

# Comment prendre en compte le travail du sol dans les bilans carbone des perspectives de séquestration dans les écosystèmes forestiers ?

Engorgement, parcelle 212



CULTI 3B tracté, Bord-Louviers



Plants chêne, parcelle 212



Parcelle 212



## Abréviations

- **ALTER** : ALternative aux hERbicides en forêt.
- **BILLON** : Modalité de travail du sol « extrême » (labour en pleins et haut billon).
- **CAPSOL** : Dynamique du CARbone et de la croissance après Préparation du SOL dans les plantations forestières.
- **CHS** : CHêne Sessile.
- **COS** : Carbone Organique du Sol.
- **DA** : Densité Apparente.
- **ECODIV** : Laboratoire Etude et Compréhension de la bioDIVERSité.
- **FCBA** : Institut Technologique Forêt Cellulose Bois construction Ameublement.
- **GERBOISE** : GEstion raisonnée de la Récolte de BOIS Energie.
- **GES** : Gaz à Effet de Serre.
- **INRA** : Institut National de la Recherche Agronomique.
- **IR** : Inter-Rang.
- **M** : Modalité Mature (M212 et M1026).
- **MOS** : Matière Organique du Sol.
- **LP** : Ligne de Plantation.
- **ONF** : Office National des Forêts.
- **RACB** : Modalité de travail du sol localisé utilisant les outils Razherb et CULTI 3B.
- **RAZ** : Razherb.
- **RDI** : Recherche, Développement et Innovation.
- **SR** : Scarificateur Réversible.
- **SSM** : Sous-Soleur Multifonction.
- **TEM** : Modalité Témoin.
- **TMR** : Temps Moyen de Résidence.
- **UR BEF** : Unité de Recherche en Biogéochimie des Ecosystème Forestiers.

## Lexique

- **Dépressage** : Opération visant à réduire la densité du peuplement et à sélectionner les tiges d'avenir, sans valorisation des tiges coupées.
- **Itinéraires sylvicoles** : Ensemble des interventions sylvicoles successives telles que les coupes ou les travaux à réaliser pour atteindre un objectif fixé dans un contexte donné.
- **Quartage** : Opération pour séparer de façon homogène la litière. On étale la litière (poids connu), on sépare en 2 portions égales, si une demie portion est encore trop grande, on divise en 4 et on prend ¼ etc...
- **Rémanents** : Eléments inférieurs à 7cm de diamètre actuellement peu valorisés et laissés sur la parcelle après exploitation

# Tables des matières

Table des figures .....	v
Table des tableaux .....	vi
Introduction .....	1
Etat de l'art.....	3
I. Le Carbone en milieu forestier .....	3
1. Le carbone du sol.....	3
2. Le carbone dans la biomasse .....	4
3. Impact de la gestion forestière sur le COS .....	4
II. Le principe des « 3S » : Séquestration, Stockage et Substitution .....	4
III. La sylviculture face au changement climatique .....	5
IV. Contexte de notre étude .....	6
V. La préparation mécanique des sols .....	6
VI. Intérêts des outils pour le contrôle de la Molinie.....	7
VII. Effet du travail du sol sur le stock de carbone du sol .....	8
VIII. Effet du travail du sol sur le développement des peuplements forestiers .....	9
IX. En résumé.....	11
Matériel et Méthodes : Contexte .....	12
.....	12
I. La forêt de Chaux.....	12
II. Les méthodes de préparation du sol utilisées lors de l'étude .....	12
III. Dispositif expérimental.....	13
1. Contexte pédoclimatique .....	13
2. Description des parcelles étudiées .....	14
Matériel et Méthodes : Les mesures effectuées .....	15
I. Les analyses de sol.....	15
1. Les prélèvements.....	15
2. Préparation des échantillons et leur analyse (effectués au laboratoire ECODIV) .....	16
IV. Les calculs de stocks de carbone du sol .....	17
1. Calcul de la DA (d'après Yoro et Godo, 1990) .....	17
2. Stock de carbone du sol à l'échelle du profil (d'après Jonard et al., 2017) .....	17
3. Pondération du stock de carbone du sol par la surface travaillée .....	18
V. Mesures in situ (parcelles 1026 et 212) .....	19

1.	Mesures de la hauteur des plants .....	19
2.	Inventaire floristique .....	19
VI.	Séquestration du carbone dans les peuplements.....	20
1.	Modélisation de la croissance des peuplements .....	20
2.	Calcul de la séquestration du carbone dans nos peuplements.....	22
VII.	Modélisation de carbone organique du sol .....	22
1.	Présentation et initiation du modèle.....	23
2.	Fonctionnement du modèle : entrées et sorties .....	23
3.	Hypothèses de fonctionnement du modèle .....	24
VIII.	Analyses statistiques .....	24
IX.	En résumé.....	25
	Résultats.....	26
I.	Stock de COS.....	26
1.	Stock de COS à l'échelle du profil .....	26
2.	Pondération du stock de COS par la surface travaillée ou non .....	29
II.	Stade juvénile .....	31
1.	Mortalité juvénile .....	31
2.	Croissance au stade juvénile.....	32
3.	Evolution du recouvrement de la molinie et des autres accompagnatrices .....	32
III.	Evolution des peuplements, sur une révolution forestière complète .....	34
1.	Hauteur dominante de nos peuplements, à l'échelle d'une révolution forestière .....	34
2.	Séquestration du carbone dans nos peuplements, à l'échelle d'une révolution forestière..	35
IV.	Modélisation COS sur 5 ans .....	36
1.	Paramètres utilisés pour notre modèle .....	36
2.	Apport de litière aérienne et racinaire de la végétation concurrente et des chênes .....	38
3.	Dynamique du COS sur 5 ans.....	38
	Discussion.....	39
	Conclusion et Perspectives.....	42
	Bibliographie .....	42
	Webographie.....	42
	Bilan personnel .....	42
	Remerciements .....	42
	Annexes.....	PP
	Résumé .....	PP

## Table des figures

Figure 1: Stock de COS dans les grands systèmes, sur les 30 premiers centimètres (ADEME, 2014). ....	3
Figure 2 : Cycle de vie des produits du bois.....	5
Figure 3 : Schéma de la modalité « RACB » .....	12
Figure 4 : Schéma de la modalité « BILLON » .....	13
Figure 5 : Schéma des modalités témoin et mature .....	13
Figure 6 : Schéma de plantation des parcelles 212 et 1026 (CHS = Chêne sessile).....	15
Figure 7 : Diagrammes des prélèvements de sol, de litière ou de cylindre (DA) effectués pour les parcelles 213, 212, 1026 et matures. Entre parenthèses : nombre d'échantillons par modalité .....	16
Figure 8 : Schémas de plantation et des zones travaillées (rouge) pour les modalités BILLON (gauche) et RACB (droite).....	18
Figure 9: Différences au niveau du stock de COS cumulé (Mg/ha) sur OL-60cm, sans pondération LP/IR (ANOVA, p-value<0.05). Points rouges = Moyennes. Traits pointillés rouges = données bibliographiques (a) Ranger et Nys, 2003 : Donnée du carbone sur 65cm pour une forêt de Chêne sessile sur Brunisol (101,3 +/- 26,8 Mg/ha) ; (b) Donnée moyenne du stock de carbone sur 40 cm d'après 4 sites de RENECOFOR pour un contexte similaire (85,38 Mg/ha). ....	26
Figure 10 : Différences au niveau du stock de COS cumulé sur OL-60cm (Mg/ha) en LP (gauche) ou en IR (droite), à l'échelle du profil, pour chaque modalité (Kruskal-Wallis, p-value<0.05). Points rouges = Moyennes. ....	27
Figure 11 : Différences au niveau du stock de COS moyen (Mg/ha) sur le profil de sol entier (0-60cm) en LP pour chaque modalité.....	28
Figure 12 : Différences au niveau du stock de COS moyen (Mg/ha) sur le profil de sol entier (0-60cm) en IR pour chaque modalité. ....	28
Figure 13 : Différences au niveau du stock de carbone (Mg/ha) au niveau de la litière (OL), LP et IR confondus, pour chaque modalité (Kruskal-Wallis, p-value<0.05). Points rouges = Moyennes. ....	29
Figure 14 : Différences des stocks de COS à l'échelle du peuplement (pondérés selon LP et IR), entre chaque modalité (ANOVA, p-value<0.05). Points rouges = Moyennes. Traits pointillés rouges : données bibliographiques (a) Ranger et Nys, 2003 : Donnée du carbone sur 65cm pour une forêt de Chêne sessile sur Brunisol (101,3 +/- 26,8 Mg/ha) ; (b) Donnée moyenne du stock de carbone sur 40 cm d'après 4 sites de RENECOFOR (85,38 Mg/ha). ....	30
Figure 15 : Part du stock de COS en LP ou en IR, dans le stock pondéré de COS moyen général pour chaque modalité. ....	30
Figure 16 : Différences au niveau de la mortalité observée (%) entre nos modalités, pour chaque année. ....	31
Figure 17 : Evolution des hauteurs moyennes (cm) selon nos modalités, pour chaque saison de croissance.....	32
Figure 18 : Evolution du recouvrement moyen (%) observé de la molinie, chaque année pour chaque modalité. ....	32
Figure 19 : Evolution du recouvrement global moyen (%) et du recouvrement moyen (%) observé pour nos groupes d'espèces, chaque année pour chaque modalité. ....	33
Figure 20 : Hauteur dominante (Hdom, m) sur une révolution forestière complète, pour chaque cas testé. ....	34
Figure 21 : Séquestration du carbone (Mg/ha), sur une révolution forestière complète, pour chaque cas testé. Lignes pointillés = Séquestration moyenne du carbone dans le temps. Les modalités « Citeaux 1500 », « RACB » et « TEM ref » sont superposées. ....	35

Figure 22 : Séquestration du carbone (Mg/ha), sur une révolution forestière complète, avec hypothèse d'une perte de fertilité pour les cas témoins. Lignes pointillés = Séquestration moyenne de carbone. ....	35
Figure 23 : Structure du modèle. La redistribution liée au travail du sol n'est pas prise en compte dans cette version préliminaire (D. Derrien).....	37
Figure 24 : Apport en carbone (Mg/ha) par la litière aérienne (gauche) ou racinaire (droite) de Chêne (rond) ou de végétation concurrente (triangle), pour chaque modalité. ....	38
Figure 25 : Simulations du COS (Mg/ha) réalisées par le modèle, pour le compartiment labile (ronds) ou stable (triangles) pour chaque modalité. ....	38
Figure 26 : Simulations du COS (Mg/ha) réalisées par le modèle, pour (A) le stade mature stationnaire (sur 100ans), (B) la modalité témoins (sur 5 ans) et (C) la modalité RACB (sur 5 ans). Les points représentant nos données réelles en LP au stade mature ( $\gamma=100$ ou $-1$ ) ou au stade juvénile (à 5 ans) pour les modalités TEM et RACB. ....	39
Figure 27 : Différences au niveau du rapport C/N entre nos différentes modalités (Kruskal-wallis, $p$ -value $<0.05$ ). Points rouges = Moyennes.....	41

## Table des tableaux

Tableau 1 : Tableau résumé de l'état de l'art. ....	11
Tableau 2 : Caractéristiques pédoclimatiques des dispositifs. ....	14
Tableau 3 : Résumé des différentes surfaces travaillées ou non travaillées pour chaque modalité ....	19
Tableau 4 : Résumé des différents paramètres utilisés pour les modélisations des peuplements pour chaque modalité. ....	22
Tableau 5 : Calcul du COS effectué dans la modélisation ....	24
Tableau 6 : Résumé des différents points étudiés lors du stage.....	25
Tableau 7: Caractéristiques des différents cas étudiés ....	36
Tableau 8: Coefficients utilisées pour stabiliser le modèle sur 100 ans et pour définir le taux de minéralisation. ....	36
Tableau 9: Coefficients utilisées pour l'allocation des apports vers les différents compartiments, ainsi que pour la distribution des entrées racinaires.....	37

# Introduction

De nos jours, nous devons faire face aux changements globaux (pollution, changements climatiques, changement d'occupation des sols...) et nous nous posons des questions sur comment diminuer/compenser notre impact afin d'atténuer ces changements. L'un des projets mis en avant pour compenser les émissions de CO<sub>2</sub>, l'un des principaux composants des gaz à effet de serre (GES), est de favoriser le stockage du carbone dans les sols, notamment dans les forêts. Cette optique de stocker du carbone dans les écosystèmes forestiers (ou du moins de préserver le stock actuel), rentre dans le cadre du protocole de Kyoto, signé en 1997, et également dans celui du nouvel objectif d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 en France (selon le rapport 4 pour 1000, Pellerin et al., 2019).

En effet, une forêt est capable de stocker le carbone d'une part dans la biomasse des arbres, grâce à l'absorption du CO<sub>2</sub> contenu dans l'atmosphère par l'activité photosynthétique. Et d'autre part dans le sol, par la séquestration du carbone organique issu de la décomposition de la matière organique. En 2016, les émissions annuelles mondiales de GES liées aux activités humaines étaient de 53,4 GtCO<sub>2</sub> éq et 19% de ces émissions étaient stockées dans les écosystèmes forestiers (Baude et al., 2019). Bien sûr, la France n'est pas en reste, puisqu'avec une superficie en forêt de 16,9 millions d'hectares en métropole, le niveau de stockage du carbone dans les forêts a été évalué en 2015 à 87Mt CO<sub>2</sub> éq, soit environ 19% des émissions nationales (Commissariat général au développement durable EFSE, 2019). De plus, nous tirons d'autres bénéfices de l'écosystème forestier (que ce soit des services écologiques, de support de biodiversité, de source de revenus...), que nous appelons les services écosystémiques (« des avantages matériels ou immatériels que l'homme retire des écosystèmes », FranceTerme, 2013). Il est donc important de concilier la protection de la forêt en tant que puits de carbone et la préservation des autres services associés à cet écosystème.

L'écosystème forestier peut être un puits (par le stockage dans la biomasse et dans le sol) mais aussi une source de carbone (par la déforestation), le devenir du carbone dans ce milieu repose donc en partie sur la gestion de celui-ci. Le stockage dans l'écosystème forestier peut être augmenté de deux manières : en augmentant la surface en forêt sur notre territoire, mais aussi en optimisant les cycles sylvicoles et la gestion associée (Inventaire Forestier National, 2005).

L'enjeu en ce qui concerne la compensation des émissions de CO<sub>2</sub> est donc double : avoir des cycles sylvicoles en accord avec cette séquestration de carbone dans la biomasse et minimiser l'impact de la gestion forestière sur le sol, afin qu'il garde ses propriétés de puits de carbone. Ainsi l'écosystème sera toujours capable d'assurer les services écosystémiques dont nous avons besoin.

Seulement, l'aspect économique entre en jeu (près de 440 000 emplois dans la filière forêt-bois, FBF-FBIE, 2014), et est tout aussi important. De plus, il est à souligner que, l'exploitation forestière peut jouer un rôle important dans le stockage du carbone, en effet les produits issus de cette exploitation (charpente, meubles...) peuvent eux aussi stocker du carbone de façon plus ou moins durable. Il est donc alors important de trouver un équilibre entre la production (l'économie) et les services rendus (stockage du carbone, filtre de l'eau...).

De nos jours, il est également plus que nécessaire de prendre en compte l'adaptation des peuplements face au changement climatique. L'un des leviers permettant de faciliter, au vu des nouvelles conditions, les régénérations naturelles difficiles ou la mise en place de nouvelles essences est la plantation. Seulement, pour avoir des plantations efficaces, il est souvent nécessaire de préparer préalablement le sol. Ces méthodes de préparations mécaniques des sols sont incontournables, en cas de conditions d'implantation ou de renouvellement difficiles, en contexte forestier.

Les méthodes de préparation du sol mécanisées, effectuées avant plantation (comme par exemple le labour, le billonnage, le décompactage du sol...), peuvent favoriser la croissance des plants, et donc le stockage de carbone dans la biomasse ligneuse. Mais elles peuvent aussi induire un déstockage du carbone organique du sol (COS). En effet, les méthodes utilisées vont impacter la structure du sol et donc potentiellement ses propriétés de puits de carbone. Néanmoins, ces effets négatifs de la préparation du sol sur le stock du carbone pourraient être compensés par une augmentation de la séquestration du carbone dans la biomasse.

C'est dans cette optique que s'inscrit le projet CAPSOL (Dynamique du CARbone et de la croissance après Préparation du SOL dans les plantations forestières). Le projet CAPSOL a débuté en mai 2016. Ce projet a pour objectif d'étudier les itinéraires sylvicoles intégrant une préparation mécanisée du sol afin d'évaluer les performances environnementales (bilan sur le COS et sur la biodiversité floristique), les performances techniques (impacts sur la croissance et la survie des plants) et économiques (coûts de mise en œuvre) de ces itinéraires. Ceci ayant pour but d'identifier des itinéraires innovants sur ces différents indicateurs et d'en faire alors la promotion (RENFOR, 2017a). Ce projet s'appuie, en partie, sur le réseau PILOTE. Ce réseau, a été mis en place en 2013 pour tester et promouvoir, en conditions proches de celles de la gestion, de nouvelles méthodes de préparation des sols forestiers dans des contextes stationnels précis (végétation concurrente, engorgement des sols...) (RENFOR, 2017b).

Le stage présenté dans ce rapport s'inscrit lui-même dans le projet CAPSOL. Il se concentre principalement sur deux dispositifs expérimentaux appartenant au réseau PILOTE, mis en place en 2013 en forêt de Chauv dans le Jura (39) par le pôle RDI de l'ONF de Dole. Les parcelles de ces dispositifs seront utilisées dans cette étude afin d'évaluer des méthodes innovantes pour la préparation du sol sur une plantation de Chêne sessile (*Quercus Petraea*), en contexte de blocage par la molinie bleue (*Molinia caerulea*). Ces méthodes innovantes consistent en l'utilisation d'engins mécaniques légers (montés sur mini pelles), qui ont pour but de gérer le couvert de molinie, de décompacter le sol limoneux, sensible au tassement ainsi que de limiter l'effet de l'engorgement sur les racines. Ces parcelles seront, entre autres, comparées à des parcelles matures (sans travail du sol, d'au moins 120 ans) et à une autre parcelle mise en place en 1994 où un travail « extrême » de labour en plein et de billonnage en planche avait été mis en place.

L'objectif du stage en lui-même est d'évaluer, à l'échelle d'une révolution forestière complète, l'effet de la préparation mécanisée du sol sur la dynamique de la biomasse aérienne et sur le stockage de carbone dans l'écosystème forestier. Et il se focalisera sur le cas d'étude des plantations de chêne sessile en contexte de blocage par la molinie.

Différents points vont être ainsi abordés lors de ce stage : que ce soit l'efficacité de nouveaux outils de préparation des sols sur la survie et sur la croissance des jeunes plants, leur impact sur le stockage du carbone dans le sol ou encore l'évolution du couvert de la végétation concurrente. Ces données seront étudiées sur le court terme (5 ans) mais aussi à l'échelle d'une révolution forestière par modélisation de la croissance. Et elles seront comparées à des parcelles non travaillées ou à une parcelle travaillée de façon « extrême ». Un début de modélisation de la dynamique du COS sera également réalisé au stade juvénile (sur 5 ans).

Voici les hypothèses qui ont été retenues pour ce rapport :

- (1) La préparation mécanisée des sols permettra de réduire le couvert de molinie, et d'augmenter celui d'autres espèces accompagnatrices moins compétitrices ;
- (2) La préparation mécanique des sols va induire une perte de COS, au moins sur la ligne de plantation ;
- (3) La préparation mécanique des sols va permettre d'améliorer la survie ainsi que la croissance des jeunes plants ;
- (4) L'amélioration de la croissance du peuplement, et donc l'augmentation de la séquestration du carbone dans la biomasse, permettra de compenser la perte potentielle du COS sur le long terme.

## I. Le Carbone en milieu forestier

Les écosystèmes forestiers couvrent une part importante de la surface mondiale puisqu'ils représentent plus d'un quart des terres immergées (Collectif APN, 2015), cette surface stocke 1120Gt de carbone (dont 488Gt dans la biomasse et 632Gt dans le sol, Rossi, 2015). Pour comparaison le carbone présent dans l'atmosphère est de 800Gt (Pellerin et al., 2019). En France, la surface occupée par les forêts est de 16,9 millions d'hectares, soit 31% de la surface totale (IGN, 2018). Cette surface forestière stocke 2 211 Mt de carbone (dont 1 147Mt dans la biomasse et 1 074Mt dans le sol, Rossi, 2015). Nous allons détailler dans cette partie comment se fait le stockage du carbone dans l'écosystème forestier.

### 1. Le carbone du sol

L'écosystème forestier est un système important dans la lutte contre les émissions de CO<sub>2</sub>, puisque c'est l'un des systèmes stockant le plus de carbone sur les 30 premiers centimètres du sol (ADEME, 2014, voir figure 1). En effet on a en moyenne, sur les 30 premiers centimètres du sol, 81 MgC/ha (t/ha) (92 MgC/ha si on prend en compte la litière, 70 MgC/ha si on ne la prend pas en compte, Pellerin et al., 2019). Sur un profil plus profond de 0-100cm on peut avoir jusqu'à 102 MgC/ha, en prenant en compte la litière, Pellerin et al., 2019). De plus, le carbone dans le sol forestier correspond à 38,2% du carbone total stocké dans tous les types de sol en France (Pellerin et al., 2019).

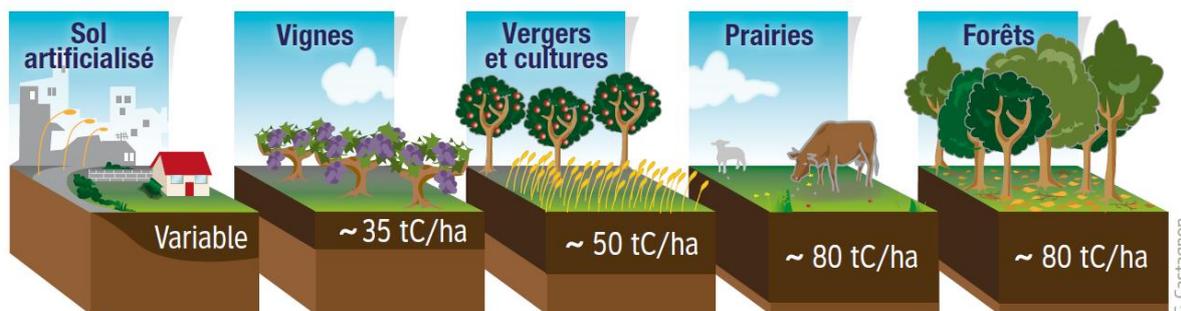


Figure 1: Stock de COS dans les grands systèmes, sur les 30 premiers centimètres (ADEME, 2014).

D'un point de vue général, dans l'écosystème forestier, on a 49% du stock de carbone qui est compris dans le sol (Rossi, 2015). Plus en détail, la répartition du carbone dans les sols forestiers Français, sur les 40 premiers centimètres, se fait de la manière suivante (Jonard et al., 2017, pour un total de 80,94 MgC/ha) :

- humus (dont la litière) : 14 % (soit 11,70 MgC/ha) ;
- couche 0-10 cm : 38 % (30,78 MgC/ha) ;
- couche 10-20 cm : 22 % (17,91 MgC/ha) ;
- couche 20-30 cm : 26 % (21,12 MgC/ha).

Mais ces chiffres dépendent avant tout du type et de l'âge du peuplement étudié ainsi que du contexte pédoclimatique.

## 2. Le carbone dans la biomasse

Le stockage du carbone ne se fait pas que dans le sol, mais aussi de manière importante dans la biomasse forestière. En effet 51% de l'ensemble du carbone forestier est stocké dans la biomasse (41% dans la biomasse aérienne, 10% dans la biomasse souterraine, Rossi, 2015).

Ce stockage du carbone se fait par la séquestration du CO<sub>2</sub>. En effet, le stockage additionnel de CO<sub>2</sub> dans la biomasse forestière, en France, est évaluée à 70,3 MtCO<sub>2</sub>eq/an, dont 14,4 MtCO<sub>2</sub>eq/an dans la biomasse de résineux et 55,9 MtCO<sub>2</sub>eq/an dans la biomasse de feuillus (Dhôte et al., 2016).

Il est important de noter qu'une part importante de la biomasse forestière est sous forme de carbone. En effet, le taux de carbone dans la biomasse forestière est estimé à 47,5% en moyenne (Dhôte et al., 2016). De plus, les chiffres présentés ci-contre ne présentent pas seulement le stockage du carbone dans les arbres, mais aussi dans le sous-étage et dans le bois mort. En effet, en France, pour un stock de carbone dans la biomasse forestière totale de 59 MgC/ha, il a été évalué à 4% la part du sous-étage et de la nécromasse (soit 2,36 MgC/ha, Dupouey et al., 2000).

Une augmentation accrue du carbone stocké dans le sol ou dans la biomasse forestière serait une solution pour compenser les émissions CO<sub>2</sub>. Pour cela, deux stratégies sont envisageables : dans un premier temps en boisant les terres arables (afforestation), puis dans un second temps en augmentant l'âge d'exploitabilité des forêts, ce qui permettrait d'accroître le niveau de stock dans la biomasse ligneuse (Inventaire Forestier National, 2005). Bien sûr, ces deux stratégies suggèrent que les forêts déjà mises en place doivent être sauvegardées, il faut donc limiter la déforestation. La gestion appliquée sur les peuplements forestiers peut donc jouer sur le stock de carbone.

## 3. Impact de la gestion forestière sur le COS

Pour ce qui est de l'impact de la gestion forestière sur le COS, il est conseillé de limiter les coupes rases, qui induisent un réchauffement du sol et donc une augmentation de la minéralisation et de préférer les interventions prudentes et continues (Gleizes, 2019). Quant aux éclaircies (récolte partielle des troncs), elles n'affectent pas significativement les stocks de COS (Augusto, Bureau, et Derrien, 2019). Enfin, plus la récolte des rémanents est importante, plus les stocks de COS se retrouvent diminués (Augusto, Bureau, et Derrien, 2019).

De plus, la sylviculture est une activité économique importante (près de 60 milliards d'euros par an de chiffre d'affaires pour la filière forêt-bois, FBF-FBIE, 2014), et l'exploitation joue elle aussi un rôle dans le stockage du carbone (principe des 3S). Il est alors important de trouver un équilibre entre la production économique et les services rendus par l'écosystème forestier (dont le stockage du carbone).

## II. Le principe des « 3S » : Séquestration, Stockage et Substitution

La sylviculture va entraîner *in fine* l'exportation, hors forêt, d'un volume important de biomasse ligneuse (avec en France 38,3 millions de m<sup>3</sup> exportés en 2017, Agreste, 2018). Cette

biomasse, ayant préalablement séquestré du CO<sub>2</sub>, va être ensuite transformée en divers éléments (papeterie, bois-énergie, matériaux de construction...). Ces différents éléments vont continuer à stocker plus ou moins durablement (selon leur durée de vie) le carbone contenu dans leur biomasse (voir figure 2, GUIDEnR Bois-Energie, [s.d.]). On a également un effet de cumul de ce stockage lorsque plusieurs vies sont données à un seul produit bois. Par exemple, un arbre devient une charpente, puis cette charpente devient une palette de bois, puis cette palette devient du bois énergie. De plus, ces produits-bois génèrent moins de CO<sub>2</sub> que les matériaux traditionnels qu'ils peuvent remplacer, tels que le béton ou encore les énergies fossiles (Deroubaix, Vial, et Cornillier, 2011). C'est le principe de « 3S » : Séquestration (par la forêt), Stockage (sous forme de matériaux) et Substitution (d'énergie ou de matériaux) (Forêt Privée Française, [s.d.]).

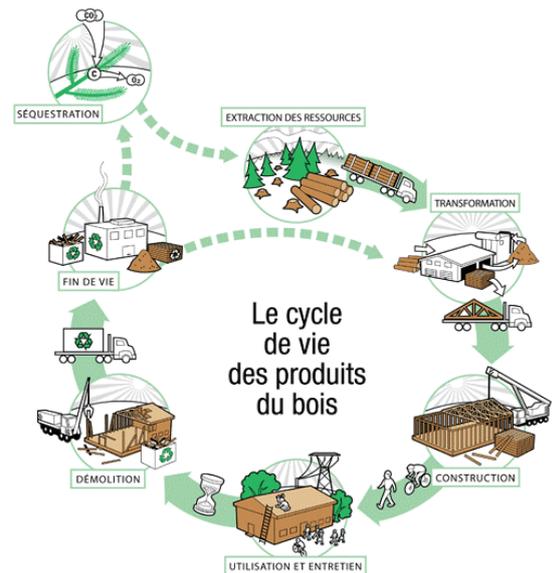


Figure 2 : Cycle de vie des produits du bois

Cet équilibre entre production de biomasse et stockage du carbone est donc important, mais de nos jours, un autre paramètre entre en jeu : l'adaptation des peuplements (et donc de la gestion appliquée) face au changement climatique. C'est ce que nous allons décrire.

### III. La sylviculture face au changement climatique

L'une des préoccupations majeures de ces dernières décennies est l'impact du changement climatique, notamment sur la répartition de diverses espèces ainsi que sur le maintien de leur productivité. Le domaine de la sylviculture sera impacté puisque les essences forestières utilisées vont être favorisées, ou non, par les nouvelles conditions climatiques.

Par exemple, il est décrit la régression de l'aire de répartition d'ici 2100 de différentes espèces telles que le Hêtre (*Fagus sylvatica*) ou l'Epicéa (*Picea abies*) (Piedallu et al., 2009). Au contraire d'autres espèces peuvent être favorisées, comme le Chêne vert (*Quercus ilex*) ou le Pin maritime (*Pinus pinaster*) (Besancenot et Thibaudon, 2012 ; Picard et al., 2014). Ces changements dans les aires de répartition sont des impacts directs, liés au changement climatique. Seulement, il peut y avoir aussi des effets plus indirects comme la favorisation de pathogènes, d'insectes herbivores ou de pathogènes d'espèces forestières. En effet, l'expansion de certains indésirables tels que le Scolyte de l'Epicéa (*Ips typographus*) ou la Chenille processionnaire du Pin (*Thaumetopoea pityocampa*) est déjà observée depuis quelques années (Picard et al., 2014).

Au vu de la modification de la distribution naturelle des essences, il semble nécessaire de trouver d'autres essences ou provenances qui seront viables (économiquement parlant) dans de nouvelles conditions climatiques, mais aussi d'aider au maintien des populations natives.

Il est alors nécessaire de réaliser des plantations, c'est pour cela que différents dispositifs sont mis en place et évalués. En effet, la plantation permet de mettre en place des espèces non natives, résistantes à diverses conditions (sécheresse, parasite...), ou d'aider à la mise en place d'espèces natives dans un endroit donné où la régénération naturelle n'est pas assez efficace (dû à des conditions difficiles). Elle permet aussi de répondre à une demande de production de bois importante. C'est donc un outil majeur pour l'atténuation du changement climatique. Aujourd'hui, les plantations représentent une activité importante, avec en France 2,1 Mha de surface plantée, soit 13% de la superficie des forêts françaises (Meredieu et al., 2019). Ce qui correspond à 73 393 198 plants achetés entre 2015 et 2016 (Boutte, 2017).

Dans des contextes d'implantations difficiles (comme le cas de notre étude), pour que les plantations soient efficaces, il est nécessaire de préparer le sol afin de favoriser au mieux la mise en place des jeunes plants. C'est pour cela que de nouvelles techniques de préparation du sol sont testées en contexte forestier (comme le cas de notre étude), notamment grâce aux réseaux ALTER (ALTERNative aux hERbicides en forêt RENFOR, 2017c), et PILOTE (Harnist et Duez, 2017).

