

**2015-2016**

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

**Spécialité Fonctionnement et Gestion des Ecosystèmes**  
**(Milieux Naturels)**

**DYNAMIQUE DE LA VEGETATION À UN STADE PRIMAIRE  
DE PLANTATION FORESTIERE**



**DUPERAT MARINE**

Mémoire de stage, soutenu à Nancy le 01/09/2016

Encadrant : Vincent Boulanger, Chargé de R&D, ONF département RDI, Fontainebleau

Référent : Bruno Ferry, Maître de conférences, AgroParisTech, Nancy

Office National des Forêts, Pôle Recherche Développement et Innovation,  
Boulevard de Constance 77300 FONTAINEBLEAU





## Remerciements

---

*Je tiens tout d'abord à remercier Jean Luc, qui m'a bien conseillé lors de ma recherche de stage dans le but d'être opérationnelle pour me lancer par la suite dans un doctorat ; et Vincent, qui m'a accepté au sein de son équipe, et qui a su se montrer très patient pour me former aux analyses statistiques et à l'utilisation du logiciel R.*

*Merci à toute l'équipe de RDI de Fontainebleau, tout d'abord pour la bonne ambiance générale au bureau (sans parler de la fameuse pause-café de 10H), puis pour les conseils personnels et professionnels que chacun a su me donner tout au long de mon stage. Plus particulièrement, merci à Romain et aux Sébastien pour m'avoir fait découvrir la varappe sur les blocs gréseux qui font la notoriété de Fontainebleau ; merci à Luc qui m'a permis d'intégrer pendant une courte période la brigade équestre de l'ONF ; merci à Delphine, Landry et Manuel pour ces afterwork au Glasgow et merci à Sophie, ma super voisine de bureau, qui a été de bons conseils pour ma recherche biblio.*

*Une mention supplémentaire pour Margaux, la stagiaire d'en bas, toujours en train de rire et de m'accompagner dans mes délires.*

*Enfin, merci à mes parents qui m'ont toujours soutenu moralement et financièrement pour avancer dans les études ; et merci à Roman, qui me pousse à toujours aller plus loin et me soutien dans tout ce que j'entreprends.*



# Sommaire

---

Introduction .....	1
Etat de l'art .....	3
Hypothèses .....	4
Matériel et méthode.....	5
1. Projet ICIF .....	5
1.1 Dispositif expérimental .....	5
1.2 Relevés dendrométriques et floristiques .....	6
1.3 Analyses de l'objectif sylvicole .....	6
1.4 Analyses des données floristiques .....	7
2. Projet ALTER .....	8
2.1 Dispositif expérimental .....	8
2.2 Relevés floristiques .....	9
2.3 Analyse de l'objectif sylvicole.....	9
2.4 Analyse des données floristiques .....	10
Résultats .....	11
1. Projet ICIF .....	11
1.1 Effet des modalités sur l'objectif sylvicole .....	11
1.1.1 Survie des plants .....	11
1.1.2 Croissance des plants .....	12
1.2 Effet des modalités sur la flore accompagnatrice .....	13
1.2.1 Richesse Spécifique (RS).....	13
1.2.2 Dynamique des Communautés Végétales.....	14
1.2.3 Etude des indices écologiques des communautés .....	14
2. Projet ALTER .....	16
2.1 Effet des modalités sur le recouvrement de l'espèce cible ( <i>Molinia caerulea</i> ) .....	16
2.2 Effet des modalités sur la flore accompagnatrice .....	17
2.2.1 Richesse Spécifique (RS).....	17
2.2.2 Dynamique des Communautés Végétales.....	17
2.2.3 Etude des indices écologiques des communautés .....	18
Discussion .....	19
Conclusion.....	22
Bibliographie.....	24



# Introduction

---

Le renouvellement des peuplements forestiers est un élément clé de la gestion durable des forêts, il est ainsi au cœur des enjeux écologiques actuels. Ce renouvellement a lieu le plus souvent après une récolte, pour pérenniser les peuplements et la production de bois. Mais il intervient parfois dans d'autres circonstances, après un accident climatique ou sanitaire par exemple.

Il peut se faire de deux façons, soit par régénération naturelle, soit par plantation. La régénération naturelle, souvent privilégiée, consiste à laisser les arbres faire leurs propres semis. Cependant elle peut ne pas être efficace lorsque la fructification ne se déroule pas correctement ou que les arbres sont trop vieux pour produire des semences. La dégradation des forêts, par exemple lors de tempête, peut également empêcher la régénération naturelle par manque de semenciers. La régénération par plantation est alors indispensable. Dans certains cas, les gestionnaires forestiers peuvent aussi recourir à la plantation pour changer d'essence principale quand un peuplement s'avère mal adapté à la station forestière ou encore par besoin de diversification des essences (créer par exemple des peuplements feuillus au sein de massifs résineux, ou inversement). Bien qu'elles soient artificielles, les plantations restent des habitats forestiers à part entière, avec cependant une richesse spécifique légèrement moins forte que celle des forêts en régénération naturelle (Brockhoff et al., 2008).

A cause des changements climatiques accentués par l'anthropisation croissante, les plantations vont sûrement devoir se multiplier. Le souci d'adaptation exigera dans certains cas d'installer des essences plus adaptées aux climats futurs. Dans le même temps, les efforts pour ralentir ces changements climatiques supposent une augmentation de l'utilisation de bois à la place des énergies fossiles et autres matériaux très « émetteurs » de gaz à effet de serre. Cela conduira à reconsidérer le potentiel « biomasse » de peuplements jusqu'ici négligés car jugés improductifs, et à les planter avec des essences pertinentes c'est-à-dire mieux adaptées aux conditions climatiques futures et fournissant un produit performant.

Quelle que soit la méthode choisie par le gestionnaire, naturelle ou pas, le renouvellement est l'étape où le peuplement est le plus vulnérable : très sensible aux « caprices » de la météo, à l'abroustissement des jeunes plants par les ongulés, aux attaques de maladies ou de ravageurs, et aux effets de la végétation concurrente. Certaines espèces dites monopolistes, comme la molinie (*Molinia caerulea*) et la fougère aigle (*Pteridium aquilinum*), toutes deux très compétitrices pour la lumière aux jeunes stades de régénération (Gaudio et al., 2010), sont particulièrement problématiques. Certains herbicides s'étant avérés très efficaces pour lutter contre la végétation concurrentielle, leur utilisation s'est répandue en France pour faciliter l'installation des plants (Frochot et al., 1986) ; cependant cet usage sera interdit d'ici 2017.

Pour améliorer les conditions du renouvellement (et, au-delà, la santé du futur peuplement), on peut aussi, notamment pour une plantation, agir sur la préparation du sol. Cette préparation peut être d'ordre chimique (minéral) ou physique (mécanique). La préparation physique consiste à travailler le sol pour favoriser l'enracinement et la compétitivité des futurs arbres (Dassot et al., 2014). La préparation chimique quant à elle consiste à améliorer la fertilité de sols forestiers, souvent pauvres et acides, par le biais d'amendements (Frochot, 1986).

En France, l'Office National des Forêts (ONF) a été créé en 1964 pour gérer les forêts publiques : forêts domaniales, qui sont la propriété privée de l'Etat, et forêts des collectivités

bénéficiant du régime forestier. C'est un Etablissement public industriel et commercial (EPIC) dont la mission est d'assurer la gestion durable et multifonctionnelle de ces forêts, qui concilie trois dimensions : économique (production et mobilisation du bois pour la filière), écologique (actions en faveur de la biodiversité) et sociale (paysage, accueil et autres aménités). En tant qu'EPIC, il est partie prenante des politiques nationales. En plus de ses services opérationnels, il dispose d'un département Recherche Développement et Innovation (RDI) qui combine des recherches en propre et en partenariat avec les principaux acteurs de la recherche forestière pour assurer une bonne adéquation avec les problématiques de gestion. Sur la période 2010-2015, ses actions se déclinent en quatre thématiques : l'adaptation des forêts au changement climatique, la disponibilité des biomasses forestières pour l'industrie du bois, la gestion durable des milieux forestiers dans un souci de préservation de l'environnement, et l'innovation dans les procédés et outils utilisés pour améliorer le travail au sein des autres missions (Dhôte, 2015).

Les projets ICIF et ALTER auxquels nous nous intéresserons ici répondent à ces thématiques. Ils visent tous deux à l'amélioration des techniques de gestion forestière en régénération par plantation, tout en cherchant des alternatives aux produits chimiques dans un but de gestion durable, de préservation de la biodiversité et de valorisation des ressources forestières.

L'expérimentation ICIF - *Itinéraires de Culture Innovants en Forêts* a pour but de tester différentes modalités innovantes de traitement du sol pour optimiser la production de biomasse en plantations forestières sur des itinéraires dédiés et semi-dédiés. Les pratiques testées ne font pas partie des modes de gestion actuels de l'ONF. Cette expérimentation permettra d'évaluer l'efficacité de ces nouveaux traitements sur la croissance de plants de diverses essences et le potentiel de production de biomasse sur des sols pauvres.

Deux types de modalités y sont croisées : le travail profond du sol à l'aide d'un Culti 3B® (outil tracté innovant dans la gestion forestière) et l'apport de cendres sur les sols forestiers en comparaison avec un amendement calcomagnésien (Dhôte, 2015).

Le projet ALTER - *Alternative aux herbicides en forêt* a pour objectif de trouver des méthodes efficaces pour maîtriser la végétation concurrente de la régénération, et notamment des alternatives à l'utilisation d'herbicides dans les travaux de préparation à la plantation. Ce projet vise à appréhender l'effet de ces méthodes sur la dynamique des espèces concurrentes (fougère et molinie), sur la régénération des plants, et sur la flore accompagnatrice (Duez, 2014).

Mon travail durant ce stage a consisté à évaluer la dynamique de végétation dans les premières années de la plantation forestière sur les expérimentations ALTER et ICIF.



# Etat de l'art

---

Pour analyser de façon concrète les résultats des expérimentations ICIF et ALTER, nous nous focaliserons sur les quatre thématiques suivantes : l'épandage de cendre en forêt, les amendements calcomagnésiens, la gestion de la végétation concurrentielle en régénération forestière et le travail profond du sol.

## *Epandage de cendre*

L'épandage de cendres de bois en régénération forestière est usage courant dans les pays scandinaves pour remédier à la pauvreté et l'acidité des sols forestiers et permettre un retour des éléments minéraux du bois dans le sol via la libération des bases cationiques (Ingerslev et al., 2014). Les cendres, souvent combinées à un apport d'azote (N), permettent notamment d'augmenter la croissance et la survie des essences, et surtout des feuillus car ils nécessitent un apport plus riche en bases cationiques (Hytönen, 2016). Du côté des résineux, elles permettent également de développer la biomasse des aiguilles (R. Ozolinčius et al., 2007).

L'épandage de cendres ne provoque pas de dérèglements majeurs des communautés végétales vasculaires, les changements observés sont une légère augmentation du couvert (R Ozolinčius et al., 2007), et l'apparition d'espèces plus neutrophiles (Jacobson, Gustafsson, 2001). Cependant, certaines études plus ciblées sur les bryophytes et lichens (R Ozolinčius et al., 2007 ; Dynesius, 2012) ont noté, sur les bryophytes les plus acidophiles, un effet qui provoque des brunissements des parties aériennes et en réduit significativement le couvert durant la première année post-traitement.

En France, les cendres sont actuellement considérées comme des déchets. Le dépôt de déchet étant interdit en forêt, l'Etat n'autorise pas pour le moment l'épandage des cendres sur le sol forestier.

## *Amendements Calcomagnésiens*

L'apport d'amendements calcomagnésiens permet d'enrichir le sol de manière durable. Il est généralement réalisé avant plantation et permet un gain de croissance des jeunes plants et donc une plus forte compétitivité pour la lumière vis-à-vis de la végétation concurrente. Il permet également, à plus long terme de limiter le dépérissement des arbres en comblant les défauts de nutrition par l'enrichissement des sols (Brethes, 2012).

L'apport d'amendements calcomagnésien permet d'enrayer l'acidification du sol en augmentant légèrement son pH, il a un impact sur les communautés végétales et notamment sur les espèces les plus acidophiles qui resteront présentes mais avec un couvert moins dense. A contrario, on peut noter une apparition d'espèces plus neutrophiles au sein des communautés végétales. Les études réalisées sur les amendements calcomagnésiens montrent également une légère augmentation de la richesse spécifique suite à l'apport d'amendements (Brethes, 2012 ; Bona et al., 2008 ; Lin et al., 2014).

