail, le suivi pourra se prolonger 30 minutes à 1 heure supplémentaire. Chaque cycle est découpé en phases. Une observation du travail de l'outil pendant quelques heures, sans rien enregistrer, permet de définir les phases correspondantes à l'outil suivi. Voici une liste de phases pouvant être utilisée:

- Phase DEPCHA : déplacement sur le chantier (mise en position)
- Phase RETOUR : manœuvre en bout de parcelle, retournement
- Phase DEPPOT* : déplacement entre potets
- Phase DECAP* : décapement végétation
- Phase SOL : travail du sol proprement dit
- Phase STOPSOL: arrêt du travail du sol : évitement de souche, d'obstacles
- Phase NETTOI : arrêt du travail du sol : nettoyage de l'outil (végétation, terre)
- Phase ENT : maintenance/entretien (plein, graissage)
- Phase INC : incident/panne

D'autres phases peuvent être ajoutées si besoin (à préciser).

*Phases ne concernant que les outils montés sur mini pelle type Razherb, Sous soleur multifonctions, Pioche-Herse, Scarificateur réversible. Dans le cas d'une modalité nécessitant l'intervention de deux outils (exemple : Razherb+Culti3B), un suivi chronométré se fera distinctement sur ces deux outils. Si plusieurs modalités nécessitent l'utilisation d'un même outil en premier passage (exemple : modalité X: Razherb+Culti3B ; modalité Z : Razherb+Sous soleur multifonctions), un seul suivi sera effectué sur celui-ci sur une des modalités. Lorsqu'un outil différent est utilisé au premier passage avec un second outil similaire sur plusieurs modalités (exemple : modalité X : Razherb+Culti3B ; modalité Y : Meri Crusher+Culti3B), le suivi sera effectué sur ce second outil sur chacune des modalités, une différence de travail pouvant être constatée (avancement, qualité). Un carnet de bord et une fiche « matériel » complètent le suivi fin des phases de travail par chronométrage. Le carnet de bord devra servir notamment à relever les temps de chargement, déchargement, et de préparation au travail (onglet « temps autre »). Ces informations permettent de connaître le taux d'activité de la machine (≠productivité horaire). Ces documents sont transmis au prestataire qui les complétera avec la plus grande précision possible. Le responsable du suivi devra assister l'opérateur dans cette tâche. Indicateur de résultat : longueur en mètre linéaire réalisée ou nombre de potets réalisés.

Suivi plantation :

A l'échelle de la placette : temps mis par X planteurs pour planter la totalité de chaque modalité. A l'intérieur de chaque placette : chronométrer un planteur (ou plusieurs mais l'un à la suite de l'autre) par séquences d'une heure et en ayant au minimum l'un d'entre eux chronométré dans toutes les modalités.

Les phases chronométrées sont :

- Phase HABI : habillage des plants,
- Phase DEPCHA : déplacement jusqu'à la ligne de plantation,
- Phase PLANT : plantation proprement dite (avec comptage a posteriori du nombre de plants plantés).

Annexe 3 : Carnet de bord pour le suivi des temps de travail du sol par les conducteurs d'engins.