#### **IV. Contexte de notre étude**

Nos dispositifs étudiés se situent en forêt de Chauv, dans le Jura (39). Les parcelles ont été sélectionnées pour tester la préparation mécanique des sols avant plantation. En effet, on y retrouve des conditions limitantes pour la mise en place des jeunes plants, telles que l'engorgement, le tassement du sol et la présence forte de végétation compétitrice. En effet, la végétation forestière peut être un obstacle à l'installation d'une régénération naturelle ou d'une plantation. Elle peut exercer une concurrence directe (par captation des ressources) ou indirecte (notamment par allopathie) (Wehrle, 2013). C'est donc la préparation mécanique du sol, qui va permettre de contrôler la végétation concurrente et de réduire ses effets négatifs, jusqu'à ce que les plants aient atteint une certaine taille, où ils ne ressentiront plus cet effet compétitif (Wehrle, 2013).

Dans notre cas, c'est la Molinie bleue (*Molinia caerulea*) qui empêche le bon développement des jeunes plants de Chêne sessile. C'est une graminée (Poaceae), héliophile qui se développe sur des sols acides hydromorphes. Elle forme localement des peuplements denses et pousse en touffes jusqu'à 2m de haut (Dassot et al., 2016). La molinie est capable de concurrencer plus ou moins directement les plants, via son système racinaire qui forme un réseau extrêmement dense jusqu'à 40cm et donc par le captage des éléments nutritifs et de l'eau. Du fait de sa taille, elle peut aussi exercer une compétition quant à l'accès à la lumière (Dassot et al., 2016). Elle est également capable d'allopathie dirigée contre ces jeunes plants. En effet, sa présence entraîne une croissance moins bonne des plants (et donc une biomasse plus faible) et impacte aussi le recrutement des mycorhizes associées au Chêne rouge (*Quercus rubra*) (Timbal, Gelpe, et Garbaye, 1990).

La présence de la molinie sur les parcelles utilisées lors de l'étude est favorisée par la nature du site. En effet, on a un sol limoneux humide qui peut se tasser facilement, on retrouve alors de l'hydromorphie de surface ainsi qu'un pH plutôt bas (4 à 5). Ces conditions sont aussi un frein pour l'implantation des plants, c'est pourquoi une partie des outils utilisés sur le dispositif vont décompacter le sol et réaliser des « billons » qui vont permettre de surélever les plants, afin de minimiser l'impact de l'engorgement.

Ce sont toutes ces conditions qui font que la préparation mécanique des sols est préconisée pour débiter les plantations.

#### **V. La préparation mécanique des sols**

Lors d'une plantation, les jeunes plants vont donc face à différentes contraintes, telles que des conditions stationnelles difficiles (liées au tassement, à l'engorgement...), de la compétition directe ou indirecte, due à la présence de végétation concurrente ou encore de l'herbivorie. C'est pour cela que les plantations nécessitent une préparation du site au préalable, avant l'implantation des jeunes plants. Les méthodes de préparations mécaniques des sols sont donc de nos jours utilisées comme alternative aux herbicides, afin d'améliorer l'implantation et la survie de jeunes plants faces à ces conditions d'installation difficiles (Collet et al., 2014).

Les opérations d'exploitations forestières peuvent utiliser des outils qui ont un poids parfois conséquent, entraînant ainsi des phénomènes de tassement et d'érosion des sols. Ces outils menacent

alors l'intégrité physique du sol, sa capacité de rétention en eau, son fonctionnement biologique (par une restructuration des communautés) et par conséquent, le renouvellement du peuplement forestier (Pischedda, 2009). Et il en va de même pour les outils utilisés pour la préparation du sol. En effet, le travail du sol mécanique va impacter la structure physique même du sol. Des outils effectuant un labour, un sous-solage ou une scarification peuvent entraîner (sur une plus ou moins courte durée) une diminution de la Densité Apparente (DA) (par décompaction du sol). Ceci augmentant la porosité au niveau de la partie supérieure du sol (jusqu'à 10 cm), comparé à un sol non travaillé (Lopez-Fando, Dorado, et Pardo, 2007 ; Wang et al., 2016).

Ce type de travail est donc contraire aux préoccupations actuelles de minimiser notre impact sur l'écosystème. De plus, un travail profond n'est pas forcément nécessaire. En effet, un travail du sol (avec un sous-soleur) améliore la croissance de jeunes plants d'Eucalyptus, mais la profondeur de travail (40cm, 60cm ou 80cm) n'entraîne pas de différence. Le coût étant plus important sur une grande profondeur (80cm), il n'est pas nécessaire de travailler au-delà de 40cm (Lacey, Brennan, et Parekh, 2001).

C'est pour ces raisons que, récemment, de nouveaux types d'outils dit « légers » ont été développés. Ceux-ci sont montés sur des mini pelles, plus légères que les tracteurs utilisés habituellement. Ces outils permettent de moins tasser le sol à leur passage et de travailler de façon localisée et précise selon le but recherché (Collet et al., 2014). De plus, contrairement aux techniques « classiques », ces outils n'entraînent pas de mélange des horizons de surface. On a alors une perturbation moins importante du sol à l'échelle du peuplement entier, car le fait de travailler de façon localisée permet de garder des zones qui ne sont pas travaillées. Plusieurs outils de ce type sont aujourd'hui utilisés en contexte forestier, comme le sous-soleur multifonction (SSM), le scarificateur réversible (SR), le Razherb (RAZ), la pioche-herse, le CULTI 3B (C3B), etc... (RENFOR, 2017b).

Néanmoins, ces outils ont quand même un impact sur le sol et peuvent ainsi perturber le cycle de certains éléments (tel que le carbone), ou encore la biodiversité associée à cet environnement. En effet, Newmaster et al., en 2007, ont démontré que l'utilisation d'un scarificateur pour la préparation du site entraîne une baisse au niveau de la richesse de la végétation du sous-bois (que ce soit au niveau des ligneux, des herbacées ou des cryptogames), ainsi qu'un couvert général en végétation moins important. De plus, quelques études montrent des effets sur la faune du sol. Par exemple, 5 ans après préparation mécanisée du sol, Berch, Battigelli, et Hope (2007, Colombie Britannique) ont observés une diversité plus faible en Oribates par rapport à un contrôle sans préparation, mais aussi une densité moins importante de la mésofaune (acariens et collemboles) avec un traitement « sévère » de buttage (« mounding »). De plus, Bellocq, Smith, et Doka (2001, Canada) suggèrent que des techniques moins intensives entraîne un impact écologique moindre sur les communautés d'arthropodes (au niveau de l'abondance et de la richesse), sur le court terme (3 ans).

Ces types d'outils ont déjà été testés en contexte de blocage par la molinie. Et des études montrent déjà des résultats positifs quant au contrôle de la molinie.

## **VI. Intérêts des outils pour le contrôle de la Molinie**

D'après Wehrle en 2013, les graminées en général sont sensibles à l'arrachage, à la coupe mécanique, à l'herbicide, au paillage et au travail du sol (sur 30cm-60cm de profondeur).

En effet, une étude réalisée en 2014 sur le réseau ALTER (Collet et al. 2014) a déjà pointée les bienfaits de la préparation mécanique du sol sur la végétation concurrente. Le Razherb étant très efficace pour contrôler les graminées qui forment un tapis dense, telle que la molinie. En 2 ans, il réduit le couvert de molinie de 80% à 8%, entraînant alors l'apparition d'autres graminées moins compétitrices. Si cet outil est couplé à d'autres, le couvert de la molinie est quand même réduit et on a la mise en place d'autres graminées, mais aussi de dicotylédones, moins compétitrices. Cet outil permet alors de créer une inversion de flore. Quant au sous-soleur multifonction, celui-ci est capable de contrôler les plantes

concurrentes, mais a besoin d'un outil supplémentaire spécifique (tel que le Razherb), pour permettre de s'attaquer aux espèces ayant des racines denses et profondes, telle que la molinie (Collet et al. 2014).

L'efficacité de la préparation mécanique du sol contre la molinie a également été évaluée par une autre étude du réseau ALTER (Dassot et al., 2016). De plus, pour des plantations de Chêne sessile ou de Chêne pédonculé (*Quercus robur*), il est observé, quels que soient le site et le type de préparation du sol, une recolonisation progressive de la végétation sur les lignes de plantation. Toutefois, les taux de recouvrement en végétation étaient plus faibles dans les parcelles préparées à l'aide d'un scarificateur réversible seul (SR, 65% de recouvrement) ou couplé avec un sous-soleur multifonction (SR+SSM 37%), que dans les modalités de broyage et/ou de labour (100%). Ces outils entraînent aussi un changement dans la composition floristique (il y a majoritairement la molinie, mais aussi une diversité plus importante avec les outils SR et SR+SSM, car la molinie y était moins dominante).

Bien qu'ayant un effet positif sur le contrôle de la molinie, il est possible que ces outils impactent d'autres aspects, tels que le stockage du carbone dans le sol ou encore la croissance de notre peuplement, c'est ce que nous allons décrire dans la suite de cet état de l'art.

## VII. Effet du travail du sol sur le stock de carbone du sol

Comme décrit précédemment, la préparation mécanisée du sol est une technique de plus en plus utilisée, pour maximiser la réussite de la plantation et pour optimiser les productions. Seulement celle-ci n'est pas sans conséquence sur le sol.

Les modifications structurelles engendrées par les outils font que le stock de carbone du sol peut être influencé par le travail effectué lors de la préparation des parcelles. En effet, certaines techniques employées, induisent une déstructuration des horizons, par la suppression des horizons organiques ou par le mélange des horizons (Rossi, 2015), entraînant ainsi une décompaction du sol ainsi que la destruction des agrégats (Lopez-Fando, Dorado, et Pardo, 2007). La fragmentation des agrégats va se traduire par une augmentation de l'activité biologique (car l'intérieur de agrégats est devenu accessible pour les organismes) et donc par la biodégradation de la matière organique du sol (MOS), qui était initialement protégée. On a donc potentiellement une minéralisation accrue du carbone contenu dans la MOS (Balesdent, Chenu, et Balabane, 2000 ; Lopez-Fando, Dorado, et Pardo, 2007). En effet, Wang et al. en 2016 montrent que le carbone libéré par respiration est plus important la première année, lorsque le sol vient d'être labouré (+25,3%), par rapport au témoin. On a donc à une perte potentielle de carbone sur la première année. Seulement, ils ne montrent pas de différence la seconde année. Et ils démontrent également que la respiration n'est pas plus importante lorsque le sol est préparé par scarification (lors d'une afforestation en région subtropicale en Chine).

De plus, le travail du sol libère le CO<sub>2</sub> contenu dans les pores, résultant de l'ancienne activité microbienne, proportionnellement au degré de perturbation. Néanmoins, ce flux de CO<sub>2</sub> est en déclin seulement 3h après perturbation, et redevient stable 8 jours après la perturbation (Alvaro-Fuentes et al., 2007, en agrosystème). On a donc un impact sur la respiration sur le court terme, mais aussi sur le long terme. En effet, on peut avoir des différences au niveau du flux de CO<sub>2</sub> en surface, selon différentes méthodes de préparation mécanisées du sol, 30 ans après plantation (Tyree et al., 2006).

Ces perturbations physiques engendrent alors une modification importante du milieu qui peut donc conduire à la réduction des stocks de carbone du sol, à la suite de l'augmentation de l'activité biologique (comme observé en contexte agricole français par Balesdent, Chenu, et Balabane en 2000 et en forêt boréale par Tan et Chang en 2007). Cette réduction possible du COS va avant tout dépendre de la technique utilisée pour la préparation du sol, en effet, la perte du COS s'accroît avec l'intensité de la perturbation du sol (Jandl et al., 2007).

De plus, ces perturbations physiques du milieu peuvent également engendrer une redistribution latérale du COS (Augusto, Bureau, et Derrien, 2019), on a alors le déplacement du carbone de la ligne de plantation vers l'andain créé par le passage de l'outil (Quibel, 2015).

Dans notre contexte, il est important de souligner que le sol des forêts régénérées par plantation montre une perte systématique de COS par rapport à celui de peuplements forestiers en régénération naturelle. Cela a été notamment décrit dans une méta-analyse par Liao et al., en 2010 (avec -20% de COS en plantation).

Toujours dans notre contexte forestier, un travail à fort impact, comme une coupe rase suivie d'un labour peut entraîner une diminution de la teneur en carbone organique dans le sol (sur 0-30cm). Le stock passant de 31,5 g/kg à 25,8 g/kg, 1 an après labour (pour du Pin maritime dans les Landes, Trichet et al., 1999). A l'inverse, il est montré que le labour n'a un impact sur le COS qu'au niveau de l'horizon organique (O, avec une perte de 35% en moyenne), mais non au niveau de la partie minérale du sol (James et Harrison, 2016).

D'autres méthodes de préparation peuvent impacter le stock de COS. Par exemple, les méthodes de scarification pour la préparation de plantation peuvent entraîner un déstockage du carbone sur 6 ans. Mais l'intensité de ce déstockage dépend du site (avec une perte du COS de -6%, -21% ou -41% selon le site, d'après Örlander, Egnell, et Albrekston, 1996, pour du Pin sylvestre en Suède). Seulement, cette perte de carbone par scarification au niveau de la partie minérale du sol (sur 0-20cm), n'est pas trouvée par Hope en 2007 que ce soit 1 an ou 10 ans après travail du sol. Dans ce même papier, il a cependant trouvé une baisse significative du COS au niveau de la litière, 1 an après travail, comparé à un contrôle sans préparation (avec une perte de 50% du COS) et il en va de même après 10 ans (avec une perte de 48% du COS, pour des Conifères, en Colombie-Britannique).

Les effets du travail du sol sur le stock de carbone vont donc dépendre du site d'étude ainsi que de la technique de préparation du sol (surtout au niveau de l'intensité du travail) utilisés (Fonseca, Figueiredo, et Martins, 2014 ; Jandl et al., 2007).

Dans notre contexte de plantation forestière, le stock de carbone va dépendre également de l'essence étudiée, du stade étudié et de la gestion appliquée. Par exemple, en France, le stock de COS (jusqu'à 1m de profondeur) est en moyenne plus important sous les conifères (109,5 MgC/ha) que sous les feuillus (88,5 MgC/ha) (Jonard et al., 2017). Mais dans ce même papier, ils expliquent que cette différence est avant tout due à l'âge du peuplement, puisque 14% de la variabilité du taux de séquestration du COS dépendait de la structure et de l'âge du peuplement. Enfin, il est également mis en avant que la gestion forestière puisse potentiellement influencer la dynamique du COS en agissant par exemple, sur la longueur de la révolution.

## **VIII. Effet du travail du sol sur le développement des peuplements forestiers**

La réalisation d'une préparation mécanisée du sol avant plantation se fait dans l'optique d'optimiser la production et donc d'optimiser le carbone sur pied. En effet, le début de la croissance est très important pour la réussite de la plantation et le développement des plants (Collet et al., 2014). Et la préparation mécanisée du sol peut potentiellement améliorer la croissance ou la survie des plants. Néanmoins, on peut être amené à se demander si cette amélioration de la croissance sur les premières années perdure le long du cycle forestier et ce, jusqu'à la récolte.

Nous avons vu que, la préparation du sol pouvait impacter de différentes manières la structure physique même du sol, notamment en décompactant celui-ci. Ceci peut être alors bénéfique pour l'exploration racinaire. En effet, Ehlers, Kopke, et Hesse en 1983 montrent que le labour permet d'augmenter la pénétration racinaire sur les 10 premiers centimètres chez l'Avoine. Ce type de résultat est observé aussi chez les arbres. Par exemple, Collet et al. 2014 mettent en avant qu'une préparation du sol réalisée avec un SSM peut permettre aux racines de pénétrer plus facilement dans le sol, que ce

soit dans la partie travaillée par l'outil ou plus en profondeur. Ou encore Bolte et Löf en 2010 montrent, 3 ans après préparation du sol, un système racinaire plus développé (biomasse racinaire plus importante) chez le Chêne.

De plus, comme c'est le cas pour notre étude, cela peut avoir un effet bénéfique lorsque les sols présentent de l'hydromorphie. En effet, les outils augmentent la porosité du sol, on a alors plus d'air dans les cavités et également un meilleur drainage de l'eau sur la surface travaillée (Burger et al., 2003 ; Londo et Mroz, 2001). Les racines ne sont donc plus noyées.

Cette capacité de pénétration accrue des racines permet alors d'améliorer les performances des plants par la capacité à chercher les nutriments ou l'eau sur des surfaces plus vastes (Löf et al., 2012).

En effet, dans un premier temps, le travail du sol peut impacter la survie des jeunes plants. Par exemple, Löf, Rydberg, et Bolte en 2006 (en Suède) montrent que la préparation mécanisée (« mounding ») améliore la survie de jeunes plants de *Quercus robur* sur 2 ans (90% de survie lorsque le sol est préparé contre 58% pour le témoin). Cette amélioration de la survie à la suite d'une préparation mécanisée du sol est aussi observée chez *Quercus ilex* (par Sanchez-Andrés et al., en 2006, en contexte méditerranéen). Ceci s'expliquant par une diminution du stress dû à la transplantation et de la compétition. Néanmoins, les premiers résultats du réseau ALTER (Projet Alter, 2012) montrent un taux de mortalité variables selon les essences, les régions et les contextes stationnels étudiés, avec parfois des résultats contradictoires entre sites. Par exemple, ils trouvent une mortalité plus élevée lorsque le site est préparé par un culti-sous-soleur dans certains sites, mais une mortalité plus faible avec le même outil dans d'autres. Toutefois, la préparation mécanisée du sol semble en général bénéfique pour la survie des plants. Seulement, si le site est déjà favorable à l'espèce et s'il n'y a pas de facteurs limitants, une préparation du sol peut ne pas avoir d'effet sur la survie (Self et al., 2012).

Dans un second temps, la préparation mécanisée du sol peut impacter la croissance et la productivité du peuplement, et donc potentiellement le carbone séquestré dans la biomasse.

Par exemple, la scarification améliore la croissance, 10 ans après plantation, plus ou moins fortement chez plusieurs espèces de conifères (*Picea mariana*, *Pinus banksiana* ou *Larix laricina* en forêt boréale québécoise, décrit par Thiffault et al. en 2004 et chez *Pinus contorta* en Colombie, d'écrit par Hope en 2007). Néanmoins, la scarification n'améliore pas la croissance d'une espèce hybride d'Epicéa sur 10 ans (d'écrit par Hope en 2007). Des améliorations significatives de la croissance en hauteur, 2 ans après préparation du sol, sont également décrites chez *Quercus robur* par Löf, Rydberg, et Bolte en 2006, avec une hauteur moyenne de 90cm lorsque le sol est préparé mécaniquement contre 75cm en moyenne pour le témoin. Un meilleur développement est également décrit, 6 ans après préparation, chez *Quercus ilex* par Sanchez-Andrés et al., en 2006. Les premiers résultats du réseau ALTER (Projet Alter, 2012) montrent, une croissance en 2<sup>ème</sup> année après préparation, chez les Chênes, plus importante lorsque le sol est préparé par le culti-sous-soleur ou le scarificateur réversible par rapport au témoin.

L'effet de la préparation mécanique du sol sur la croissance du peuplement va alors aussi dépendre du site et de l'essence qui sont étudiés, mais semble majoritairement positif malgré tout.

Comme décrit dans la partie du stockage du carbone dans le sol, la préparation mécanique peut entraîner des effets négatifs sur les stocks de COS. Néanmoins, ces opérations de préparation du site peuvent également provoquer une augmentation de la séquestration de carbone dans la biomasse, en améliorant la croissance des arbres. Cette augmentation peut être susceptible de compenser les pertes de COS qu'elles génèrent, voire de constituer un puits net de carbone à l'échelle de l'écosystème forestier (Augusto, Bureau, et Derrien, 2019). En effet, dans une revue sortie en 2007, Jandl et al. montrent que, dans la plupart des études qui ont été examinées, la production de biomasse est favorisée par la préparation du site et que cet effet peut compenser, voire dépasser, la perte de COS dans la réponse globale de l'écosystème. Ceci dépendrait avant tout du type de préparation et de la gestion qui sont appliquées.

## IX. En résumé

Voici un résumé de l'état de l'art présenté dans le tableau 1.

Tableau 1 : Tableau résumé de l'état de l'art.

<b>Le carbone en milieu forestier</b>	<p>En France, la forêt représente une surface de 16,9 millions d'hectares et stocke 2 211 Mt de carbone (1 147Mt dans la biomasse, 1 074 Mt dans le sol).</p> <p>Le stockage de carbone peut se faire dans le sol, mais aussi dans la biomasse.</p> <p>La sylviculture influence de diverses manières le stock de carbone dans la biomasse, mais aussi dans le sol, cela va dépendre de la gestion appliquée.</p> <p>Il est important de trouver un équilibre entre la production économique et les services rendus par l'écosystème forestier (dont le stockage du carbone).</p>
<b>Le principe des « 3 S »</b>	<p>La forêt Séquestre le carbone (activité photosynthétique).</p> <p>Les produits issus de la production forestière Stockent ce carbone.</p> <p>Ces mêmes produits servent de Substitution à des matériaux qui génèrent plus d'émissions de CO<sub>2</sub>.</p>
<b>La sylviculture et le changement climatique</b>	<p>Des changements dans les aires de distribution des espèces forestières sont attendus, à la suite du changement climatique.</p> <p>Il faut rechercher des espèces qui seront plus adaptées aux conditions climatiques futures. Et aider la mise en place difficiles des espèces natives.</p> <p>La plantation est une manière d'aider à la mise en place d'espèces non natives ou natives et permet de répondre à la demande en bois.</p> <p>La plantation est un outil majeur face au changement climatique.</p>
<b>Contexte de l'étude</b>	<p>Les dispositifs de notre étude se situent sur des parcelles acides, présentant un engorgement, et envahies par la molinie.</p> <p>La présence de la molinie est un frein important à la mise en place des jeunes plants.</p> <p>La préparation mécanique des sols est une manière pour réguler ces conditions limitantes.</p>
<b>La préparation mécanique des sols</b>	<p>Permet d'optimiser la mise en place des jeunes plants.</p> <p>Les anciennes méthodes (outils lourds) affectent l'intégrité physique du sol, entraînant ainsi des perturbations (circulation de l'eau, fonctionnement biologique, stockage de carbone etc...)</p> <p>Des outils plus légers et travaillant de façon localisée ont été développés afin de limiter les perturbations.</p> <p>Néanmoins, ces outils peuvent encore avoir un impact sur le sol (stock de carbone, biodiversité du sol...).</p>
<b>Intérêts des outils pour le contrôle de la Molinie</b>	<p>Plusieurs études semblent être d'accord sur le fait que la préparation mécanique des sols est une bonne alternative aux herbicides.</p> <p>Le couvert de la molinie est moins important et la diversité de la végétation accompagnatrice est plus importante après préparation par ces outils légers.</p>
<b>Effet du travail du sol sur le carbone</b>	<p>Peu d'études en contexte « tempéré Européen » et également avec les outils utilisés sur nos dispositifs.</p> <p>La mise à nus des agrégats entraîne une minéralisation du carbone accrue (court et long terme).</p> <p>Redistribution latérale du COS observée.</p> <p>Perte de COS en plantation, comparée à une régénération naturelle.</p> <p>Résultats quant à la modification du stock de COS variables selon le site d'étude et l'outil utilisés sol.</p> <p>Mais en général, la préparation entraîne une diminution du stock de COS.</p> <p>Dans notre contexte, l'essence, le stade du peuplement et la gestion qui sont appliqués jouent aussi un rôle important dans les variations de COS.</p>
<b>Effet du travail du sol sur la survie, la croissance et la biomasse</b>	<p>Peu d'études en contexte « tempéré Européen » et également avec les outils utilisés sur nos dispositifs.</p> <p>La préparation mécanique du sol se fait dans l'optique d'optimiser la croissance du peuplement.</p> <p>Elle va améliorer l'expansion des racines, mais aussi la circulation de l'eau (surtout dans les sols tassés).</p> <p>On a des effets, dans un premier temps, sur la mortalité des jeunes plants, elle est plus souvent diminuée, mais on a des variations selon le site ou l'essence.</p> <p>Dans un second temps on a des effets sur la croissance du peuplement, le plus souvent positifs, mais on observe aussi des variations selon le site ou l'essence.</p> <p>Optimiser la croissance et donc la biomasse sur pied permettrait de compenser la possible perte de COS.</p>

# Matériel et Méthodes : Contexte

## I. La forêt de Chaux

La forêt de Chaux est un massif forestier (principalement domanial) situé à l'est de la ville de Dole, dans les départements du Jura (39) et du Doubs (25). Ce massif a une superficie de près de 22 000 hectares (entièrement classés en zone Natura 2000) et repose sur du limon sur cailloutis (INPN, 2014). On y retrouve surtout des sols acides, présentant une hydromorphie de surface (Redoxsol) où l'on a un fort développement de la molinie. C'est dans cette forêt que se situent les parcelles étudiées.

## II. Les méthodes de préparation du sol utilisées lors de l'étude

Dans notre contexte, la préparation des sols s'est effectuée afin de contrôler la concurrence de la molinie, de réduire l'impact de l'engorgement sur les plants et de décompacter les sols limoneux, sensibles au tassement. Historiquement, la gestion de la végétation concurrente en forêt s'effectuait par traitement aux produits phytosanitaires et la préparation du sol par l'utilisation de techniques plus « drastiques » telles que le labour en plein et la mise en place de gros billons. Aujourd'hui, des alternatives à ces méthodes, basées sur des outils plus légers et spécifiques sont étudiées et leur efficacité est évaluée sur les dispositifs présentés dans cette étude (parcelles 212 et 1026). Ces résultats seront comparés à une technique plus ancienne de labour en plein et de mise en place de hauts billons (parcelle 213) et à des peuplements matures issus de régénérations naturelles, sans travail du sol préalable (M212 et M1026).

Voici les modalités (et leurs outils associés), qui seront étudiées dans ce rapport (d'après RENFOR, 2017b) :

- « **RACB** » (parcelle 1026) : Cette modalité utilise dans un premier temps l'outil « RazHerb » (désherbage par décapage superficiel). Fixé sur mini-pelle, cet outil arase le tapis de molinie, lissant alors la surface du sol. C'est pour cela que, dans un second temps, un autre outil est utilisé, le « CULTI 3B ». C'est un outil tracté (de 7 tonnes), décompactant le sol jusqu'à 70/80cm et réalisant la technique 3B (Billon-Bombé-Becker), qui crée des billons grâce à deux paires de disques.

Ces deux outils sont utilisés de manière localisée, le travail du sol s'effectue donc seulement là où vont être disposés les plants (sur la ligne de plantation), sur une bande de 1m50. Les arbres sont alors plantés de manière surélevée (pour éviter d'avoir les racines dans l'eau).

L'outil « CULTI 3B » réalise la technique 3B (formation de billon). On a alors une structure de plantation bien précise (figure 3) avec : un creux (là où on prélève la terre), la ligne de plantation (LP, qui va permettre une plantation surélevée), un inter-rang (IR, entre deux lignes de plantation) et un andain (endroit où se dépose le surplus de terre/végétation).

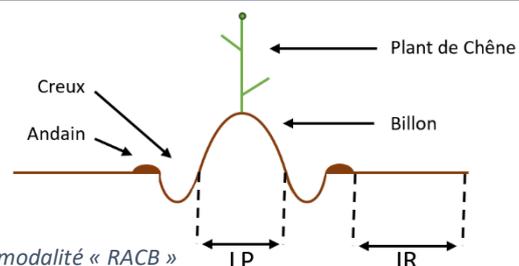


Figure 3 : Schéma de la modalité « RACB »

- « **BILLON** » (parcelles 213) : Cette modalité représente un travail « extrême » du sol avec un labour en plein à la charrue (sur la totalité de la parcelle), suivi de la mise en place de hauts billons en planche de 2m de large, au niveau de la zone où seront plantés les arbres. On a donc un travail sur la totalité de la parcelle.

Pour la modalité « BILLON », les billons ont été formés par le déplacement de sol de l'inter-rang à la ligne de plantation, formant ainsi des billons en planche faisant 2m de large. Le labour a été effectué sur la totalité de la parcelle (figure 4).

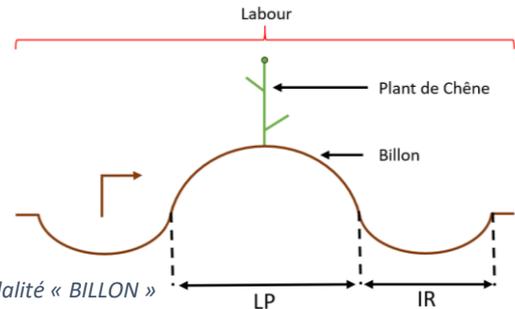


Figure 4 : Schéma de la modalité « BILLON »

- Témoin (« **TEM** », parcelle 212) : Dans cette modalité, nous n'avons pas de préparation du sol avant la plantation.
- Mature (« **M** », parcelle M212 et M1026) : Ce sont deux parcelles matures, issues de régénérations naturelles, de plus de 120 ans et sans travail du sol, qui serviront de contrôle supplémentaire. Ces deux parcelles sont proches de nos parcelles tests, l'une se situant à côté des parcelles 212 et 213 (M212) et l'autre à côté de la parcelle 1026 (M1026).

Enfin, pour les modalités « TEM » et « M » nous n'avons aucun travail qui a été effectué (figure 5).

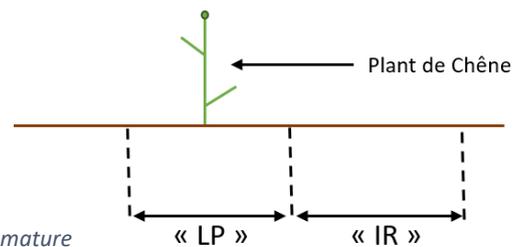


Figure 5 : Schéma des modalités témoin et mature

D'autres outils sont également testés sur ces parcelles (sous-soleur multifonction, Meri-Crusher...) (annexe 1). Mais ne seront pas étudiés ici, car n'ayant pas de données sur le stock de carbone du sol. Ce ne sont donc pas des parcelles entières que l'on étudie, mais des placettes se situant sur ces parcelles. Sur la parcelle 212 et 213 (annexe 2), il y a également eu des tests sur l'amendement calcaire, mais seules les placettes n'ayant pas reçu d'amendement seront prises en compte.

### III. Dispositif expérimental

#### 1. Contexte pédoclimatique

Le contexte pédoclimatique des parcelles utilisées pour la mise en place des dispositifs est présenté tableau 2 (le détail est en annexes 1 et 2).

Tableau 2 : Caractéristiques pédoclimatiques des dispositifs.

<b>Température moyenne</b>	10°C
<b>Précipitation moyenne</b>	1000mm
<b>Altitude</b>	250m
<b>Exposition</b>	Plateau
<b>Facteurs limitants</b>	Engorgement, faible niveau trophique, Molinie
<b>Roches mère</b>	Formations plio-quaternaires
<b>Formation superficielle</b>	Limons sur cailloutis
<b>Type sol</b>	Redoxisol avec hydromorphie de surface (niveau variable)
<b>Humus</b>	Mull acide, pH 4 à 5
<b>Végétation</b>	Méso acidiphile
<b>Végétation concurrente</b>	Molinie
<b>Essence</b>	Chêne sessile
<b>Fertilité <sup>a</sup></b>	Classe 2

<sup>a</sup> La fertilité étant la hauteur dominante (hauteur moyenne des 100 plus grands arbres à l'hectare) du peuplement, atteinte à l'âge de 100 ans (classe 2 = 30m à 100 ans).

## 2. Description des parcelles étudiées

### - **Les parcelles matures :**

Parcelles matures, de plus de 120 ans, issues de régénération naturelle et donc sans travail du sol. Elles sont composées majoritairement de Chênes sessiles. Elles se situent à proximité des parcelles tests (M212 pour celles proches des parcelles 212 et 213, M1026 pour celle proche de la parcelle 1026).

### - **Parcelle 213 :**

Parcelle mise en place en 1994 avec une technique de préparation du sol « ancienne » qui consistait à un labour en plein à la charrue et à la mise en place de grands billons (ancien dispositif de test d'amendements, dont on n'utilisera que les témoins sans amendement).