## *Végétation concurrentielle de la régénération forestière*

Les espèces présentes sur les sites forestiers peuvent avoir un effet négatif sur la régénération forestière, elles sont communément appelées « espèces concurrentielles » et peuvent avoir un impact sur la régénération durant de nombreuses années (Wagner et al., 2006. Vu dans Gaudio, 2010). Par exemple, la fougère aigle (*Pteridium aquilinum*) présente en forte densité peut « écraser » et « étouffer » les semis et jeunes plants avec le poids de ses frondes (Frochot et al., 2002). Ces effets néfastes peuvent être atténués, à condition que la végétation et les jeunes plants s'installent en même temps (Gaudio, 2010). Il est ainsi important de s'attarder sur des techniques de maîtrise de cette végétation. La technique actuellement la plus répandue en

Europe pour limiter le développement et le recouvrement de la végétation compétitrice (molinie, fougère, callune ou ronce) et favoriser la régénération forestière est l'épandage d'herbicides avant plantation (Gama, 2006). Cependant, à l'échelle de l'Europe, il existe de plus en plus de restrictions quant à l'utilisation des herbicides en forêt. Il est donc nécessaire d'envisager des méthodes alternatives de gestion de la végétation concurrentielle. (Willoughby et al., 2009). En France, suite au projet de loi relatif à la transition énergétique pour la croissance verte, l'utilisation d'herbicides dans un contexte forestier sera interdite en 2017.

#### *Travail du sol*

Le travail du sol est régulièrement utilisé, en France, en régénération forestière. L'utilisation d'un outil tel que le Culti3B permet une amélioration significative de la croissance des plants (Auzuret et al., 2014) et des semis (Dassot, Collet, 2015), notamment en zone très hydromorphe et a priori défavorable à l'implantation des essences (Dassot et al., 2016). Il permet également de lutter contre des espèces compétitrices telles que la fougère aigle (Auzuret et al., 2014), son utilisation est ainsi appropriée dans des expérimentations telles qu'ALTER ou ICIF.

## Hypothèses

---

La plantation forestière est une opération coûteuse et délicate et dont la réussite est un enjeu majeur. Les méthodes de plantation forestière doivent évoluer en fonction des exigences environnementales et de la demande du public.

Techniquement se pose la question de la performance des traitements du sol (chimique et/ou physique) pour la réussite des plantations en parallèle de celle de l'impact sur la biodiversité.

Pour l'expérimentation ICIF, nous pouvons émettre les hypothèses suivantes :

H1a : l'apport de cendres va augmenter la survie et la croissance des arbres, avec un effet plus fort sur les feuillus que sur les résineux.

H1b : l'effet de l'apport de cendres, sur la survie et la croissance des plants, sera amplifié par le travail profond du sol.

H2 : le travail profond du sol et/ou l'apport de cendres avant plantation n'ont pas d'effet marqué sur la composition de la végétation accompagnatrice.

H3 : l'apport de cendres provoque les mêmes effets que l'apport d'amendements calcomagnésiens sur la survie et croissance des plants, et sur la composition de la végétation accompagnatrice.

Pour l'expérimentation ALTER :

H1 : les traitements mécaniques testés ont un effet sur le recouvrement de l'espèce compétitrice cible équivalent à celui des traitements chimiques (herbicide).

H2 : les traitements mécaniques et chimiques testés n'ont pas d'effet marqué sur la végétation accompagnatrice (autre qu'espèce cible).

# Matériel et méthode

---

## 1. Projet ICIF

### 1.1 Dispositif expérimental

Le site d'expérimentation de 11ha se situe en Forêt Domaniale de Francbois-Bryas dans la sylvoécocorégion des Ardennes Primaires, code IGN<sup>1</sup> C11 (Cavaignac, 2009), à une altitude de 395m sur un sol de type « alocrisol » pauvre en éléments minéraux et plutôt acide. Les précipitations annuelles normales sont de 1100 mm et le climat est de type atlantique à influence continentale et sub-montagnarde. Il est situé sur d'anciennes plantations de Douglas et Epicéa détruites en totalité en Juillet 2010 lors d'une tempête.

Le dispositif expérimental est composé de 48 placettes de 23 ares (48m x 48m) réparties en 3 blocs complets. La préparation du terrain par broyage des débris de bois a été faite en aout 2012 suite à l'extraction des fûts tombés lors de la tempête.

Plusieurs modalités ont été expérimentées : l'effet de l'apport de cendre et l'effet du travail du sol en profondeur. La décompaction profonde du sol pour les placettes avec travail profond du sol a été réalisée à l'aide d'un Culti 3B<sup>®</sup> en septembre 2012. Utilisé en préparation avant plantation, le Culti 3B<sup>®</sup> est un outil innovant qui sert à la décompaction et la fracturation des sols tassés à une profondeur de 60cm, puis à la création d'un billon (Annexe : Culti 3B). Les cendres de bois (sous une forme agrégée) ont été épandues en avril 2013.

Une modalité supplémentaire a été mise en place : la modalité amendements calcomagnésiens (épandus en avril 2013 comme les cendres, avec travail profond du sol) pour comparer l'effet de l'apport de cendres à celui d'une modalité plus classiquement employée avant plantation. Cette modalité a été expérimentée en condition de travail profond du sol pour s'affranchir d'un éventuel échec dû à un sol trop compact en profondeur.

L'effet de ces modalités de préparation physique et chimique du sol a été testé sur les performances d'une essence feuillue (Saule, plantée à 2000 tiges/ha) et d'une essence résineuse (Douglas, plantée à 1600 tiges/ha).

La modalité de traitement « apport de cendres et travail profond du sol » a été testée sur diverses essences : Cupressocyparis, Epicéa, Saule, Robinier et sur le Douglas planté à différentes densités (1100 tiges/ha, 1600 tiges/ha, 2000 tiges/ha et 2200 tiges/ha).

Chacune des 16 modalités a été répétée 3 fois sur le dispositif (une fois par bloc).

La plantation a été effectuée en mai 2013. Dans chaque placette les plants ont été plantés sur 15 lignes espacées de 3m, l'espacement des plants est variable en fonction de la densité de plantation, respectivement 1.5m, 1.6m, 2m et 3m pour les densités 2200, 2000, 1600 et 1100.

Les relevés floristiques et dendrométriques sont effectués dans la partie centrale de ces placettes pour laisser une marge au niveau des bordures et prendre ainsi des données au cœur des modalités, sans interaction possible avec une modalité voisine (Annexe : ICIF).

Tous les croisements de modalités possibles n'ont pas été testés (6 essences \* 3 apports \* 2 travail du sol, Tableau 1) pour pouvoir privilégier les répétitions des modalités choisies pour répondre, avec un modèle statistiquement fiable, à trois questions : 1) Quelle est la réaction des différentes essences aux apports de cendres ? 2) Quelle est l'efficacité de la préparation

---

<sup>1</sup> IGN : Institut National de l'Information Géographique et Forestière.

chimique et physique du terrain avant plantation ? 3) Quelle est la différence entre un apport de cendres (modalité innovante) et un amendement plus classique à base de CaMg ?

Tableau 1 : Plan expérimental ICIF : nombre de placettes réalisées par modalité.

Amendement 6 T/ha	Cendres	CaMg		Aucun	
		oui	non	oui	non
<b>Travail du sol</b>					
<b>Douglas</b>	1100 t/ha	3			
<b>Douglas</b>	1600 t/ha	3	3	3	3
<b>Douglas</b>	2000 t/ha	3			
<b>Epicéa</b>	2200 t/ha	3			
<b>Cupressocyparis</b>	1600 t/ha	3			
<b>Saule</b>	2000 t/ha	3	3	3	3
<b>Robinier</b>	2000 t/ha	3			

## 1.2 Relevés dendrométriques et floristiques

Les relevés dendrométriques ont été effectués sur la totalité des placettes aux printemps 2013, 2014, 2015 et durant mon stage fin mars 2016. Sur chaque placette nous avons mesuré la hauteur et estimé l'état sanitaire de 64 plants de la partie centrale de la placette. L'état sanitaire a été noté sur des critères simples : mort, vivant, jaunissant, dépérissant ou non-retrouvé. A partir d'un arbre repère, nous relevons 1 arbre sur 2 (modalité à 1600 tiges /ha) ou 2 arbres sur 3 (modalité à 2000 tiges/ha). Les mesures sont ainsi répétées sur les mêmes arbres tous les ans.

Les relevés floristiques ont été réalisés sur les itinéraires de Douglas (1600t/ha) et Saule (2000t/ha) testés sur l'ensemble des modalités de travail du sol et d'amendement, soient 30 placettes (2 essences \* 5 modalités \* 3 répétitions). Au sein de chaque placette, nous avons relevé les espèces présentes sur 21 placeaux de 1m<sup>2</sup>. Ces placeaux sont répartis sur 3 transects parallèles espacés de 12m perpendiculaires aux lignes de plantation. Chaque transect mesure 25m, porte 7 placeaux espacés de 3m. Les extrémités des transects sont matérialisées par des piquets permanents. Ainsi, bien que la position des placeaux ne soit pas rigoureusement permanente, l'emplacement des relevés est relativement constant dans le temps et permet d'assurer un suivi temporel de l'évolution des communautés végétales présentes (Annexe : ICIF).

Trois campagnes de relevés de flore ont eu lieu en août 2013, juillet 2014 et celle que j'ai réalisée fin juin 2016. Chaque campagne de relevés a été effectuée par plusieurs équipes d'au moins deux observateurs pour avoir les relevés les plus exhaustifs possibles, les deux premiers relevés de chaque campagne sont systématiquement réalisés en commun afin d'harmoniser la manière de procéder des différentes équipes.

## 1.3 Analyses de l'objectif sylvicole

J'ai analysé la survie et la croissance des différentes essences plantées en fonction des différentes modalités. Dans ce rapport je présente les résultats sur les itinéraires Saule (2000t/ha) et Douglas (1600t/ha), en cohérence avec les relevés floristiques (les résultats des différentes essences testées sur la modalité apport de cendres avec travail profond du sol sont fournis dans l'annexe : ICIF - Résultats Complémentaires).

Pour analyser les taux de survie de chaque essence, j'ai regroupé la notation de l'état sanitaire des arbres en deux catégories : les arbres morts (notés « mort » ou « absent ») et les arbres vivants (y compris ceux notés jaunissant ou dépérissant). A l'aide du package « survival » (Therneau, 2016), j'ai utilisé la fonction « surv » pour créer un objet de survie dont l'évènement est la mort (mise en forme de type 1 : mort, 0 : vivant) puis je l'ai assigné à la fonction « survfit » qui génère des courbes de survies selon le modèle de Kaplan-Meier. J'ai par la suite utilisé la fonction « coxph » pour effectuer un modèle de risques proportionnels de régression de Cox sur l'objet de survie et voir la significativité de l'effet des différentes modalités.

Pour analyser les effets des différents traitements sur la croissance des plants, j'ai calculé les moyennes de hauteur de chaque placette par année et par essence. J'ai analysé la hauteur moyenne atteinte en 2016 qui correspond à la croissance des plants sur trois saisons de végétation. Le plan d'expérience étant incomplet (modalité CaMg non testée en l'absence de travail en profondeur du sol) nous avons scindé l'analyse en deux temps. Premièrement, j'ai modélisé la hauteur moyenne en fonction de l'apport de cendres (avec / sans) et du travail en profondeur du sol (avec / sans) et de l'interaction des deux ; pour cela, j'ai exclu les modalités avec amendement CaMg (testée uniquement avec travail du sol en profondeur). Deuxièmement, afin de comparer les effets de l'apport de cendres et de l'amendement CaMg, j'ai modélisé la hauteur en fonction des apports (aucun / cendres / CaMg), excluant les modalités sans travail du sol.

Afin de déterminer les modalités dont la survie ou la croissance en hauteur est significativement différente j'ai effectué une anova puis un test de Tukey sur le taux de survie et sur la différence moyenne de hauteur des arbres mesurée en 2016.

#### 1.4 Analyses des données floristiques

J'ai commencé par une étape d'harmonisation taxonomique entre les différentes années, pour que toutes les espèces recensées soient notées de la même façon et pour regrouper les éventuels doublons d'espèces (une même espèce dont le nom aurait changé d'une année à l'autre).

J'ai ensuite agrégé les relevés des 21 placeaux de chaque placette : le nombre de placeaux où une espèce a été recensée est utilisé comme un indicateur de son abondance dans la placette. J'ai ainsi analysé l'effet des différentes modalités sur la richesse spécifique en utilisant des modèles linéaires mixtes (package lme4, Bates et al., 2015) avec un effet aléatoire « placette », la significativité des effets a été testée suivant les hypothèses linéaires généralisées (package multcomp ; Hothorn et al., 2008) (Tableau 2).