| PROJET PILOTE Suivi de chantier de reboisement - Travaux préparatoires à la plantation CARNET DE BORD OPERATEUR | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|-----------------------|--|-------------|----------------------------|------------------------------------|-------------------|----------------------|--|----------------------|-----------------|--------|---------------------------------|--|--|------------------------------|---------------------|--|
| Feuille remplie tous les jours par le pilote de la machine - Une feuille par chantier et par engin | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Nom du chantier : | | | | | | Outil | | | Nom du pilote de la machine N° tél portable | | | | | | | | | |
| Localisation : | | | | | | Type d'engin/outil | | | Nom du contact à l'ONF N° tél portable | | | | | | | | | |
| | | | | | | Marque | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | Modèle | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pas besoin de remplir les cellules brunes : calcul automatisé (sauf si c'est pour l'autocontrôle du conducteur pour éviter les erreurs de saisie) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Date | Homme (merci de préciser le temps avec une précision au 1/4 d'heure) | | | | | | | | | | Machines | | | Productions | | | Divers (à préciser) | |
| | Heure d'arrivée sur chantier | Heure départ chantier | Différence heure de départ - heure d'arrivée | Temps pause | Temps de travail productif | Temps de travail auxiliaire | | | à préciser SYP | | Horamètre engin | | Conso. en carburant (en litres) | Km en début de journée (compteur kilométrique) | Km en fin de journée (compteur kilométrique) | Km parcourus dans la journée | | Nombre de lignes travaillées OU nombre de potets réalisés |
| | | | | | | Temps de préparation (repérage...) | Temps d'entretien | Temps de réparations | Temps autres | | Matin | Soir | | | | | | |
| 10/01/2013 | 8:00 | 17:30 | 9:30 | 1:30 | 6:00 | 0:15 | 0:30 | 0:45 | 0:30 | visite du technicien | 1750.2 | 1756.7 | 6.5 | 55 | 67 | 12 | 30 | Culti 3B : 12 lignes préparées en un seul passage et 8 avec 2 passages |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Annexe 4 : Résultats de suivi des temps de plantation

Lexique :

| Modalité | Abréviation |
|--|-------------|
| Charrue bi-disques tractée | CBD |
| Culti3B tracté | C3B |
| Charrue Deltasol tractée | Deltasol |
| Dent Maillard sur pelle 23T | DM |
| Râteau Fleco sur pelle 23T + Culti3B tracté | Fleco+C3B |
| Meri Crusher tracté + Culti3B tracté | MC+3B |
| Technique locale | LOC |
| Râteau scarificateur 1,5 m sur mini-pelle | RS1.5m |
| Râteau scarificateur 2 m sur mini-pelle | RS2m |
| RazHerb sur mini-pelle + Culti3B tracté | RH+C3B |
| RazHerb sur mini-pelle + Sous Soleur Multifonction (technique 3B) sur mini-pelle | RH+SSMF(3B) |
| RazHerb sur mini-pelle + Sous Soleur tracté | RH+SS |
| Sous Soleur simple tracté | SS simple |
| Sous Soleur déporté tracté | SS déporté |
| Sous Soleur deux rangs Bertrandie tracté | SS_2 rangs |

Tableau 2 : Lexique des modalités.

➤ Site de Fontainebleau :

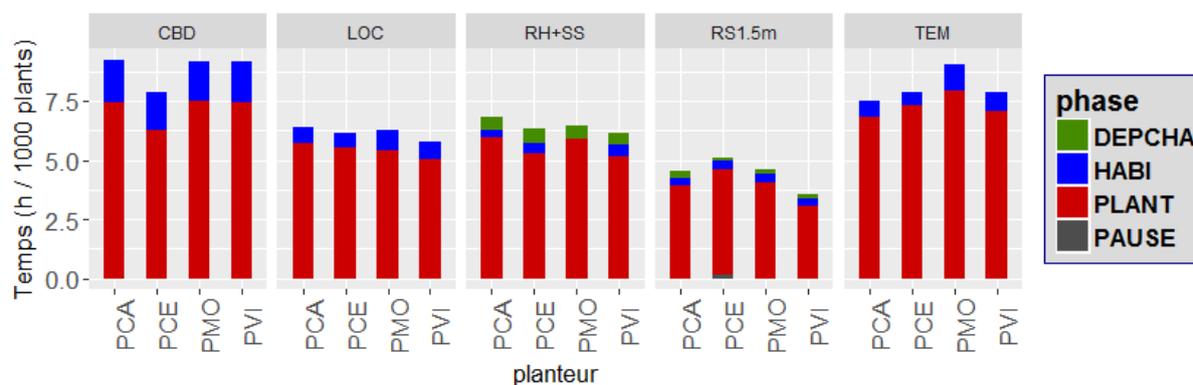


Figure 25 : Suivi de la plantation à Fontainebleau.