#### - Parcelle 212 et 1026 :

Anciennes futaies de Chêne exploitées en hiver 2008/2009 (212) ou en hiver 2010/2011 (1026), de 7,25 ha (212) ou de 5,01 ha (1026). Aujourd'hui ce sont des parcelles expérimentales, mises en place en 2013 et clôturées (afin d'éviter l'herbivorie). Des plantations de Chênes sessiles ont été installées en 2014 (mars – avril) suivant un schéma de plantation précis (1500 plants/ha, avec pour distance entre chaque plan 1,5m et 4m entre chaque ligne de plantation, voir figure 6). Des Pins sylvestres (*Pinus sylvestris*) ont également été plantés pour la parcelle 1026 mais ne seront pas étudiés ici.

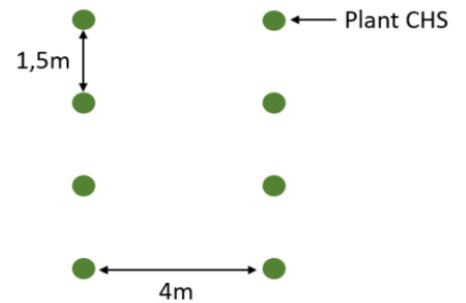


Figure 6 : Schéma de plantation des parcelles 212 et 1026 (CHS = Chêne sessile)

L'objectif de ces dispositifs (parcelles 212 et 1026) est de « développer et de tester à un niveau opérationnel des méthodes mécanisées permettant de s'affranchir du blocage de plantation de chênes sessiles aussi bien de la régénération par la molinie, que d'un sol tassé et hydromorphe en accord avec les contraintes de gestion actuelles, économiques et environnementales » (annexe 1).

Différentes combinaisons d'outils ont également été testées sur ces deux parcelles, mais seules deux nous intéressent pour cette étude : « RACB » et « TEM ». La modalité Témoin représentant 0,33 ha de la parcelle 212, et la modalité RACB 1,19 ha de la parcelle 1026.

## Matériel et Méthodes : Les mesures effectuées

### I. Les analyses de sol

#### 1. Les prélèvements

Différents prélèvements ont été effectués pour détailler au mieux la dynamique du carbone dans le sol (que ce soit au niveau de la profondeur ou de l'endroit sur la parcelle). Ces prélèvements de sols et de litières ont été effectués lors l'été de 2018 (4 ans après plantation) par le laboratoire ECODIV (Mont-Saint-Aignan) et le pôle RDI de l'ONF de Dole.

Pour chaque modalité, on a 3 points de prélèvements distincts (sauf cas particulier en M1026, où on a 1 seul point), où on échantillonne un couple ligne de plantation (LP) - inter-rang (IR). Pour les modalités « M » et « TEM », sans travail du sol et donc sans LP/IR, des points théoriques ont été prélevés (proche ou plus éloignés des plants).

Sur ces différents points, 5 profondeurs de sol ainsi que la litière ont été échantillonnés de la façon suivante :

- Litière (OL), seule couche de litière bien distincte
- 0-10cm
- 10-20cm
- 20-30cm
- 30-45cm
- 45-60cm

Pour chacune de ces profondeurs, 3 échantillons (réplicas : alpha, bêta et oméga) de sol, de litière ou de cylindres de sol ont été prélevés de la manière suivante pour chaque réplique :

- Pour le sol, 100g ont été échantillonnés.
- Pour la litière, l'horizon OL (seul horizon perceptible), a été échantillonné sur une surface de 20 cm \* 20 cm.

La hauteur moyenne de la litière a ensuite été déterminée à partir de 10 relevés de hauteur au hasard, proche de la zone d'échantillonnage. Une moyenne a ensuite été calculée pour chaque point de prélèvement (donc 3 hauteurs moyennes par modalité et par endroit de prélèvement).

- Des cylindres de sol, de volume connu (100cm<sup>3</sup>) ont été prélevés, afin de déterminer la Densité Apparente (DA, masse par unité de volume).

Pour résumer (figure 7), voici les diagrammes des prélèvements (de sol, de litière ou de cylindre) qui ont été effectués.

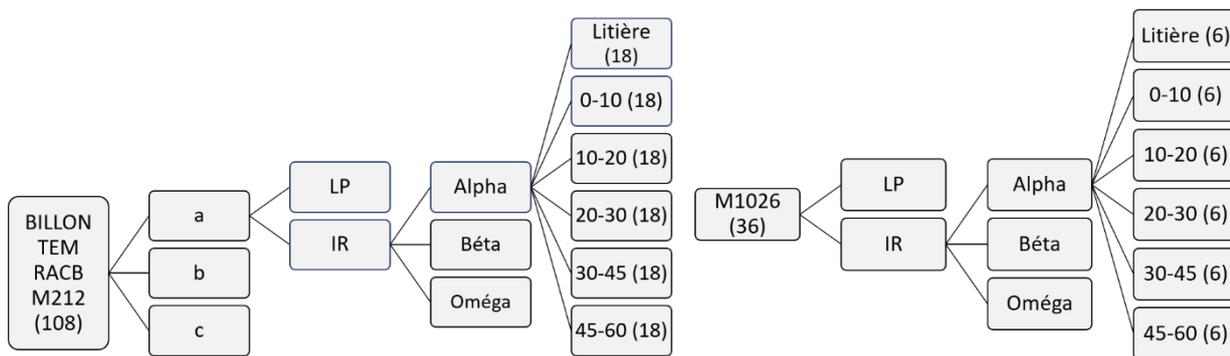


Figure 7 : Diagrammes des prélèvements de sol, de litière ou de cylindre (DA) effectués pour les parcelles 213, 212, 1026 et matures. Entre parenthèses : nombre d'échantillons par modalité

## 2. Préparation des échantillons et leur analyse (effectués au laboratoire ECODIV)

### a) Pour le sol

Les réplicas des échantillons ont, dans un premier temps, été mélangés (sauf pour la M1026 de façon à avoir le même nombre d'échantillons entre nos modalités). Ce mélange a ensuite été tamisé à 2mm puis broyé pendant 4 minutes à l'aide d'un broyeur à bille (de façon à voir au moins 1g de matériel) afin de passer à l'analyseur CHN.

Le CHN un appareil permettant, à partir de la combustion de 30-40mg d'échantillon de sol et après une chromatographie en phase gazeuse, d'avoir les teneurs en Carbone et en Azote de cet échantillon (voir le principe détaillé en annexe 3).

### b) Pour la litière

Les prélèvements de litière ont été pesés. Puis un quartage a été réalisé afin de prélever de façon homogène une quantité voulue de litière pour ensuite broyer de manière grossière à l'aide d'un broyeur spécifique (de 2mm).

Les répliques broyées grossièrement ont ensuite été réunies (sauf pour la M1026) en un échantillon composite de 1,5g (en mettant 0,5g de chaque réplique). Ces échantillons ont ensuite été broyés comme cela avait été fait pour le sol, à l'aide d'un broyeur à bille (pendant 3 minutes) afin de passer à l'analyseur CHN.

#### c) Pour les DA (cylindre de sol)

Chaque prélèvement cylindrique a été placé dans un bécher annoté et mis pendant au moins 24h à sécher dans une étuve à 105°C. Ensuite, les répliques ont été rassemblés (sauf pour la M1026) puis pesés à sec. Ces échantillons ont été tamisés à l'eau afin de ne garder que les éléments grossiers >2mm (branche, cailloux, racines...). Les éléments grossiers ont ensuite été séchés dans une étuve à 105°C pendant 24h minimum, puis ils ont été pesés à sec. Pour déterminer leur masse volumique, les éléments grossiers secs ont été plongés dans une éprouvette graduée (contenant un volume connu), puis le volume déplacé a été noté.

#### IV. Les calculs de stocks de carbone du sol

##### 1. Calcul de la DA (d'après Yoro et Godo, 1990)

$$DA (g.cm^{-3}) = \frac{(\text{Poids sec (g)} - \text{Poids sec éléments grossiers (g)})}{(\text{Volume cylindre (cm}^3) - \text{Volume éléments grossiers (cm}^3))}$$

Le volume d'un cylindre est de 100cm<sup>3</sup>, mais comme les 3 répliques ont été rassemblés nous avons donc dans notre cas un volume total de 300 cm<sup>3</sup> (sauf pour la M1026 où le volume est de 100cm<sup>3</sup>).

Pour le volume de la litière, nous avons prélevé sur une surface de 20cm\*20cm, le volume était donc de 20 \* 20 \* hauteur moyenne.

##### 2. Stock de carbone du sol à l'échelle du profil (d'après Jonard et al., 2017)

Dans tout ce rapport, nous prenons seulement en compte le carbone organique, car étant sur des sols acides, nous n'avons pas de carbone sous forme minérale.

Le stock de carbone organique a été calculé, dans un premier temps, de la manière suivante :

$$\text{Stock de carbone organique (mg.cm}^{-2}) = \text{Carbone (g.kg}^{-1}) * DA (g.cm^{-3}) * \text{Epaisseur (cm)}$$

Pour obtenir en **Mg/ha** on divise ce précédent résultat par 10.

Une correction des éléments grossiers a été apportée en calculant tout d'abord le % en éléments grossiers :

$$\%EG = \frac{(\text{Volume déplacé par EG} * 100)}{\text{Volume cylindre(s)}}$$

Puis, la correction apportée est la suivante : **Stock (Mg.ha<sup>-1</sup>) = (1 - %EG)**

A savoir que durant le stage, une méthode de calcul à masse constante (qui apporte une correction lorsque la DA varie entre nos échantillons) a également été testée. Les résultats étant similaires au premier calcul et pour simplifier, elle ne sera pas présentée dans le rapport. La réflexion menée pour cette méthode et quelques résultats sont néanmoins présentés en [annexe 4](#).

### 3. Pondération du stock de carbone du sol par la surface travaillée

Pour terminer, afin de permettre de voir l'effet du travail du sol ou non sur le stock de carbone du sol à l'échelle du peuplement entier, une somme pondérée est utilisée tenant compte de la part de surface travaillée ou non travaillée. Un poids différent a donc été attribué à chaque résultat, selon si on se trouvait en LP ou en IR. Le poids a été défini comme :

$$\frac{\text{Surface en LP ou en IR}}{\text{Surface totale}}$$

Donc, dans un premier temps, les surface de sol travaillées ou non travaillées ont été déterminées pour chaque modalité (voir résumé tableau 3). Pour les modalités « Témoin » et « Mature », la surface non travaillée représente 100% de notre surface, les stocks correspondent alors à une moyenne arithmétique des échantillons. Pour la modalité « BILLON » (213), les billons mis en place faisaient, au début, 2m de large (figure 8). Sachant qu'on a 4m entre chaque ligne de plantation on a donc 50/50 en proportion de surface travaillée/non travaillée (voir figure 8).

Pour la modalité « RACB » (voir figure 8), les lignes de plantation réellement travaillées (de 1,5m de large), représentent 31% de la surface totale et la partie non travaillée 69% de la surface totale, en prenant en compte les cloisonnements.

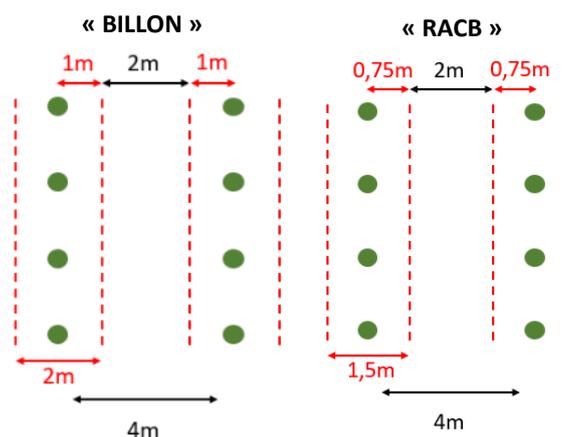


Figure 8 : Schémas de plantation et des zones travaillées (rouge) pour les modalités BILLON (gauche) et RACB (droite)

Tableau 3 : Résumé des différentes surfaces travaillées ou non travaillées pour chaque modalité

	Matures (M)	Témoin (TEM)	BILLON	RACB
<b>Surface totale</b>	-	0.33 ha	0.48 ha	1.19 ha
<b>Surface travaillée</b>	0%	0%	50% (0.24 ha)	31% (0.37 ha)
<b>Surface non travaillée</b>	100%	100%	50% (0.24 ha)	69% (0.82 ha)

Le stock de carbone en LP (ou IR) obtenu dans la première partie a donc été multiplié par la surface travaillée (ou non travaillée) puis divisé par la surface totale, pour obtenir le stock pondéré par la surface (en Mg/ha). Les nouveaux stocks en LP et en IR ont ensuite été additionnés (« RACB » et « BILLON »), ou moyennés (« TEM » et « M ») pour avoir le stock de carbone global, à l'échelle des dispositifs.

## V. Mesures in situ (parcelles 1026 et 212)

Ces mesures ont été uniquement réalisées sur les parcelles 1026 et 212 et donc uniquement pour les modalités « RACB » et « TEM ».

### 1. Mesures de la hauteur des plants

Les mesures de hauteurs ont été effectuées de façon régulière, en 2014, 2015, 2016, 2017 et 2019 en fin juin/début juillet (correspondant aux saisons de croissance de 2013, 2014, 2015, 2016 et 2018). Le principe est le suivant :

4 placettes ont été installées pour chaque modalité, chacune d'elle comprenant 9 arbres, disposés sur 3 lignes de plantations différentes, soit 36 arbres mesurés par modalité.

Les arbres de chaque placette ont un numéro unique de façon à suivre individuellement leur croissance. Leur hauteur a été mesurée à l'aide de perches graduées.

Des observations ont aussi été marquées pour chaque plant de façon à suivre leur état sanitaire (mort, cime sèche, gale, blessé durant l'exploitation ou non, disparition...)

La hauteur du jeune peuplement servira à suivre sa croissance juvénile puis à modéliser la croissance de ce peuplement sur une révolution forestière entière, afin de déterminer la quantité de carbone qu'il est capable de séquestrer dans sa biomasse.

### 2. Inventaire floristique

Deux placettes de relevés de 1m<sup>2</sup> ont été installées sur une ligne de plants, au niveau d'une placette de relevé des hauteurs, on a donc 8 placettes d'inventaire par modalité. Le protocole suivi est le protocole d'inventaire floristique mis en place pour le réseau PILOTE (annexe 5), celui-ci permet de voir l'impact de nos modalités sur la molinie, mais aussi de voir l'arrivée d'autres espèces. Ces relevés ont été réalisés les mêmes années que les relevés de hauteur (2014, 2015, 2016, 2017 et 2019) en fin juin/début juillet.

Pour chaque placette, différentes informations ont été relevées :

- Le recouvrement global de la végétation (estimé visuellement en pourcentage).
- Les 5 espèces les plus recouvrantes ainsi que leur recouvrement respectif (estimé visuellement). Le recouvrement peut être déterminé sur plusieurs strates.
- Le nombre de ligneux présents par espèces.
- La hauteur maximale du feuillage de l'herbacée la plus dominante.
- La hauteur maximale des ligneux.

Ces relevés serviront à voir l'évolution du couvert de la végétation dominante et donc à avoir une estimation de notre biomasse de végétation concurrente.

## **VI. Séquestration du carbone dans les peuplements**

Dans un premier temps, la modélisation de la croissance de nos peuplements est nécessaire pour nous permettre de quantifier la séquestration de carbone dans nos peuplements à l'échelle d'une révolution forestière entière.

### **1. Modélisation de la croissance des peuplements**

La modélisation de nos peuplements a été effectuée grâce au logiciel Capsis (Dufour-Kowalski et al., 2012). Capsis est une plateforme logicielle générique, créée par l'INRA et qui héberge de nombreux modèles de croissance pour différentes essences forestières. Ce logiciel intègre différents modèles de croissance (selon l'espèce considérée, le contexte étudié etc...). Le module utilisé pour cette étude s'intitule « Sydy ». Ce module de sylviculture automatique, développé par Philippe Dreyfus permet de simuler l'évolution de chênaies et de hêtraies sur la base des équations du modèle de croissance Fagacées (Le Moguédec et Dhôte, 2011).

Le module Sydy permet de simuler un cycle sylvicole complet, pour cela il est nécessaire d'initier la simulation avec des données réelles de description du peuplement. Cette initiation se fait grâce à une liste d'arbre (sur 1ha). Cette liste contient diverses caractéristiques tels que la circonférence de chaque arbre, la surface du peuplement, le couple hauteur dominante/âge du peuplement et la fertilité du site.

Seulement, nous n'avons que des données de hauteurs pour notre dispositif et non de circonférences. Une autre référence a donc été sélectionnée pour initier notre simulation. Celle-ci se situe dans un contexte proche (classe de fertilité 2) en forêt domaniale de Citeaux (21). C'est une parcelle en régénération naturelle, à dominance de Chênes sessiles, pour laquelle la gestion appliquée est celle préconisée par le guide de sylviculture des chênaies continentales (ONF, 2008), pour une futaie régulière, avec un dépressage à 7-8m ramenant la densité à 3600 tiges/ha. Les données de circonférences dont nous disposons sont celles de ce peuplement à 19 ans.

Nous avons donc une liste d'arbres ramenés à 1ha pour décrire notre peuplement initial. Ensuite, sur Sydy, nous avons appliqué un itinéraire de sylviculture classique du Chêne sessile (selon le guide de sylviculture des chênaies continentales, pour une futaie régulière, ONF, 2008). L'itinéraire est l'ensemble des interventions sylvicoles que va subir notre peuplement (coupes, travaux...) afin d'atteindre un objectif donné (un nombre d'arbres, une certaine circonférence...). La coupe finale a été étalée sur 10 ans (réalisée en 3 étapes). Cet étalement permet de ne pas ouvrir brutalement le milieu (et donc de ne pas favoriser la croissance de la végétation concurrente) et permet d'avoir un impact moins important sur l'écosystème (notamment au niveau du sol). Sydy nous permet d'avoir

l'évolution du peuplement (nombre d'arbre, hauteur dominante etc...) suivant ces différentes interventions.

Seulement, ce site de Citeaux reste différent de nos dispositifs à Chaux (régénération naturelle contre plantation). Pour avoir une base proche de nos plantations nous avons aussi étudié plusieurs cas dérivés de la référence décrite au-dessus.

- Cas 1 « Référence 1500 tiges » : La référence possédant près de 16 000 arbres sur 1 ha, nous avons modifié l'itinéraire afin d'imposer une première éclaircie (une première coupe d'arbre à 7,8m) pour atteindre 1500 tiges (qui correspond à la densité de plantation de nos dispositifs). L'itinéraire a ensuite été adapté à un peuplement moins dense (car plantation). On obtient alors un cycle plus court, car les arbres, avec moins de compétition, poussent plus vite en circonférence.
- Cas 2 « RACB » : Ayant observé des mortalités qui différaient entre nos modalités « RACB » et « TEM » nous avons décidé d'appliquer ces taux de mortalité à notre « Référence 1500 tiges ». Ceci permettra d'avoir un peuplement initial proche de notre modalité « RACB ». Pour ce cas, nous avons une première intervention qui permet d'atteindre 1395 arbres (93% de survie à 5 ans). L'itinéraire suivi est le même que dans le cas 1.
- Cas 3 « TEM » : Avec le même principe que le « Cas 2 », nous avons appliqué la mortalité observée en modalité « TEM ». Nous avons donc une première intervention qui permet d'atteindre 345 arbres (23% de survie à 5 ans). L'itinéraire a été adapté à ce cas de forte mortalité, on a alors un cycle beaucoup plus court, car le peuplement est de qualité « médiocre » (trop peu de compétition pour former de beaux fûts).
- Cas 4 « TEM, références » : Le taux de mortalité étant extrême pour notre modalité témoin (77%), nous avons décidé de tester un autre cas. Ce cas reprend le taux de mortalité moyen observé sur d'autres sites des réseaux expérimentaux équivalents PILOTE ou ALTER, dans des contextes similaires (plantations de Chêne sessile, envahies par la molinie). Nous avons donc une première intervention qui permet d'atteindre 1170 arbres (78% de survie). L'itinéraire appliqué est celui du cas 1.

Un résumé des cas étudiés est présenté tableau 4 et tous les itinéraires utilisés sont présentés en annexes 6a, 6b, 6c, 6d et 6e.

Tableau 4 : Résumé des différents paramètres utilisés pour les modélisations des peuplements pour chaque modalité.

	Référence (Citeaux)	« Référence 1500 tiges » (Citeaux 1500)	« RACB » (RACB)	« TEM » (TEM)	« TEM Références » (TEM ref)
Liste d'arbres	Citeaux	Citeaux	Citeaux	Citeaux	Citeaux
Itinéraire	Guide Chêne continental	Guide du Chêne continental adapté à une plantation	Guide du Chêne continental adapté à une plantation	Guide du Chêne continental adapté à une plantation et à faible densité	Guide du Chêne continental adapté à une plantation
Première intervention	Classique (3600 tiges)	1500 tiges	1395 tiges (93% de survie)	345 tiges (23%)	1170 tiges (78%)

De plus, comme nous avons observé un décalage de la croissance d'un an du témoin par rapport à la modalité « RACB », deux autres cas ont été étudiés. Nous avons posé une hypothèse forte à partir de ce constat : il y aurait un gain de fertilité (de 1 an) lorsqu'on prépare le sol (« RACB »), comparée au témoin (ou une perte de fertilité en témoin). Nous avons donc repris nos cas témoins (cas 3 et 4) et nous avons imposé comme âge du peuplement initial 20 ans (au lieu de 19 ans, pour la même hauteur initiale), décalant ainsi le couple âge/hauteur dominante de 1 an.

## 2. Calcul de la séquestration du carbone dans nos peuplements

Grâce à nos modélisations réalisées avec Sydy, nous avons obtenu des données dendrométriques, aux échelles arbre et peuplement (sur chacun des cas étudiés), sur une révolution forestière complète. A partir de ces données (espèces, diamètre, hauteur...), il est possible de calculer la biomasse (et donc la séquestration du carbone) de nos peuplements en fonction du temps.

Dans un premier temps, le volume des arbres a été calculé avec les tarifs de cubage EMERGE (Deleuze et al., 2014) et compilé dans un script (R) développé par Jean-Pierre Renaud dans le cadre du projet GERBOISE (Landmann et al., 2018).

Dans un second temps, c'est la biomasse au fil du cycle qui a été quantifiée grâce au calcul suivant (Lauvin, 2018) : **Biomasse** = *Volume* \* "Infradensité"

L'infradensité (rapport entre la masse sèche du bois et son volume à l'état vert, saturé en eau) étant définie pour le chêne à 0.55 (Dupouey et al., 2000 ; Loustau et al., 2004).

Enfin, la séquestration du carbone a été quantifiée sur la durée de la révolution complète à partir de la biomasse totale (avec le même script R que cité précédemment).

## VII. Modélisation de carbone organique du sol

## 1. Présentation et initiation du modèle

Un début de modèle de la dynamique du carbone lors du stade juvénile (sur 5 ans) a été construit par Delphine Derrien (UR BEF, INRA de Nancy). Nous l'avons utilisé pour décrire la dynamique du carbone dans le sol. Ce modèle se décline en différentes tranches de profondeurs (OL-10cm, 10-30cm et 30-60cm) et intègre deux compartiments de carbone organique : labile, qui se décompose rapidement et stable. Pour simuler la dynamique du carbone organique sur 5 ans, nous avons utilisé comme point initial (avant coupe et plantation), le COS de nos forêts mûres (supposé correspondre à la forêt avant plantation de nos dispositifs). Ce point nous permet d'avoir le carbone du sol dans notre système avant plantation, dans des conditions d'équilibre.

## 2. Fonctionnement du modèle : entrées et sorties

### a) Les entrées

Les entrées ont été définies par les apports de carbone provenant de la litière des Chênes et de la végétation concurrente.

- Les biomasses de litières aériennes des jeunes plants de chêne (modalité « RACB » et « TEM ») ont été estimées en considérant que la biomasse foliaire représente 80% de la biomasse aérienne totale à ce stade.
- Les apports de biomasse aérienne (et racinaire) de la végétation concurrente ont été estimés à partir des relevés de recouvrement pour chaque groupe d'espèces (voir annexe 7).
- Pour le peuplement mature, la litière aérienne est estimée à partir de la surface terrière du peuplement avant la coupe finale par une relation logarithmique (équation du projet GERBOISE, Landmann et al., 2018).
- Pour les apports racinaires des jeunes plants et du stade mature, nous avons fait l'hypothèse qu'ils étaient équivalents à ceux de la litière aérienne (d'après Mao et al. 2019).
- Le turn-over des litières a été décidé de façon que la totalité des litières de chênes (aérienne ou souterraine) alimentent le sol chaque année. Pour ce qui est des litières de végétation concurrente, la partie aérienne alimente en totalité le sol chaque année. Seulement, pour la partie racinaire, seulement ¼ alimente le sol chaque année (d'après Van Vuuren, Berendse, et De Visser, 1993).

Ensuite, le stock de carbone contenu dans ces biomasses a été défini comme : **Carbone** = *Biomasse* \* 0.5. Puis nous avons considéré que les entrées de litière aérienne n'alimentaient que la couche OL-10cm.

Cette démarche de calcul des biomasses aériennes et racinaires pour les chênes et pour la végétation concurrente a été établie dans le cadre du projet CAPSOL et est détaillée en annexe 7 ainsi que dans le rapport final du projet CAPSOL.

### b) Les sorties

Les sorties ont été définies seulement par la minéralisation du COS. La redistribution du COS au sein du profil a été, pour le moment, définie comme nulle par manque de données (en cours de traitement actuellement).

- La minéralisation a été définie de la manière suivante :

$$\text{Minéralisation} = \text{Carbone}(t) * (1 - e^{(-\text{constante de décomposition} * \Delta t)})$$

La constante de décomposition a été définie pour chacune de nos tranches de profondeur (d'après Balesdent et al., 2018, voir tableau 8).

- Nous avons fait l'hypothèse simplificatrice que le travail du sol n'affectait ni la vitesse de minéralisation, ni la redistribution du carbone sur le profil, par manque de données. Le travail du sol, à ce stade du travail, n'intervient donc que via l'apport de litière.

### 3. Hypothèses de fonctionnement du modèle

Le COS initial a été distribué vers les compartiments stable ou labile, sur les différentes profondeurs, d'après les coefficients donnés par Balesdent et al., en 2018 (voir tableau 8). Ces coefficients ont été calibrés de façon à obtenir un état stationnaire sur 100 ans.

Les rapports aériens et souterrains ont ensuite été distribués vers les compartiments labile ou stable, pour cela des paramètres (hypothétiques à ce stade du travail) ont été définis sur les différentes profondeurs de manière à avoir un système à l'équilibre sur 100 ans (décrit dans le tableau 9). Puis la distribution des apports racinaires s'est faite selon la distribution de la biomasse racinaire donnée par Jobbagy et Jackson (en 2010, pour les écosystèmes de forêts et de prairies voir tableau 9).

Voici (tableau 5) comment a été calculé le carbone sur 5 ans :

Tableau 5 : Calcul du COS effectué dans la modélisation

Temps	Calcul du COS
-1 (avant coupe et plantation)	<i>COS matures</i>
0 (juste avant la plantation)	$COS(t + \Delta t) = COS(matures) - Minéralisation + Apports$
1 à 5 ans	$COS(t + \Delta t) = COS(t) - Minéralisation + Apports$

## VIII. Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été effectuées grâce au logiciel R Studio (RStudio Team, 2015). Des tests de comparaison de moyennes ont été utilisés pour comparer nos stocks de COS ainsi que le développement de nos jeunes plants. Le test utilisé était une ANOVA avec post-hoc Tukey HSD (p-value < 0.05), si nos conditions d'homoscédasticité et de normalité étaient respectées. Si elles ne l'étaient pas, le test utilisé était un Kruskal-Wallis (p-value < 0.05).

Sur les graphiques présentés en partie résultats, les indices (a, b, c...) montrent les différences significatives entre les modalités (pour une p-value < 0.05).

Les numérotations montrent le test statistique utilisé : (1) pour ANOVA et post-hoc TukeyHSD (p-value < 0.05) ou (2) pour Kruskal-Wallis (p-value < 0.05).

L'inscription « n = », représente le nombre d'échantillons.

## IX. En résumé

Nous cherchons à déterminer la dynamique de carbone à l'échelle d'une révolution forestière, à la suite d'une préparation mécanique du sol, pour cela différents points ont été étudiés dans ce rapport (tableau résumé 6).

Tableau 6 : Résumé des différents points étudiés lors du stage

Données...	A partir...	Echelle de temps
Stock de carbone du sol	Mesures : Prélèvements sol	5 ans après plantation (« TEM », « RACB ») 25 ans (« BILLON ») 120 ans (Parcelle matures)
Croissance du peuplement	Mesures : Relevés de hauteur	Sur 5 ans
Biomasse de litière	Mesures : Evolution du couvert du sous-bois (molinie et sous-étage)	Sur 5 ans
Carbone dans la litière racinaire et aérienne	Estimation : De la teneur en carbone dans les litières à partir de mesures réelles	Sur 5 ans
Evolution du stock de carbone du sol	Estimation : Modélisation, à partir de nos mesures réelles	Sur 5 ans
Croissance du peuplement	Estimation : De la croissance (et de la biomasse), à partir de mesures réelles (nos données ou autres dispositifs similaires)	Révolution forestière
Séquestration du carbone dans notre peuplement	Estimation : Selon biomasse et la part en carbone, à partir de mesures réelles	Révolution forestière

# Résultats

## I. Stock de COS

Pour rappel, la modalité « TEM » correspond au témoin de notre dispositif (sans travail du sol), la modalité « BILLON » correspond au dispositif où on a eu un labour en plein, suivi de la mise en place de hauts billons et la modalité « M212 » correspond à la parcelle mature, proche de ces deux modalités. Enfin la modalité « RACB » est la modalité de notre dispositif où on a eu un travail localisé (à l'aide d'un Razherb et d'un CULTI 3B) et la modalité « M1026 » correspond à la parcelle mature proche de la modalité « RACB ».

Le sigle « LP » correspond à « Ligne de plantation », et le sigle « IR » à « Inter-Rang ».

### 1. Stock de COS à l'échelle du profil

#### a) En général

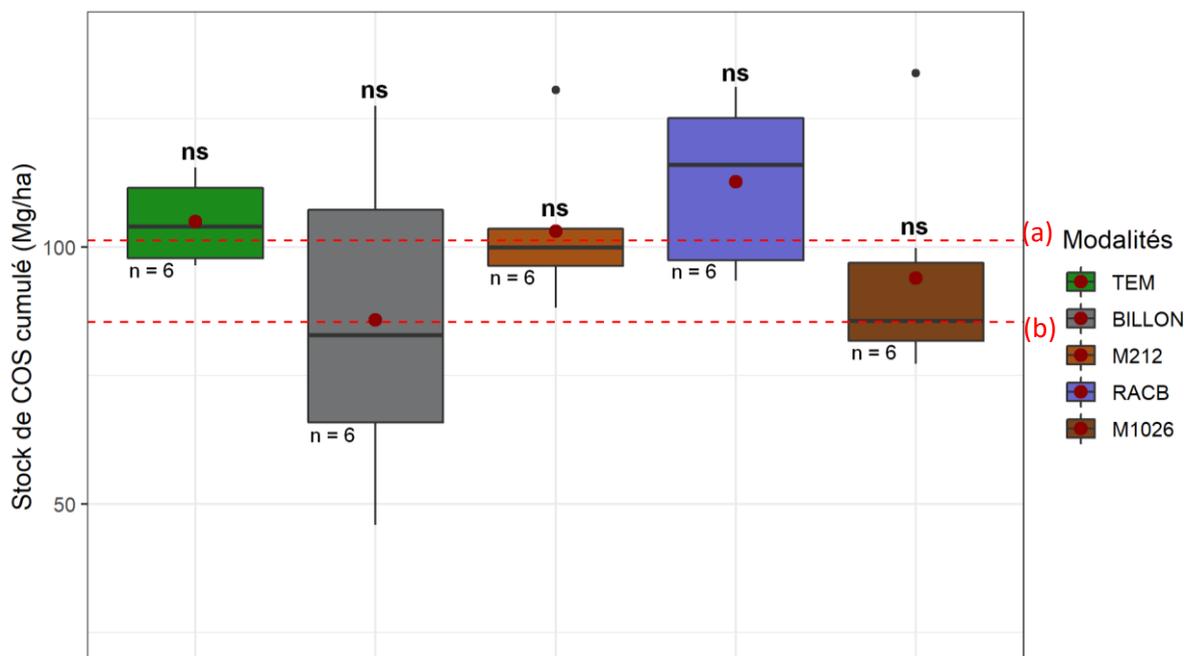


Figure 9: Différences au niveau du stock de COS cumulé (Mg/ha) sur OL-60cm, sans pondération LP/IR (ANOVA,  $p$ -value < 0.05). Points rouges = Moyennes. Traits pointillés rouges = données bibliographiques (a) Ranger et Nys, 2003 : Donnée du carbone sur 65cm pour une forêt de Chêne sessile sur Brunisol (101,3 +/- 26,8 Mg/ha) ; (b) Donnée moyenne du stock de carbone sur 40 cm d'après 4 sites de RENECOFOR pour un contexte similaire (85,38 Mg/ha).