J'ai analysé les changements de communautés végétales à l'aide d'une analyse multivariée de type « non-Metric Multidimensional Scaling » en utilisant la fonction metaMDS (package vegan ; Oksanen et al., 2016) et en choisissant la distance de Horn-Morisita, plus robuste à la présence d'espèces rares et aux défauts d'exhaustivité et prenant en compte l'abondance des espèces (Chao et al., 2006). Cette analyse a ainsi été réalisée à partir des relevés floristiques des 30 placettes aux 3 dates de campagne de relevés (2013, 2014, 2016), soit au total 90 points. J'ai testé l'effet des différentes modalités sur la composition des communautés végétales (coordonnées sur les deux premiers axes de la NMDS) de la même façon que pour la richesse spécifique (Tableau 2 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Tableau 2 : Analyses floristiques (ICIF): détail des formules et fonctions utilisées

Variable à expliquer	Formules utilisées	Jeu de données
Coordonnées des points sur les axes de la NMDS (MDS1 et MDS2)	~ date * Travail du sol + (1 Placette)	Placettes amendement exclues
	~ date * Apport + (1 Placette)	Placettes avec Culti 3B®
	~ date * Essence + (1 Placette)	/
	~ date * Apport * Travail du sol + (1 Placette)	Avec et sans les placettes amendements
Richesse Spécifique	~ date * Apport * Travail du sol * Essence + (1 Placette)	Placettes amendement exclues
	~ date + Essence + date : Essence + (1 Placette)	/
	~ date + Travail du sol + date : Travail du sol + (1 Placette)	Placettes de type amendement exclues + sélection de l'essence
	~ date + Apport + date : Apport + (1 Placette)	Placettes avec Culti 3B®
Valeur indicatrice moyenne (L, T, N, H_eda, pH).	~ date * Apport + (1 Placette)	/

J'ai analysé l'effet des différents traitements sur les changements de valeurs indicatrices des communautés végétales en utilisant la base floristique « baseflor » (Julve, 1998). Cette base de données assigne aux espèces des valeurs indicatrices semblables aux valeurs indicatrices d'Ellenberg, mais plus adaptées à la flore française. J'ai retenu 5 indices jugés pertinents pour la compréhension des changements dans la composition des communautés végétales : l'indice de lumière (L), l'indice de température (T), l'indice de niveau trophique (N), l'indice d'humidité édaphique (H\_eda) et celui d'acidité (pH). Pour chaque placette j'ai calculé la valeur moyenne de ces 5 indices sans les pondérer par l'abondance des espèces. Les résultats de ces valeurs indicatrices ont ensuite été analysés suivant la même démarche que la richesse spécifique (Tableau 2).

Pour pouvoir interpréter écologiquement les deux premiers axes de la NMDS et donc les variations des communautés sur ces axes, j'ai effectué des tests de corrélations (Pearson) entre les coordonnées des espèces sur ces deux axes et leurs indicateurs écologiques.

## 2. Projet ALTER

### 2.1 Dispositif expérimental

Le réseau d'expérimentation ALTER regroupe 8 sites expérimentaux répartis dans 4 régions, Alsace, Normandie, Bretagne et Aquitaine, pour prendre en compte des conditions pédoclimatiques contrastées (**Figure 1**). L'objectif sylvicole du projet est de tester diverses méthodes de contrôle de la végétation concurrente de la régénération forestière, notamment la Molinie (*Molinia caerulea*) et la Fougère aigle (*Pteridium aquilinum*) dans le but de remplacer les traitements herbicides actuellement utilisés.

Seul le cas de la molinie a été traité durant ce stage, en adéquation avec les résultats dendrométriques ALTER qui ont été publiés récemment (Dassot et al., 2016).

Sur chaque site, six modalités de traitement ont été testées : une modalité témoin sans aucune intervention (« TE »), une modalité laissée nue avec traitement herbicide (« HE » ; N-Phosphonométhyl glycine, plus connu sous le nom de glyphosate, dans le cas de la molinie ; et Asulame dans le cas de la fougère aigle), une modalité travaillée au Scarificateur Réversible® (« SR » ; Annexe : Scarificateur Réversible), une modalité travaillée au Scarificateur Réversible® et au sous-soleur multifonction (« SR + SSMF »), une modalité ensemencée avec

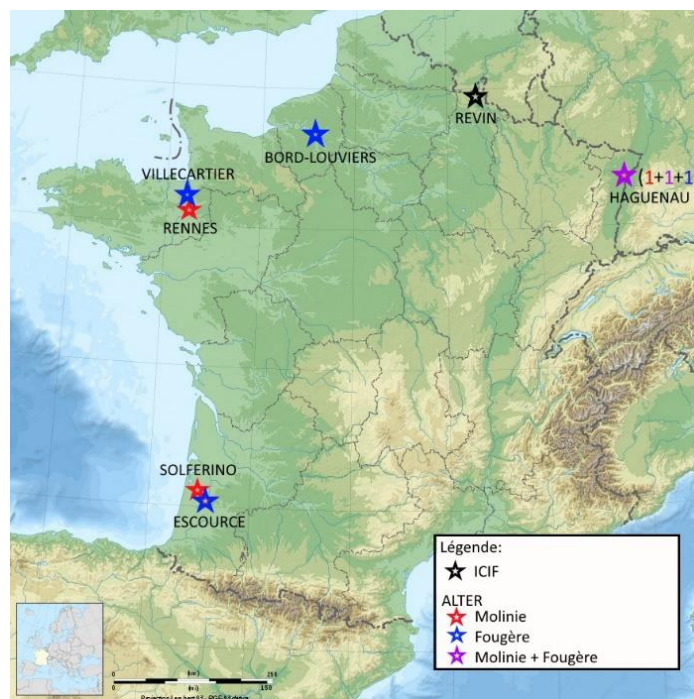


Figure 1 : Localisation des expérimentations ICIF et ALTER en France

une couverture végétale et une modalité entretenue avec la méthode locale de gestion (« LO » ; variable selon les sites).

La modalité de couverture végétale a été abandonnée en cours d'expérimentation du fait du faible taux de germination des graines plantées ; elle ne sera pas traitée dans ce rapport.

Tous les sites contiennent trois blocs expérimentaux complets, excepté les deux sites en alsace qui n'en contiennent que deux. Chaque répétition est appelée « PU » (parcelle unitaire) et chaque PU est plantée à moitié en chêne et à moitié en pin pour pouvoir tester les modalités sur une espèce de résineux et une espèce de feuillus.

## 2.2 Relevés floristiques

Les inventaires floristiques ont été effectués annuellement par l'équipe MGVF<sup>2</sup> en charge du projet. Dans chaque PU, 8 à 11 placeaux de 1m<sup>2</sup> ont été relevés de façon aléatoire, en prenant en note l'abondance dominance de chaque espèce présente.

## 2.3 Analyse de l'objectif sylvicole

Sur chaque site, j'ai analysé l'effet des différentes modalités sur le pourcentage de recouvrement de la molinie. Pour cela, j'ai calculé la moyenne du pourcentage de recouvrement de la molinie par PU, et également la moyenne du pourcentage de recouvrement des espèces entrant dans l'ordre des Poales pour voir l'effet du glyphosate sur toutes les espèces de cet ordre en plus de la molinie. J'ai par la suite analysé l'effet des différentes modalités sur le pourcentage de recouvrement de la molinie sur chaque site du réseau ALTER à l'aide de modèles linéaires mixtes avec les variables date, modalité et l'interaction des deux en effets fixes et en indiquant

<sup>2</sup> MGVF : Mission de Gestion de la Végétation Forestière, équipe Recherche et Développement du LERFOB (Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois), Centre INRA Nancy-Lorraine.

un effet aléatoire PU. La significativité des effets est testée d'après les hypothèses linéaires généralisées.

## 2.4 Analyse des données floristiques

Avant d'analyser les données floristiques, j'ai commencé par vérifier et harmoniser les noms d'espèces de tous les relevés pour éviter les doublons.

J'ai ensuite regroupé les relevés effectués sur les placeaux pour avoir des relevés floristiques par PU. J'ai décidé de conduire des analyses par site, les sites d'études étant répartis sur un fort gradient bio-climatique (du Nord-Est de la France au Sud-Ouest), à priori beaucoup plus structurant pour la composition des communautés végétales que l'effet des différentes modalités.

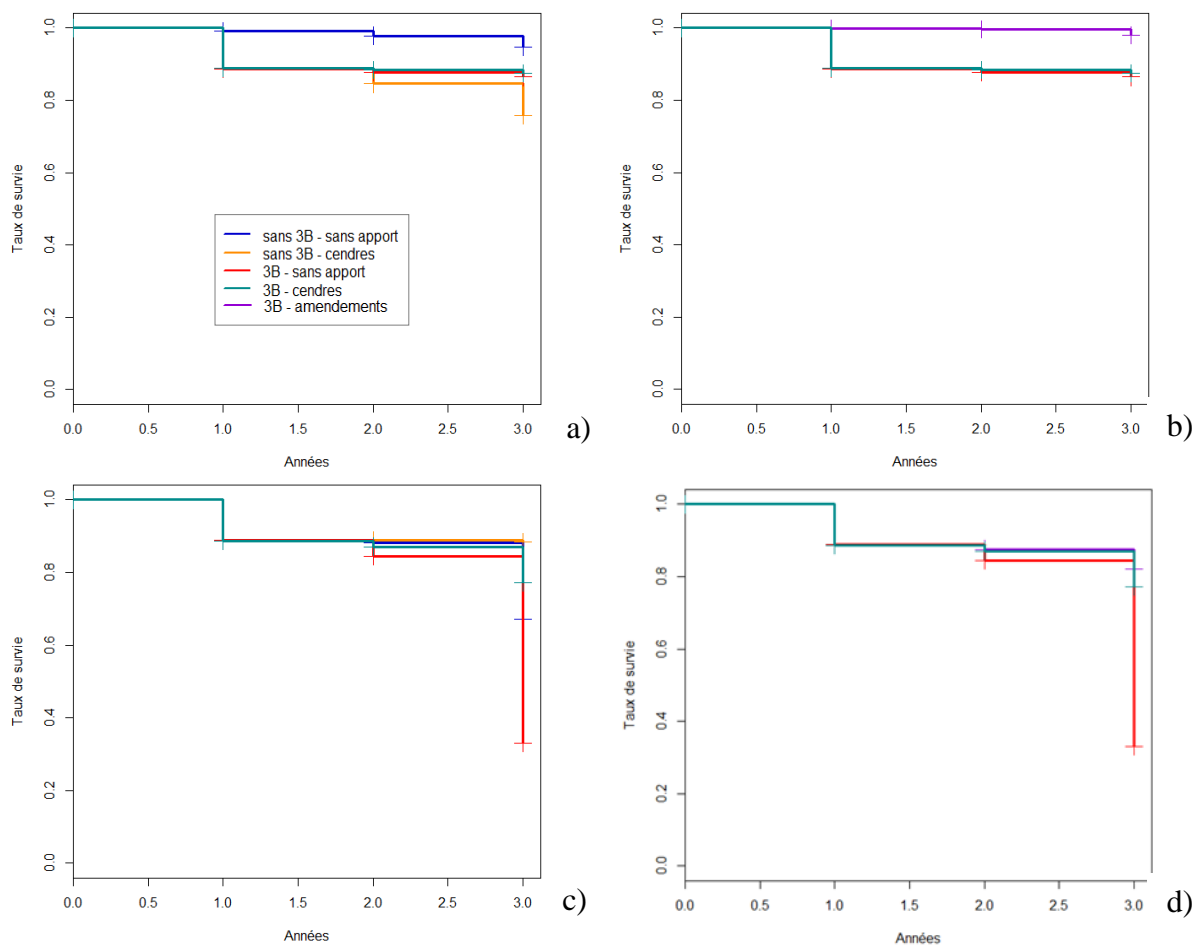
J'ai ensuite comparé l'effet des différentes modalités sur la richesse spécifique à l'aide de modèles linéaires mixtes avec les variables date, modalité et l'interaction des deux en effets fixes et en indiquant un effet aléatoire PU. La significativité des effets est testée d'après les hypothèses linéaires généralisées.

J'ai analysé les changements de communautés végétales à l'aide d'une analyse multivariée de type « non-Metric Multidimensional Scaling » en utilisant la fonction metaMDS (package vegan) en choisissant la distance de Horn-Morisita, de la même manière que pour les analyses ICIF. La NMDS a ainsi été réalisée à partir des relevés floristiques des 5 modalités à toutes les dates de campagne de relevés (diverses selon les sites). J'ai testé l'effet de ces modalités sur les communautés végétales de la même façon que pour la richesse spécifique.

J'ai analysé l'effet des différents traitements sur les changements de valeurs indicatrices des communautés végétales en utilisant la base floristique « baseflor » du projet CATMINAT porté par Philippe Julve.

J'ai retenu les mêmes indices que pour ICIF : l'indice de lumière (L), l'indice de température (T), l'indice de niveau trophique (N), l'indice d'humidité édaphique (H\_eda) et celui d'acidité (pH). Pour chaque placette j'ai calculé la valeur moyenne de ces 5 indices sans les pondérer par l'abondance des espèces. Les résultats de ces valeurs indicatrices ont ensuite été analysés suivant la même démarche que la richesse spécifique à l'aide de modèles linéaires mixtes avec les variables date, modalité et l'interaction des deux en effets fixes et en indiquant un effet aléatoire PU. La significativité des effets est testée d'après les hypothèses linéaires généralisées.