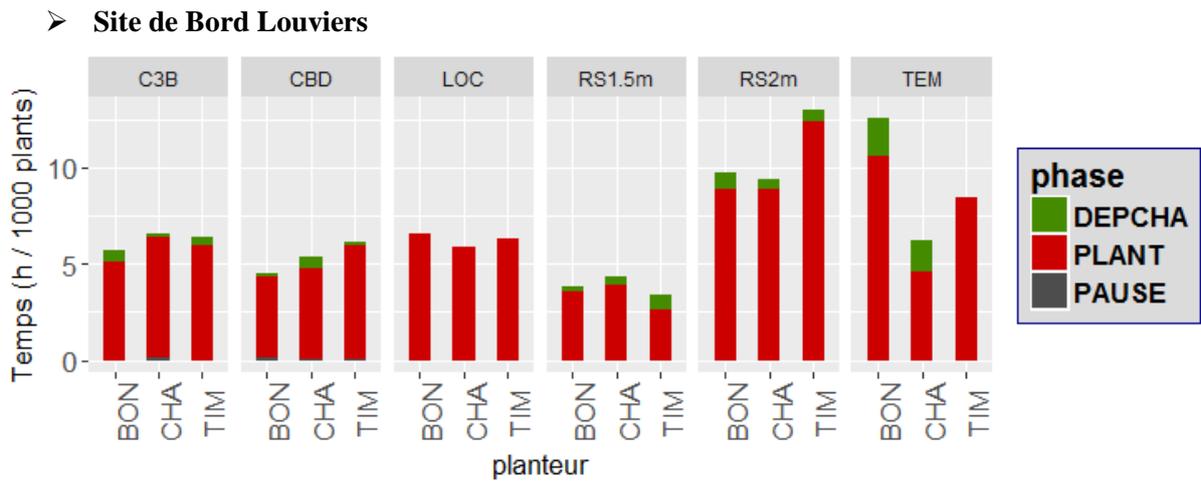


Figure 26 : Suivi de la plantation à Bord Louviers.

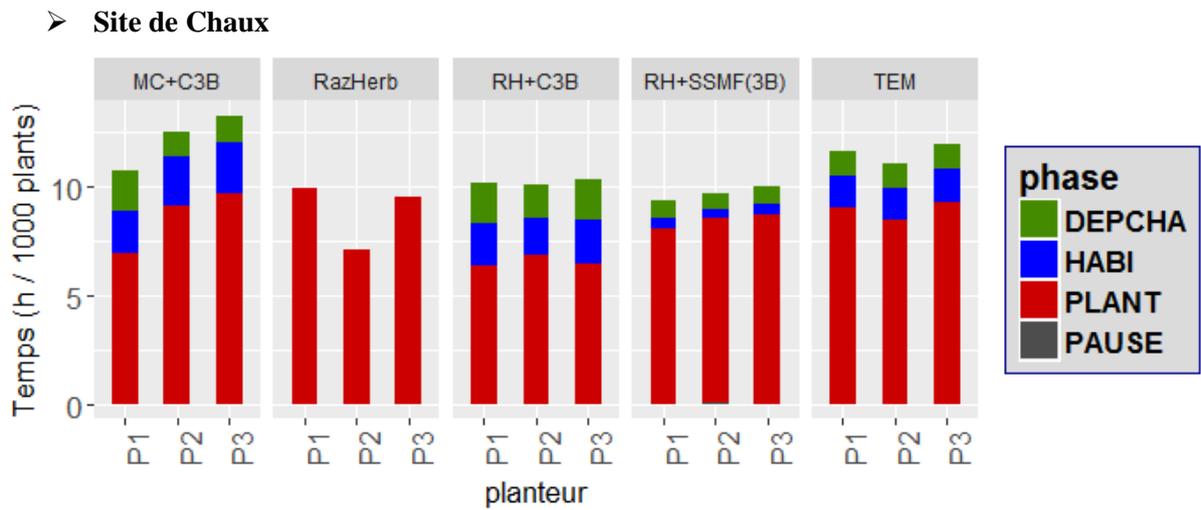


Figure 27 : Suivi de la plantation à Chaux.