Nous pouvons voir que les stocks moyens (points rouges, figure 9), pour chaque modalité, sont proches de ceux trouvés dans la littérature (a : 101,3 Mg/ha et b : 85,38 Mg/ha). Nous n'observons pas de différence significative entre nos modalités concernant le stock de COS cumulé à l'échelle du profil, lorsque la ligne de plantation (LP) et l'inter-rang (IR) sont confondus. En effet, nous avons en moyenne 105 Mg/ha en « TEM », 85,8 Mg/ha en « BILLON », 103 Mg/ha en « M212 », 113 Mg/ha en « RACB » et 93,9 Mg/ha en « M1026 ».

Seulement, ce graphique nous sert juste à comparer avec la bibliographie et a besoin d'être affiné pour pouvoir comparer convenablement nos modalités. Pour cela nous allons différencier Ligne de Plantation (LP) et Inter-Rang (IR).

### b) Différence entre nos modalités en LP ou en IR

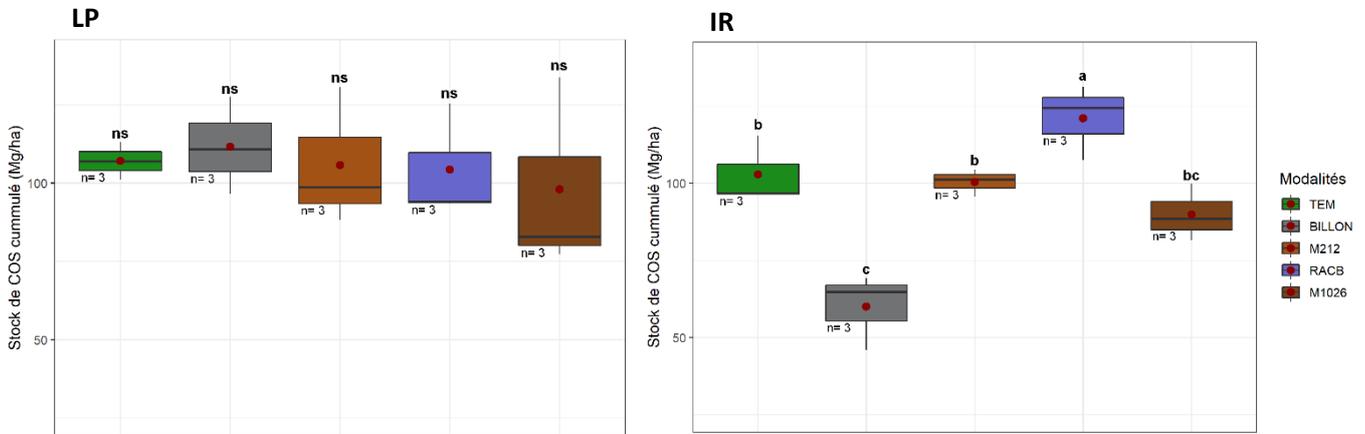


Figure 10 : Différences au niveau du stock de COS cumulé sur OL-60cm (Mg/ha) en LP (gauche) ou en IR (droite), à l'échelle du profil, pour chaque modalité (Kruskal-Wallis, p-value < 0.05). Points rouges = Moyennes.

Sur la figure 10, nous pouvons voir qu'il n'y a aucune différence significative du stock de COS entre nos modalités en LP (à gauche, avec 107 Mg/ha en moyenne en « TEM », 112 Mg/ha en « BILLON », 106 Mg/ha en « M212 », 106 Mg/ha en « RACB » et 98 Mg/ha en « M1026 »).

En IR (figure 10, à droite), nous pouvons observer que la modalité « BILLON » a en général un stock de COS plus bas (60Mg/ha en moyenne) que nos autres modalités et au contraire que la modalité « RACB » a un stock plus élevé (121 Mg/ha en moyenne). Enfin, nous n'observons pas de différences significatives entre le « TEM » (103 Mg/ha en moyenne) et les matures (100 Mg/ha pour la « M212 » et 89,8 Mg/ha pour la « M1026 » en moyenne).

Nous allons maintenant voir ce qui se passe en détail, au niveau de chaque profondeur échantillonnée.

### c) Déclinaison du stock de COS selon les profondeurs

Nous avons voulu voir si les différences, ou non différences, mises en avant dans le point précédent sont toujours observables, ou non, quelle que soit la profondeur étudiée.

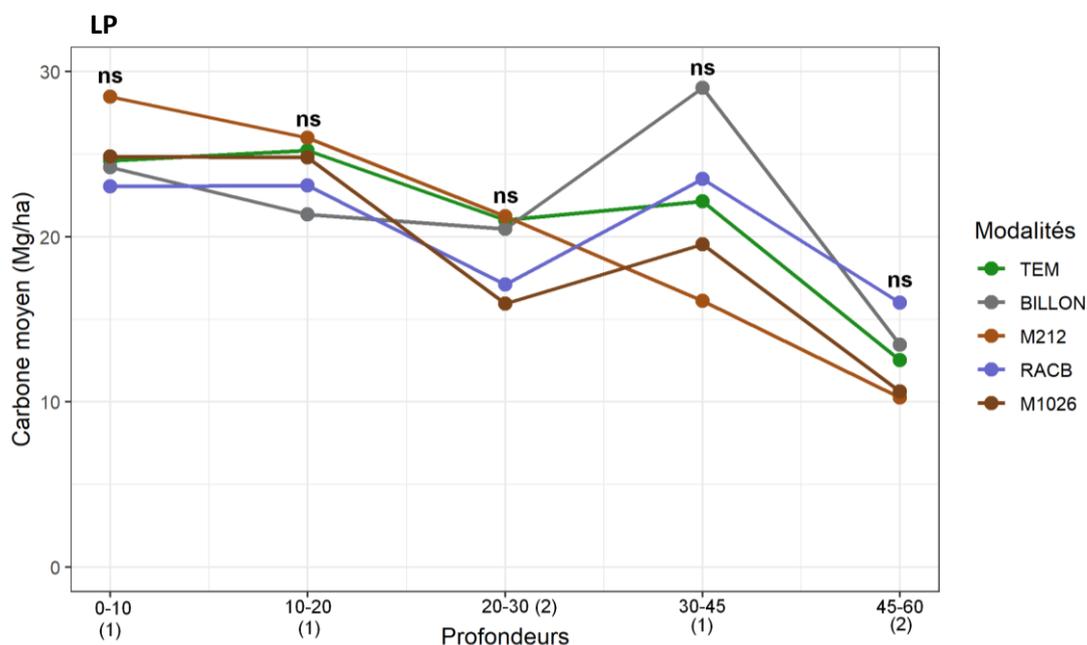


Figure 11 : Différences au niveau du stock de COS moyen (Mg/ha) sur le profil de sol entier (0-60cm) en LP pour chaque modalité.

Au niveau de la ligne de plantation (figure 11), nous pouvons remarquer qu'il n'y a aucune différence significative du stock de COS entre nos modalités, et ce, quelle que soit la profondeur prise en compte.

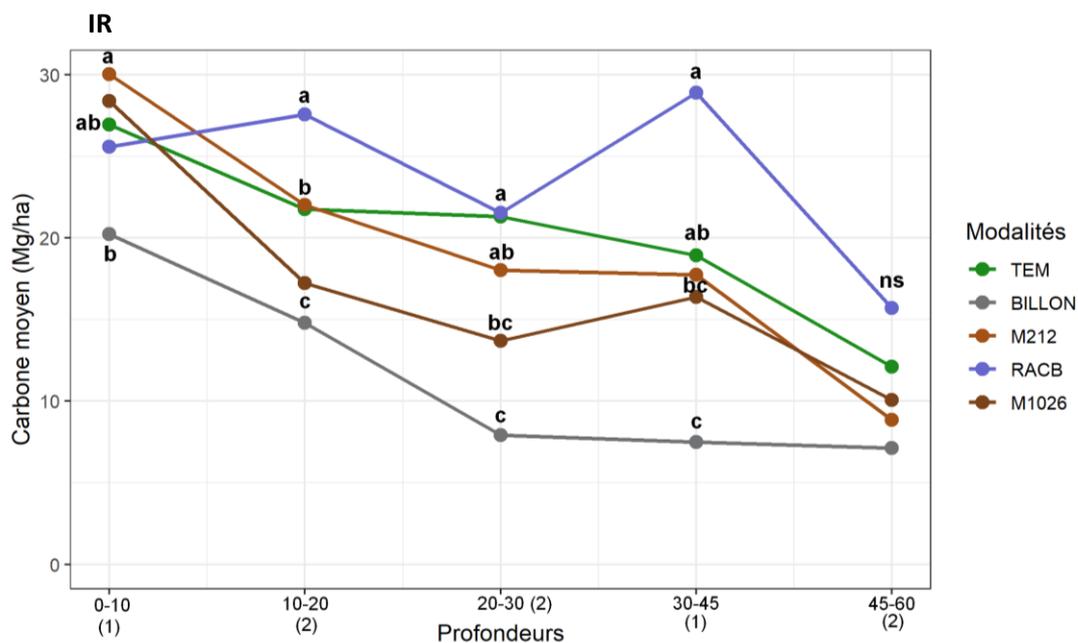


Figure 12 : Différences au niveau du stock de COS moyen (Mg/ha) sur le profil de sol entier (0-60cm) en IR pour chaque modalité.

Au niveau de l'inter-rang (figure 12), nous pouvons observer dans un premier temps que nous n'avons aucune différence significative au niveau du stock de COS entre nos modalités au-delà de 45cm de profondeur. Ensuite, nous pouvons voir que le stock de COS en « RACB » est toujours supérieur à celui dans la modalité « BILLON » (sauf en 0-10cm). Enfin, nos modalités « TEM » et « M212 » semblent aussi avoir un stock de COS supérieur à la modalité « BILLON », tandis que la modalité « M1026 » semble plutôt intermédiaire.

## a) Carbone dans la litière

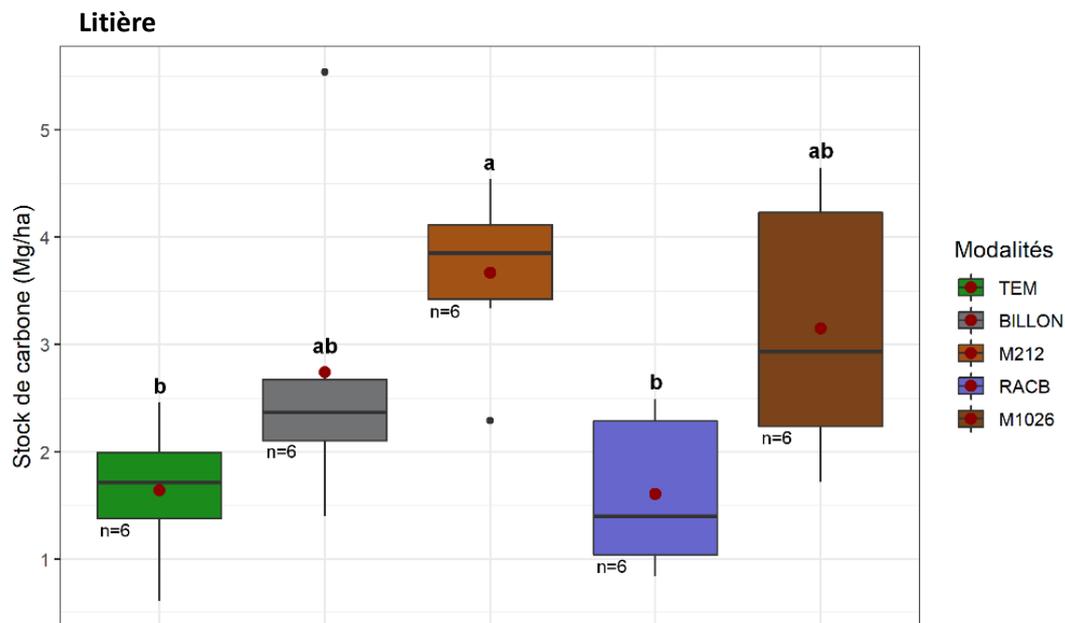


Figure 13 : Différences au niveau du stock de carbone (Mg/ha) au niveau de la litière (OL), LP et IR confondus, pour chaque modalité (Kruskal-Wallis,  $p$ -value < 0.05). Points rouges = Moyennes.

Au niveau de la litière (figure 13), nous pouvons observer en général un stock de carbone plus faible en « TEM » (1,64 Mg/ha en moyenne), ainsi qu'en « RACB » (1,61 Mg/ha en moyenne). Nous observons également des stocks en carbone plus importants au niveau des parcelles matures, en effet pour la « M212 » on a 3,67 Mg/ha en moyenne et pour la « M1026 » 3,15 Mg/ha en moyenne. Mais pour la « M1026 » nos valeurs pour cette modalité semblent très hétérogènes. Enfin, la modalité « BILLON » a un stock intermédiaire (2,74 Mg/ha en moyenne).

Nous allons maintenant encore plus affiner nos résultats en pondérant par la surface travaillée ou non au niveau de nos dispositifs.

### 2. Pondération du stock de COS par la surface travaillée ou non

La pondération du stock de COS par la surface travaillée nous permet de voir l'impact d'un travail généralisé (« BILLON ») ou non (« RACB ») par rapport à nos modalités non travaillées (« TEM » et « M »). Nous allons observer alors un stock de COS général (à l'échelle du dispositif), où la part de surface travaillée, ou non travaillée, est prise en compte.

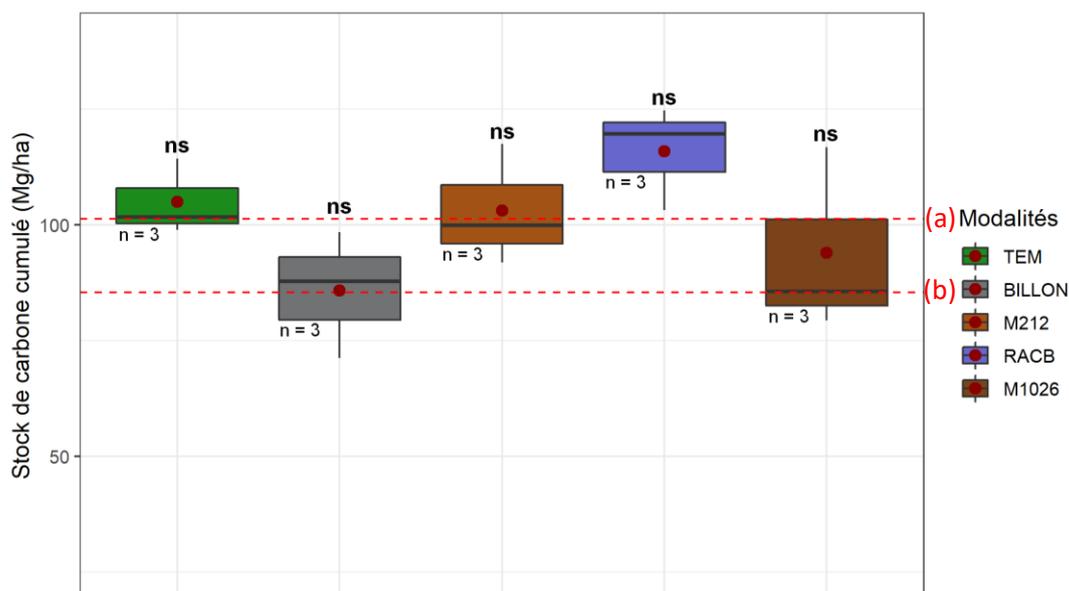


Figure 14 : Différences des stocks de COS à l'échelle du peuplement (pondérés selon LP et IR), entre chaque modalité (ANOVA,  $p$ -value<0.05). Points rouges = Moyennes. Traits pointillés rouges : données bibliographiques (a) Ranger et Nys, 2003 : Donnée du carbone sur 65cm pour une forêt de Chêne sessile sur Brunisol (101,3 +/- 26,8 Mg/ha) ; (b) Donnée moyenne du stock de carbone sur 40 cm d'après 4 sites de RENECOFOR (85,38 Mg/ha).

Nous pouvons voir figure 14 que, malgré la prise en compte de la surface travaillée ou non, nous n'avons aucune différence significative du stock de COS entre nos modalités, au niveau de nos dispositifs (avec un stock moyen de 105 Mg/ha en moyenne pour « TEM », 85,8 Mg/ha pour « BILLON », 103 Mg/ha pour « M212 », 116 Mg/ha pour « RACB » et 93,9 Mg/ha pour « M1026 »). La part de la surface travaillée, ou non, pour ces stocks moyens est présentée figure 15.

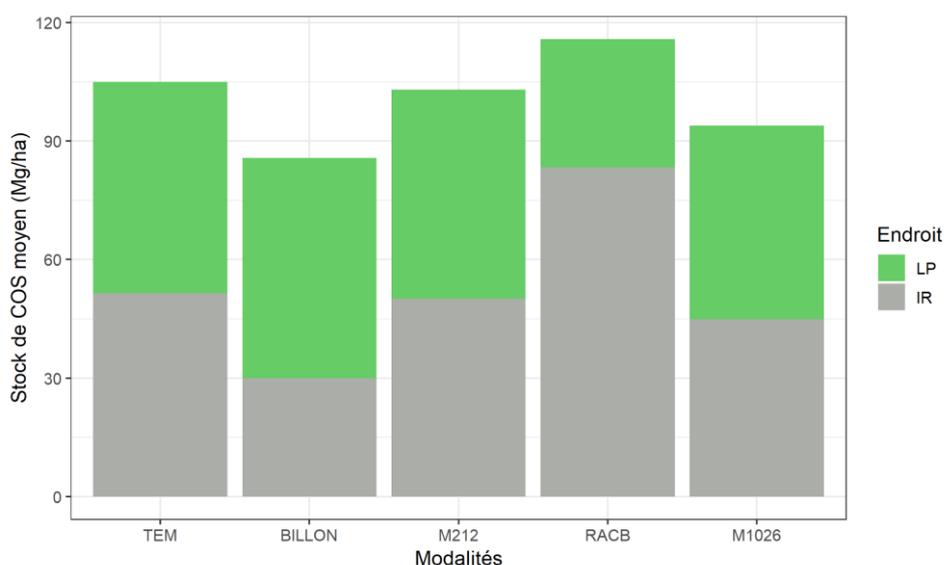


Figure 15 : Part du stock de COS en LP ou en IR, dans le stock pondéré de COS moyen général pour chaque modalité.

Sur la figure 15, la proportion de stock en LP ou en IR pour les modalités « TEM » et « M » ont été définis à 50% (car LP et IR théoriques). Nous pouvons voir que pour la modalité « BILLON », le stock est plus important en LP (55,8 Mg/ha en moyenne contre 30 Mg/ha en IR ; malgré le fait que le travail en

billonnage représente 50% de la surface). Et pour la modalité « RACB », c'est notre stock en IR qui est plus important (83,4 Mg/ha en moyenne contre 32,4 Mg/ha en LP).

## II. Stade juvénile

Nous allons voir dans cette partie l'évolution au stade juvénile (sur 5 ans) de nos peuplements.

### 1. Mortalité juvénile

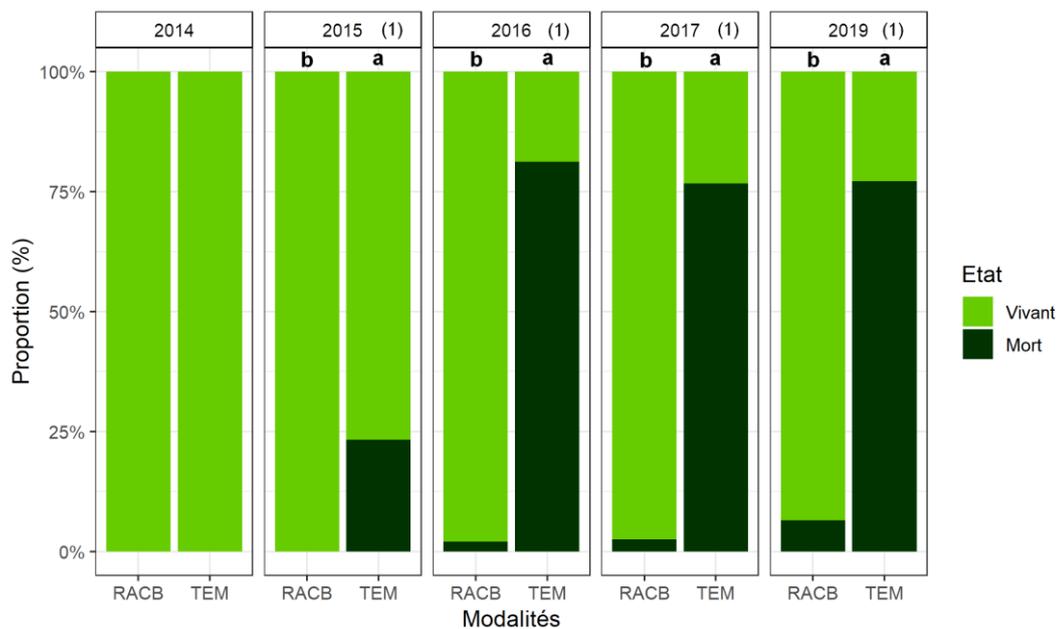


Figure 16 : Différences au niveau de la mortalité observée (%) entre nos modalités, pour chaque année.

Nous observons figure 16, une mortalité très élevée (et significative) du témoin par rapport à la modalité « RACB » et ceci dès 2015. Nous arrivons en effet à 77% de mortalité pour la modalité « TEM » en 2019 contre 7% en « RACB ».

## 2. Croissance au stade juvénile

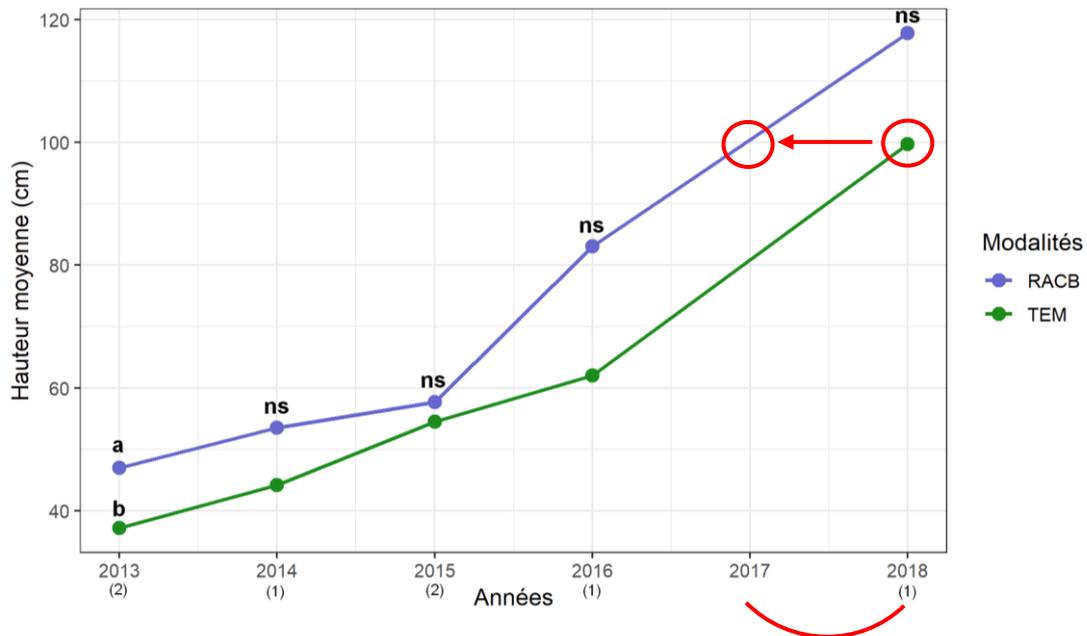


Figure 17 : Evolution des hauteurs moyennes (cm) selon nos modalités, pour chaque saison de croissance.

Nous pouvons voir figure 17, que nous avons seulement une différence significative de la hauteur moyenne entre nos modalités en 2013 (avec des tendances en 2014 et 2016). La modalité « RACB » a néanmoins une hauteur supérieure à la modalité « TEM », quelle que soit l'année (avec par exemple en 2018 une hauteur de 99,7cm en moyenne pour le « TEM » et 117,8cm en moyenne pour « RACB »). De plus, on peut observer, même si les différences sont non significatives, un décalage de 1 an de la croissance sur les dernières années entre le témoin et le « RACB » (voir cercles rouges). En effet la modalité « TEM » a atteint la hauteur moyenne qu'avait la modalité « RACB » en 2017 (environ 100cm) en 2018.

## 3. Evolution du recouvrement de la molinie et des autres accompagnatrices

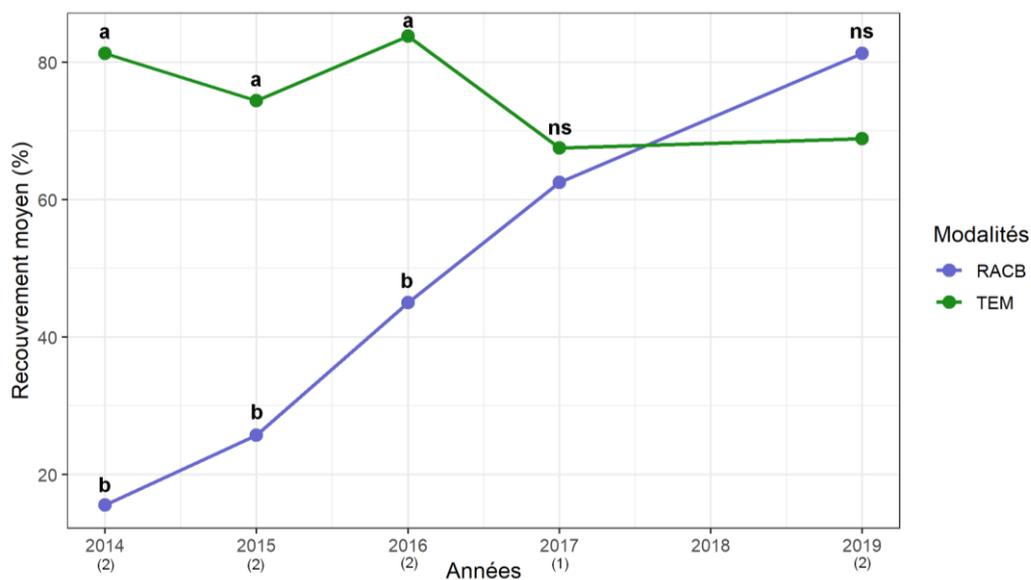


Figure 18 : Evolution du recouvrement moyen (%) observé de la molinie, chaque année pour chaque modalité.

Nous pouvons voir sur la figure 18 que, la modalité « RACB » est efficace contre la molinie sur les 3 premières années (dû au passage du Razherb qui a « décapé » la molinie). Le recouvrement moyen de la molinie passe alors de 15,6% en 2014 à 45% en 2016. Après 3 ans, le recouvrement en « RACB » devient non différent significativement du témoin. En effet nous avons un recouvrement moyen de molinie en « RACB » qui va de 62,2% en 2017 à 81,2% en 2019. Le recouvrement en témoin va lui de 81,2% en 2014 à 68,9% en 2019. Nous allons maintenant voir si cette perte de molinie a été bénéfique pour d'autres espèces.

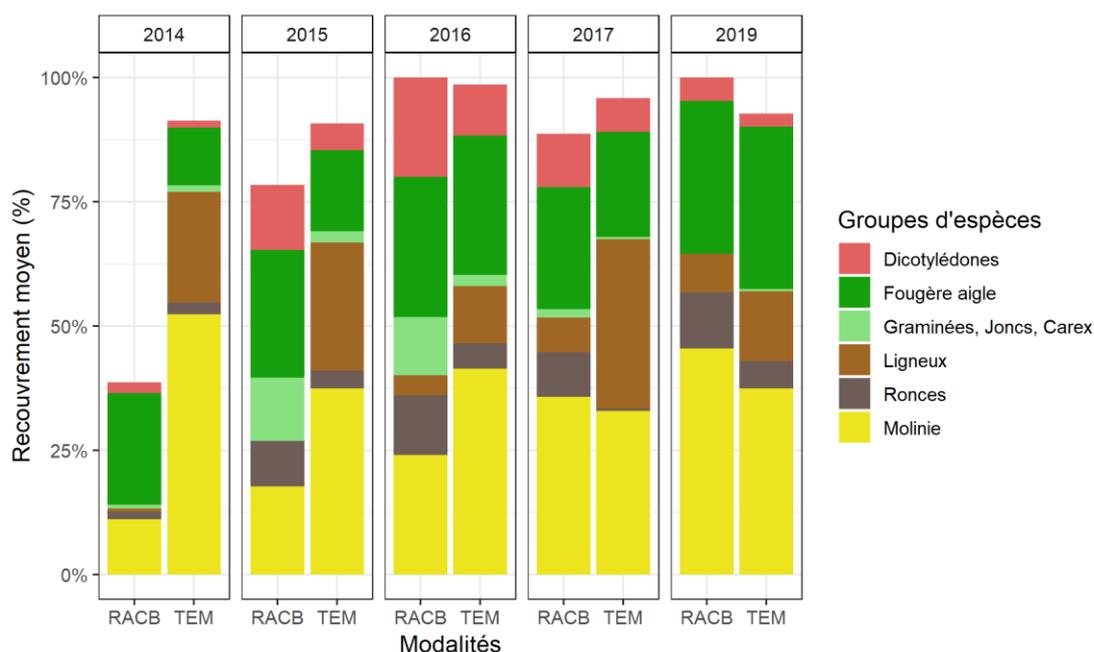


Figure 19 : Evolution du recouvrement global moyen (%) et du recouvrement moyen (%) observé pour nos groupes d'espèces, chaque année pour chaque modalité.

Nous pouvons dans un premier temps voir figure 19, que le passage du Razherb et du CULTI 3B conduit à un recouvrement global faible pour la modalité « RACB » sur la première année (environ 40% en moyenne).

Ensuite, les principaux groupes d'espèces vont varier, selon l'année et selon la modalité, ce qui fait qu'on va avoir une litière qui va différer. En effet en « RACB » on observe ce recouvrement bas de la molinie sur les premières années, mais qui revient au niveau du témoin sur la fin. On peut voir que cet effet dépressif sur la molinie s'accompagne, dans les premières années en « RACB », par le développement d'autres espèces moins compétitrices, telles que la fougère ou d'autres graminées, jonc ou carex. Cet ensemble d'espèces représente environ 60% du recouvrement global en « RACB » en 2015 (contre environ 53% en « TEM ») et environ 76% du recouvrement global en « RACB » en 2016 (contre environ 57% en « TEM »). Sur les dernières années (2017 et 2019), nous retrouvons à peu près les mêmes proportions de molinies ou des autres espèces entre nos modalités (avec par exemple en 2019 environs 55% de recouvrement moyen pour les autres espèces que la molinie pour nos deux modalités).