**Figure 2:** Courbes de survie du Douglas et du Saule dans diverses conditions de culture.

a) Survie du Douglas sans les modalités amendements calcomagnésiens ; b) Survie du Douglas uniquement avec Culti 3B<sup>®</sup> ; c) Survie du Saule sans les modalités amendements calcomagnésiens ; d) Survie du Saule uniquement avec Culti 3B<sup>®</sup>

## Résultats

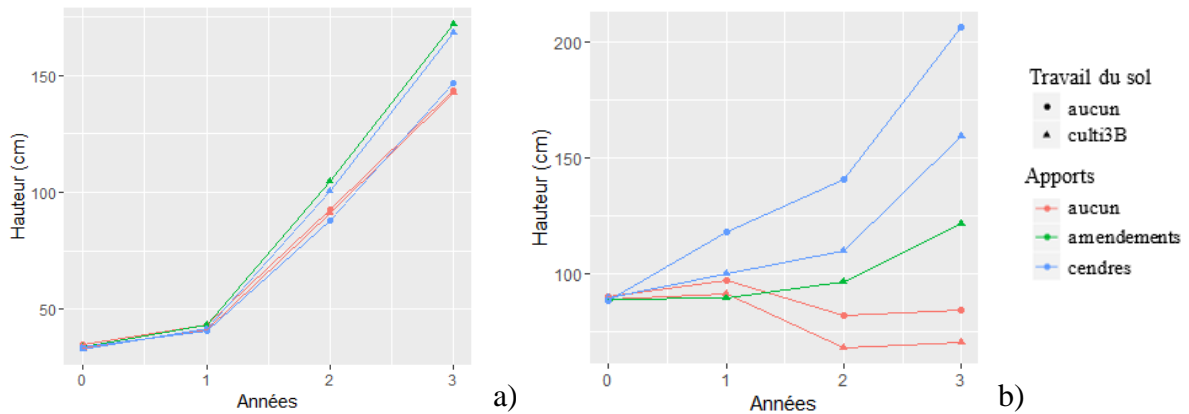
### 1. Projet ICIF

#### 1.1 Effet des modalités sur l'objectif sylvicole

##### 1.1.1 Survie des plants

Dans le cas du Douglas, l'étude du travail profond du sol excluant les modalités avec amendements calcomagnésiens montre que l'utilisation du Culti 3B<sup>®</sup> n'a pas d'effet sur la survie des plants ( $Pr=0.151$ ). La modalité sans apport et sans utilisation du Culti 3B<sup>®</sup> présente le meilleur taux de survie (94.8%). La modalité cendre sans utilisation du Culti 3B<sup>®</sup> montre le plus faible taux de survie (75.7%) (**Figure 2a**).

Dans le cas des apports sur les modalités comprenant l'utilisation du Culti 3B<sup>®</sup>, les analyses montrent que l'apport d'amendements calcomagnésiens permet une survie du Douglas significativement plus forte que celle de la modalité référence sans apport (98% avec les amendements contre 86.4% sans apport,  $Pr=4.1e^{-09}$ ). La survie des plants de la modalité avec apport de cendre (87.5%) est équivalente à celle des plants de la modalité sans apport (**Figure 2b**).



**Figure 3:** Croissance du Douglas et du Saule en fonction des modalités de traitement ; a) Croissance du Douglas ; b) Croissance du Saule

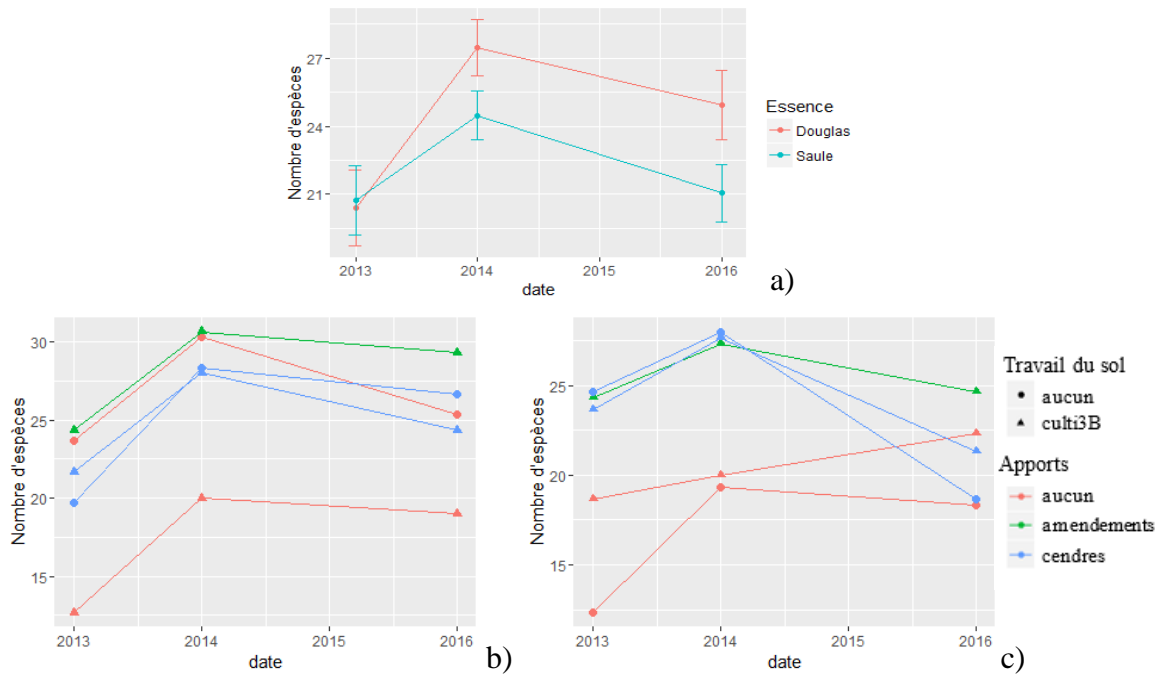
Dans le cas du Saule, l'étude du travail profond du sol excluant les modalités avec amendements calcomagnésiens montre que les modalités de travail du sol avec et sans apport diminuent significativement la survie des plants ; soit en moyenne 54.7% de survie à 3 ans dans le cas de travail du sol contre 77.7% de survie sans travail du sol (modalités cendres et sans apport confondues) ( $Pr=3.77e^{-15}$ ). A l'inverse, la modalité sans travail du sol avec apport de cendres l'augmente (88.4% avec cendres contre 67.1% sans apport,  $Pr=1.44e^{-15}$ ) (**Figure 2c**).

Dans le cas des apports sur les modalités comprenant l'utilisation du Culti 3B<sup>®</sup>, les analyses montrent que l'apport d'amendements calcomagnésiens et de cendres permettent d'augmenter significativement la survie du saule (82.1% pour les amendements CaMg,  $Pr=3.00e^{-15}$ , 77.1% pour l'apport de cendres,  $Pr=1.38e^{-12}$ , et 33.0% sans apport). L'apport d'amendements calcomagnésiens étant le plus efficace lors du travail du sol (**Figure 2d**).

### 1.1.2 Croissance des plants

Dans le cas du Douglas, l'étude du travail profond du sol excluant les modalités avec amendements calcomagnésiens présente des résultats qui ne montrent aucun effet du travail du sol seul ( $Pr=0.765$ ). Dans le cas des modalités avec utilisation du Culti 3B<sup>®</sup>, la croissance du Douglas augmente significativement lors de l'apport de cendres (+25.75cm à t=3ans,  $Pr=2.37e^{-13}$ ) ou d'amendements (+29.67cm, à t=3ans,  $Pr=2e^{-16}$ ) comparé au témoin sans apport. On ne note pas de différence significative entre ces deux types d'apports (**Figure 3a**).

Dans le cas du Saule, l'étude du travail profond du sol excluant les modalités avec amendements calcomagnésiens montre que : le travail du sol seul diminue la croissance du saule (-14.2cm,  $Pr=0.037$ ). L'apport de cendres sans travail profond du sol augmente considérablement la croissance du saule (+122.3cm,  $Pr=2e^{-16}$ ). Dans le cas du travail profond du sol avec utilisation du Culti 3B<sup>®</sup>, l'apport de cendres et d'amendement permettent une augmentation significative de la croissance du saule, respectivement de +89.2cm ( $Pr=2e^{-16}$ ) et +54.4cm ( $Pr=8.22e^{-16}$ ). L'apport de cendre permet une croissance significativement plus importante que l'apport d'amendements CaMg (**Figure 3b**).



**Figure 4:** Représentation graphique de la richesse spécifique (RS), a) RS globale sans distinction des modalités; b) RS des parcelles à Douglas en fonction des différentes modalités; c) RS des parcelles à Saule en fonction des différentes modalités.

## 1.2 Effet des modalités sur la flore accompagnatrice

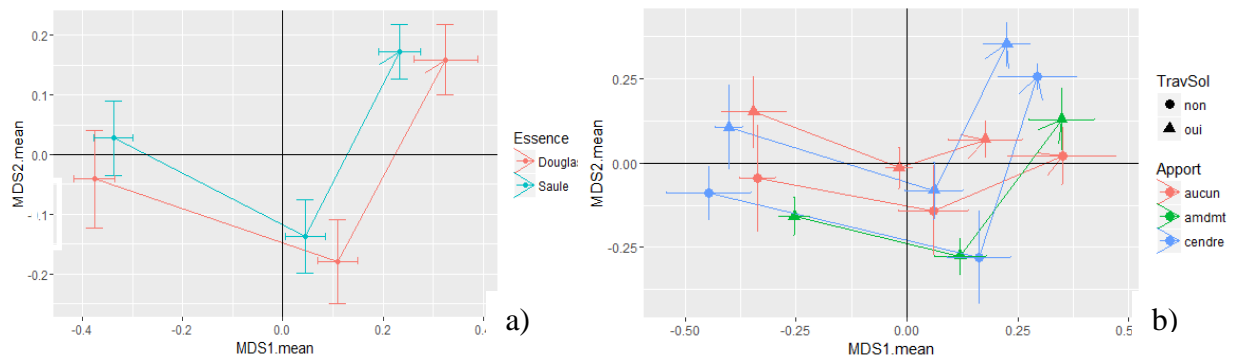
### 1.2.1 Richesse Spécifique (RS)

L'analyse du modèle statistique global toutes modalités confondues (apports, essence, Culti 3B<sup>®</sup>) montre un effet significatif ( $Pr < 0.02$ ) de l'apport de cendres (+6 espèces) et de l'apport d'amendements (+8 espèces) sur la richesse spécifique.

L'observation du graphique (**Figure 4a**), laisse entrevoir un écart important de richesse spécifique entre les placettes à Saule et celles à Douglas, cependant l'analyse statistique ne montre pas d'effet significatif ( $Pr = 0.996$ ) de l'essence plantée sur la richesse spécifique. Dans le cas du travail profond du sol en excluant les modalités avec amendements calcomagnésiens, l'utilisation du Culti 3B<sup>®</sup> n'a pas d'effet significatif sur la richesse spécifique, quelle que soit l'essence plantée ( $Pr_{saule} = 0.929$  et  $Pr_{douglas} = 0.315$ ) (**Figure 4b et 4c**).

Dans le cas des apports sur les modalités comprenant l'utilisation du Culti 3B<sup>®</sup>, on observe, en présence de Douglas, une augmentation marginalement significative (+ 11 espèces,  $Pr = 0.051$ ) de la richesse spécifique des modalités avec apport d'amendements calcomagnésiens (**Figure 4b**). En présence de Saule, on observe une augmentation marginalement significative de la richesse spécifique sur les modalités amendements calcomagnésiens avec (+7 espèces,  $Pr = 0.081$ ) et cendres (+7 espèces,  $Pr = 0.071$ ).

Indépendamment de l'essence plantée, on note une augmentation significative de la RS sur les modalités amendements calcomagnésiens (+9 espèces,  $Pr = 0.002$ ) et cendres (+8 espèces,  $Pr = 0.009$ ) (**Figure 4b et 4c**).



**Figure 5 :** Représentation graphique des changements de communautés végétales au cours du temps ; a) en fonction des essences Douglas et Saule ; b) toute essence confondue, en fonction des modalités.

### 1.2.2 Dynamique des Communautés Végétales

D'après les tests de corrélation effectués pour la **Figure 5**, l'axe MDS1 est plutôt dirigé par l'indice de température des espèces : les espèces recensées en 2013 présentant un indice de température plus fort qu'en 2016. L'axe MDS2 quant à lui est plutôt dirigé par le niveau trophique : en 2013 les espèces présentent un indice de niveau trophique plus bas qu'en 2016 (Tableau 3).

Les analyses statistiques de la répartition des coordonnées des espèces le long des axes ne montrent pas d'effet significatif de l'essence plantée sur les communautés végétales ( $Pr_{MDS1} = 0.362$ ,  $Pr_{MDS2} = 0.838$ ). Elles montrent cependant un effet significatif du temps sur l'axe MDS1 ( $Pr = 0.001$ ) et sur l'axe MDS2 ( $Pr = 0.006$ ) (**Figure 5a**). Le modèle global intégrant toutes les modalités ne présente pas d'effet significatif particulier (**Figure 5b**).

L'étude du travail profond du sol excluant les modalités avec amendements calcomagnésiens ne montre pas d'effet du Culti 3B<sup>®</sup> sur les communautés végétales, indépendamment de l'essence plantée. L'analyse montre cependant un mouvement temporel significatif des communautés végétales, notamment sur l'axe MDS1 dirigé par l'indice de température ( $Pr_{MDS1} = 0.0004$ ,  $Pr_{MDS2} = 0.015$ ).

L'étude des apports sur les modalités avec utilisation du Culti 3B<sup>®</sup> montre que les communautés végétales sont globalement dirigées par un mouvement temporel significatif sur l'axe MDS1 influencé par l'indice de température, quelle que soit la modalité testée ( $Pr=0.001$ ). L'apport d'amendements calcomagnésiens ( $Pr=0.044$ ) et l'interaction « date : amendements » ( $Pr=0.045$ ) influencent également les communautés végétales le long de l'axe MDS2 dirigé par le niveau trophique. On observe également un effet marginalement significatif de l'apport de cendre et de l'interaction « date : cendre » sur l'axe MDS2.