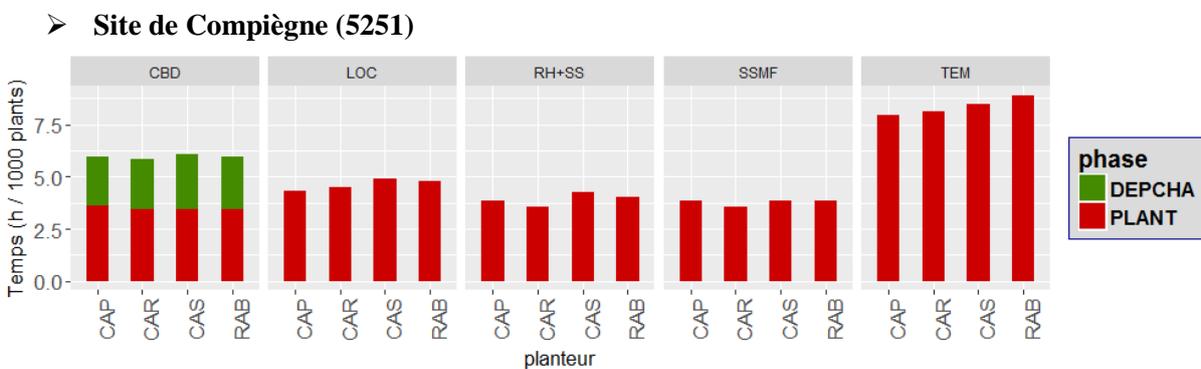


Figure 28 : Suivi de la plantation à Compiègne, parcelle 5251.

➤ **Site de Compiègne (9072)**

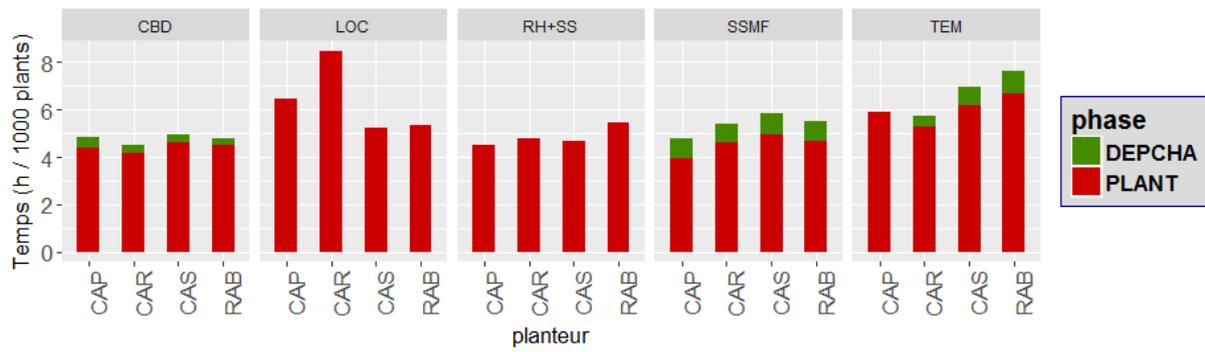


Figure 29 : Suivi de la plantation à Compiègne, parcelle 9072.