### III. Evolution des peuplements, sur une révolution forestière complète

Pour rappel, la modalité « Citeaux » renvoie au dispositif en régénération naturelle, la modalité « Citeaux 1500 » au dispositif en régénération naturelle ramené à une densité de plantation (1500 tiges/ha, sans mortalité). La modalité « RACB » au dispositif en régénération naturelle ramené à la densité observée en « RACB » sur notre dispositif à Chaux après 5 ans. La modalité « TEM » au dispositif en régénération naturelle ramené à la densité observée en témoin sur notre dispositif à Chaux après 5 ans. Et la modalité « TEM ref » au dispositif en régénération naturelle ramené à la densité observée en témoin sur les autres dispositifs ALTER et PILOTE. Enfin les modalités « TEM +1 » et « TEM ref +1 » représentent les modalités « TEM » et « TEM ref » respectivement, pour lesquelles nous avons décalé la fertilité de 1 an (commencement du peuplement à 20 ans au lieu de 19 ans).

#### 1. Hauteur dominante de nos peuplements, à l'échelle d'une révolution forestière

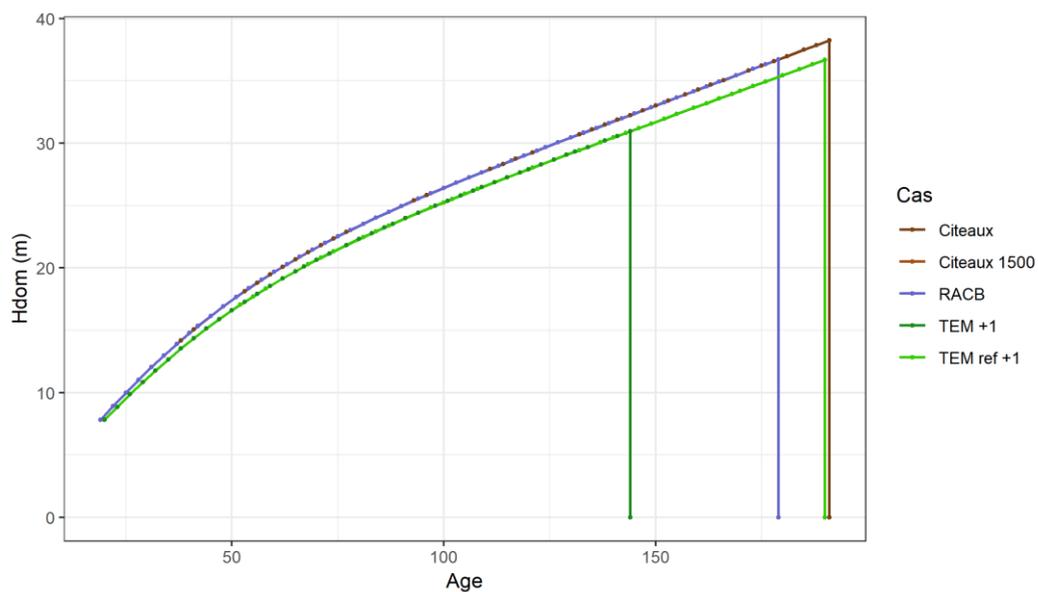


Figure 20 : Hauteur dominante (Hdom, m) sur une révolution forestière complète, pour chaque cas testé.

Nous pouvons voir sur la figure 20, que la hauteur dominante (les 100 plus grands arbres à l'hectare) en fonction du temps pour chacun de nos cas (avec le décalage de fertilité pour les témoins). C'est sur ces courbes de fertilité que va se baser le module Sydy pour l'élaboration des cycles sylvicoles.

## 2. Séquestration du carbone dans nos peuplements, à l'échelle d'une révolution forestière

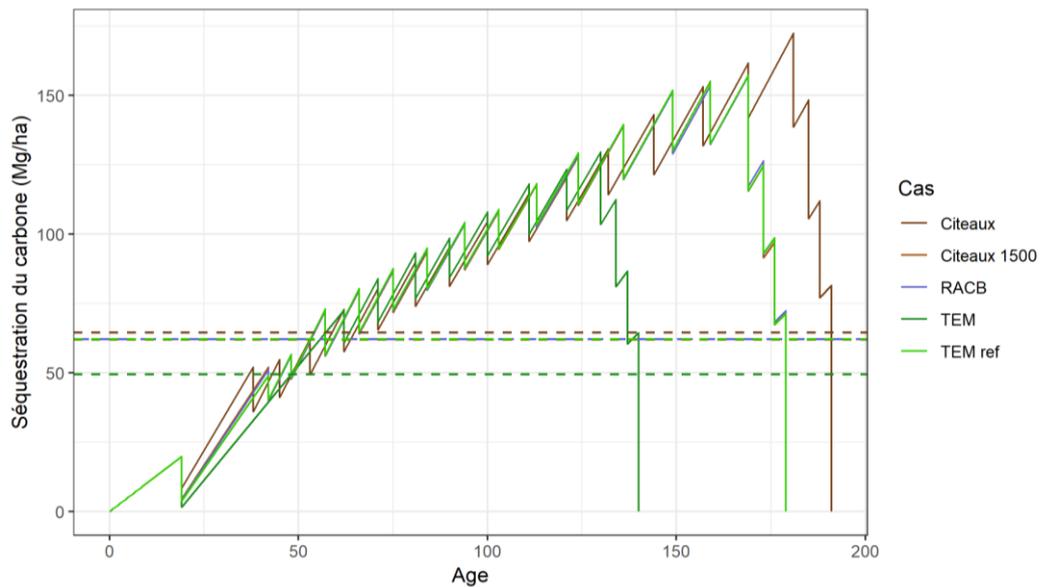


Figure 21 : Séquestration du carbone (Mg/ha), sur une révolution forestière complète, pour chaque cas testé. Lignes pointillés = Séquestration moyenne du carbone dans le temps. Les modalités « Citeaux 1500 », « RACB » et « TEM ref » sont superposées.

Nous pouvons observer (figure 21) un cycle plus court pour le cas témoin avec nos mortalités observées (« TEM »), dû à une qualité médiocre du peuplement. Et à l'inverse un cycle plus long pour la régénération naturelle (« Citeaux »).

Ces différences au niveau de la durée du cycle se répercutent au niveau de la séquestration moyenne du carbone. En effet, celle-ci est plus faible (49,5 Mg/ha, voir tableau 7) pour le cas témoins avec nos mortalités observées (« TEM »), et légèrement plus importante (64,6 Mg/ha) pour la régénération naturelle (« Citeaux »). Les autres cas testés (« Citeaux 1500 », « RACB » et « TEM ref ») ont des séquestrations qui semblent identiques (proche de 62 Mg/ha).

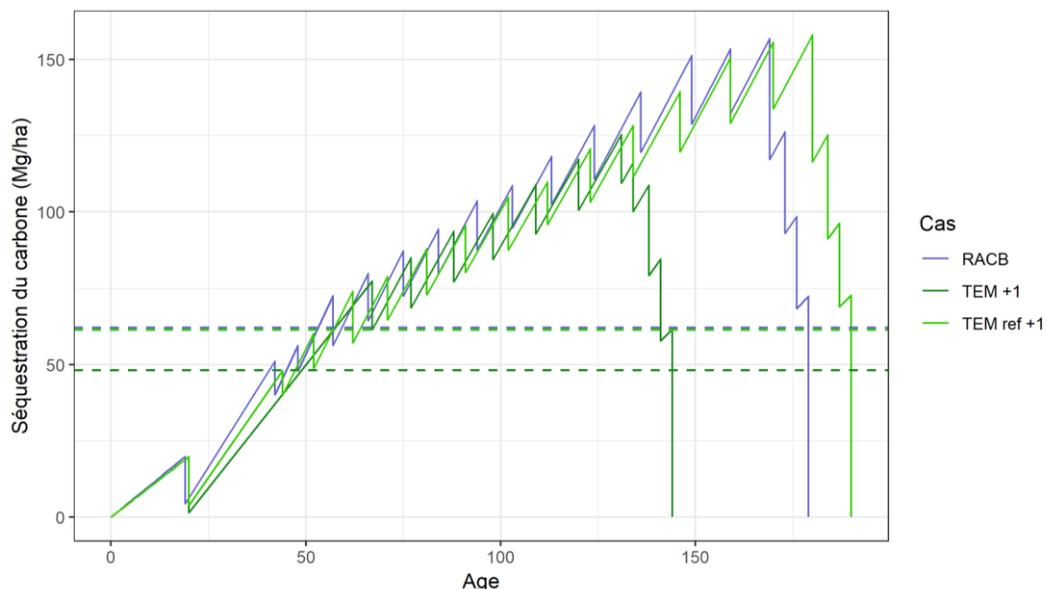


Figure 22 : Séquestration du carbone (Mg/ha), sur une révolution forestière complète, avec hypothèse d'une perte de fertilité pour les cas témoins. Lignes pointillés = Séquestration moyenne du carbone.

Nous pouvons voir figure 22, qu'une perte de fertilité conduit à rallonger le cycle de nos deux cas témoins. On passe alors d'une fin de cycle de 140 ans à 144 ans pour « TEM », et de 179 ans à 190 ans pour « TEM ref ». Seulement la séquestration moyenne varie très peu, et diminue (de 49,5 à 48,2 pour « TEM +1 » et de 62,2 à 61,4 pour « TEM ref +1 », voir tableau 7).

Tableau 7: Caractéristiques des différents cas étudiés

	Arbres départ	Durée cycle (ans)	Carbone moyen (Mg/ha)
<b>Citeaux</b>	16148 (3600)	191	64.6
<b>Citeaux 1500</b>	1500	179	62.0
<b>RACB</b>	1395	179	62.2
<b>TEM</b>	345	140	49.5
<b>TEM ref</b>	1170	179	62.2
<b>TEM +1</b>	345	144	48.2
<b>TEM ref +1</b>	1170	190	61.4

#### IV. Modélisation COS sur 5 ans

Nous allons montrer dans cette partie les paramètres utilisés pour le fonctionnement de notre modèle de dynamique du COS ainsi que les premiers résultats qui en sont sortis.

##### 1. Paramètres utilisés pour notre modèle

Dans cette partie sont présentés les divers paramètres ayant permis d'initier et de faire tourner le modèle, selon les hypothèses qui ont été posées (tableaux 8 et 9).

Tableau 8: Coefficients utilisées pour stabiliser le modèle sur 100 ans et pour définir le taux de minéralisation.

Caractérisation des compartiments						
Horizons	Part relative des compartiments à l'équilibre <sup>a</sup>		Constante de décomposition (an <sup>-1</sup> ) <sup>b</sup>		Temps moyen de résidence TMR (années) <sup>c</sup>	
	labile	stable	labile	stable	labile	stable
<b>0-10 cm</b>	43%	57%	0,167	0,007	6	152
<b>10-30 cm</b>	8%	92%	0,200	0,005	5	212
<b>30-60 cm</b>	11%	89%	0,200	0,002	5	404

<sup>a</sup> Valeurs légèrement modifiées à partir de Balesdent et al., 2018 afin d'être à l'état stationnaire sur le peuplement mature (valeurs Balesdent et al., 2018 : 47-53 / 17-83 / 8-92)

<sup>b</sup> Cet horizon comprend également la couche organique de surface

<sup>c</sup> Valeurs d'après Balesdent et al., 2018

Tableau 9: Coefficients utilisées pour l'allocation des apports vers les différents compartiments, ainsi que pour la distribution des entrées racinaires

Apports			
Horizons	Allocation des entrées racinaire et aérienne vers le compartiment labile <sup>a</sup>	Distribution des entrées racinaires <sup>b</sup>	
		Chêne	Végétation concurrente
0-10 cm	95%	30%	26%
10-30 cm	77%	42%	41%
30-60 cm	90%	28%	33%

<sup>a</sup> Valeurs théoriques

<sup>b</sup> Valeurs d'après Jobbagy et Jackson 2000

Voici, illustré de manière schématique (figure 23), la structure du modèle qui a été utilisé. Sur ce schéma, notre sol se décline selon les 3 couches de profondeurs étudiées (0-10, 10-30 et 30-60cm). Dans ces différentes couches on a des entrées de carbone qui se font via les apports de litière aérienne (couche 0-10cm) et racinaire (0-60cm). Ces différents apports de carbone vont être intégrés soit dans le compartiment stable, soit dans le compartiment labile pour chaque couche. L'appartenance à l'un ou l'autre compartiment fait que le carbone va résider plus ou moins longtemps dans le sol (TMR : Temps Moyen de Résidence), avant d'être dégagé sous forme de CO<sub>2</sub>, par minéralisation.

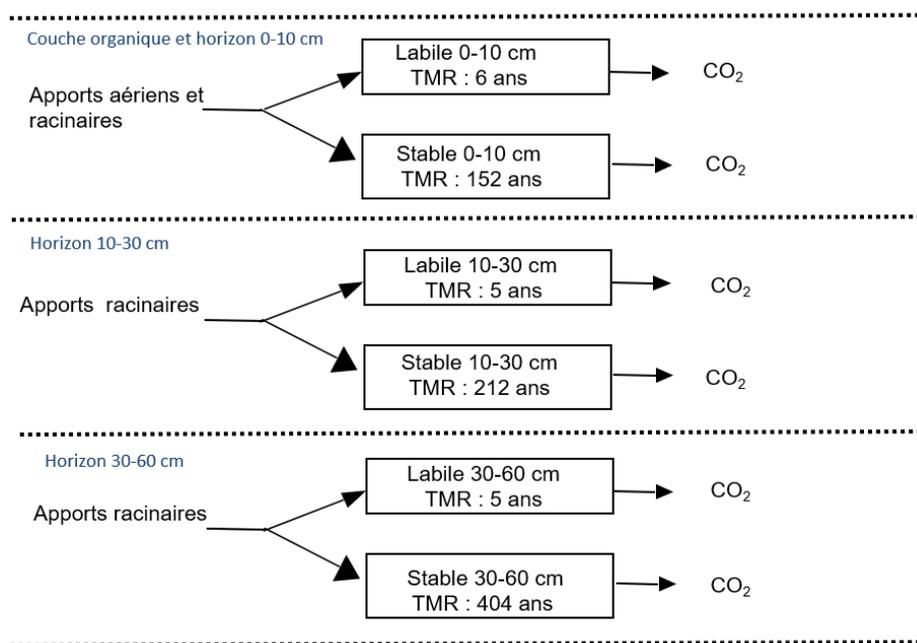


Figure 23 : Structure du modèle. La redistribution liée au travail du sol n'est pas prise en compte dans cette version préliminaire (D. Derrien).

## 2. Apport de litière aérienne et racinaire de la végétation concurrente et des chênes

Sur l'ensemble des graphiques à venir, il est à noter que le point « -1 », sur l'axe des abscisses, correspond à ce qu'était notre dispositif avant la coupe et sa mise en place. Et le point « 0 », sur l'axe des abscisses, représente le moment de la coupe avant la mise en place du dispositif.

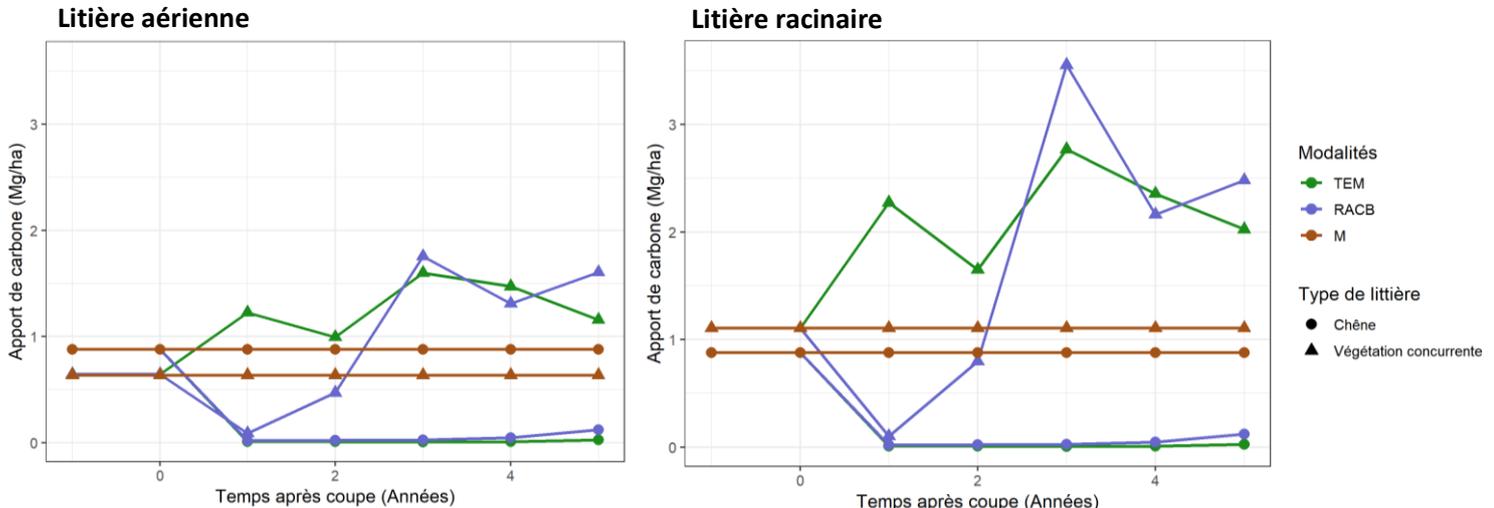


Figure 24 : Apport en carbone (Mg/ha) par la litière aérienne (gauche) ou racinaire (droite) de Chêne (rond) ou de végétation concurrente (triangle), pour chaque modalité.

Nous pouvons voir figure 24 que, les apports provenant des Chênes (ronds) pour nos modalités « TEM » et « RACB » sont plus faibles (0,2 à 0,9 Mg/ha), que ceux provenant de la végétation concurrente (triangles, de 0,2 à 3,5 Mg/ha), car ce sont des petits plants. Comme vu dans la partie « évolution du recouvrement de la molinie », les apports de la molinie pour la modalité « RACB » sont plus faibles sur les 3 premières années. Les apports pour la modalité mature ont, eux, été définis comme stables. On peut voir que pour la végétation concurrente, les apports de litière racinaire sont plus importants (entre 0 et 3,5Mg/ha) que les apports aériens (de 0 à moins de 2 Mg/ha).

## 3. Dynamique du COS sur 5 ans

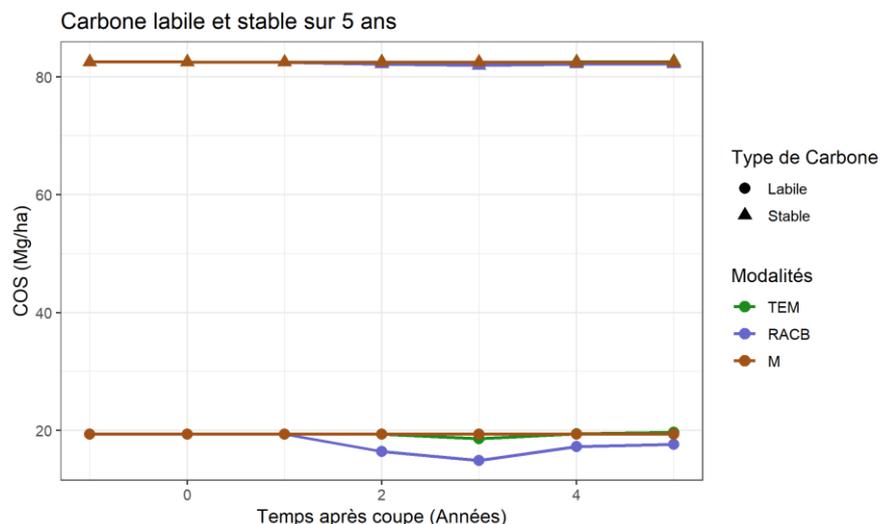


Figure 25 : Simulations du COS (Mg/ha) réalisées par le modèle, pour le compartiment labile (ronds) ou stable (triangles) pour chaque modalité.

A partir de la figure 25, nous pouvons noter une légère diminution du COS labile (ronds) en « RACB », 2 à 4 ans après la mise en place de la plantation (atteignant 14,9 Mg/ha à 3 ans contre 19,4 Mg/ha à 0 ans). Au niveau de la partie stable (triangle) du COS, nous n’observons pas cette diminution. Cette diminution n’est pas ou à peine visible pour la modalité témoin.

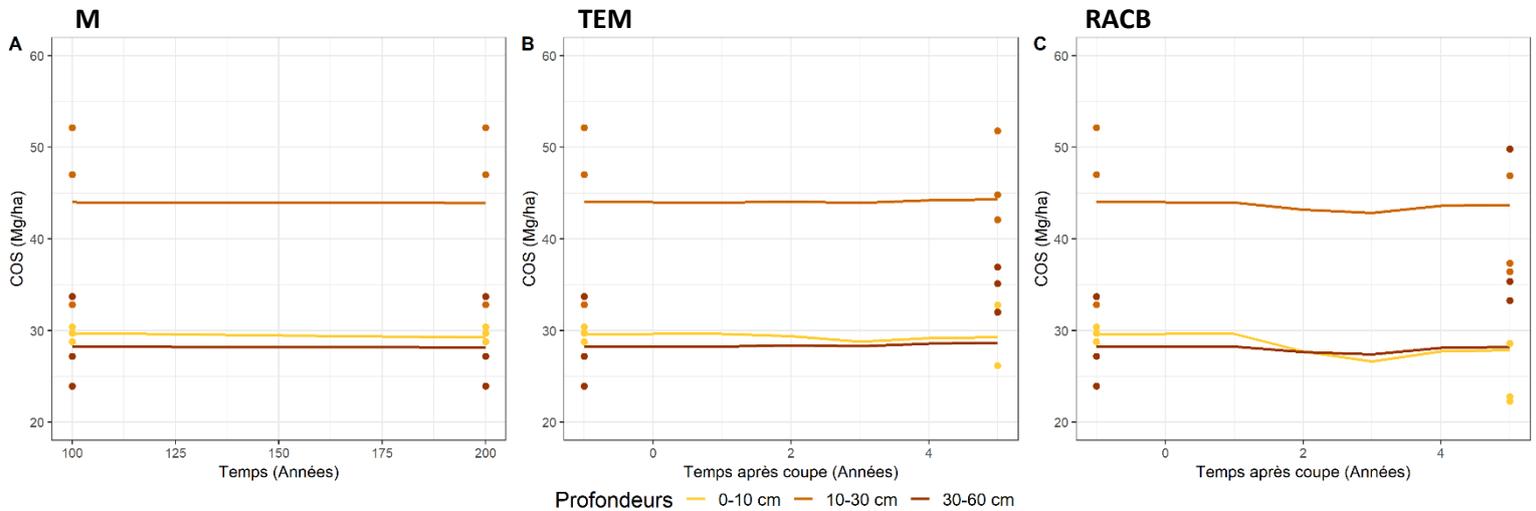


Figure 26 : Simulations du COS (Mg/ha) réalisées par le modèle, pour (A) le stade mature stationnaire (sur 100ans), (B) la modalité témoins (sur 5 ans) et (C) la modalité RACB (sur 5 ans). Les points représentant nos données réelles en LP au stade mature (y=100 ou -1) ou au stade juvénile (à 5 ans) pour les modalités TEM et RACB.

Nous pouvons voir figure 26 la simulation du COS selon différentes profondeurs pour nos 3 modalités (« M », « TEM » et « RACB », sans séparer selon les compartiments). On peut voir ainsi que la diminution du COS en « RACB » (C) est plus importante sur les profondeurs 0-10cm (passant de 29,6 Mg/ha à 26,6 Mg/ha entre 0 et 3 ans, en jaune) et 10-30cm (passant de 43,9Mg/ha à 42,8 Mg/ha entre 0 et 3 ans, en orange). Nous pouvons aussi observer une légère diminution du COS, en 0-10cm (jaune) pour la modalité « TEM » (B). Le carbone en mature (A), a été défini comme à peu près stable sur 100 ans. Cette perte de COS, sans prendre en compte les différentes profondeurs, à 3 ans est de l’ordre de 5% en « RACB » et 0,8% en « TEM », comparés au stade mature.

## Discussion

Dans ce rapport, nous avons analysé l’impact de préparations mécanisées du sol avant plantation de Chênes sessiles, dans un contexte de blocage par la molinie et d’engorgement, sur le bilan de carbone total et donc sur toutes les variables permettant ce bilan.

Pour rappel, voici les hypothèses qui ont été retenues pour ce rapport :

(1) La préparation mécanique des sols permettra de réduire le couvert de molinie, et d’augmenter celui d’autres espèces accompagnatrices moins compétitrices ;

- (2) La préparation mécanique des sols va induire une perte de COS, au moins sur la ligne de plantation ;
- (3) La préparation mécanique des sols va permettre d'améliorer la survie ainsi que la croissance des jeunes plants ;
- (4) L'amélioration de la croissance du peuplement, et donc l'augmentation de la séquestration du carbone dans la biomasse, permettra de compenser la perte potentielle du COS sur le long terme.

Dans un premier temps, nous avons regardé s'il y avait des différences de stocks de COS entre nos modalités (« TEM », « RACB », « BILLON » et « M »).

Pour cela, nous avons voulu voir ces différences de manière générale (à l'échelle du profil). Avec ce point de vue, nous n'avons pas observé de différences significatives du stock de COS entre nos modalités, 5 ans après préparation du sol. Cette absence de différences se retrouvant lorsque l'on prend en compte uniquement la ligne de plantation. Seulement, lorsqu'on regarde cette fois l'inter-rang, nous observons de manière générale un stock de COS plus bas pour la modalité « BILLON » et un stock de COS plus important pour la modalité « RACB ». L'hypothèse (2) est donc partiellement validée, il semble y a un impact du travail du sol qu'au niveau de l'inter-rang.

Le fait que nous n'ayons pas de différence (de manière générale ou sur la ligne de plantation) entre nos parcelles matures (provenant de régénérations naturelles) et nos plantations (« RACB », « TEM », « BILLON »), semble être en désaccord avec la littérature. En effet, on s'attendait à observer une perte systématique de COS en plantations, par rapport aux régénérations naturelles (Augusto, Bureau, et Derrien, 2019 ; Liao et al., 2010). En général, ce résultat s'explique, par une retombée de litière moins importante en plantations, comparées aux régénérations naturelles (-34%), et donc par une incorporation moins importante dans le sol du carbone provenant de la litière (Liao et al., 2010).

En ce qui concerne l'absence de différences entre nos plantations (« RACB », « TEM », « BILLON ») de manière générale et en LP), ceci semble être en accord avec la littérature. En effet l'impact sur le COS, suite à une préparation du sol, semble être très dépendant du site étudié et de la méthode de préparation (notamment au niveau de l'intensité du travail) utilisée (Fonseca, Figueiredo, et Martins, 2014 ; Jandl et al., 2007). Ce non effet de la préparation du sol sur le COS a notamment été trouvé par Hope en 2007, pour une méthode de scarification (1 ou 10 ans après préparation).

Pour ce qui est de la modalité « BILLON », celle-ci ne semble pas avoir d'impact de manière générale ou lorsque l'on regarde uniquement la ligne de plantation, mais en un fort au niveau de l'inter-rang (diminution du COS). En effet, cette différence en IR s'explique par le fait qu'on ait eu un labour en plein (sur toute la parcelle) avant la mise en place des billons, contrairement à la modalité « RACB » qui a un travail localisé. Cette perte de COS dû au labour a notamment été décrite en contexte agricole par Balesdent, Chenu, et Balabane en 2000 (sur 8cm) mais aussi par Trichet et al., en 1999, pour une plantation de Pin maritime (sur 30cm). Seulement, James et Harisson en 2016 ont, eux, décrit que le labour n'avait un effet négatif sur le COS qu'au niveau de la couche organique du sol (O), mais non au niveau de la couche minérale. La mise en place des billons atténue donc l'effet sur le COS en LP, mais le labour l'accentue fortement en IR.

Nous avons également regardé l'impact du travail du sol sur le stock de COS sur nos différentes profondeurs, mettant ainsi en avant que le travail du sol n'a aucun effet sur la ligne de plantation, quelle que soit la profondeur prise en compte. Sur l'inter-rang, nous avons vu que nos modalités « RACB », « TEM » et « M212 » avaient un stock de COS supérieur par rapport à la modalité « BILLON » sur 45cm (la modalité « M1026 » étant intermédiaire). Ces différences s'expliqueraient donc de la même manière que ce qu'on a vu précédemment, sur le profil entier.

Néanmoins, ce travail nous a permis de voir que l'on n'avait aucun impact des modalités sur le stock de COS au-delà de 45cm. Cet impact des outils (notamment du labour), seulement en surface, a déjà été mise en avant dans la littérature. En effet, Angers et al., en 1997 (en contexte agricole) montrent un stock de COS plus important sans préparation du sol sur 0-10cm, comparée à un sol labouré (+14%). Cette différence n'étant pas observable au-delà de 10cm. De même, Lopez-Fando, Dorado, et Pardo en 2007 (en contexte agricole) ont démontré qu'un travail conventionnel (de labour) entraînait baisse

du COS sur 5 cm, mais qu'ils n'observaient pas de différence significative au-delà de cet horizon, 1 an après l'expérience. Ce résultat de perturbation du COS en surface, s'expliquerait par le fait que les outils utilisés peuvent réduire la densité apparente, augmentant alors l'aération et donc l'activité biologique au niveau de la surface (Fonseca, Figueiredo, et Martins, 2014). De plus, une redistribution du COS au niveau du profil est souvent observée. Ceci est dû à l'utilisation d'outils qui peuvent perturber la distribution de la MO au niveau du profil, entraînant alors une accumulation du COS plus en profondeur, au détriment de la surface (Fonseca, Figueiredo, et Martins, 2014 ; Balesdent, Chenu, et Balabane, 2000). Néanmoins, ces résultats dépendraient de l'intensité du travail et donc de l'outil utilisé (Fonseca, Figueiredo, et Martins, 2014).

Au niveau de la couche OL, c'est avant tout le type de litière qui va déterminer le stock de carbone. En effet, nous avons un stock de COS en général plus bas pour nos modalités situées sur des dispositifs jeunes (« TEM », « RACB », « BILLON »). Cela s'explique par le fait que, dans les modalités matures nous avons principalement de la litière de chêne, dans la modalité « BILLON » un mélange entre la litière de chêne et de molinie et pour les modalités « TEM » et « RACB » (plants jeunes) principalement de la litière de molinie et de fougère, qui se décompose moins bien (voir figure 27). La litière de molinie et de fougère est donc de moins bonne qualité que celle du chêne.

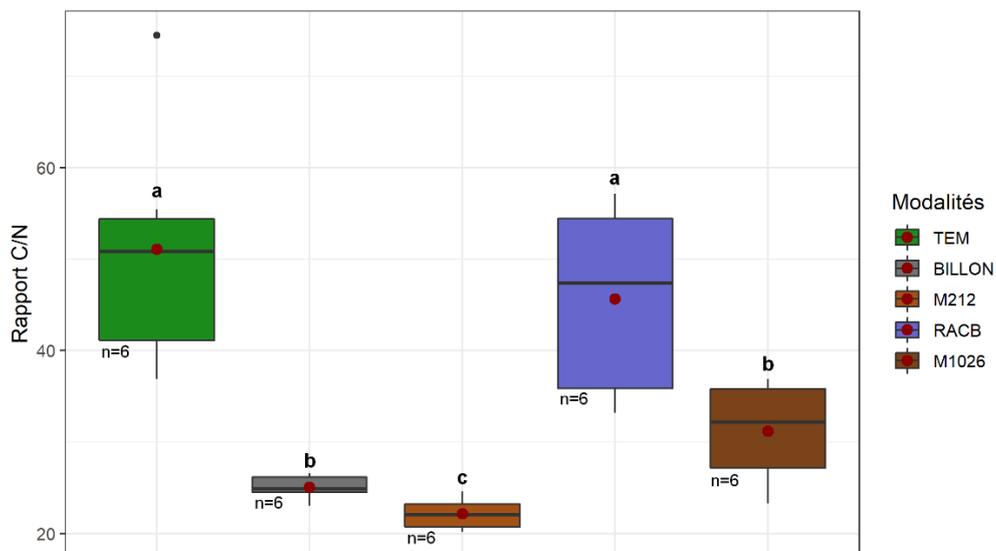


Figure 27 : Différences au niveau du rapport C/N entre nos différentes modalités (Kruskal-wallis,  $p$ -value < 0.05). Points rouges = Moyennes

Ensuite, nous avons affiné cette analyse, pour cela nous avons pris en compte la surface travaillée (LP) ou non (IR) dans notre calcul du stock général de COS. Nous avons donc ainsi obtenu le stock pondéré de COS à l'échelle de nos dispositifs. Avec cette méthode, nous n'avons pas observé de différences significatives du stock de COS entre nos modalités. Un travail localisé (« RACB ») ou non (« BILLON »), ne semble pas avoir d'impact sur le stock de COS, à l'échelle du dispositif entier. Pourtant, sans prise en compte des surfaces, nous avons trouvé un stock de COS en IR plus importante en « RACB » et moins important en « BILLON ». Nous avons donc un effet du travail localisé ou non au niveau de l'inter-rang, mais non à l'échelle du dispositif. Il est également important de noter qu'un travail localisé peut permettre de réduire l'impact l'environnemental, en minimisant la surface travaillée (Collet et al., 2014).