### 1.2.3 Etude des indices écologiques des communautés

Dans le cas du Douglas, l'étude du travail profond du sol excluant les modalités avec amendements calcomagnésiens montre que l'utilisation du Culti 3B<sup>®</sup> n'impacte pas le type de végétation présent. On remarque un effet marginalement significatif de l'apport de cendre qui augmente légèrement (+0.3) l'indice d'humidité édaphique des communautés végétales.

Dans les modalités plantées en Saule, on observe un effet significatif de l'apport de cendre sur les indices d'héliophilie (-0.4), de température (-0.16), d'humidité édaphique (-0.3) et du pH (+0.6) sur les communautés végétales. On remarque également une augmentation

marginale significative de l'indice de niveau trophique au cours du temps lors de l'apport de cendres (+0.2). On ne note cependant pas d'effet d'utilisation du Culti 3B® (Tableau 4).

L'étude des apports sur les modalités avec utilisation du Culti 3B® montre pour le Douglas, des effets significatifs sur l'indice de niveau trophique des communautés végétales : un effet global temporel négatif (-0.14) et, un effet temporel positif (+0.14) de l'apport de cendre sur cet indice. On peut également noter un effet marginal temporel positif de l'apport d'amendements calcomagnésiens (+0.17, Tableau 5).

Dans le cas de la plantation de Saule, on observe un effet négatif (-0.15, Tableau 5) de l'apport d'amendements calcomagnésiens sur l'indice d'humidité édaphique des communautés végétales.

Tableau 3 : Test de corrélation (Pearson) entre les indices écologiques et les coordonnées des espèces sur les axes MDS1 et MDS2

Traits	Axe	Pvalue	Cor
L	MDS1	0.126	0.249
	MDS2	0.470	0.118
T	MDS1	<b>0.026</b>	<b>-0.355</b>
	MDS2	0.990	0.001
pH	MDS1	0.121	0.251
	MDS2	0.165	0.226
H_edu	MDS1	0.743	0.054
	MDS2	0.320	0.163
N	MDS1	0.652	0.074
	MDS2	<b>0.020</b>	<b>0.369</b>

Tableau 4 : Analyse statistique du travail profond du sol excluant les modalités avec amendements calcomagnésiens

	Effet	L	N	T	H_edu	pH	
Douglas	Date	1.000	0.937	0.991	0.933	0.997	
		+0.003	-0.045	-0.012	+0.038	-0.027	
	Culti3B	1.000	0.924	0.392	0.996	0.748	
		+0.033	+0.182	+0.131	+0.067	-0.331	
	Cendres	1.000	0.458	1.000	0.086 (.)	0.846	
		-0.059	+0.339	+0.012	+0.353	+0.287	
	Culti3B :cendres	1.000	0.999	0.919	0.556	1.000	
		-0.072	-0.107	-0.094	-0.292	+0.117	
	Date : Culti3B	0.924	0.772	1.000	0.999	0.999	
		+0.069	-0.090	-0.001	0.021	+0.031	
	Date : cendres	0.986	0.988	1.000	0.321	1.000	
		-0.048	+0.046	-0.007	-0.121	+0.005	
	Saule	Date	1.000	0.086 (.)	0.092 (.)	1.000	0.999
			-0.006	-0.129	-0.049	-0.001	-0.014
Culti3B		0.865	1.000	0.627	0.971	0.959	
		-0.168	-0.004	-0.069	-0.056	+0.137	
Cendres		0.038 (*)	0.829	0.016 (*)	0.005 (**)	0.007 (**)	
		-0.481	+0.299	-0.162	-0.278	+0.593	
Culti3B :cendres		0.525	1.000	0.777	0.229	0.592	
		+0.363	-0.081	+0.081	+0.231	-0.361	
Date : Culti3B		1.000	0.523	0.904	0.750	0.999	
		-0.013	+0.113	+0.024	-0.036	0.018	
Date : cendres		0.993	0.040 (*)	0.225	0.452	0.951	
		+0.040	+0.205	+0.057	+0.050	0.042	

Tableau 5 : Analyse statistique des apports de cendres et d'amendements CaMg (amdmt) sur les modalités avec utilisation du Culti 3B.

	Effet	L	N	T	H_eda	pH
Douglas	Date	0.516	0.030 (*)	0.969	0.620	1.000
		+0.072	-0.136	-0.014	+0.060	+0.003
	Apport == amdmt	0.738	1.000	0.287	0.277	0.443
		-0.181	+0.002	-0.142	+0.235	+0.361
	Apport == cendre	0.907	0.833	0.777	0.989	0.332
		-0.132	+0.232	-0.082	+0.061	+0.404
	Date : amdmt	0.475	0.079 (.)	1.000	0.265	1.000
		-0.107	+0.167	+0.005	-0.125	+0.009
	Date : cendre	0.082 (.)	0.001 (**)	1.000	0.568	0.585
		-0.175	+0.260	-0.008	-0.090	+0.096
Saulte	Date	0.996	0.997	0.250	0.186	1.000
		-0.019	-0.016	-0.024	-0.038	+0.003
	Apport == amdmt	0.849	0.999	0.244	0.016 (*)	0.439
		-0.161	+0.084	-0.085	-0.149	+0.276
	Apport == cendre	0.956	0.944	0.290	0.810	0.610
		-0.117	+0.217	-0.081	-0.046	+0.231
	Date : amdmt	0.967	0.888	0.999	0.892	1.000
		+0.043	+0.051	+0.005	+0.021	-0.006
	Date : cendre	0.858	0.071 (.)	0.446	0.906	0.449
		-0.063	+0.145	+0.028	+0.020	+0.082

## 2. Projet ALTER

### 2.1 Effet des modalités sur le recouvrement de l'espèce cible (*Molinia caerulea*)

Sur le site de Rennes, les analyses statistiques ne montrent pas d'effet significatif des différentes modalités de traitement sur le pourcentage de recouvrement de la molinie, cependant grâce au graphique (**Figure 6**) on peut estimer que les modalités HE et SR+SSMF présentent une efficacité non négligeable dans la lutte contre la molinie.

Sur le site de Solférino, tous les traitements présentent un effet significatif sur le pourcentage de recouvrement de la molinie. Cependant dans le temps, le traitement le plus efficace semble être la modalité SR+SSMF car elle présente le pourcentage de recouvrement de la molinie le plus faible, ainsi que la pente la plus faible (recolonisation de la molinie moins rapide que pour les autres modalités). Les analyses des sites d'Haguenau (P32 et P35) ainsi que les graphiques ne montrent aucun effet significatif des traitements sur le recouvrement de la molinie.

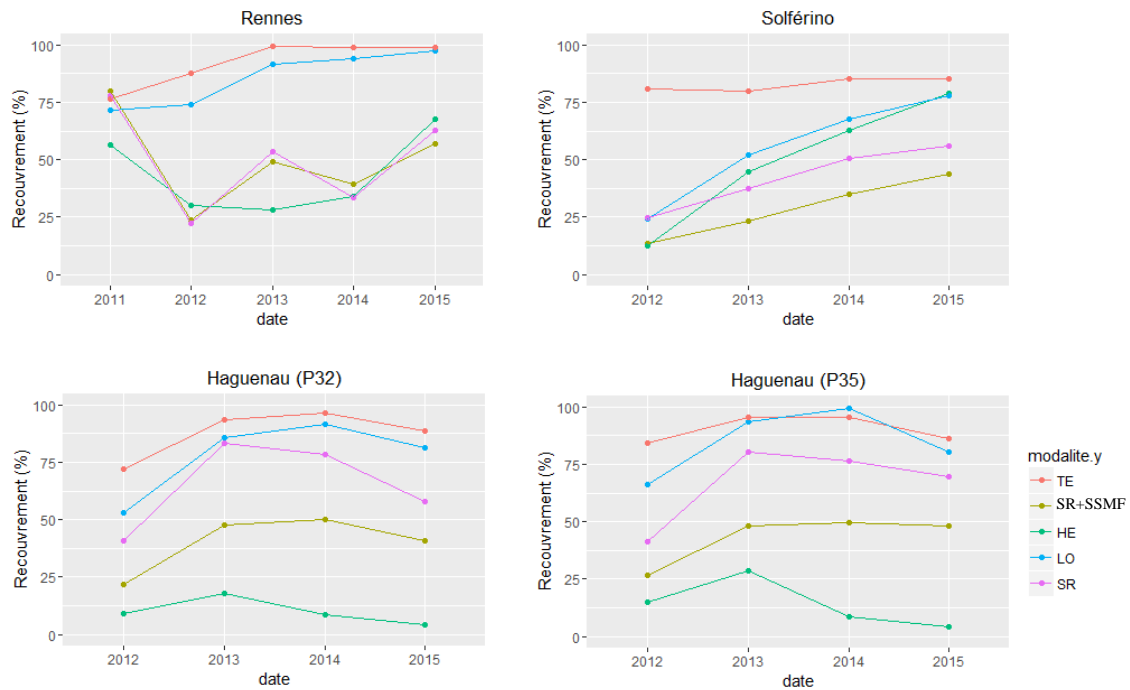


Figure 6: Effet des différentes modalités sur le pourcentage de recouvrement de la Molinie (*Molinia caerulea*)

## 2.2 Effet des modalités sur la flore accompagnatrice

### 2.2.1 Richesse Spécifique (RS)

Sur le site de Rennes, la modalité SR+SSMF montre une RS significativement plus forte que la modalité témoin ([Erreur ! Source du renvoi introuvable.](#) ; Figure 7). On note une tendance identique des modalités HE et SR. Sur les autres sites, l'analyse ne révèle pas d'impact significatif des diverses modalités sur la RS.

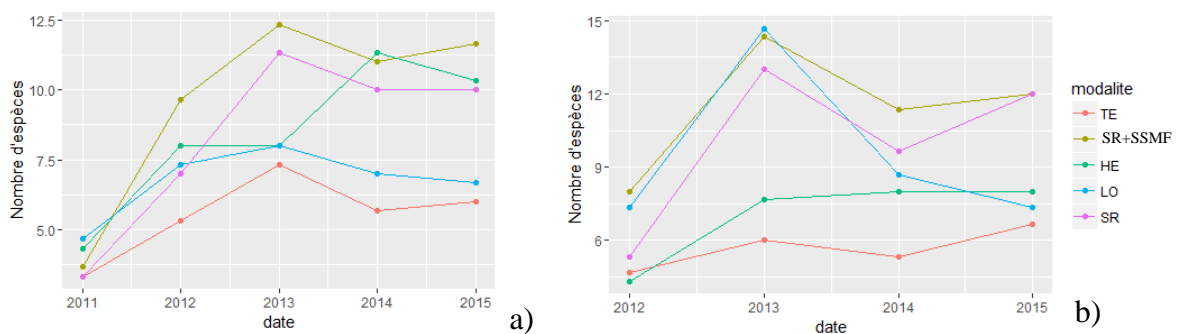


Figure 7 : Richesse Spécifique des différentes modalités testées sur les sites de Rennes (a) et Solférino (b)

### 2.2.2 Dynamique des Communautés Végétales

Sur le site de Rennes, seul un effet temporel influence la composition des communautés végétales sur toutes les modalités le long de l'axe MDS1 (Tableau 6). Sur le site P32 d'Haguenau, les modalités SR et SR+SSMF ont un effet significatif sur la composition des communautés végétales sur l'axe MDS1. Sur le site P35 d'Haguenau, la modalité LO influence la composition des communautés végétales sur l'axe MDS2. Sur le site de Solférino, les résultats ne montrent pas d'effet des modalités ou du temps sur les communautés végétales.

### 2.2.3 Etude des indices écologiques des communautés

Sur le site de Rennes les modalités SR+SSMF, HE et SR ont un effet significatif et tendent à augmenter l'indice de lumière des communautés végétales. La modalité SR+SSMF fait également significativement décroître l'indice d'humidité édaphique ainsi que l'indice d'acidité.

Tableau 6 : Résultats de l'analyse statistique de la Richesse Spécifique (RS) et des axes MDS en fonction de l'effet date et des interactions date: modalités

Site	Effet	RS		MDS1		MDS2	
		Pr	Esti	Pr	Esti	Pr	Esti
RENNES	Date	0.828	0.369	0.007 (**)	0.172	0.951	-0.042
	SR+SSMF	0.007 (**)	1.511	0.065 (.)	0.164	0.986	-0.044
	HE	0.079 (.)	1.145	0.239	0.127	0.738	-0.086
	LO	0.999	0.106	1.000	0.005	1.000	0.002
	SR	0.060 (.)	1.194	0.835	0.068	0.898	-0.067
SOLFÉRINO	Date	1.000	-0.027	1.000	-0.002	0.998	0.022
	SR+SSMF	0.347	1.423	0.866	0.091	0.993	0.038
	HE	0.912	0.688	1.000	0.001	0.998	0.031
	LO	1.000	-0.008	0.966	0.065	0.947	0.059
	SR	0.202	1.668	0.997	0.039	0.993	0.038
HAG_P32	Date	1.000	0.060	0.999	-0.018	0.366	0.105
	SR+SSMF	0.627	-0.830	0.029 (*)	-0.210	0.262	0.147
	HE	0.177	-1.288	0.247	-0.146	1.000	-0.009
	LO	1.000	-0.010	1.000	-0.006	0.783	0.087
	SR	0.224	-1.220	0.001 (***)	-0.286	0.104	0.180
HAG_P35	Date	0.971	-0.302	0.995	-0.025	1.000	0.004
	SR+SSMF	0.778	0.709	0.955	0.055	0.123	-0.181
	HE	0.122	-1.474	0.247	0.149	0.906	0.068
	LO	0.696	-0.789	1.000	-0.019	0.001 (***)	-0.363
	SR	0.389	-1.082	0.408	0.126	0.065 (.)	-0.202

Sur le site de Solférino, les modalités SR+SSMF et LO ont un effet significatif et augmentent l'indice de température des communautés végétales. La modalité LO diminue également l'indice d'acidité.