➤ **Site de Rennes**

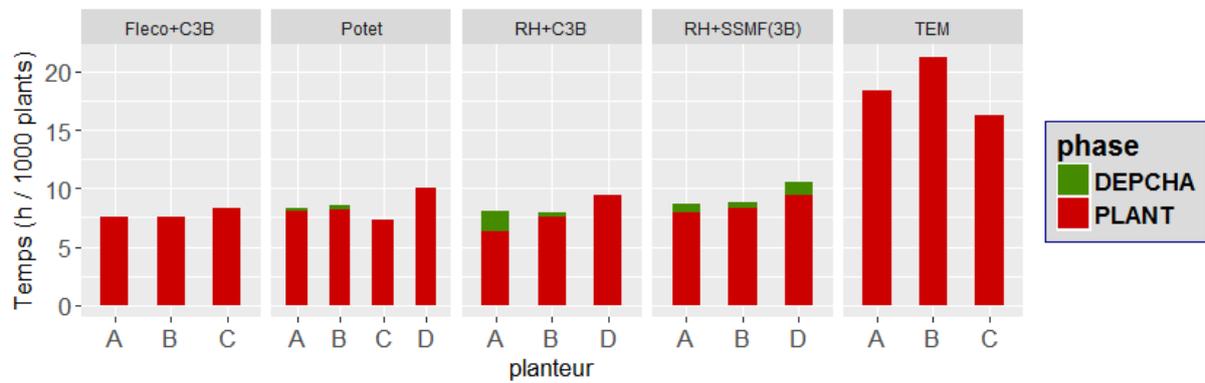


Figure 30 : Suivi de la plantation à Rennes.

➤ **Site de Toul**

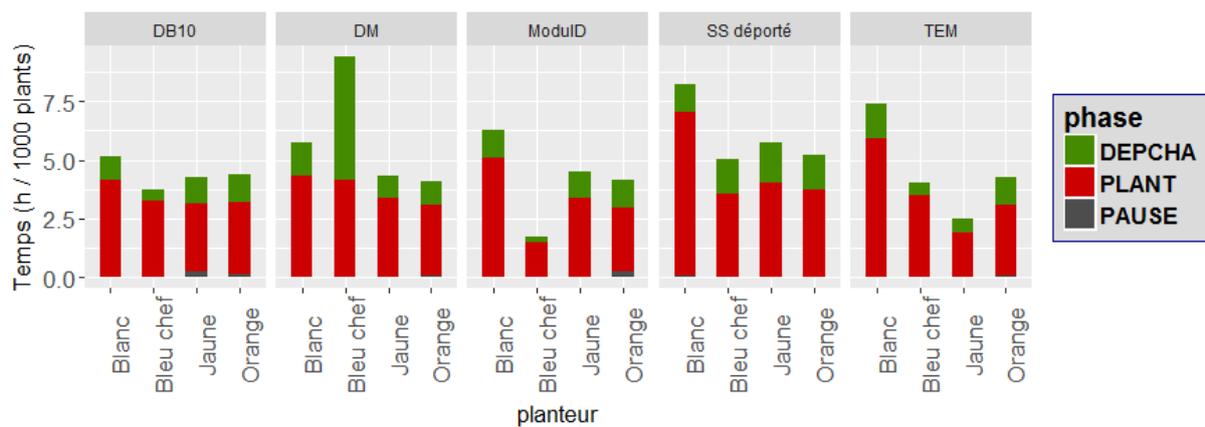


Figure 31 : Suivi de la plantation à Toul.

➤ Site de Chinon

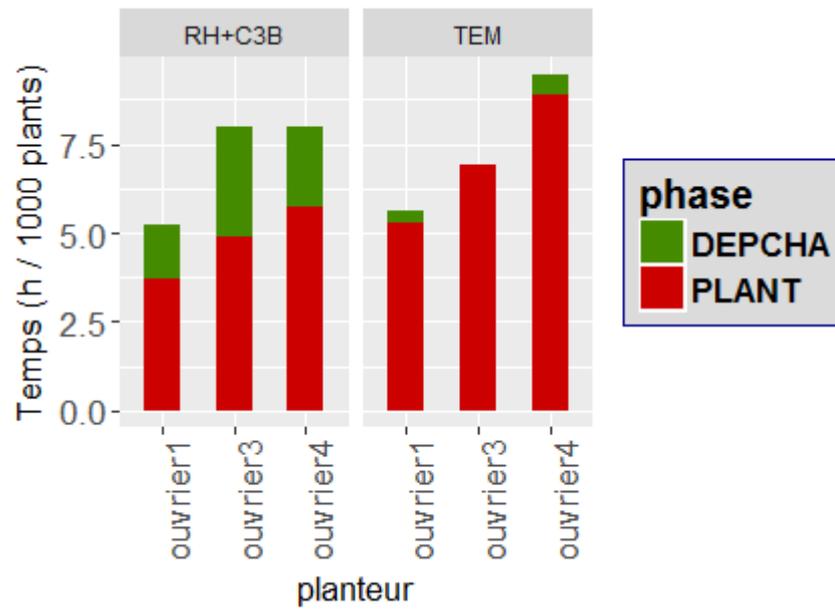


Figure 32 : Suivi de la plantation à Chinon.