Dans un second temps, nous avons regardé l'évolution de nos dispositifs au stade juvénile. Nous avons alors observé une mortalité extrême au niveau de notre modalité « TEM » (77% à 5 ans), qui n'est pas en accord avec les mortalités observées sur d'autres dispositifs des réseaux PILOTE et ALTER, pour un contexte similaire (22% en moyenne, à 4 ou 5 ans), ainsi qu'avec la littérature (42% de mortalité pour du *Quercus robur* à 3 ans, Löf, Rydberg, et Bolte en 2006). Nous avons donc pour ce dispositif, des conditions (concurrence, engorgement...) extrêmement contraignantes pour nos jeunes plants. Nous avons également observé que la survie était améliorée en « RACB » contrairement au témoin (hypothèse 3 partiellement validée), ceci s'expliquerait par une diminution du stress lors de l'implantation (moins d'eau, sol moins tassé) et par une diminution de la compétition exercée par la molinie (Sanchez-Andrés et al., 2006).

En effet, nous avons pu voir que le couvert de la molinie était significativement plus faible en « RACB », comparé au témoin sur les trois premières années. Ce contrôle de la molinie sur les premières années a permis le développement d'autres plantes moins compétitrices (Ligneux, Graminées, Joncs, Carex et Dicotylédones), qui ont favorisé l'installation des jeunes plants.

Une inversion de flore s'est donc mise en place, dans les premières années pour la modalité « RACB » (hypothèse 1 validée). Ce type de résultat avait déjà été mis en lumière par Collet et al., en 2014, avec après travail du sol, une diminution du couvert de molinie de (passant de 80% à 8%) ainsi que l'apparition d'espèces moins compétitrices.

Seulement, sur les trois dernières années, la composition floristique devient similaire entre le témoin et la modalité « RACB ». Cette recolonisation progressive du milieu par la molinie a aussi été observée par Dassot et al., en 2016.

Quant à la croissance juvénile de notre peuplement, nous n'avons pas observé de différences significatives de la hauteur moyenne entre nos modalités témoin et « RACB » (hypothèse 3 non totalement validée). Ceci est en contradiction avec la littérature. En effet, il a généralement été observé, pour les espèces de Chênes, que la préparation du sol améliorait la croissance (Sanchez-Andrés et al., 2006 ; Projet Alter, 2012, Löf, Rydberg, et Bolte en 2006). Néanmoins, la croissance était améliorée de 10 à 20cm pour la modalité travaillée, comparée au témoin (Löf, Rydberg, et Bolte en 2006 sur 3 ans et Projet Alter, 2012 sur 2 ans), comme ce que nous avons observé dans cette étude (mais sur 5 ans). C'est cette variation de croissance entre notre modalité « RACB » et témoin qui nous a fait poser l'hypothèse d'une fertilité plus faible d'un an en témoin. De plus, dû à cette forte mortalité en « TEM », très peu d'individus ont été mesurés sur cette modalité. Nous avons donc mesuré des arbres qui ont résisté à ces conditions ayant entraîné une forte mortalité, et qui sont donc potentiellement plus vigoureux (et donc ayant une meilleure croissance).

Dans un troisième temps, nous avons voulu voir les différences de séquestration du carbone dans la biomasse entre nos modalités, à l'échelle d'une révolution forestière entière.

Nous avons, dans un premier temps, observé des décalages concernant la longueur des cycles, notamment notre témoin qui avait un cycle plus court que les autres modalités. Ce qui conduisait une séquestration moyenne de carbone plus faible pour notre témoin observé (« TEM »), comparé à notre modalité travaillée « RACB » (-20%). Il est néanmoins à noter qu'on n'observe pas cette différence de séquestration entre notre modalité « RACB » et les témoins des autres sites ALTER et PILOTE. Le travail du sol améliore donc la séquestration du carbone (pour ce qui est de nos dispositifs, avec une mortalité en témoin forte), ou du moins, n'entraîne pas de différence (mortalité en témoin « normale »).

Cette séquestration (en « RACB » ou en « TEM ») reste néanmoins plus basse que celle d'une régénération naturelle.

En effet, Liao et al., en 2010, lors d'une méta-analyse avaient souligné que les plantations entraînaient en général une perte de carbone dans la biomasse (aérienne ou souterraine) de 28%, comparées aux régénérations naturelles. Cette perte de biomasse serait la conséquence d'une production primaire net plus faible (perte de 11%), d'une retombée en litière moins importante (-34%) et d'une rotation

plus courte en plantation, comparée à une régénération naturelle (Liao et al. 2010). Comme nous avons au départ encore moins d'arbres pour notre témoin observé (« TEM »), la séquestration de carbone moins importante observée pour cette modalité (par rapport aux autres modalités) pourrait s'expliquer de la même manière que cette différence entre plantations et régénérations naturelles (moins d'arbres, donc productivité moins importante à l'échelle du peuplement).

Le travail du sol, par l'amélioration de la survie de plants, va donc permettre une meilleure séquestration du carbone dans la biomasse, par rapport à une plantation sans travail du sol.

Ensuite, nous avons pu voir que la perte de fertilité rallonge les cycles de nos modalités témoins, mais n'entraînait a priori pas de changement de la séquestration du carbone dans la biomasse.

Néanmoins, la modélisation par le module Sydy montre des limites. En effet, ce module ne prend pas en compte le recru ligneux (les ligneux arrivant sur notre dispositif sans être plantés, qui peuvent être nombreux dans un peuplement à faible densité). De plus, ce module a été créé pour travailler sur des régénérations naturelles et non sur des plantations ayant une densité plus faible (1500 tiges/ha). Nous avons donc imposé une « fausse » coupe (pour atteindre 1500 tiges/ha) à l'itinéraire classique de sylviculture du chêne continental de façon à simuler nos plantations. On part donc d'une régénération naturelle, ramenée à une densité de plantation, il se peut donc que la croissance avant la première intervention soit sous-estimée.

De plus, le modèle est en limite de validité pour la modalité « TEM » avec sans doute une surestimation de la croissance des chênes par sous-estimation de la croissance d'accrus feuillus naturels non pris en compte dans le modèle.

De plus, ce ne sont pas les données de nos dispositifs qui ont été utilisées pour initier la modélisation, mais les données d'un autre dispositif (situé dans un contexte proche) en régénération naturelle, qui ont été adaptées à nos mortalités observées. Ce sont donc seulement les différences de mortalités entre nos modalités qui ont été utilisées (et donc le nombre d'arbre au départ de la simulation), et non les différences de croissance qui auraient pu nous donner des informations supplémentaires.

Enfin, nous avons étudié, grâce à un début de modèle, la dynamique du COS sur 5 ans, selon nos modalités.

Ce modèle nous a permis d'observer un effet de la préparation du sol (modalité « RACB ») entre 2 et 4 ans après plantation, qui s'est traduit par une faible diminution du COS (-5%, par rapport au stade mature, surtout sur la partie labile de carbone, et surtout en surface sur 0-10cm et 10-30cm). Cette diminution du COS n'étant pas ou moins observable sur notre modalité témoin (-0,8%, par rapport au stade mature). Il serait intéressant de voir si cette perte observée se répercute sur la révolution forestière complète, pour pouvoir ensuite comparer à nos modélisations de la séquestration du carbone dans la biomasse. Pour cela, il nous manque les données des apports en litière racinaire ou aérienne des Chênes ou de la végétation concurrente mais aussi des recrues ligneux, au-delà de 5 ans. Cette comparaison pourrait déterminer un possible effet compensatoire de la séquestration du carbone dans la biomasse. L'hypothèse 4 n'est donc actuellement pas validée.

Seulement, ce modèle est en cours de développement et plusieurs informations ont été, dans un premier temps, négligées par manque de connaissance. Par exemple, nous n'avons pas pris en compte ni la redistribution du carbone sur le profil, ni la possibilité d'une minéralisation différente après travail du sol. En effet, nous avons déjà observé qu'une respiration plus importante se produisait la première année après préparation du sol (pour du labour, Wang et al. 2016). Et nous avons également vu que le flux de CO<sub>2</sub> en surface variait (dépendamment de l'outil utilisé) jusqu'à 30 ans après la préparation mécanisée du sol (Tyree et al., 2006).

Aussi, n'ayant pas de données réelles pour les apports de litière aérienne et racinaire, celles-ci restent des estimations, basées sur des équations mises en place pour d'autres peuplements.

De plus, par manque de plusieurs informations, les coefficients pour l'initiation du modèle ont été adaptés afin d'obtenir une stabilité au stade mature. En effet, les coefficients permettant de distribuer le carbone vers la partie labile ou vers la partie stable ont été décidé arbitrairement. C'est pour cela que ce modèle est toujours en cours d'amélioration, le temps de récupérer les informations supplémentaires pour calibrer et affiner au mieux le modèle et ses paramètres.

## Conclusion et Perspectives

Dans ce rapport, nous avons vu l'impact de préparations mécanisées du sol avant plantation de Chênes sessiles sur la dynamique du carbone, dans un contexte de blocage par la molinie et d'engorgement.

Dans un premier temps, nos résultats montrent l'importance d'un travail localisé, permis par les nouveaux outils (« RACB »), par rapport à un travail en plein réalisé avec une ancienne méthode de labour suivi d'un billonnage (« BILLON »). En effet, un travail localisé ne va pas impacter le stock de COS au niveau de l'inter-rang, contrairement à un travail général.

Dans un second temps, nous avons vu l'importance du travail du sol sur la survie des jeunes plants. En effet, sur notre dispositif nous avons eu une survie très faible (23%) au niveau du témoin, qui a été améliorée par le travail du sol (« RACB »). La croissance du jeune peuplement, elle, n'a pas été impactée significativement par le travail du sol. Nous avons retenu néanmoins une perte de fertilité de 1 an en absence de travail du sol (« TEM », due à une croissance ralentie), contrairement à notre modalité travaillée (« RACB »).

Dans un troisième temps, nous avons observé, grâce à la modélisation de nos peuplements, un gain de séquestration du carbone dans la biomasse (sur une révolution forestière complète), lorsqu'on avait un travail du sol, comparé à notre témoin observé. Mais ce résultat est surtout la conséquence de la faible densité observée pour notre témoin (dû à une mortalité importante), le modèle n'étant pas adapté aux plantations à si faible densité.

Enfin, une modélisation du COS sur 5 ans, nous a permis de mettre en avant une perte de COS entre 2 et 4 ans après préparation du sol (« RACB »), contrairement à notre modalité témoin. Mais ce modèle a besoin d'être mieux ajusté et affiné pour avoir des résultats plus fiables.

Une préparation du sol localisée permet de ne pas impacter le stock de COS au niveau de l'inter-rang, contrairement à un travail généralisé. Cette préparation va permettre également d'améliorer la survie des jeunes plants dans un contexte de blocage par la molinie et d'engorgement. Cette survie plus importante des plants va se traduire *in fine*, par une meilleure séquestration du carbone dans la biomasse du peuplement sur une révolution forestière complète.

En perspective, pour compléter ce projet, l'amélioration du modèle est un point important. En effet celui-ci a besoin d'être étoffé pour obtenir des résultats plus viables. Il faudrait, notamment, continuer ce modèle au-delà de 5 ans pour nos plantations. Pour cela, il nous faudrait les données réelles de nos peuplements, que ce soit la dynamique de la végétation concurrente ou de nos ligneux, de façon à avoir des données d'apport de litière au cours de la révolution forestière.

Des données estimées des apports de litière peuvent être récupérées à partir de nos simulations de peuplement sur Sydy, mais cela n'a pas été entièrement développé pour le moment. De plus, cette simulation sur Sydy montre des limites. Pour l'améliorer, il faudrait, entre autres, nos données réelles de circonférences ou des retombés de litière, mais ces simulations restent tout de même un bon point de départ.

De plus, pour compléter le modèle de la dynamique de carbone, il faut non seulement la redistribution du carbone sur le profil, mais aussi l'impact du travail du sol sur ce paramètre ainsi que sur la minéralisation du carbone. Puisque, pour le moment, le travail du sol dans notre modèle n'influe que sur les apports de litière aérienne ou racinaire.

Bien sûr, continuer à analyser ces dispositifs dans le temps est un point important, de façon à voir l'évolution de tous les paramètres que nous avons étudiés, et aussi pour compléter les modélisations initiées.

Toutes les méthodes de préparation utilisée dans ces dispositifs n'ont pas été étudiées dans ce rapport. Il serait peut être intéressant de faire des analyses de COS et d'analyser plus finement les données de croissance juvénile (que nous avons pour chaque méthode de préparation) sur les méthodes non étudiées. Il est cependant important de noter que ces outils sont analysés dans d'autres études des projets PILOTE et ALTER.

## Bibliographie

- ADEME. « Carbone organique des sols : L'énergie de l'agro-écologie, une solution pour le climat ». 2014.
- Agreste. « Récolte de bois et production de sciages en 2017 ». *Agreste Primeur*. 2018. Vol. 355, p. 1-4.
- Alvaro-Fuentes J., Cantero-Martinez C., Lopez M. V., Arrue J. L. « Soil carbon dioxide fluxes following tillage in semiarid Mediterranean agroecosystems ». *Soil Tillage Res.* [En ligne]. 2007. Vol. 96, p. 331-341. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.08.003> >
- Angers D. A., Bolinder M. A., Carter M. R., Gregorich E. G., Drury C. F., Liang B. C., Voroney R. P., Simard R. R., Donald R. G., Beyea R. P., Martel J. « Impact of tillage practices on organic carbon and nitrogen storage in cool, humid soils of eastern Canada ». *Soil Tillage Res.* 1997. Vol. 41,.
- Augusto P. L., Bureau F., Derrien D. « Séquestration de carbone organique dans les sols forestiers : impacts de la gestion sylvicole ». *Forêt-Entreprise*. 2019. Vol. 245, p. 62-66.
- Balesdent J., Basile-doelsch I., Chadoeuf J., Cornu S., Derrien D., Fekiacova Z., Hatté C. « Atmosphere-soil carbon transfer as a function of soil depth ». *Nature* [En ligne]. 2018. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0328-3> >
- Balesdent J., Chenu C., Balabane M. « Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage ». *Soil Tillage Res.* 2000. Vol. 53,.
- Baude M., Baudry M., Dussud F.-X., Duvernoy J., Bultheel C., Vailles C. « Chiffres clés du climat ». *I4CE Inst. Clim. Econ.* 2019.
- Belloq M. I., Smith S. M., Doka M. E. « Short-term effects of harvest technique and mechanical site preparation on arthropod communities in jack pine plantations ». *J. Insect Conserv.* 2001. Vol. 5, p. 187-196.
- Berch S. M., Battigelli J. P., Hope G. D. « Responses of soil mesofauna communities and oribatid mite species to site preparation treatments in high-elevation cutblocks in southern British Columbia ». *Pedobiologia (Jena)*. [En ligne]. 2007. Vol. 51, Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2006.12.001> >
- Besancenot J., Thibaudon M. « Changement climatique et pollinisation ». *Rev. Mal. Respir.* [En ligne]. 2012. Vol. 29, n°10, p. 1238-1253. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.rmr.2012.07.007> >
- Bolte A., Löf M. « Root spatial distribution and biomass partitioning in *Quercus robur* L. seedlings : the effects of mounding site preparation in oak plantations ». *Eur J For. Res* [En ligne]. 2010. p. 603-612. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1007/s10342-010-0360-9> >
- Boutte B. « Suivi national "Plantation de l'année" : Bilan des campagnes 2015 et 2016 ». *Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation*. 2017. p. 1-22.
- Burger J. A., Aust W. M., Zedaker S. M., Torbert J. L. « LOBLOLLY PINE ( *PINUS TAEDA* L. ) PLANTATION RESPONSE TO MECHANICAL SITE PREPARATION IN THE SOUTH CAROLINA AND GEORGIA PIEDMONT Thesis submitted to the Faculty of the TO MECHANICAL SITE PREPARATION ». *Forestry*. 2003.
- Collectif APN. « Carbone et Forêts (Réflexions et propositions sur la diversité des filières carbonées) ». *FS, FRAPNA, LPO-CoRA*. 2015. p. 58.
- Collet C., Ulrich E., Dassot M., Wehrle L., Gibaud G., Girard Q., Richter C., Piat J., Duez F., Koller R. « Light-weight mechanical tools for site preparation in planted or naturally regenerated forest stands ». *For. An Int. J. For. Res.* 2014. p. 38.
- Commissariat général au développement durable EFSE. « La séquestration de carbone par les écosystèmes en France ». *La Doc. Française*. 2019. p. 102.
- Dassot M., Collet C., Girard Q., Gibaud G., Piat J., Wehrle L., Richter C., Fraysse J.-Y. « Méthodes alternatives de contrôle de la molinie et de préparation du sol pour réussir les plantations ». *RDV Tech*. 2016. Vol. 50, p. 8.
- Deleuze C., Morneau F., Renaud J.-P., Vivien Y., Rivoire M., Santenoise P., Longuetaud F., Mothe F., Hervé J.-C., Vallet P. « Estimer le volume total d'un arbre, quelles que soient l'essence, la taille, la sylviculture, la station ». *RDV Tech*. 2014. Vol. 44, p. 22-32.
- Deroubaix G., Vial E., Cornillier C. « CYCLES DE VIE DES PRODUITS A ». *CIAG*. 2011.
- Dhôte J.-F., Leban J.-M., Saint-André L., Derrien D., Zhun M., Loustau D., Achat D., Roux A., Schmitt B. « Leviers forestiers en termes d'atténuation pour lutter contre le changement climatique aux horizons 2020, 2030, 2050 ». 2016.
- Dufour-Kowalski, Courbaux, Dreyfys, Meredieu, Coligny. « Capsis : an open software framework and community for forest growth modelling To cite this version : HAL Id : hal-00930711 Capsis : an open software framework and community for forest growth modelling ». 2012. Disponible sur : <

- <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0140-9> >
- Dupouey J.-L., Pignard G., Badeau V., Thimonier A., Dhôte J., Nepveu G., Bergès L., Augusto L., Belkacem S. « Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises ». *Rev. For. Fr. LII*. 2000.
- Ehlers W., Kopke U., Hesse F. « PENETRATION RESISTANCE AND ROOT GROWTH OF OATS IN TILLED AND UNTILLED LOESS SOIL ». *Soil Tillage Res.* 1983. Vol. 3, n°1983, p. 261-275.
- FBF-FBIE. « Forêt & Bois, une filière d'avenir pour la France ». 2014.
- Fonseca F., Figueiredo T. De, Martins A. « Carbon storage as affected by different site preparation techniques two years after mixed forest stand installation ». *For. Syst.* 2014. Vol. 23, n°1, p. 84-92.
- Gleizes O. « Le carbone au CNPF, un savoir-faire au service des forestiers et des entreprises responsables ». *Forêt-Entreprise*. 2019. Vol. 245, p. 7-15.
- Harnist S., Duez F. « Le projet PILOTE ». 2017.
- Hope G. D. « Changes in soil properties , tree growth , and nutrition over a period of 10 years after stump removal and scarification on moderately coarse soils in interior British Columbia ». *For. Ecol. Manage.* [En ligne]. 2007. Vol. 242, p. 625-635. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.01.072> >
- IGN. « Le mémento : inventaire forestier ». 2018.
- Inventaire Forestier National. « LA FORÊT FRANÇAISE : UN PUIITS DE CARBONE ? SON RÔLE DANS LA LIMITATION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ». *l'IF*. 2005. Vol. 7, p. 8.
- James J., Harrison R. « The Effect of Harvest on Forest Soil Carbon : A Meta-Analysis ». *Forests* [En ligne]. 2016. Disponible sur : < <https://doi.org/10.3390/f7120308> >
- Jandl R., Lindner M., Vesterdal L., Bauwens B., Baritz R., Hagedorn F., Johnson D. W., Minkinen K., Byrne K. A. « How strongly can forest management influence soil carbon sequestration ? ». *Geoderma* [En ligne]. 2007. Vol. 137, p. 253-268. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.09.003> >
- Jobbagy E. G., Jackson R. B. « THE VERTICAL DISTRIBUTION OF SOIL ORGANIC CARBON AND ITS RELATION TO CLIMATE AND VEGETATION ». *Ecol. Appl.* 2000. Vol. 10, n°April, p. 423-436.
- Jonard M., Nicolas M., Coomes D. A., Caignet I., Saenger A., Ponette Q. « Science of the Total Environment Forest soils in France are sequestering substantial amounts of carbon ». *Sci. Total Environ.* [En ligne]. 2017. Vol. 574, p. 616-628. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.028> >
- Lacey S. T., Brennan P. D., Parekh J. « Deep may not be meaningful : Cost and effectiveness of various ripping tine configurations in a plantation cultivation trial in eastern Australia ». *New For.* 2001. Vol. 21, p. 231-248.
- Landmann G., Augusto L., Bilger I., Cacot E., Deleuze D., Gosselin M., Pousse N. « GERBOISE : Gestion raisonnee de la recolte de bois-energie ». *Paris : ECOFOR, Angers : ADEME*. 2018. p. 7.
- Lauvin D. « Les modèles de croissance : un outil de la recherche transférable à la gestion ? ». 2018.
- Liao C., Luo Y., Fang C., Li B. « Ecosystem Carbon Stock Influenced by Plantation Practice : Implications for Planting Forests as a Measure of Climate Change Mitigation ». *PLoS One* [En ligne]. 2010. Vol. 5, n°5,. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010867> >
- Löf M., Dey D. C., Navarro R. M., Jacobs D. F. « Mechanical site preparation for forest restoration ». *New For.* [En ligne]. 2012. Vol. 43, n°September,. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9332-x> >
- Löf M., Rydberg D., Bolte A. « Mounding site preparation for forest restoration : Survival and short term growth response in *Quercus robur* L . seedlings ». *For. Ecol. Manage.* [En ligne]. 2006. Vol. 232, p. 19-25. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.05.003> >
- Londo A. J., Mroz G. D. « Bucket Mounding as a Mechanical Site Preparation Technique in Wetlands ». *NJAF*. 2001. Vol. 18, n°1, p. 7-13.
- Lopez-Fando C., Dorado J., Pardo M. T. « Effects of zone-tillage in rotation with no-tillage on soil properties and crop yields in a semi-arid soil from central Spain ». *Soil Tillage Res.* [En ligne]. 2007. Vol. 95, p. 266-276. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.01.005> >
- Loustau D., Déqué M., Ciais P., Davi H. « Rapport final du projet CARBOFOR : Volet C ». 2004.
- Mao Z., Derrien D., Didion M., Liski J., Eglin T., Nicolas M., Jonard M., Saint-André L. « Modeling soil organic carbon dynamics in temperate forests with Yasso07 ». *Biogeosciences*. 2019. Vol. 16, p. 1955-1973.
- Meredieu C., Bailly A., Berthelot A., Cailly P., Danjon F., Fiquepron J., Girard S., Marron N., Merzeau D., Orazio C., Pastuszka P., Raffin A., Richter C., Riou-Nivert P. « Définir une densité de plantation : comment et pour quels objectifs ? ». 2019.
- Moguédec G. Le, Dhôte J. « Fagacées : A tree-centered growth and yield model for sessile oak ( *Quercus* Fagacées : a tree-centered growth and yield model for sessile oak ( *Quercus petraea* L .) and common beech ( *Fagus sylvatica* L .) ». *Ann. For. Sci.* [En ligne]. 2011. n°March 2012,. Disponible sur : <

- <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0157-0> >
- Newmaster S. G., Parker W. C., Bell F. W., Paterson J. M. « Effects of forest floor disturbances by mechanical site preparation on floristic diversity in a central Ontario clearcut ». *For. Ecol. Manage.* [En ligne]. 2007. Vol. 246, p. 196-207. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.03.058> >
- ONF. *Guide des sylvicultures continentales*. [s.l.] : [s.n.], 2008. 456 p. ISBN : 9782842073213.
- Örlander G., Egnell G., Albrekston A. « Long-term effects of site preparation on growth in Scots pine ». *For. Ecol. Manage.* 1996. Vol. 86, p. 27-37.
- Pellerin S., Bamière L., Launey C., Martin R., Schiavo M., Angers D., Augusto L., Balesdent J., Basile-Doelsch I., Ballassen V., Cardinael R., Cécillon L., Ceschia E., Chenu C., Constantin J., Darroussin J., Delacote P., Delame N., Gastal F., Gilbert D., Graux A.-I., Guenet B., Houot S., Klumpp K., Letort E., Litrico I., Martin M., Menasseri S., Mézière D., Morvan T., Mosnier C., Roger-Estrade J., Saint-André L., Sierra J., Théron O., Viaud V., Grateau R., Le Perchec S., Savini I., Réchauchère O. « Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût? Synthèse du rapport d'étude ». *INRA*. 2019. p. 114.
- Picard O., Legay M., Landmann G., Berger F., Riou-Nivert P., Guillet P., Rebendenne M., Peyron J.-L., Bailly A., Bellin I., Reyssat B., Duvernoy J., Mondon S. *L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change*. [s.l.] : [s.n.], 2014. 184 p. ISBN : 9782110097668.
- Piedallu C., Perez V., Gégout J.-C., Lebourgeois F., Bertrand R. « Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l'Epicéa, du Sapin, du Hêtre et du Chêne sessile en France ». *Biol. Ecol.* 2009. p. 27.
- Pischedda D. *Guide pratique : Pour une exploitation forestière respectueuse des sols et de la forêt « PROSOL »*. [s.l.] : [s.n.], 2009. 113 p.
- Projet Alter. « Des alternatives aux herbicides : l'exemple des plantations en station acide ». 2012.
- Quibel E. « EFFET DES PRATIQUES DE CONTRÔLE DE LA VEGETATION CONCURRENTE EN CONTEXTE DE PLANTATION FORESTIERE SUR LES STOCKS DE CARBONE ET LA QUALITÉ DES MATIERES ORGANIQUES DES SOLS ». 2015. p. 38.
- Ranger J., Nys C. « La qualité des sols forestiers français ». 2003. Vol. 10, n°1, p. 263-286.
- Rossi M. « Le carbone forestier en mouvements ». 2015.
- Sanchez-Andrés R., Sanchez-Carrillo S., Benitez M., Sanchez-Lopez A. « Tillage induced differential morphometric responses and growth patterns in afforestation with *Quercus ilex* ». *Soil Tillage Res.* [En ligne]. 2006. Vol. 90, p. 50-62. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.08.005> >
- Self A., Ezell A. W., Rowe D., Schultz E. B., Hodges J. D. « Effects of Mechanical Site Preparation on Growth of Oaks Planted on Former Agricultural Fields ». *Forests* [En ligne]. 2012. Vol. 3, p. 22-32. Disponible sur : < <https://doi.org/10.3390/f3010022> >
- Tan X., Chang S. X. « Soil compaction and forest litter amendment affect carbon and net nitrogen mineralization in a boreal forest soil ». *Soil Tillage Res.* [En ligne]. 2007. Vol. 93, p. 77-86. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.03.017> >
- Thiffault N., Cyr G., Prigent G., Jobidon R., Charette L. « Régénération artificielle des pessières noires à éricacées : effets du scarifiage, de la fertilisation et du type de plants après 10 ans ». *For. Chron.* [En ligne]. 2004. Vol. 80, n°February,. Disponible sur : < <https://doi.org/10.5558/tfc80141-1> >
- Timbal J., Gelpe J., Garbaye J. « Étude préliminaire sur l'effet dépressif de la molinie (*Molinia caerulea*) sur la croissance et l'état mycorhizien de semis de chêne rouge (*Quercus rubra*) ». *Ann Sci.* 1990. Vol. 21,.
- Trichet P., Jolivet C., Arrouays D., Loustau D., Bert D., Ranger J. « Le maintien de la fertilité des sols forestiers landais dans le cadre de la sylviculture intensive du pin maritime Revue bibliographique et identification des pistes de recherches ». *Etude Gest. des Sols*. 1999. Vol. 6, n°4, p. 197-214.
- Tyree M. C., Seiler J. R., Aust W. M., Sampson D. A., Fox T. R. « Long-term effects of site preparation and fertilization on total soil CO<sub>2</sub> efflux and heterotrophic respiration in a 33-year-old *Pinus taeda* L. plantation on the wet flats of the Virginia Lower Coastal Plain ». 2006. Vol. 234, p. 363-369. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.07.021> >
- Van Vuuren Mm., Berendse F., De Visser W. « Species and site differences in the decomposition of litters and roots from wet heathlands ». 1993.
- Wang J., Wang H., Fu X., Xu M., Wang Y. « Forest Ecology and Management Effects of site preparation treatments before afforestation on soil carbon release ». *For. Ecol. Manage.* [En ligne]. 2016. Vol. 361, p. 277-285. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.11.022> >
- Wehrlen L. « Quels outils pour mieux maîtriser la végétation forestière concurrente ? ». *Forêt Wallonne*. 2013. Vol. 122,.
- Yoro G., Godo G. « Les méthodes de mesure de la densité apparente ». 1990. p. 7.

## Webographie

- Forêt Privée Française. « Les 3 S ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <https://www.foretpriveefrancaise.com/n/les-s/n:562> >
- FranceTerme. « Commission d'enrichissement de la langue française (France) ». [s.l.] : [s.n.], 2013. Disponible sur : < [http://www.gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheoqlf.aspx?id\\_fiche=26540328](http://www.gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheoqlf.aspx?id_fiche=26540328) > (consulté le 20 mai 2018)
- GUIDEnR Bois-Energie. « Avantages de la construction en bois ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <http://www.boisenergie.guidenr.fr/avantages-construction-bois.php> >
- INPN. « FR4312005 - Forêt de Chaux ». [s.l.] : [s.n.], 2014. Disponible sur : < <https://inpn.mnhn.fr/site/natura2000/FR4312005> >
- RENFOR. « Projet CAPSOL ». In : Proj. en cours [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], 2017a. Disponible sur : < <https://www6.inra.fr/renfor/Projets-en-cours/CAPSOL> > (consulté le 20 août 2019)
- RENFOR. « Réseau PILOTE ». In : Réseaux d'expérimentation [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], 2017b. Disponible sur : < <https://www6.inra.fr/renfor/Reseaux-d-experimentation/PILOTE#> > (consulté le 20 août 2019)
- RENFOR. « Réseau ALTER ». In : Réseaux d'expérimentation [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], 2017c. Disponible sur : < <https://www6.inra.fr/renfor/Reseaux-d-experimentation/ALTER> > (consulté le 20 août 2019)
- RStudio Team. « RStudio: Integrated Development for R ». RStudio, Inc. 2015. Boston.  
URL <http://www.rstudio.com/>.