Sur le site P32 de Haguenau, les analyses montrent un effet significatif de la temporalité qui diminue l'indice d'acidité des communautés végétales, notamment en interaction avec la modalité SR. La modalité SR+SSMF a quant à elle un effet significatif en diminuant l'indice de température. La modalité HE a un effet significatif en diminuant l'indice d'humidité édaphique.

Sur le site P34 de Haguenau, l'analyse montre un effet significatif de la temporalité qui accroît l'indice d'humidité édaphique des communautés végétales. Les modalités HE et LO accroissent et diminuent respectivement et significativement l'indice de niveau trophique.



Tableau 7 : Résultats de l'analyse statistique des indices de Julve des communautés végétales en fonction de l'effet date et des interactions date : modalités

Site	Effet	L		N		T		H_eda		pH	
		Pr	Esti	Pr	Esti	Pr	Esti	Pr	Esti	Pr	Esti
RENNES	Date	0.576	-0.056	1.000	-0.010	0.610	-0.031	0.859	0.036	0.935	-0.028
	D : SR+SS										
	MF	0.026 (*)	0.152	0.709	0.078	0.142	-0.067	0.014(*)	-0.150	0.042 (*)	-0.125
	D : HE	0.041 (*)	0.144	0.979	0.041	0.091 (.)	-0.072	0.710	-0.061	0.158	-0.100
	D : LO	0.728	0.023	1.000	0.017	0.999	-0.009	1.000	-0.008	0.432	-0.075
	D : SR	0.028 (*)	0.151	0.506	0.095	0.360	-0.052	0.313	-0.089	0.377	-0.079
	D : SR+SS										
	MF	0.051 (.)	0.152	1.000	0.018	0.015 (*)	0.084	0.916	-0.063	0.124	-0.136
	D : HE	0.603	0.078	0.953	0.057	0.999	-0.006	0.970	-0.050	0.916	-0.050
	D : LO	0.223	0.115	0.912	-0.066	0.030 (*)	0.078	0.445	-0.121	0.046 (*)	-0.161
D : SR	0.215	0.116	0.984	0.045	0.468	0.042	0.992	-0.037	0.731	-0.070	
HAG_P32	Date	1.000	0.006	0.845	-0.057	0.992	-0.020	0.059 (.)	0.100	0.016 (*)	-0.121
	D : SR+SS										
	MF	0.878	0.059	0.995	-0.039	0.001 (***)	-0.173	0.999	0.012	0.693	-0.063
	D : HE	0.994	-0.032	0.967	0.056	0.851	0.035	0.009 (**)	-0.168	1.000	-0.003
	D : LO	0.974	0.042	0.222	-0.153	0.193	-0.093	0.992	0.029	0.070	-0.125
	D : SR	0.961	-0.046	0.987	-0.046	0.765	-0.052	0.996	0.025	0.001 (***)	-0.207
HAG_P35	Date	0.876	0.036	0.073 (.)	-0.100	0.125	-0.079	0.0481 (*)	0.104	0.058 (.)	-0.171
	D : SR+SS										
	MF	0.995	0.024	0.623	-0.076	0.655	-0.057	1.000	0.004	0.760	-0.099
	D : HE	1.000	-0.010	0.025 (*)	0.166	0.698	-0.054	0.181	-0.112	0.073 (.)	0.221
	D : LO	0.442	-0.086	0.029 (*)	-0.163	0.999	0.015	0.558	0.076	0.346	-0.155
	D : SR	0.828	-0.055	0.986	-0.031	0.991	-0.022	0.385	0.090	0.661	-0.112

## Discussion

### Expérimentation ICIF

#### Croissance et Survie

La préparation physique et chimique du sol est un processus qui permet de modifier dans de très fortes proportions le succès des plantations, notamment dans le cas du Saule pour lequel sur les modalités sans travail du sol, le taux de survie varie de 67.1% sans apports, à 88.4% avec apport de cendres ; pour les modalités avec travail du sol, le taux de survie varie de 33% sans apport, à 77.1% avec apport de cendres et 82.1% avec amendements CaMg.

Dans le cas du Douglas, les effets de la préparation physique et chimique du sol sont plus nuancés : sans travail du sol, les variations du taux de survie vont de 94.8% sans apports, à 75.7% avec apport de cendres ; avec travail du sol, elles vont de 86.4% sans apports, à 87.5% avec apport de cendres et 98% avec amendements CaMg.

Du côté de la croissance des essences, le douglas avec travail du sol a un gain de croissance de 29cm avec amendements et 25 cm pour l'apport de cendres ; et sans travail du sol, un gain de 3cm avec apport de cendres (comparé au témoin sans travail du sol et sans apport).

Le saule, quant à lui, avec travail du sol, présente un gain de croissance de 89cm pour l'apport de cendres et de 54cm pour l'apport d'amendements CaMg ; et sans travail du sol, un gain de 122cm avec apport de cendres (comparé au témoin sans travail du sol et sans apport).

La majorité des études sur les apports de cendres en forêt a été effectuée sur des plantations de résineux en forêt boréale sur sol pauvre, (Pitman, 2006) dans des conditions pédoclimatiques

assez éloignées de celles connues en France. Pour ce qui est des feuillus, l'étude (Hytönen, 2016) réalisée sur le Bouleau et le Saule, lors d'une culture en serre ayant comme substrat de la tourbe, confirme les résultats obtenus lors de notre étude : l'apport de 6T/ha de cendres (dans le cas d'Hytönen, enrichie en N) augmente la croissance des essences testées.

Je note également que l'apport de cendres a plus tendance à favoriser la croissance du Saule (feuillu) que celle du Douglas (résineux), résultat confirmé par l'étude de Vance et al. (1996, vu dans Pitman, 2006) qui montre que les cendres sont plus favorables à la croissance des feuillus qu'aux résineux en raison de leur plus grande exigence en bases cationiques, justement fournies par l'apport de cendres, hypothèse également validée par les travaux d'Ingerslev et al., 2014.

Notre étude diffère cependant dans l'ajout de travail du sol au Culti 3B® qui impacte également la croissance des plants et peut rendre intéressant l'apport de cendres dans la plantation de Douglas. De plus, l'étude réalisée par Ozolinčius et al. (2007), sur un peuplement mature de 40 ans de Pins (*Pinus sylvestris*) montre que l'apport de cendres supplémentées en azote permet un accroissement de la biomasse, notamment au niveau des aiguilles des plants. Ces accroissements de biomasse n'ont pour le moment pas pu être quantifiés sur l'expérimentation ICIF du fait de son caractère encore juvénile. Il pourrait être judicieux d'envisager ce genre d'étude lorsque l'expérimentation arrivera à terme.

Les études d'Hytönen et d'Ozolinčius citées ci-dessus ont montré des résultats similaires aux nôtres, cependant dans leurs cas, les cendres étaient supplémentées avec de l'azote, chose qui n'a pas été réalisé sur ICIF. Lors de nos phases de terrain, nous avons remarqué une forte densité de Genêt à balais (*Cytisus scoparius*) dépassant souvent les 2m de haut dans les cas d'apport d'amendements CaMg et de cendres. Le Genêt à balais est connu pour être en symbiose avec des bactéries fixatrices d'azote, il est possible selon moi, que l'azote fixé par les bactéries présentes dans les nodosités du Genêt ait été naturellement utilisé par les plants en plus de l'apport de cendres, ce qui expliquerait les résultats similaires aux études citées ci-dessus.

### Végétation

L'apport de cendres augmente la richesse spécifique de la strate herbacée, de la même façon que l'apport d'amendements (CaMg). Ceci peut s'expliquer par le fait que l'apport dans un but de désacidification des sols, pour favoriser les plantations, offre la possibilité à de nouvelles espèces plus calciclinales de s'installer, sans pour autant supplanter les espèces acidophiles et acidiclinales. Hypothèse en adéquation avec les conclusions de Brethes (2012), pour les amendements et, Jacobson et Gustafsson (2001), pour les apports de cendres. De plus, l'apport de cendres sans travail du sol diminue les indices de lumière, de température et d'humidité édaphique et augmente l'indice d'acidité des communautés végétales. Ce qui nous approche de l'objectif de base de l'étude qui est, pour améliorer les plantations, de permettre une augmentation de la fertilité et une diminution de l'acidité des sols tout en n'ayant que peu d'impact sur les espèces végétales. Le mouvement global des communautés sur l'axe de l'indice de niveau trophique suite à l'apport de cendres et d'amendements confirme l'objectif d'enrichissement du niveau de fertilité sols, en adéquation avec les résultats de l'étude sur une plantation de jeunes Epicéa (*Picea abies*) (Arvidsson et al., 2002).

Le choix de ne pas avoir intégré la modalité apport d'amendements calcomagnésiens sans travail du sol sur le dispositif expérimental, a complexifié l'analyse statistique des données du projet ICIF. Il était cependant difficile de l'ajouter au dispositif du fait du manque de place sur le site expérimental, le département RDI de l'ONF a dû arbitrer entre différentes options. Celle retenue a été de tester la performance de diverses essences à l'apport de cendres et au travail profond du sol. La modalité amendements calcomagnésiens visait à comparer l'effet de l'apport de cendres à celui d'un amendement plus classiquement mis en œuvre. Finalement, on

retiendra que les deux essences testées se comportent de manière différente face aux apports de cendres et d'amendements calcomagnésiens.

De plus, suite aux observations réalisées sur le terrain, il aurait été intéressant de mettre en place un protocole de suivi de la biomasse du Genêt à balais et ainsi voir si leur présence apporte un bénéfice (mise à disposition de l'azote sous forme minérale) aux plants.

Il serait également intéressant de refaire des analyses de sol, notamment pour contrôler les taux de métaux lourds dans le sol et en particulier le cadmium (Cd) car d'après les études de Rühling et al., 1996 (vu dans Pitman, 2006) un apport de cendres à tendance à enrichir le sol en Cd. Ce Cd peut également être accumulé dans des champignons tels que *Boletus edulis*, qui sont largement consommés par les cueilleurs.

## **Expérimentation ALTER**

### *Lutte contre la végétation concurrentielle*

En alternative aux herbicides le travail profond du sol en alliant les deux outils (Sous-Soleur Multifonction et Scarificateur Réversible® - Modalité SR+SSMF) ressort comme la solution de remplacement la plus efficace pour lutter contre la Molinie sur les sites de Rennes et de Solférino. Les sites d'Hagenau ne présentent cependant pas de résultats aussi tranchés entre les différentes méthodes utilisées, cependant cette association reste également efficace. Nos résultats valident l'efficacité du Sous-Soleur Multifonction allié au Scarificateur Réversible® dans la lutte contre la molinie (Dassot, et al., 2016).

### *Effets sur la végétation accompagnatrice*

Sur le site de Rennes le travail profond du sol à l'aide du Sous-Soleur Multifonction et du Scarificateur Réversible® (modalité SR+SSMF) provoque une augmentation de la richesse spécifique.

Sur le site P32 d'Hagenau, le travail profond du sol à l'aide du Scarificateur Réversible® seul ou en association avec le Sous-Soleur Multifonction (modalités SR et SR+SSMF) ont un effet significatif sur la composition des communautés végétales sur l'axe MDS1. Sur le site P35 d'Hagenau, la méthode locale de gestion (modalité LO) influence la composition des communautés végétales sur l'axe MDS2.

Je n'observe pas de tendance générale des effets des différents traitements sur la dynamique de la flore.

Pour le site de Rennes, le travail profond du sol à l'aide du Scarificateur Réversible® seul ou en association avec le Sous-Soleur Multifonction® (modalités SR et SR+SSMF), ainsi que le traitement herbicide (modalité HE) augmentent l'indice de lumière de la végétation. Le travail profond du sol à l'aide du Scarificateur Réversible® en association avec le Sous-Soleur Multifonction (modalité 3B) diminue l'indice d'humidité édaphique et l'indice d'acidité (on observe une baisse du pH) de la végétation.

Sur le site de Solférino, le travail profond du sol à l'aide du Scarificateur Réversible® en association avec le Sous-Soleur Multifonction (modalité SR+SSMF) et la technique de gestion locale (modalité LO) augmentent l'indice de température. La modalité LO fait également baisser l'indice d'acidité (on observe une baisse du pH) de la végétation. Les indices d'écologie des espèces, ne montrent pas de tendance générale des effets des différents traitements sur la dynamique de la flore.