➤ Site de La Celle d’Auvergne

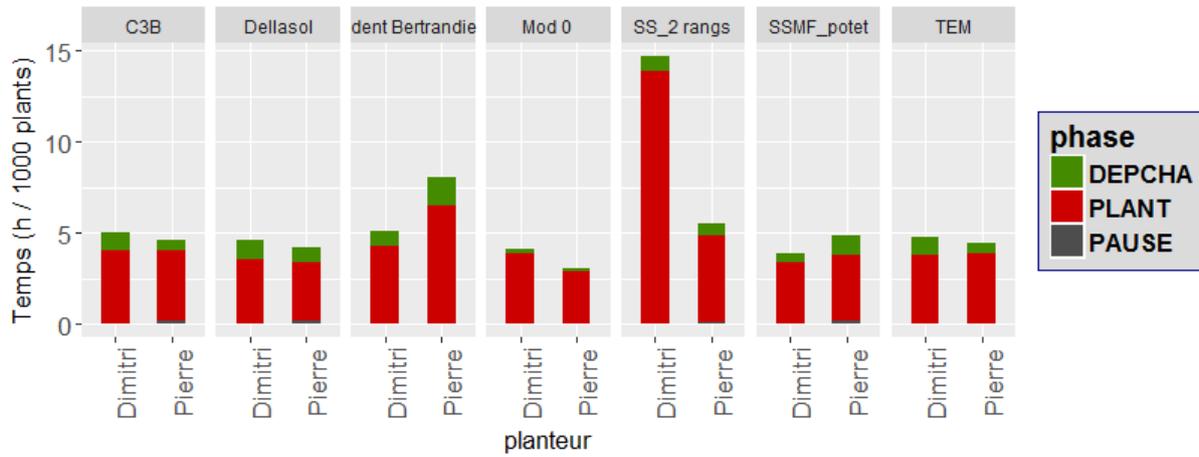


Figure 33 : Suivi de la plantation à La Celle d’Auvergne.

Annexe 5 : Résultats de croissance en hauteur des dispositifs ALTER par contexte.

Croissance en hauteur des chênes en contexte d'envahissement par la fougère aigle :