## Bilan personnel

Ce fût une expérience assez longue mais très intéressante. J'ai pu participer à l'étude depuis presque le début (analyse de sol, mesures de terrain, mise en place des différents modèles, analyses statistiques, exploitation des résultats, discussion...), en étant dans une équipe à l'écoute, bienveillante et très sympathique. Travailler dans l'équipe RDI de l'ONF de Dole m'a permis d'en apprendre plus sur le domaine forestier en général. J'ai pu participer à diverses missions (mesure de hauteur d'arbre, marquage, mesure de circonférences, analyses pédologiques...), hors du cadre de mon stage, qui m'ont permis de découvrir de facettes que je ne connaissais pas ou peu de ce milieu. J'ai pu assister également à la restitution du rapport 4/1000 à Paris, c'était une expérience très enrichissante. J'ai aussi travaillé avec des personnes autres que l'équipe de Dole (comme Delphine Derrien), qui m'ont appris des choses avec lesquelles je n'étais pas forcément familières (dont le modèle carbone).

J'ai vraiment pris ce sujet à cœur, j'étais assez fière de pouvoir travailler sur un projet depuis quasiment le début, jusqu'à quasiment la fin. Et j'étais aussi fière de voir qu'on avait confiance en ce que je faisais.

Il y a pleins de choses que je ne maîtrisais pas forcément au début de mon stage (exploitation forestière, modèle de croissance, modèle de carbone...), mais qui sont maintenant plus claires pour moi, notamment grâce à toutes les personnes qui m'ont aidée et aiguillée tout le long de mon stage.

C'était donc un sujet qui m'a grandement intéressé du début, à la fin, et grâce auquel j'ai beaucoup appris sur ce que je peux faire, et ce que je voudrais faire plus tard (notamment en discutant avec un peu toutes les personnes que j'ai rencontré durant ce stage.

## Remerciements

Je ne suis pas du tout forte en remerciements etc... mais. Je tiens bien sûr à remercier toute l'équipe RDI de Dole, que ce soit Emila, Christine, aux Didier, Mickaël, Salomé, Anthony ou encore Stephen, avec qui j'ai passé de bon moment. Je leur remercie de m'avoir fait confiance, de m'avoir amené sur plusieurs terrains et de m'avoir appris pleins de chose sur leur domaine de travail.

Je remercie également toutes les autres personnes que j'ai pu rencontrer, au cours des divers terrains que j'ai pu réaliser ou au sein du pôle de Dole.

Je remercie bien sûr mon copain, ma maman et mes chats pour le support mental tout le long de ce stage...

## Annexe 1 : Compte rendu d'installation et plans des parcelles 212 et 1026 (p1/5)

OFFICE NATIONAL DES FORETS /MGVF-INRA  
Pôles Recherche Développement Innovation de Dole et de Fontainebleau (39 et 77)  
Mission Gestion de la Végétation Forestière (MGVF/INRA)

AR\_2013\_16\_02

### COMPTE RENDU D'INSTALLATION D'UN CHANTIER TEST

Fiche rédigée le 29/12/2014, par Didier FRANCOIS ([didier.francois@onf.fr](mailto:didier.francois@onf.fr)), Erwin ULRICH ([erwin.ulrich@onf.fr](mailto:erwin.ulrich@onf.fr)),  
Fabien DUEZ ([fabien.duez@nancy.inra.fr](mailto:fabien.duez@nancy.inra.fr), MGVF/INRA),  
François CONRARD ([francois.conrard@onf.fr](mailto:francois.conrard@onf.fr)) et Bruno CHOPARD ([bruno.chopard@onf.fr](mailto:bruno.chopard@onf.fr))

Contacts locaux : ROMANSKI Michel : 03 84 82 09 21 (chef d'UT), TERROUX Alain : 03 84 81 23 74 (Agent patrimonial P 212) et BRUEZ Sylvain : 03 84 37 66 81 (Agent patrimonial P 1026)

#### TITRE :

Projet PILOTE (alternatives aux herbicides en forêt) : l'exemple des plantations en station hydromorphe, acide et envahies par la molinie.

#### OBJECTIF POURSUIVI :

L'objectif du projet est de développer et de tester à un niveau opérationnel des méthodes mécanisées permettant de s'affranchir du blocage aussi bien de la régénération par la molinie, que d'un sol tassé et hydromorphe en accord avec les contraintes de gestion actuelles, économiques et environnementales. L'effet de deux doses d'amendements calco-magnésien sur le développement de la molinie est testé en sus.

Ce développement passe par l'étude des effets de la compétition exercée par la végétation accompagnatrice sur les jeunes plants.

#### LOCALISATION :

- Département : JURA (39)	- DT Franche-Comté
- Commune : OUR (212) et GERMIGNEY (1026)	- Agence du Jura
- Forêt domaniale de Chauv	- Unité Territoriale Chauv
- Parcelles : 212 et 1026 (cf. plan de situation en <b>annexe 1</b> )	
- Région IFN : Sylvoécocorégion C 51 Saône, Bresse et Dombes	
- Coordonnées GPS de la parcelle 212 : N 47°04'40.7''	E 05°39'36.2'' (précision 7-8 m)
- Coordonnées GPS de la parcelle 1026 : N 47°04'52.3''	E 05°40'57.0'' (précision 7-8 m)
- Coordonnées Lambert II étendue : parcelle 212 (852413, 2236409) ; parcelle 1026 (853831, 2236500)	

#### STATION :

- Altitude : 250 m	- Exposition : plateau
- Données climatiques (Aurelhy 1981-2010) : T. moy. <b>10,7 °C</b> ; Préc. moy. <b>1134 mm</b> ; Préc. (mois 6,7 et 8) : <b>255 mm</b>	
- Facteurs limitants : hydromorphe, faible niveau trophique, molinie ; lorsque le sol est sec en été il est très dur en surface.	
- Roche mère : formations plio-quadernaires	
- Formation superficielle : limons sur cailloutis	
- Sol : brun acide à pseudogley superficiel à moyennement profond (20 à 45 cm)	
- Humus : mull acide pH = 4 à 5	
- Végétation : mésoacidiphile (molinie)	
- Profondeur : supérieure à 60 cm	- Hydromorphie : 20 à 45 cm
- Catalogue de référence : catalogue des stations du massif de CHAUX.	

#### PEUPEMENT FORESTIER :

Ancienne futaie de chêne exploitée hiver 2008/2009 (212) et hiver 2010/2011 (1026).  
Depuis, la parcelle a été envahie à presque 100% par de la molinie, dont la hauteur moyenne maximale est de 150 cm.  
Il existe des cloisonnements d'exploitation avec un entre-axe de 19 m, orientés perpendiculairement à la route forestière (cf. plans des dispositifs en annexes 2 et 3).

#### OBJET DU CHANTIER TEST :

Tester plusieurs méthodes mécanisées d'élimination du blocage de la molinie et de travail du sol en profondeur pour diminuer et si possible éliminer le blocage lié partiellement au tassement et surtout à l'hydromorphie. L'effet de ces travaux mécanisés est étudié sur de jeunes plants de chêne sessile (parcelles 212 et 1026) et pin sylvestre (parcelle 1026) en plantation. Parallèlement, l'efficacité technico-économique est analysée afin d'en déduire des itinéraires opérationnels.

**Parcelle 212 : 1 facteur** est étudié, le « **type d'itinéraire** », avec **5 modalités** :

- **TEMOIN**, témoin sans aucune intervention, **environ 1 hectare**,

## **Annexe 1 : Compte rendu d'installation et plans des parcelles 212 et 1026 (p2/5)**

- **RAZHERB SEUL**, décapage de la molinie avec une partie du système racinaire à environ 10 cm de profondeur sur une largeur de 150 cm ; la biomasse a été déposée entre les bandes travaillées ; ce travail a été fait avec un nouvel outil développé récemment par Claude Becker (enveloppe déposée à l'INPI), **environ 0,25 hectare**,
- **RAZHERB+TECHNIQUE 3B AVEC MINIPELLE**, décapage de la molinie, comme dans la modalité « RAZHERB SEUL », suivi par un travail en profondeur du sol avec le sous-soleur multifonction, en technique 3B (Ulrich et al., 2014), **environ 2 hectares**,
- **RAZHERB+TECHNIQUE 3B AVEC TRACTEUR et OUTIL CULTI 3B**, décapage de la molinie, comme dans la modalité « RAZHERB SEUL », suivi par un travail du sol en profondeur du sol avec l'outil CULTI 3B monté sur le 3 points arrière d'un tracteur (description de cette technique dans Ulrich et al., 2014), **environ 2 hectares**,
- **OUTIL MERI CRUSHER+TECHNIQUE 3B AVEC TRACTEUR et OUTIL CULTI 3B**, travail du sol à faible profondeur avec le broyeur MERI CRUSHER monté sur le 3 points arrière d'un tracteur, suivi par un travail du sol en profondeur du sol avec l'outil CULTI 3B monté sur le 3 points arrière d'un tracteur, **environ 2 hectares**.

**Parcelle 1026 : 1 facteur** est étudié, le « type d'itinéraire », avec **3 modalités** :

- **RAZHERB SEUL**, **environ 0,2 ha**,
- **RAZHERB+TECHNIQUE 3B AVEC MINIPELLE**, **environ 2,44 ha**,
- **RAZHERB+TECHNIQUE 3B AVEC TRACTEUR et OUTIL CULTI 3B**, **environ 2,37 ha**.

### **Variables de jugement**

- survie des plants,
- croissance en hauteur totale,
- estimation de la présence de la molinie ou d'autres plantes par inventaire sur placeaux.

### **DISPOSITIF :**

**Parcelle 212 (cf. plan du dispositif en annexe 2, un cloisonnement d'exploitation toutes les 5 lignes) :**

- **RAZHERB SEUL** : 3 premières lignes de plantation, à côté de la limite avec la parcelle 213 ; ces lignes sont suivies par un cloisonnement d'exploitation ;
- **TEMOIN** : 10 lignes de plantation suivantes ;
- **RAZHERB+TECHNIQUE 3B AVEC MINIPELLE** : 20 lignes de plantation suivantes ;
- **RAZHERB+TECHNIQUE 3B AVEC TRACTEUR et OUTIL CULTI 3B** : 20 lignes de plantation suivantes ;
- **OUTIL MERI CRUSHER+TECHNIQUE 3B AVEC TRACTEUR et OUTIL CULTI 3B** : 20 lignes de plantation suivantes.

**Amendement calco-magnésien** (cf. plan du dispositif en annexe 1, réalisation : 12 août 2014) :

Chaque modalité est coupée en tiers. Le tiers le plus éloigné de la route reçoit un amendement de 7 tonnes, le tiers du milieu de 3,5 tonnes et le tiers le plus proche de la route reste sans amendement. Seulement les 10 dernières lignes de plantation (modalité RAZHERB+BROYAGE AVEC TRACTEUR et OUTIL MERI CRUSHER) ont reçu une dose de 11,5 et 7 tonnes/ha, au lieu de 7 et 3,5 tonnes. Ce traitement a été réalisé à partir du 15<sup>ème</sup> cloisonnement. Voir en **annexe 14** le compte-rendu du traitement.

**Parcelle 1026 (cf. plan du dispositif en annexe 3, un cloisonnement d'exploitation toutes les 5 lignes) :**

- **RAZHERB SEUL** : que 2 lignes au milieu de la modalité suivante,
- **RAZHERB+TECHNIQUE 3B AVEC MINIPELLE**, 18 lignes,
- **RAZHERB+TECHNIQUE 3B AVEC TRACTEUR et OUTIL CULTI 3B**, 19 lignes.

### **MATERIALISATION :**

Les modalités sont matérialisées sur le terrain par des piquets d'angle accolés au grillage des deux côtés de la parcelle. Les zones de traitement calco-magnésien sont matérialisées par des piquets d'angle dont la tête a été peinte en bleu

La zone de mesures de chaque placeau est centrée sur les 3 lignes centrales de la bande entre cloisonnements, et matérialisée par 4 piquets dont la tête a été peinte en blanc

### **Facteurs contrôlés :**

- **génétique et origine des plants** : (1) les plants de chêne sessile de la parcelle 212 sont de la même provenance QPE 203, éduqués chez deux pépiniéristes (Naudet : 5000 plants de taille 30/80 et 2250 plants de taille 50/80 ; Wadel : 320 plants de taille 30/80) ; les plants de chêne de la parcelle 1026 ont les mêmes provenances et viennent du pépiniériste Wadel. Dans le fond de la parcelle 1026 (plus caillouteux en surface), 2750 pins sylvestres ont été plantés (provenance PSYVG002), qui ont été éduqués par la pépinière Naudet.
- **histoire sylvicole** : tous les plants ont été installés dans la parcelle 212 du 18 mars - 2 avril 2014 et la parcelle 1026 du 17 mars au 3 avril 2014, par la même équipe de planteurs, et pour le chêne selon le même schéma (ITTS : 3 CHS 02, 1500 plants/ha, distance entre les lignes de plantation de 4 m et entre les plants sur chaque ligne 1,50 m). Pour le pin sylvestre le schéma de plantation a été le même que pour les chênes 1500 plants/ha (4m x 1,50 m)

Surface totale du dispositif : 12,74 ha (7,34 ha pour la parcelle 212 et 5,4 ha pour la parcelle 1026 partie)

## Annexe 1 : Compte rendu d'installation et plans des parcelles 212 et 1026 (p3/5)

### Chronologie des actions

La chronologie des inventaires, mesures, observations, travaux, suivis de chantiers avec chronométrage etc. est indiquée dans l'annexe 4.

### Caractérisation stationnelle initiale (voir annexes 2, 3 et 5)

Cette caractérisation concerne :

#### 1) Les sols :

- 10 sondages dans la parcelle 212 (profondeurs 45-70 cm) et 9 sondages dans la parcelle 1026 (profondeurs 30 à 60 cm).
- **Nature des blocs** : compact (212 et 1026) et caillouteux (une partie de 1026)
- **Profondeur d'apparition de la hydromorphie** : 10-55 cm (212) et 35 à 60 cm (1026)

#### Résultats analytiques (voir annexe 5) :

- **Texture** : les sols sont surtout caractérisés par des limons fins et grossiers, suivi des argiles ;
- **C/N** : il se trouve dans une faible gamme, entre 12 et 17, ce qui signifie plutôt une bonne décomposition de la matière organique ;
- **pH** : il se trouve dans une gamme étroite, entre 4,7 et 4,9, les pH plus bas se trouvant en profondeur ;
- **Phosphore (Dyer)** : le phosphore disponible est présent en très faible quantité dans les deux parcelles et tout au long des profils ;
- **Taux de saturation en bases** : la gamme est de 13 à 39%. Les taux les plus bas (<20 %) se trouvent à partir de 30 cm de profondeur. Comparé aux chénaies pédonculés du réseau RENECOFOR (n=9), ces sols sont bien plus pauvres, au moins de moitié, souvent même bien plus.

#### 2) La végétation présente :

- molinie (partout), puis en partie et par tâches de la fougère, quelques ligneux (charme, bouleau, peuplier, noisetier), un peu de ronces et du jonc ;

#### 3) La présence de souches (qui peuvent avoir un impact sur le travail du sol, c'est-à-dire la productivité surtout, sans être un gêne pour les engins) : la densité moyenne est de **118 souches/ha** (médiane : 100 souches/ha). Aucune présence de grosses branches ( $\varnothing > 30$ cm) ou de troncs (longueur > 2m).

### Données machines (productivités globales et par heures productives machines) et prix des prestations en fonction des modalités:

Description succincte des engins et outils utilisés en fonction des modalités :

- **RAZHERB SEUL et RAZHERB+TECHNIQUE 3B AVEC MINIPELLE** : Minipelle Takeuchi TB 228 modèle « Compact Excavator », puissance 18,1 kW (24,6 ch) ; longueur 1,90 m, largeur 1,45 m, hauteur 2,40 m, largeur des chenilles en caoutchouc 30 cm, poids avec sabot de franchissement et un outil 3,5 tonnes.
- **TECHNIQUE 3B AVEC TRACTEUR et OUTIL CULTI 3B** : tracteur VALTRA T 191, 136 kW (185 ch), longueur 5,2 m, largeur 2,33 m, hauteur 3,03 m, poids sans outil : 6 tonnes ; Outil Culti 3B® : poids 2,2 tonnes.
- **BROYAGE AVEC TRACTEUR et OUTIL MERI CRUSHER** : tracteur forestier VALTRA T 170, 129 kW (175 ch), longueur 5,1 m, largeur 2,33 m, hauteur 3,03 m, poids sans outil : 6 tonnes ; outil Meri Crusher MERI MJ-2.3 DT : poids 1,519 tonnes avec pousse bois ; largeur de travail 2,30 m, largeur totale 2,70 m

Les productivités et rendement au niveau du chantier (suivi global) et en heure productive machine (chronométrages) sont présentés dans l'annexe 6. Les prix des prestations sont présentés en annexe 7 par modalité.

### Résultat du suivi des plantations (voir schéma de plantation en annexe 8) :

Les plantations ont fait l'objet de deux types de suivis :

- suivi global au niveau du chantier de tous les planteurs (temps de travail)
- suivis par chronométrage autant que possible dans chaque parcelle et dans chaque modalité.

L'annexe 9 présente les données de synthèse issues de ces suivis.

### Mesures (voir plans des placeaux annexe 10 et 11) :

#### Sur les plants échantillons :

- mesures de la hauteur totale vivante initiale, puis évolution annuelle : voir **annexe 12** les résultats des mesures initiales datant du 21 et 22 mai 2014.

#### Sur la végétation d'accompagnement en juin-juillet :

- par espèce : recouvrement global, hauteur globale.
- inventaire de la flore complète.

Voir **annexe 13** les résultats des observations initiales datant du 30 juin et 1<sup>er</sup> juillet 2014.

## Annexe 1 : Compte rendu d'installation et plans des parcelles 212 et 1026 (p4/5)

### Périodicité des mesures :

Sur les plants échantillons : en période hivernale de chaque année.  
Observations de la végétation fin juin/début juillet de chaque année.

### Amendement calco-magnésien (voir annexes 2 et 14) :

Afin de pouvoir tester l'effet éventuel d'amendements calco-magnésien, des apports de 0 tonnes, 3,5 tonnes, 7 tonnes et 11,5 tonnes ont été réalisés après la plantation (12 août 2014).

L'annexe 2 présente les zones des différents tonnages à l'hectare.

L'annexe 14 présente le déroulé de l'opération et les détails techniques nécessaires à la future interprétation des résultats.

### REALISATION :

Voir la chronologie des actions annexe 4

DATE D'INSTALLATION : Eté 2013

DUREE : au moins 5 ans

### BIBLIOGRAPHIE :

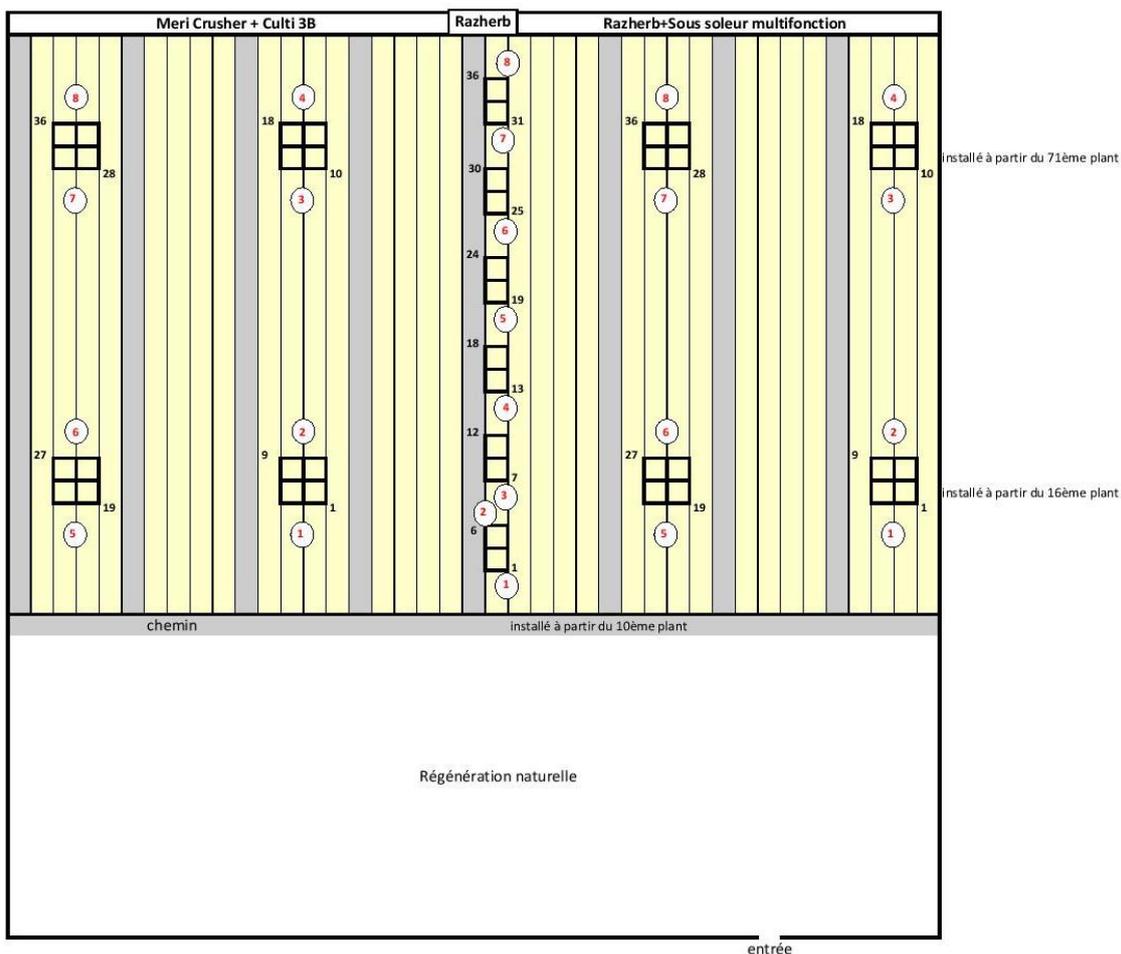
Ulrich E., Becker C., Franco J.-P., 2013 : Préparer le sol avant plantation selon la technique 3B avec tracteur et l'outil Culti 3B® - validation sur chantiers test. Rendez-Vous Techniques de l'ONF, Rendez-Vous Techniques de l'ONF, 43, hiver 2014 : 11-21.

Parcelle 1026 :

Razherb+Sous soleur multifonction :  
RAMF/1...36

Razherb + Culti 3B :  
RACB/1...36

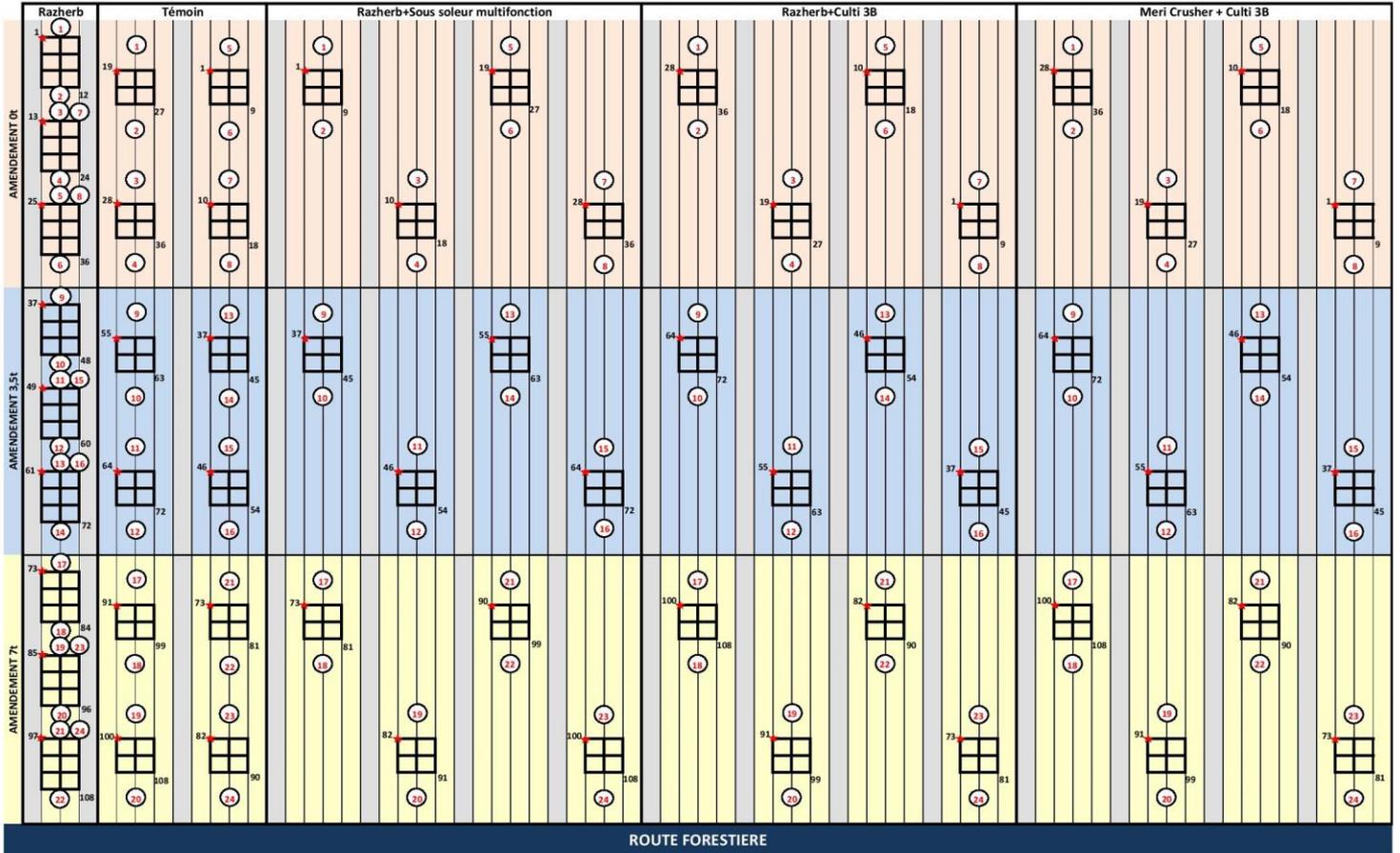
Razherb :  
RAZ/1...36



# Annexe 1 : Compte rendu d'installation et plans des parcelles 212 et 1026 (p5/5)

Parcelle 212

23/05/2014. INRA MGVF



**Légende**

- numéro plateau flore 1m² symbolisé par un bambou blanc 2 m + 2 fibres : modalité + numéro 1 à 24.
- piquet acacia 1m50 blanc
- placette de 9 plants (3 plants/ligne) : étiquette sur chaque plant : modalité + type amendement + numéro plant
- numéro 1er plant placette "73" (et numéro dernier plant placette en haut à gauche "81")
- lignes (1 à 5)

- amendement 7 tonnes
- amendement 3,5 tonnes
- amendement 0
- Cloisonnement

**Étiquettes modalités :**

**Parcelle 212 :**

Razherb :	Témoïn :	Razherb+Sous soleur multifonction :	Razherb + Culti 3B :	Meri crusher + Culti 3B :
RAZ/0t/1...36	TEM/0t/1...36	RAMF/0t/1...36	RACB/0t/1...36	MECB/0t/1...36
RAZ/3.5t/37...72	TEM/3.5t/37...72	RAMF/3.5t/37...72	RACB/3.5t/37...72	MECB/3.5t/37...72
RAZ/7t/73...108	TEM/7t/73...108	RAMF/7t/73...108	RACB/7t/73...108	MECB/7t/73...108

**Parcelle 1026 :**

Razherb+Sous soleur multifonction :	Razherb + Culti 3B :
RAMF/1...36	RACB/1...36

## **Annexe 2 : Compte rendu d'installation de la parcelle 213 (p1/2)**

### **COMPTE RENDU D'INSTALLATION DE L'EXPERIMENTATION**

ATX 92.16.3

Fiche rédigée le 9 mai 1994

C. DEMOLIS - IGRF et D. FRANCOIS - TF

**TITRE :** Amendement calcaire magnésien dans un reboisement de chêne sessile sur station acide

#### **LOCALISATION :**

- Département : JURA - carte Michelin n° : 70 - Pli n° : 4
- Forêt domaniale de CHAUX
- Parcelle n° 213
- DR de FRANCHE COMTE - SD du JURA - Division de DOLE CHAUX
- Groupe Technique d'ORCHAMPS - Triage d'ORCHAMPS
- Région I.F.N. : Vallées et plaine de la Saône et affluents - n° 327

#### **STATION :**

- Altitude : 250 m - Exposition : plateau
- T° m annuelle : 9,6°C - Précipitation : 1 000 mm
- facteurs limitants : hydromorphe, faible niveau trophique, molinie.
- Roche mère : formations plio-quadernaires
- Formation superficielle : limons sur cailloutis
- Sol : brun acide à pseudogley superficiel à moyennement profond (20 à 45 cm)
  - humus : mull acide pH = 4 à 5
  - végétation : mésoacidiphile (molinie)
  - profondeur : supérieure à 60 cm - hydromorphie : 20 à 45 cm
- Catalogue de référence : catalogue des stations du massif de CHAUX.