### *Résultats dendrométriques issus de la littérature*

Les résultats dendrométriques des sites de Rennes, et Hagenau (Dassot et al., 2016) font ressortir l'association Culti 3B® et Scarificateur Reversible® (modalité 3B) comme la modalité testée la plus efficace pour la reprise des plants du point de vue de la survie et de la croissance radiale et longitudinale de ceux-ci. Ces résultats sont valables pour la culture de Chêne et pour

la culture de Pins. Cette modalité est particulièrement efficace dans un contexte de sol hydromorphe, car l'association des deux outils permet d'effectuer un sous-solage/billonnage qui surélève les plants et canalise les eaux stagnantes sur les côtés. Les plants sont ainsi protégés de l'envoyage racinaire durant les premières années de croissance.

La documentation associée aux bases de données présente parfois quelques imprécisions, notamment quant à la chronologie des opérations (relevés, travaux). Ceci laisse parfois l'incertitude sur le moment du premier relevé de végétation (avant ou tout de suite après les traitements).

Nous pouvons également noter que la modalité LO (méthode de gestion locale) varie d'un site à l'autre et ne constitue pas un traitement homogène à l'échelle de la France. Néanmoins, il était intéressant de tester la performance des pratiques que les gestionnaires auraient mises en œuvre en l'absence d'accompagnement par la R&D. L'efficacité de cette modalité locale ne se démarque pas des autres modalités testées.

Globalement, le peu de sites étudiés (4 pour la molinie) et la forte variabilité entre les sites complexifient la mise en place d'une analyse générale de l'expérimentation en réseau.

### **Enjeu économique**

Quels que soient les résultats expérimentaux, le coût des opérations reste à analyser pour proposer des opérations viables aux gestionnaires forestiers.

En effet, dans le cas de nos expérimentations, l'utilisation d'outils innovants tels que le Scarificateur Réversible® et le Sous-Soleur Multifonction (outil utilisé sur les expérimentations ALTER et ICIF dans une version tractée) ajoute un coût non négligeable aux travaux de plantation. Il reste à observer si, dans les prochaines années, la croissance et la survie des plants seront suffisamment accentuées pour pallier aux dépenses d'utilisation de ces outils. Il serait également judicieux de contrôler s'il n'est pas possible de faire d'autres associations d'outils moins onéreux, pour arriver à un résultat similaire à moindre coût.

## **Conclusion**

---

Les résultats acquis montrent que l'association du Scarificateur Réversible®, pour le retrait de la végétation, et du Sous-Soleur Multifonction (monté sur mini-pelle ou tracté dans sa modalité Culti3B), pour le travail profond du sol, ressort comme une association d'outils performants dans la lutte contre la végétation concurrentielle (Projet ALTER) pouvant se substituer à l'utilisation des herbicides.

Le Sous-Soleur Multifonction (utilisé seul et tracté –modalité 3B - dans le cas du projet ICIF car l'utilisation d'un Scarificateur Réversible® n'était pas nécessaire du fait de l'absence de végétation) peut présenter également un réel atout dans la préparation mécanique du sol vis-à-vis de la croissance et de la survie des plants de certaines essences (notamment du Douglas dans le contexte expérimental du projet ICIF). L'utilisation de cet outil innovant semble donc prometteuse pour l'augmentation des chances de réussite des plantations forestières, cela nécessite cependant de mettre en place des investigations à plus large échelle pour confirmer l'efficacité de cet outil.

L'utilisation des cendres de bois constitue également un atout pour la croissance des peuplements sur les sols pauvres et se pose comme une alternative possible aux amendements calcomagnésiens.

Les objectifs sylvicoles tels que croissance et survie des plants, et réduction du couvert végétal des espèces concurrentielles sont des variables simples à appréhender et grâce auxquelles on peut juger rapidement de l'efficacité des modalités testées. D'un autre côté, l'évaluation environnementale de ces modalités est plus difficile à mettre en œuvre car elle repose sur une analyse multifactorielle complexe. Dans mon cas, j'ai travaillé uniquement sur la végétation accompagnatrice, fraction de la biodiversité qui est susceptible d'être directement impactée par les itinéraires de plantation. Cependant, cette étude de la végétation ne suffit pas pour juger de l'impact d'un itinéraire sylvicole sur la biodiversité dans son ensemble. D'autres compartiments tels que les bryophytes, les champignons et la micro et mésofaune du sol sont également susceptibles d'être impactés. D'autres variables environnementales peuvent également être prises en compte, telles que la pollution possible des eaux par les divers amendements, ou encore le rejet de métaux lourds dans les sols (dans le cas des cendres).

Aujourd'hui, un axe majeur de la recherche et développement est de travailler sur l'évaluation multicritère des itinéraires ; le volet environnemental est particulièrement attendu et nécessite la formalisation d'objectifs clairs permettant une évaluation par des indicateurs pertinents

# Bibliographie

---

ARVIDSSON, H., VESTIN, T. et LUNDKVIST, H., 2002. Effects of crushed wood ash application on ground vegetation in young Norway spruce stands. *Forest Ecology and Management*. Vol. 161, n° 1-3, p. 75-87. DOI 10.1016/S0378-1127(01)00482-0.

AUZURET, X, GIBAUD, G, PIAT, J, COLLET, C, WEHRLEN, L, RICHTER, C, GIRARD, Q et FRAYSSE, J-Y, 2014. Contrôler la fougère aigle sans asulame : quelles méthodes alternatives pour réussir les plantations ? *RDV techniques - Office National des Forêts*. n° 43, p. 22-32.

BONA, K. A., BURGESS, M.S. et FYLES, J.W., 2008. Weed cover in hybrid poplar (*Populus*) plantations on Quebec forest soils under different lime treatments. *Forest Ecology and Management*. Vol. 255, p. 2761–2770.

BRETHES, A, 2012. Les amendements calco-magnésiens en forêt. Impact sur le fonctionnement de l'écosystème. *Office National des Forêts*. n° 22.

BROCKERHOFF, E, JACTEL, H, PARROTTA, J, QUINE, C et SAYER, J, 2008. Plantation forests and biodiversity: oxymoron or opportunity? *Biodiversity Conservation*. n° 17, p. 925-951. DOI 10.1007/s10531-008-9380-x.

CAVAIGNAC, S, 2009. Les sylvoécotones (SER) de France métropolitaine -Étude de définition. *IGN*.

CHAO, A, CHAZDON, R L, COLWELL, R K et SHEN, T-J, 2006. Abundance-based similarity indices and their estimation when there are unseen species in samples. *Biometrics*. Vol. 62, n° 2, p. 361-371. DOI 10.1111/j.1541-0420.2005.00489.x.

DASSOT, M et COLLET, C, 2015. Manipulating seed availability, plant competition and litter accumulation by soil preparation and canopy opening to ensure regeneration success in temperate low-mountain forest stands. *European Journal of Forest Research*. Vol. 134, n° 2, p. 247-259. DOI 10.1007/s10342-014-0847-x.

DASSOT, M, COLLET, C, GIRARD, Q, GIBAUD, G, PIAT, J, WEHRLEN, L, RICHTER, C et FRAYSSE, J-Y, 2016. Méthodes alternatives de contrôle de la molinie et de préparation du sol pour réussir les plantations. *Rendez-vous Techniques - Office National des Forêts*. n° 50.

DHÔTE, J-F, 2015. Rapport d'activité des activités R&D de l'Office National des Forêts, période 2010-14. *Office National des Forêts*.

DUEZ, F, 2014. Le projet ALTER. *INRA*.

DYNESIUS, M, 2012. Responses of bryophytes to wood-ash recycling are related to their phylogeny and pH ecology. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*. Vol. 14, n° 1, p. 21-31.

FROCHOT, H., 1986. Maitrise chimique de la végétation indésirable en plantation forestière. *Revue Forestière Française*. n° 3, p. 280-284.

FROCHOT, H., ARMAND, G., GAMA, A., NOUVEAU, M. et WEHRLLEN, L., 2002. La gestion de la végétation accompagnatrice : état et perspective. *Revue Forestière Française - Office National des Forêts*. Vol. 6.

FROCHOT, H., PICARD, J.F. et DREYFUS, Ph., 1986. La végétation herbacée obstacle aux plantations. *Revue Forestière Française*. n° 3, p. 271-279.

GAMA, A., 2006. Utilisation des herbicides en forêt et gestion durable. *Cost*. ISBN 978-2-7592-1571-3.

GAUDIO, N., 2010. Interactions pour la lumière entre les arbres adultes, les jeunes arbres et la végétation du sous-bois au sein d'un écosystème forestier : application à la régénération du pin sylvestre en peuplement mélangé chêne sessile - pin sylvestre. Thèse. Earth Science. *Université d'Orléans*.

GAUDIO, N., BALANDIER, P, PHILIPPE, G, DUMAS, Y, JEAN, F et GINISTY, C, 2010. Light-mediated influence of three understorey species (*Calluna vulgaris*, *Pteridium aquilinum*, *Molinia caerulea*) on the growth of *Pinus sylvestris* seedlings. *European Journal of Forest Research*. Vol. 130, n° 1, p. 77-89. DOI 10.1007/s10342-010-0403-2.

HYTÖNEN, J, 2016. Wood Ash Fertilisation Increases Biomass Production and Improves Nutrient Concentrations in Birches and Willows on Two Cutaway Peats. *Baltic Forestry*. Vol. 22, n° 1, p. 98-106.

INGERSLEV, M, HANSEN, M, PEDERSEN, L B et SKOV, S, 2014. Effects of wood chip ash fertilization on soil chemistry in a Norway spruce plantation on a nutrient-poor soil. *Forest Ecology and Management*. Vol. 334, p. 10-17. DOI 10.1016/j.foreco.2014.08.034.

JACOBSON, S et GUSTAFSSON, L, 2001. Effects on ground vegetation of the application of wood ash to a Swedish Scots pine stand. *Basic and Applied Ecology*. Vol. 2, n° 3, p. 233-241. DOI 10.1078/1439-1791-00050.

JULVE, P, 1998. Baseflor. Index botanique, écologique et chorologique de la flore de France.

LIN, N, BARTSCH, N et VOR, T, 2014. Long-term effects of gap creation and liming on understory vegetation with a focus on tree re- generation in a European beech (*Fagus sylvatica* L.) forest. *Annals of Forest Research*. Vol. 57, n° 2, p. 233-246. DOI 10.15287/afr.2014.274.

OZOLINČIUS, R, BUOZYTE, R et VARNAGIRYTEKABASINSKIENE, I, 2007. Wood ash and nitrogen influence on ground vegetation cover and chemical composition. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 31, n° 10, p. 710-716. DOI 10.1016/j.biombioe.2007.06.015.

OZOLINČIUS, R., VARNAGIRYTĖ-KABAŠINSKIENĖ, I., STAKĖNAS, V. et MIKŠYS, V., 2007. Effects of wood ash and nitrogen fertilization on Scots pine crown biomass. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 31, n° 10, p. 700-709. DOI 10.1016/j.biombioe.2007.06.016.

PITMAN, R M, 2006. Wood ash use in forestry – a review of the environmental impacts. *Forestry*. Vol. 79, n° 5, p. 563-588. DOI 10.1093/forestry/cpl041.

WILLOUGHBY, I, BALANDIER, P, BENTSEN, N S, MCCARTHY, N et CLARIDGE, J, 2009. Forest vegetation management in Europe. *Cost office*. Brussels

## PACKAGES

BATES, D., MAECHLER, M., BOLKER, B., WALKER, S., 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software.* 67(1), 1-48. doi:10.18637/jss.v067.i01.

OKSANEN J., BLANCHET F.G., KINDT R., et al., 2016. vegan: Community Ecology. Package R, package version 2.3-4.

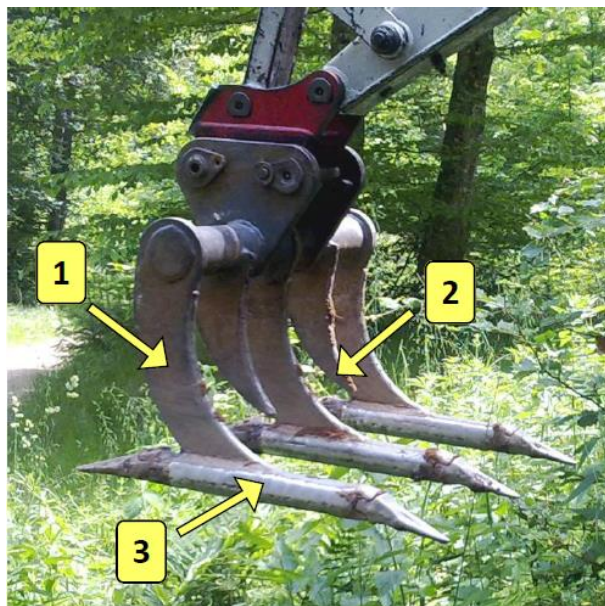
THERNEAU T., 2015. A Package for Survival Analysis in S. Version 2.38.

HOTHORN T., BRETZ F. and WESTFALL P., 2008. Simultaneous Inference in General Parametric Models. *Biometrical Journal.* 50(3), 346--363.