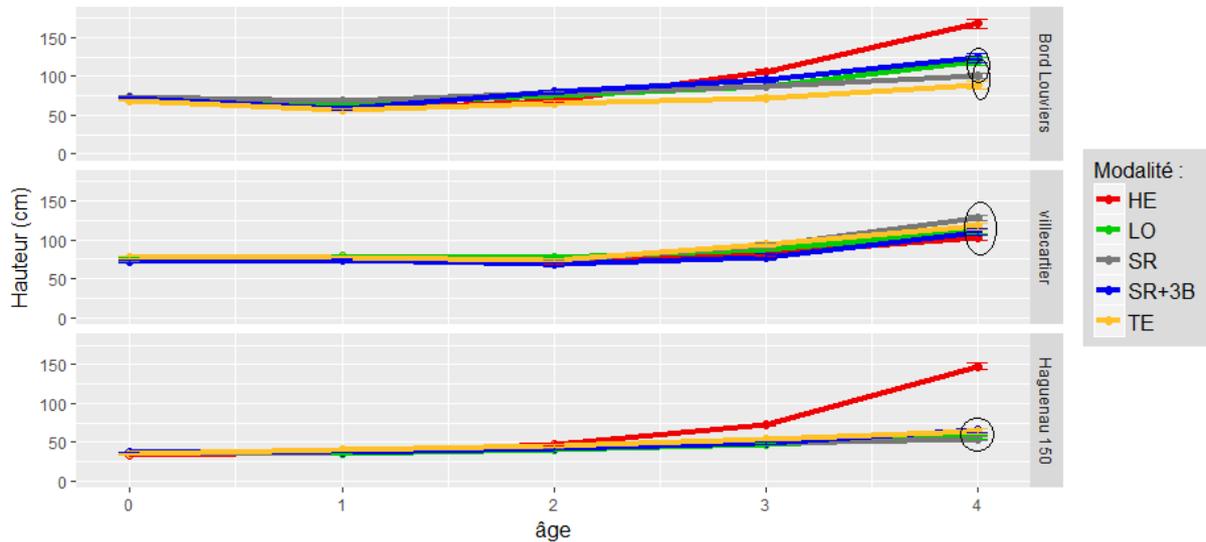


Figure 34 : Résultats de croissance en hauteur des chênes en contexte d'envahissement par la fougère aigle.

Croissance en hauteur des pins en contexte d'envahissement par la fougère aigle :

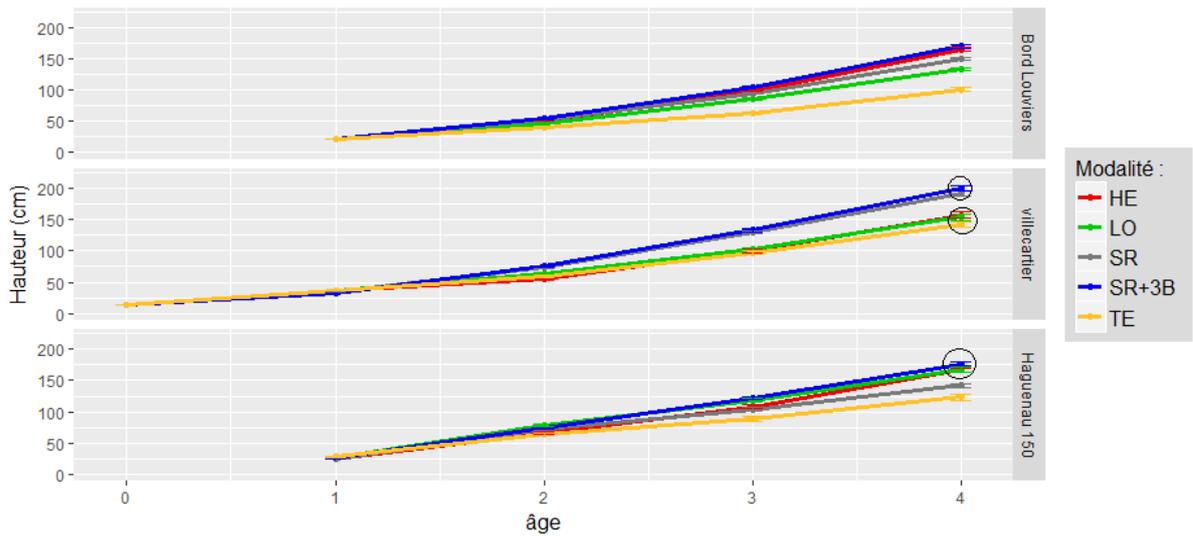


Figure 35 : Résultats de croissance en hauteur des pins en contexte d'envahissement par la fougère aigle.

Croissance en hauteur des chênes en contexte d'invasion par la molinie :