**PEUPELEMENT ACTUEL :** Plantation après coupe rase de chêne sessile à la densité de 1500 plants/ha (4 m x 1,60m)

**OBJET DE L'ESSAI :** Tester l'influence d'un amendement calcaire magnésien sur une plantation de chêne sessile sur station acide

Un seul facteur est étudié (= amendement) avec 5 modalités :

- **TEMOIN** : sans fertilisation
  - **CAL 7** : épandage de 6,9 tonnes/ha de calcaire magnésien broyé.
  - **CAL 15** : épandage de 13,9 tonnes/ha de calcaire magnésien broyé
  - **CH 7** : épandage de 3,3 t de chaux vive
  - **CH 15** : épandage de 6,7 t de chaux vive.
  - ♦ **Calcaire magnésien broyé** : CARBOMAGNESIA 42-10 granulé par compactage, 10 % d'oxyde de magnésium (MgO) à l'état de carbonate, 42 % d'oxyde de calcium (CaO). Finesse : 80 % minimum entre 100 et 300 gr. Oligo-éléments : cuivre, fer, manganèse et zinc.
  - ♦ **Chaux** : CHAUX VIVE granul (2-8), 92 % d'oxyde de calcium (CaO) à l'état d'oxyde. 4 % d'oxyde de magnésium (MgO) à l'état d'oxyde.
  - Mode d'application : épandeur à engrais. Labour et billonnage de l'ensemble du dispositif après épandage et avant plantation.
- Remarque: Deux autres modalités (S7 et S15) seront testées (sans répétition) en marge de l'essai : Il s'agit d'apporter, en plus du calcaire magnésien broyé à 6,9 t et 13,9 t/ha, de la silice amorphe à la dose de 2,2 t/ha, support neutre devant permettre théoriquement de fixer le calcaire au niveau du complexe argilo-humique.*

**DISPOSITIF :** comprenant 4 blocs contrôlant les effets lisières et la variabilité stationnelle

blocs n° 1 et 2 : sol lessivé fragique à pseudogley (45 cm)

blocs n° 3 et 4 : pseudogley lessivé à fragipan (30 cm)

**Unité expérimentale :** 12 ares (30 x 40 cm). Surface totale : 2,7 ha

**Nombre de traitement :** 20 + 2 modalités "silice"

#### **REALISATION :**

Coupe rase en 1992/93

Labour à la charrue à disques en septembre 93 (1 passage)

Analyses pédologiques et floristiques en juin 1992

Billonnage en mars 1994

## Annexe 2 : Compte rendu d'installation de la parcelle 213 (p2/2)

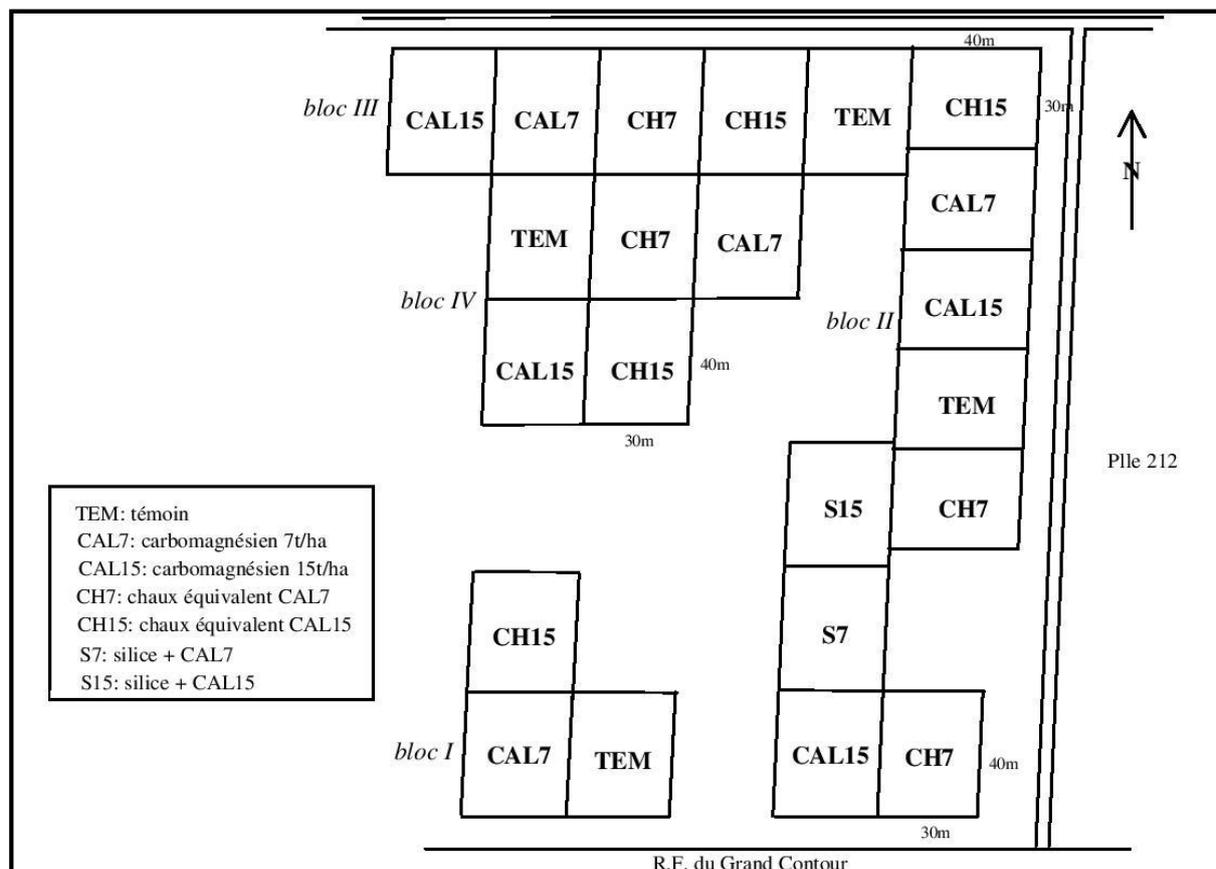
Piquetage le 3/8/93 Epandage les 6 et 7/9/93	Plantation en mars 1994 : densité 1500 plants/ha (4 m x 1,60 m) Mesures initiales (croissance des plants) le 30 mars 1994.
---	---

<b><u>ECHANTILLONNAGE :</u></b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- analyses pédologiques initiales : 72 points selon un maillage de 30 m x 30 m.</li> <li>- relevés floristiques : 4 carrés échantillons par U.E. (2 m x 5 m) sur le billon</li> <li>- croissance des plants : 60 plants par U.E.</li> </ul>	
<b><u>VARIABLES DE JUGEMENT :</u></b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- analyses pédologiques sur les 20 premiers cm du sol : mesure du pH, granulométrie, carbone organique, bases échangeables (Ca, Mg, K), ions de l'acidité (H, Al), capacité totale d'échange cationique, taux de saturation.</li> <li>- évolution de la végétation, monocotylédones, dicotylédones, semi-ligneux et ligneux.</li> <li>- croissance des plants en hauteur et diamètre à 10 cm du collet.</li> </ul>	
<b><u>Fréquence des mesures :</u></b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- analyses pédologiques : tous les 3 ans</li> <li>- végétation : annuelle</li> <li>- croissance des plants : bi-annuelle</li> </ul>	} bilan à 10 ans

<b><u>DUREE MINIMUM</u></b> : 20 ans
<b><u>PREMIERS RESULTATS SIGNIFICATIFS ATTENDUS</u></b> : 1996/97

<b><u>Collaboration extérieure</u></b> : Mme GAIFFE laboratoire de pédologie, Université de BESANCON pour les analyses pédologiques. Société MEAC - GRAY (70) pour la fourniture du calcaire
---

### PLAN DU DISPOSITIF



### Annexe 3 : Principe et photo du CHN

	Instruction	Réf. : IN Version 0 Date : 12/10/2015 Nombre de pages : 6
	<b>CHN Flash 2000</b>	

1 – PRINCIPE

Détermination de C, N dans les échantillons solides d'origine organique, minérale, environnementale.  
L'azote et le carbone sont détectés respectivement sous forme de :  $N_2$  ;  $CO_2$

L'échantillon et une quantité optimale d'oxygène sont injectés dans un four de combustion, balayé par de l'hélium.  
La combustion très exothermique de la nacelle en étain en présence d'oxygène est très rapide et a lieu à très haute température (jusqu'à  $1800^{\circ}C$ ), c'est une combustion dite « flash ».  
L'hélium entraîne les gaz de combustion vers une conversion catalytique immédiate (le cuivre réduit les gaz produits). Un absorbeur retient l'eau produite.  
Le mélange gazeux passe ensuite dans une colonne de chromatographie de type remplie à longue durée de vie ( $> 10$  ans) pour séparer les composés.  
Les gaz sont détectés et quantifiés par un détecteur à conductibilité thermique universel très sensible (catharomètre ou TCD).  
En sortie on obtient le chromatogramme des produits en temps réel.



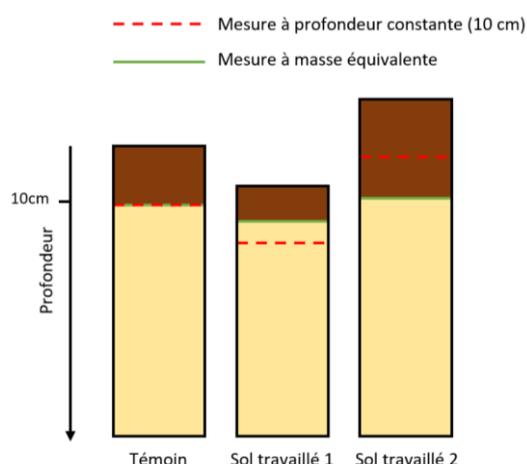
#### Annexe 4 : Méthodologie et quelques résultats du calcul de COS à masse équivalente (p1/2)

Le calcul à masse équivalente permet de corriger le calcul du stock de carbone lorsque la DA varie entre nos échantillons. En effet, la méthode de calcul à profondeur constante (échantillons prélevés à profondeur constante pour chaque modalité) suggère que la DA est similaire à chaque point de prélèvement. Or, ce n'est pas forcément le cas. Le travail du sol peut augmenter ou diminuer l'épaisseur par unité de surface (le volume) occupé par la même masse de sol, dû aux phénomènes de décompactage ou de tassement du sol. Les « horizons » définis pour les prélèvements ne sont plus alors forcément respectés et la masse de sol par tranche de profondeur ne correspond plus entre un sol travaillé et non travaillé. De plus, le travail du sol peut entraîner une déstructuration des horizons de surfaces.

Pour pouvoir comparer les échantillons entre eux, il faut alors ramener les échantillons à masse équivalente. Pour cela, la masse à l'hectare du sol pour chaque échantillon doit être calculée :

$$\text{Masse à l'ha de sol (Mg/ha)} = \text{épaisseur (m)} * \text{DA (g.cm}^{-3}\text{)} * 10000$$

Puis chaque échantillon va être comparé à une masse de référence, qui sera soit le profil le plus lourd ou soit la moyenne des masses de la modalité « témoin » (mature ici). Cette comparaison servira à trouver l'épaisseur supplémentaire (ou en trop) pour atteindre une masse équivalente.



*Changements des propriétés du sol induits par le travail du sol (d'après Ellertl et Bettany, 1995)*

L'épaisseur supplémentaire ( $T_{add}$ ) pour arriver à masse équivalente est définie par (Ellert et Bettany, 1995) :

$$T_{add} \text{ (m)} = \frac{(M_{sol \text{ ref}} \text{ (Mg/ha)} - M_{sol \text{ horizon}} \text{ (Mg/ha)}) \cdot 0,0001}{DA_{\text{horizon}} \text{ (g.cm}^{-3}\text{)}}$$

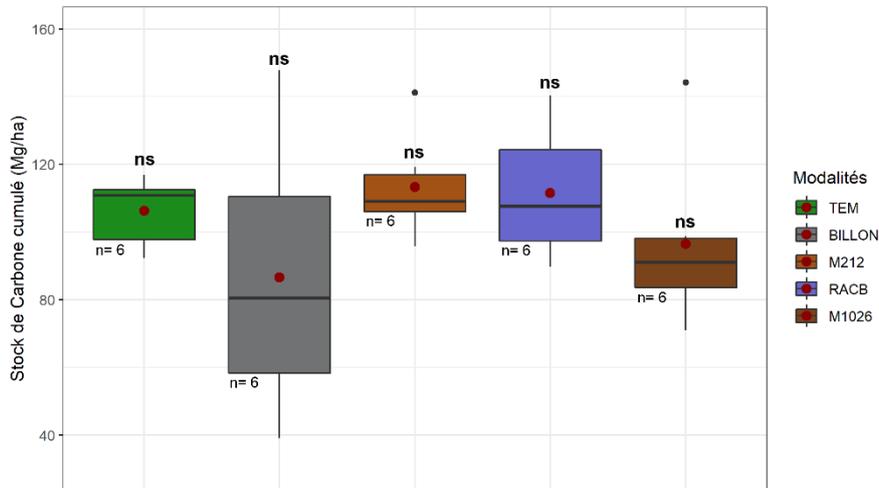
Et donc le stock de carbone à masse constante pourra être calculer de la manière suivante :

$$\text{Stock carbone org}_{eq} \text{ (mg.cm}^2\text{)} = \text{g Carbone (g/kg)} * \text{DA (g.cm}^{-3}\text{)} * (\text{Epaisseur}_{\text{horizon}} + \text{Epaisseur}_{T_{add}}) \text{ (cm)}$$

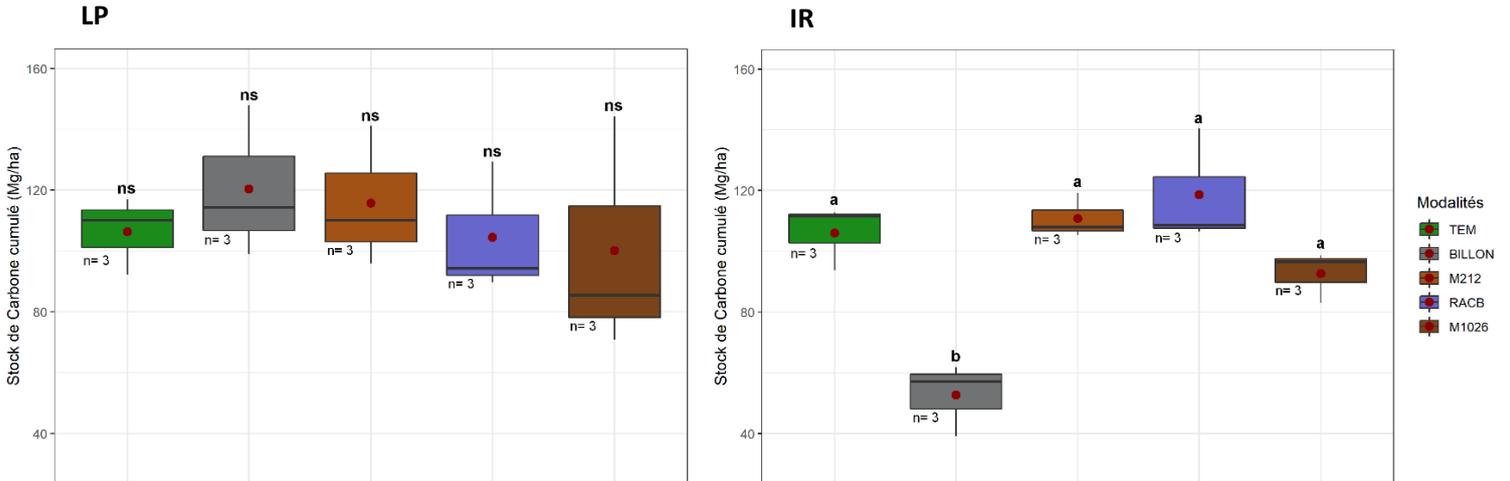
Ellertl B. H., Bettany J. R. « Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes ». Can. J. Soil. Sci. 1995.

**Annexe 4 : Méthodologie et quelques résultats du calcul de COS à masse équivalente (p2/2)**

Quelques résultats réalisés avec cette méthode de calcul (selon le profil le plus lourd) :



Différences des stocks du COS cumulé (sur 0-60cm) entre nos modalités, LP et IR confondu (ANOVA, p-value<0.05). Points rouges = moyennes.



Différences des stocks de COS cumulé (sur 0-60cm) entre nos modalités, en LP (gauche, ANOVA, p-value<0.05) ou en IR (droite, ANOVA, TukeyHSD, p-value<0.05). Points rouges = moyennes.

## **Annexe 5 : Protocole unifié d'inventaire floristique PILOTE (p1/3)**

### **Protocole unifié d'inventaire floristique PILOTE**

#### **1. Objectifs de l'inventaire floristique**

Evaluation de l'impact des modalités :

- Quels effets des différentes modalités sur l'espèce concurrente ciblée a priori ? (Efficacité de la suppression, vitesse de retour...).
- Quelles espèces s'installent suite aux travaux conduits ?

#### **2. Echantillonnage**

##### **2.1. Matérialisation sur le terrain des placeaux d'inventaires floristiques**

Chaque placeau d'inventaire floristique est repéré sur le terrain de manière visible via un dispositif permanent sur la durée de l'expérimentation. Les carrés d'inventaire de 1m<sup>2</sup> sont disposés sur la ligne de plantation (zone travaillée), entre deux plants. Un piquet, tuteur ou bambou de grande taille (2 m), peint en blanc à son extrémité, marque un angle du placeau, toujours le même sur la parcelle (par exemple l'angle NO). Ce tuteur porte la référence du placeau : « Modalité\_Numéro du placeau » (ex. C3B\_12), directement sur le piquet ou sur une étiquette. Les 3 autres angles sont matérialisés par des jalonnets en plastique de même couleur. Si des tuteurs plus petits sont initialement installés, il faudra prévoir leur remplacement ultérieur quand la végétation croîtra.

Remarque : Il n'y a pas de placeaux d'inventaires installés dans les interlignes ou les andains.

##### **2.2. Intensité d'échantillonnage**

Sur chaque modalité, 8 à 12 placettes seront installées et suivies, en fonction de la taille de l'unité expérimentale (par exemple un à chaque angle des placeaux de mesure dendrométriques).

##### **2.3. Période des relevés floristiques**

Pour éviter les pics de périodes de mesure, il faut veiller à répartir les dates de relevés dans les différents sites. Mais sur chaque site, il est important de réaliser ces inventaires chaque année à la même période. Selon les sites, ils pourront se faire soit en début d'été (fin juin/ juillet) sur les sites à graminées (calamagrostis, molinie) soit en fin d'été (septembre) sur les sites à Fougère aigle. En effet, la fougère n'est pas toujours pleinement développée en juin, et il existe un risque de casse induisant un « effet dégagement ».

##### **2.4. Périodicité des mesures**

Les relevés floristiques seront réalisés pendant la première saison de végétation qui suit la réalisation des travaux, puis annuellement les 3 années suivantes. Passées ces 4 premières années de mesures, les relevés seront réalisés tous les 2 ans.

## **Annexe 5 : Protocole unifié d'inventaire floristique PILOTE (p2/3)**

### **3. Données générales sur les relevés floristiques**

Lors du relevé sur le terrain, il est important de noter, en plus des données floristiques :

- la date ;
- l'opérateur ;
- la parcelle unitaire (PU) ;
- le numéro du plateau ;
- et pour confirmation la modalité (qui est déductible du PU).

On utilisera la nomenclature TaxRef pour le nom des espèces relevées.

### **4. Inventaire floristique**

Un plateau d'inventaire floristique doit rester vierge de perturbations : on ne marche jamais dessus. On remet éventuellement en place après inventaire la végétation déplacée (notamment la fougère).

Pour chaque plateau d'inventaire, on note :

- 4.1. **Le recouvrement global de la végétation.** Il est estimé visuellement et correspond au rapport entre la surface projetée verticale occupée par la végétation et la surface totale du plateau. Le recouvrement s'estime en imaginant un contour enveloppant les folioles plutôt que par projection de la surface stricte du limbe foliaire. Exprimé en 1/10<sup>e</sup>, avec un maximum de 10/10<sup>e</sup> quand le couvert est continu. Cette mesure intègre l'ensemble de la végétation qui se projette sur la surface du plateau, indépendamment de l'implantation des individus.

Si le recouvrement global est très faible (quelques %, par exemple dans le cas d'une modalité herbicide), on indiquera « p » pour présence.

- 4.2. **Le recouvrement des plants de l'expérimentation.** Le recouvrement des plants, après quelques années de croissance, peut être important et avoir des conséquences sur le développement des autres espèces. Le recouvrement du plant est également estimé visuellement en imaginant un contour enveloppant les folioles plutôt que par projection de la surface stricte du limbe foliaire. Il s'exprime en 1/10<sup>e</sup>.

#### **4.3. Les espèces et le recouvrement spécifique**

##### **4.3.1. L'inventaire des espèces**

Inventaire des 5 espèces les plus recouvrantes : herbacées, arbustes et ligneux, hors bryophytes. Sont recensées toutes les espèces dont une partie de l'appareil végétatif se projette sur le plateau : les espèces dont le pied est dans le plateau **OU** dont le pied est hors plateau mais dont une partie des feuilles et tiges se projette sur le plateau.

## **Annexe 5 : Protocole unifié d'inventaire floristique PILOTE (p3/3)**

### **4.3.2. Attribution d'un recouvrement par espèces**

Le recouvrement s'estime en imaginant un contour enveloppant les folioles plutôt que par projection de la surface stricte du limbe foliaire. Il est exprimé en 1/10<sup>e</sup>. La somme des recouvrements spécifiques peut être supérieure au recouvrement global (et excéder 100%) en raison de la superposition des strates.

### **4.3.3. La hauteur par espèces**

On ne mesurera que la hauteur des éventuels ligneux (plant exclus) + celle de l'espèce herbacée la plus abondante. Dans le cas « limite » d'un mélange à proportions à peu près égales de fougère et molinie par exemple on notera les hauteurs des deux espèces.

Les hauteurs sont déterminées comme suit et mesurées au décimètre le plus proche :

Hauteur des ligneux, de la ronce et de la fougère aigle : On prendra la hauteur maximale des individus à l'aplomb du plateau.

Hauteur des graminées : On prendra la hauteur maximale du feuillage (c'est-à-dire sans prendre en compte les hampes florales).

## **4.4. Les ligneux**

Les ligneux sont pris en compte dans l'inventaire floristique : on note l'espèce (cf. paragraphe 4.2.1), leur recouvrement (cf. 4.2.2) et leur hauteur (cf. 4.2.3).

### Annexe 6a : Itinéraire sylvicole réalisé pour la modalité « Citeaux »

#Guide chênaies continentales - ITS pour une régénération naturelle  
#avec récolte finale étalée sur 10 ans  
#Chênes sessiles  
#Fertilité 2

@Hdom	7.8	\$Nha	3610
@Hdom	14.2	\$Gha	16.8
@Hdom	16	\$Gha	17
@Hdom	18.2	\$Gha	18.2
@Hdom	20.1	\$Gha	19.1
@Hdom	21.8	\$Gha	19.9
@Hdom	23.5	\$Gha	20.8
@Hdom	25	\$Gha	21.5
@Hdom	26.5	\$Gha	22.2
@Hdom	27.9	\$Gha	22.9
@Hdom	29.3	\$Gha	23.6
@Hdom	30.7	\$Gha	24.3
@Hdom	32.3	\$Gha	24.9
@Hdom	33.9	\$Gha	25.6
@Hdom	35.5	\$Gha	26.3
@Hdom	37	\$Gha	24.25
@Delai 4	\$Gha	18.5	
@Delai 3	\$Gha	13	
@Delai 3	\$Nha	0	

### Annexe 6b : Itinéraire sylvicole réalisé pour la modalité « Citeaux 1500 »

#Guide chênaies continentales - adaption en itinéraire de plantation à 1500t/ha théorique  
#sans mortalité; récolte finale en 10 ans  
#Chênes sessiles  
#Fertilité 2

@Hdom	7.8	\$Nha	1500
@Hdom	15.2	\$Gha	16.8
@Hdom	17	\$Gha	18.2
@Hdom	19.1	\$Gha	19.1
@Hdom	20.8	\$Gha	19.9
@Hdom	22.5	\$Gha	20.8
@Hdom	24	\$Gha	21.5
@Hdom	25.5	\$Gha	22.2
@Hdom	26.9	\$Gha	22.9
@Hdom	28.3	\$Gha	23.6
@Hdom	29.7	\$Gha	24.3
@Hdom	31.3	\$Gha	24.9
@Hdom	32.9	\$Gha	25.6
@Hdom	34.2	\$Gha	25.25
@Hdom	35.5	\$Gha	21.25
@Delai 4	\$Gha	16.5	
@Delai 3	\$Gha	12	
@Delai 3	\$Nha	0	

### Annexe 6c : Itinéraire sylvicole réalisé pour la modalité « RACB »

#Guide chênaies continentales - ITS pour le RACB PILOTE,  
#avec la densité initiale = mortalité du RACB PILOTE Chaux; récolte finale en 10 ans  
#Chênes sessiles  
#Fertilité 2

@Hdom	7.8	\$Nha	1395
@Hdom	15.2	\$Gha	16.8
@Hdom	17	\$Gha	18.2
@Hdom	19.1	\$Gha	19.1
@Hdom	20.8	\$Gha	19.9
@Hdom	22.5	\$Gha	20.8
@Hdom	24	\$Gha	21.5
@Hdom	25.5	\$Gha	22.2
@Hdom	26.9	\$Gha	22.9
@Hdom	28.3	\$Gha	23.6
@Hdom	29.7	\$Gha	24.3
@Hdom	31.3	\$Gha	24.9
@Hdom	32.9	\$Gha	25.6
@Hdom	34.2	\$Gha	25.25
@Hdom	35.5	\$Gha	21.25
@Delai	4	\$Gha	16.5
@Delai	3	\$Gha	12
@Delai	3	\$Nha	0

### Annexe 6d : Itinéraire sylvicole réalisé pour la modalité « TEM »

#Guide chênaies continentales- ITS pour le TEM PILOTE, avec la densité initiale = mortalité réelle de Chaux 212;  
#Coupe à Dg de 65cm car qualité médiocre, récolte finale en 10 ans  
#Chênes sessiles  
#Chênes sessiles  
#Fertilité 2

@Hdom	7.8	\$Nha	345
@Hdom	20.1	\$Gha	19.1
@Hdom	21.8	\$Gha	19.9
@Hdom	23.5	\$Gha	20.8
@Hdom	25	\$Gha	21.5
@Hdom	26.5	\$Gha	22.2
@Hdom	27.9	\$Gha	22.9
@Hdom	29.3	\$Gha	23.6
@Dg	65	\$Gha	21.6
@Delai	4	\$Gha	16.5
@Delai	3	\$Gha	12
@Delai	3	\$Nha	0

## Annexe 6e : Itinéraire sylvicole réalisé pour la modalité « TEM ref »

#Guide chênaies continentales- ITS pour le TEM PILOTE,  
#avec la densité initiale = mortalité moyenne des autres essais alter/pilote; récolte finale en 10 ans  
#Chênes sessiles  
#Fertilité 2

@Hdom	7.8	\$Nha	1170
@Hdom	15.2	\$Gha	16.8
@Hdom	17	\$Gha	18.2
@Hdom	19.1	\$Gha	19.1
@Hdom	20.8	\$Gha	19.9
@Hdom	22.5	\$Gha	20.8
@Hdom	24	\$Gha	21.5
@Hdom	25.5	\$Gha	22.2
@Hdom	26.9	\$Gha	22.9
@Hdom	28.3	\$Gha	23.6
@Hdom	29.7	\$Gha	24.3
@Hdom	31.3	\$Gha	24.9
@Hdom	32.9	\$Gha	25.6
@Hdom	34.2	\$Gha	25.25
@Hdom	35.5	\$Gha	21.25
@Delai	4	\$Gha	16.5
@Delai	3	\$Gha	12
@Delai	3	\$Nha	0

## Annexe 7 : Méthodologie détaillée pour le calcul des entrées du modèle de COS (Emila Akroume)

### **Modélisation de l'évolution des stocks de C dans la biomasse et sols lors des stades juvéniles**

#### 1. Structure du modèle de dynamique du carbone du sol intégrant le travail du sol

##### Estimation de la biomasse aérienne des plants de chêne

La biomasse des plants a été estimée à partir de la hauteur des plants de chaque plateau échantillon (1 plateau = 9 plants sur 24 m<sup>2</sup>), en se basant sur les équations de biomasse pour le chêne au stade juvénile : biomasse aérienne =  $a * (H * D)^b$  (Annighöfer et al. 2016), (H = hauteur totale, D = diamètre au collet, a, b constantes)

Dans un premier temps, le diamètre au collet est calculé à partir de la hauteur totale selon une équation de type :  $D = a_1 * \log(H * e^{b_1} + 1)$ . Les paramètres  $a_1$  et  $b_1$  sont issus de l'ajustement sur un jeu de données de hauteur, diamètre au collet et biomasse aérienne sur de jeunes chênes sessiles et pédonculés (jeu d'essais INRA, C.Collet). Le même jeu de données a permis l'ajustement de des paramètres a et b de l'équation de biomasse aérienne. Les biomasses aériennes individuelles de chaque plant sont converties en carbone (= 0.5 \* biomasse puis ramenées à l'hectare).

##### Estimation de la biomasse aérienne et souterraine de la végétation concurrente

La biomasse aérienne de la végétation concurrente est estimée à partir des relevés de recouvrement et hauteur de la végétation, effectués annuellement sur des plateaux d'1m<sup>2</sup> sur la ligne de plantation. Les espèces sont regroupées en grands groupes « cibles ». On estime dans un premier temps, le phytovolume de chaque groupe d'espèce défini comme : phytovolume = recouvrement (%) \* hauteur (cm) (Porté et al. 2009). Des relations allométriques entre phytovolume et biomasse issues de la littérature sont ensuite utilisées pour chaque groupe d'espèces : de la forme biomasse =  $a * \text{phytovolume}^b$  pour la molinie et la fougère (Gonzalez et al. 2013) ; de la forme  $a * \text{phytovolume} + b * \text{phytovolume}^2$  pour les ligneux et les herbacées (Porté et al. 2009), les constantes a et b étant dépendants du groupe spécifique. La biomasse racinaire est estimée comme étant une fonction linéaire de la biomasse aérienne (Gonzalez et al. 2013). Les biomasses sont ensuite exprimées en tonnes par hectare et converties en carbone (= 0.5 \* biomasse).

##### Bibliographie

Annighöfer, Peter, Aitor Ameztegui, Christian Ammer, Philippe Balandier, Norbert Bartsch, Andreas Bolte, Lluís Coll, et al. 2016. « Species-Specific and Generic Biomass Equations for Seedlings and Saplings of European Tree Species ». *European Journal of Forest Research* 135 (2): 313-29. <https://doi.org/10.1007/s10342-016-0937-z>.

Gonzalez, Maya, Laurent Augusto, Anne Gallet-Budynek, Jianming Xue, Nathalie Yauschew-Raguenes, Dominique Guyon, Pierre Trichet, et al. 2013. « Contribution of Understorey Species to Total Ecosystem Aboveground and Belowground Biomass in Temperate Pinus Pinaster Ait. Forests ». *Forest Ecology and Management* 289 (février): 38-47. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.026>.

Porté, Annabel J., Jean-Charles Samalens, Raphaël Dulhoste, Rémi Teissier Du Cros, Alexandre Bosc, et Céline Meredieu. 2009. « Using Cover Measurements to Estimate Aboveground Understorey Biomass in Maritime Pine Stands ». *Annals of Forest Science* 66 (3): 307. <https://doi.org/10.1051/forest/2009005>.

## Résumé

De nos jours, nous devons faire face aux changements globaux (pollution, changements climatiques, changement d'occupation des sols...). L'un des leviers mis en avant pour compenser les émissions de CO<sub>2</sub>, l'un des principaux composants des gaz à effet de serre (GES), est de favoriser le stockage du carbone dans les sols, notamment dans les forêts.

Or, ce contexte de changement climatique et de demande en bois nous amène à réaliser des plantations, pour faciliter la mise en place ou le renouvellement des peuplements dans des conditions difficiles. Un travail du sol avant plantation est souvent nécessaire. Ce travail n'est pas sans conséquences sur les capacités du sol à stocker le carbone, mais aussi sur le développement du peuplement (survie et croissance).

Dans ce rapport, nous avons analysé l'impact des préparations mécanisées du sol avant plantation de Chênes sessiles, dans un contexte de blocage par la molinie et d'engorgement, sur le bilan de carbone total et donc sur toutes les variables permettant ce bilan.

Les résultats obtenus montrent l'importance d'un travail du sol localisé (modalité « RACB »), comparé à un travail général (modalité « BILLON »). En effet, le travail localisé ne va pas impacter le stock de COS au niveau l'inter-rang, contrairement à un travail en plein. De plus, ce travail localisé permet une meilleure survie des plants, comparé à un témoin sans travail du sol. Néanmoins, la croissance n'a pas été impactée significativement par le travail du sol. Ensuite, grâce à des simulations, nous avons vu que cette amélioration de la survie a permis, pour notre dispositif, une amélioration de la séquestration du carbone sur une révolution forestière complète. Néanmoins, la méthode de modélisation utilisée est peu adaptée aux plantations. Enfin, une modélisation de la dynamique du carbone organique du sol sur 5 ans a été réalisée, mais est encore incomplète, celle-ci ayant besoin d'informations supplémentaires pour obtenir des résultats plus fiables.

**Mots-clés :** Changement climatique, Plantations forestières, Travail du sol, Carbone organique du sol, Séquestration du carbone.

Nowadays, we have to face global changes (pollution, climate change, land use change ...). One of the important projects to offset CO<sub>2</sub> emissions, one of the main components of greenhouse gases (GHGs), is to promote carbon storage in soils, especially in forests.

However, this context of climate change and demand for wood leads us to carry out plantations, to facilitate the establishment renewal of stands under difficult conditions. Tillage before planting is often necessary. This work has consequences not only on the soil's ability to store carbon, but also on stand development (survival and growth).

In this report, we analyzed the impact of mechanized soil preparation before planting sessile oaks. And this in a context of blockage by molinia and engorgement, on the total carbon balance and therefore on all the variables allowing this balance.

The results obtained show the importance of localized tillage work ("RACB" modality), compared to a general work ("BILLON" modality). Indeed, localized work will not influence the SOC stock at the inter-row level, unlike general work. In addition, this localized work allows a better survival of the plants, compared to a control without tillage. Nevertheless, growth has not been significantly impacted by tillage. Then, thanks to modelling, we saw that this improvement in survival allowed, for our device, an improvement in carbon sequestration over a complete forest revolution. But the modeling method used is not well adapted to plantations.

Finally, a 5-year soil organic carbon dynamics modelling has been carried out, but is still incomplete, as it requires additional information to obtain more reliable results.

**Keywords :** Climate change, Forest plantations, Tillage, Soil organic carbon, Carbon sequestration.