## ANNEXE - Scarificateur Réversible®

Illustrations issues de fiches techniques détaillées disponibles sur le site  
[www.nancy.inra.fr/mission-gestion-vegetation-foret](http://www.nancy.inra.fr/mission-gestion-vegetation-foret)



Le Scarificateur Réversible® est un outil utilisé en préparation de régénération naturelle ou de plantation. Il permet d'éliminer la végétation par arrachage et réalise ensuite un travail du sol sur 40 cm de profondeur par griffage, ou sur 60 cm par bêchage.

Il est constitué de trois dents principales d'une hauteur de 40 cm (1), deux dents secondaires d'une hauteur de 20 cm intercalées entre les dents principales (2), et de trois obus de sous solage de 60 cm de long, fixés en prolongement des dents principales, à profil pointu aux deux extrémités (3).



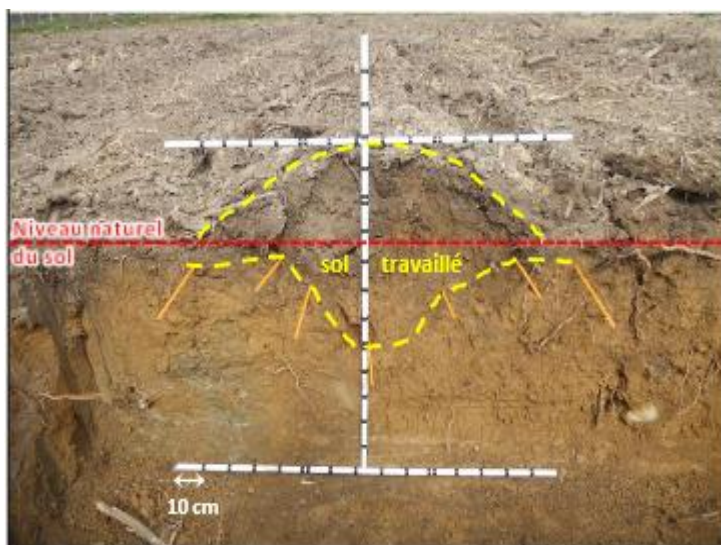
Exemple d'efficacité de l'outil 2 ans après utilisation.

## ANNEXE – Culti 3B®

Illustrations issues de fiches techniques détaillées disponibles sur le site [www.nancy.inra.fr/mission-gestion-vegetation-foret](http://www.nancy.inra.fr/mission-gestion-vegetation-foret)

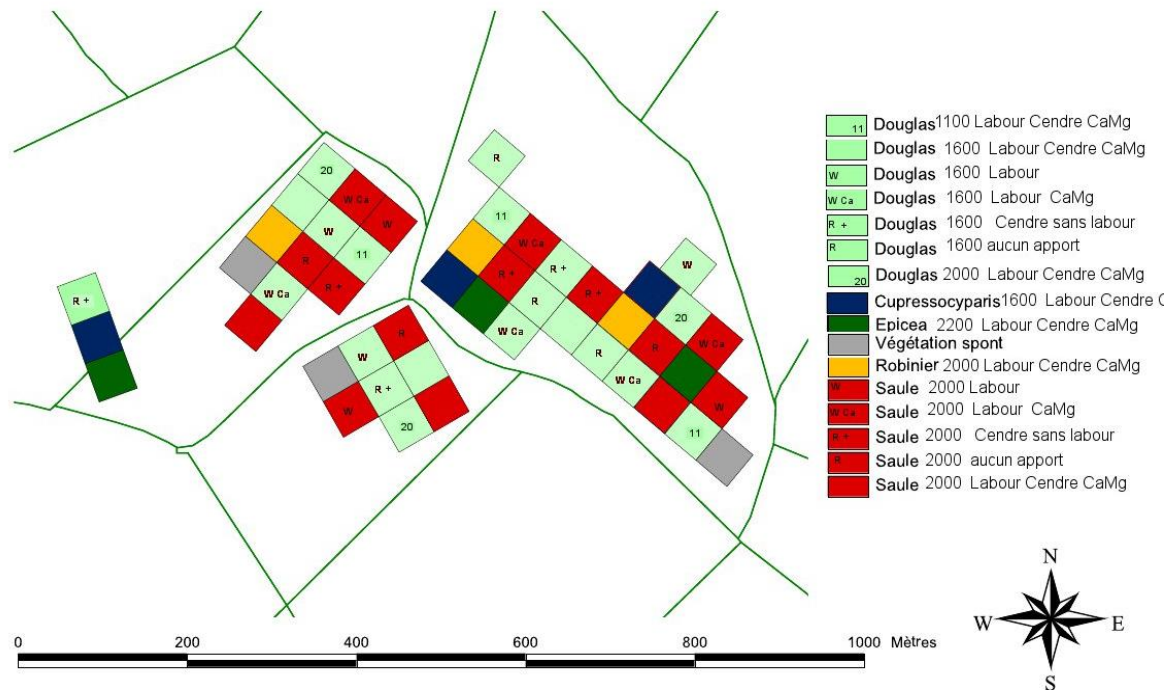


Le Culti 3B® est un outil tracté équipé d'une dent de sous-solage prévue pour créer un sillon de 40 à 60cm de profondeur, et de quatre disques utilisés pour retourner la terre et créer un billon central surélevé de 10 à 30cm au-dessus du sol.

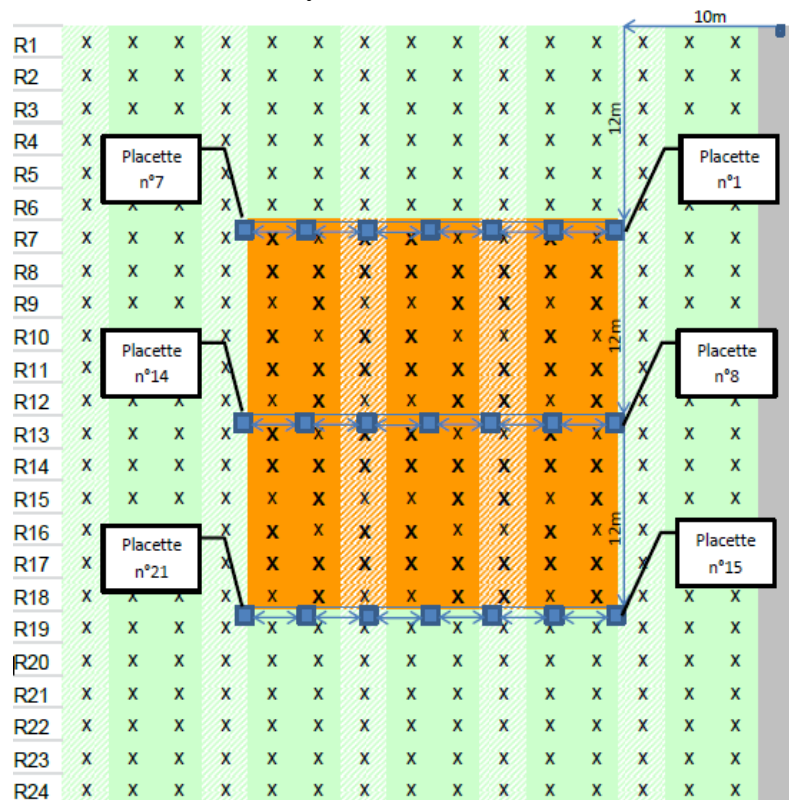


Profil de sol après travail au Culti 3B®. Sol brun acide, forêt domaniale de Francois-Bryas.

# ANNEXE - ICIF



Carte de la disposition des placettes expérimentales de l'expérimentation ICIF sur le site de la forêt Domaniale de Francois-Bryas.



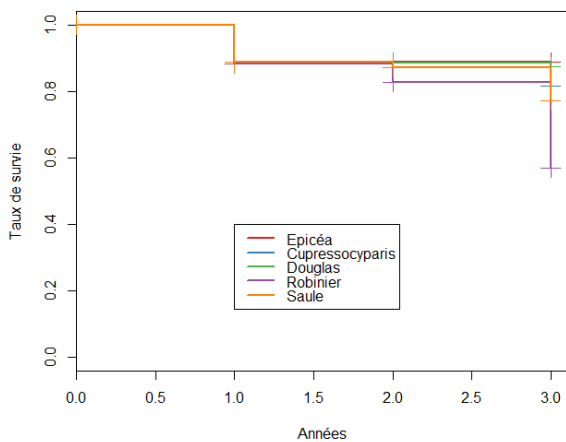
Positionnement des transects de relevés de végétation (les placettes de 1m<sup>2</sup> sont représentées en bleu) dans les unités expérimentales plantées avec une densité de 1600 tiges/ha.

# ANNEXE - ICIF

## Résultats complémentaires

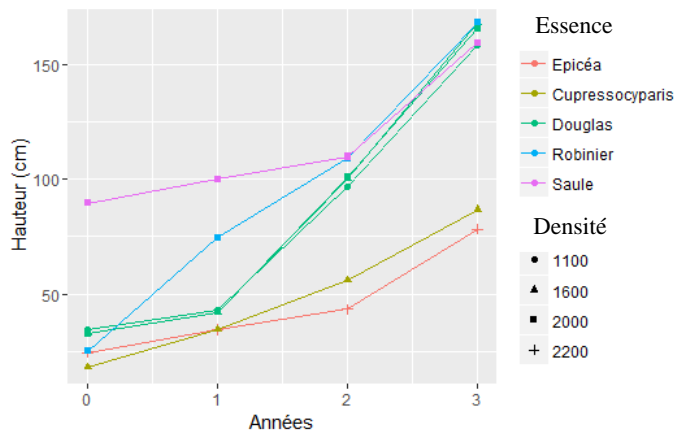
Les figures ci-dessous montrent les courbes et analyses statistiques de survie et de croissance des essences testées sur la modalité de travail profond du sol avec apport de cendres. L'Epicéa sert de référence locale de plantation.

Courbes de survie



<i>Essence</i>	<i>Survie (%)</i>	<i>Pr (&gt; z )</i>
<i>Epicéa</i>	88.8	# Référence
<i>Cupressocyparis</i>	81.7	0.1659
<i>Douglas</i>	87.5	0.7217
<i>Robinier</i>	56.8	1.16 <sup>e</sup> -09 ***
<i>Saule</i>	77.1	0.0138 *

Courbes de croissance



<i>Essence</i>	<i>Croissance (cm/an) par rapport à l'Epicéa</i>	<i>Pr(&gt; z )</i>	<i>Croissance (cm/an)</i>
<i>Epicéa</i>	# Référence	# Référence	16.9452
<i>Cupressocyparis</i>	5.4437	0.001 ***	22.3863
<i>Douglas 1600</i>	28.3772	0.001 ***	45.3218
<i>Robinier</i>	27.5971	0.001 ***	44.399
<i>Saule</i>	4.0301	0.00291 **	20.996

## Résumé

---

Le renouvellement des peuplements forestiers constitue une étape stratégique de la gestion durable des forêts, notamment dans une perspective d'adaptation aux changements climatiques où le recours à la plantation peut être nécessaire. La gestion de la fertilité (mécanique et minérale) des sols et la maîtrise de la végétation concurrentielle sont deux problématiques majeures pour les gestionnaires forestiers à la recherche de techniques performantes et respectueuses de l'environnement. L'expérimentation ICIF révèle que les cendres sont une alternative possible aux amendements calcomagnésiens : augmentation de la survie et de la croissance du Douglas et du Saule, effets semblables sur la biodiversité floristique. Le travail profond du sol n'est bénéfique que pour le Douglas et sans effet sur la flore. D'autre part, le projet ALTER montre que l'utilisation combinée deux outils innovants (Culti 3B® et Scarificateur Réversible®) permet de s'affranchir de l'utilisation d'herbicide dans la lutte contre la molinie tout en n'impactant pas la végétation accompagnatrice. L'analyse multivariable des différentes techniques présentées a porté sur quelques éléments d'appréciation qui mériteraient d'être approfondis (autres compartiments de biodiversité) et complétés (analyse économique) afin d'être intégrés dans une analyse multicritère.

Mots clé : ALTER – ICIF – cendres – communautés végétales – plantation – sous-solage – herbicide

## Abstract

---

Forest stands renewal is a strategic step for sustainable forest management, particularly in a view to adapting to climate change where the use of plantation may be necessary. Soil fertility management (mechanical and mineral) and competitive vegetation control are two major issues for forest managers seeking effective and environmentally friendly techniques. The ICIF experimentation reveals that wood ashes are a possible alternative to liming: increasing survival and growth of Douglas and willow, similar effects on plant biodiversity. Subsoiling is only beneficial for Douglas and have no effect on plant diversity. On the other hand, the ALTER project shows that the use of two innovative tools combined (Culti 3B® and Scarificateur Réversible®) overcomes the herbicide use in the fight against *Molinia caerulea*. Environmentally, it appears not to affect plant biodiversity. Multivariate analysis of these different technics focused on a few relevant factors which need to be thorough (other biodiversity compartments) and completed (economic analysis) in order to be integrated into a multi-criteria analysis.

Keywords: ALTER – ICIF – wood ash – plant communities – plantation – subsoiling – herbicide