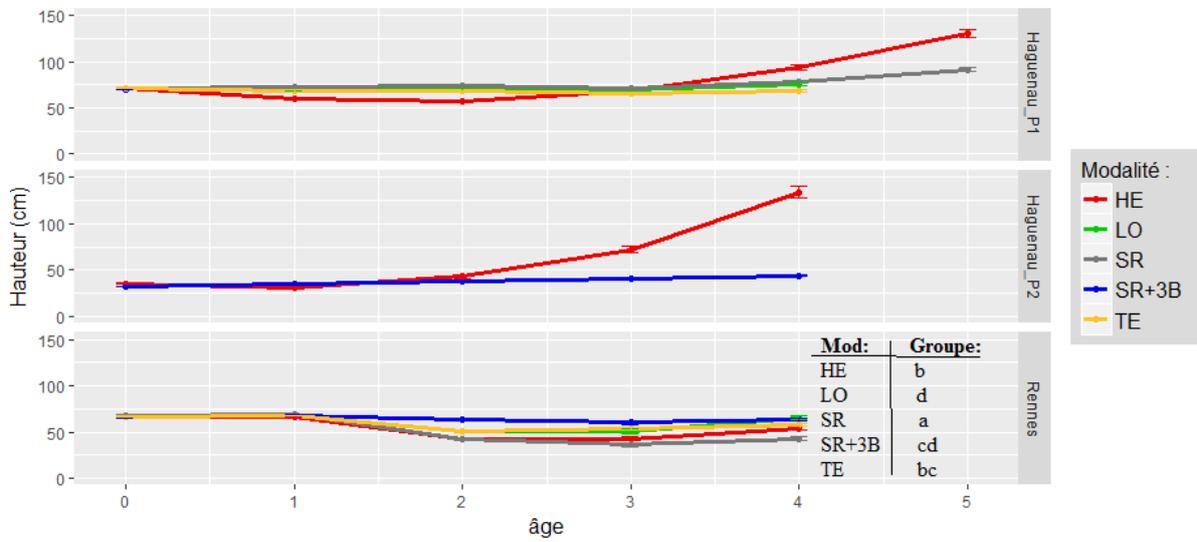


Figure 36 : Résultats de croissance en hauteur des chênes en contexte d'invasion par la molinie.

Croissance en hauteur des pins en contexte d'invasion par la molinie :

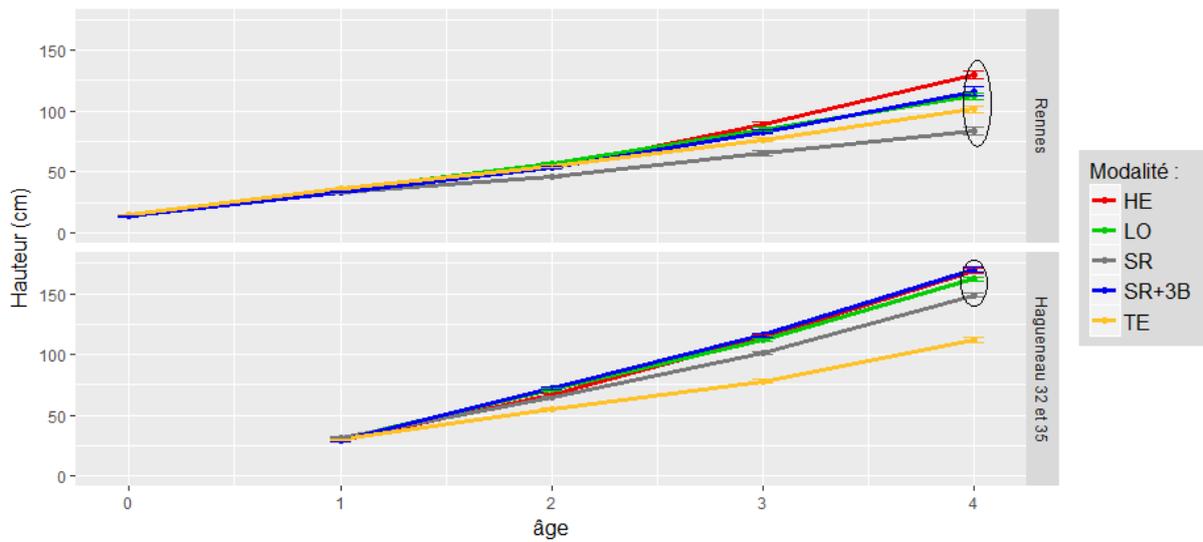


Figure 37 : Résultats de croissance en hauteur des pins en contexte d'invasion par la molinie.