



Oct.
2019

PROJET CAPSOL

Dynamique du CARbone et de la croissance après
Préparation du SOL dans les plantations forestières

RAPPORT FINAL

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie

En partenariat avec :



REMERCIEMENTS

Membres du Comité de Pilotage :

E. Bataille (MAA), N. Bilot (GCF), A. Departe (ADEME), J. Fiquepron (IDF), M. Gentils (MAA), T.E. Helou (FNEDT), X. Morvan (CRPF), R. Touffait (ONF)

Membres du consortium de recherche :

E. Akroume (ONF), A. Berthelot (FCBA), M. Blondet (AgroParisTech), V. Boulanger (ONF), F. Bureau (Univ. Rouen), L. Cécillon (IRSTEA), C. Collet (INRA), C. Deleuze (ONF), D. Derrien (INRA), N. Dumas (INRA), M. Fortin (AgroParisTech), D. François (ONF), J.C. Miquel (INRA), J. Piat (ONF), N. Pousse (ONF), E. Quibel (Univ. Rouen), H. Rakotoarison (ONF), C. Richter (ONF), E. Ulrich (ONF), L. Vincenot (Univ. Rouen), L. Wehrlen (INRA)

CITATION DE CE RAPPORT

Collet C., Akroume E., Bureau F., Cécillon L., Deleuze C., Derrien D., Richter C., Berthelot A. 2018. Rapport du projet CAPSOL: Dynamique du Carbone et de la croissance après Préparation du SOL dans les plantations forestières. 80 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr/mediatheque

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 16-60-C0002

Projet de recherche coordonné par : COLLET Catherine (INRA)

Appel à projet de recherche : REACTIF 2015

Coordination technique - ADEME : DEPARTE Alba
Service Forêt, Alimentation et Bioéconomie
Direction Productions et Energies Durables



SOMMAIRE

RÉSUMÉ.....	6
ABSTRACT	7
PREAMBULE	8
1. Contexte du projet.....	8
2. Etat de l'art	9
2.1. Caractériser la dynamique du COS en forêt.....	9
2.2. Comparer les bilans de carbone selon différents scénarios sylvicoles.....	9
2.3. Intégrer les stades juvéniles dans les modèles de croissance.....	10
2.4. Modéliser la dynamique du carbone sol-plante sur une révolution complète.....	10
3. Objectifs et démarche générale	11
4. Bilan / Principaux résultats obtenus	12
4.1. Tâche 1: Estimation des stocks et des flux de carbone dans les sols.....	12
4.1.1. Matériel et méthodes.....	13
4.1.1.1. Outils testés, sites d'études et stratégie d'échantillonnage.....	13
4.1.1.2. Calcul des stocks de COS.....	13
4.1.1.3. Qualité des stocks de COS et paramètres fonctionnels	14
4.1.1.4. Traitements statistiques	14
4.1.2. Effet du Scarificateur Réversible et du Sous-Soleur Multifonction – Réseau ALTER	14
4.1.3. Effet du RAZherb combiné au Culti3B - Réseau PILOTE.....	16
4.2. Tâche 2: Etude de la croissance juvénile.....	17
4.2.1. Analyse des effets de la PMS sur la survie et la croissance des jeunes plantations	17
4.2.2. Elaboration de modèles phénoménologiques	18
4.2.3. Elaboration de modèles fonctionnels et de modèles hybrides	18
4.3. Tâche 3: Evaluation des performances des méthodes de PMS.....	18
4.3.1. Evaluation des performances multiples des méthodes de PMS	19
4.3.1.1. Variables disponibles	19
4.3.1.2. Analyse multivariée	19
4.3.1.2.1. Compilation des données et analyses effectuées.....	19
4.3.1.2.2. Résultats.....	20
4.3.1.3. Evaluation multicritère	21
4.3.1.3.1. Acteurs concernés par la plantation	21
4.3.1.3.2. Délimitation du système étudié	22
4.3.1.3.3. Identification des critères et des indicateurs qualifiant les itinéraires de plantation.....	22
4.3.1.3.4. Poursuite de la démarche d'EMC	23
4.3.2. Modélisation de l'impact du travail du sol sur l'évolution des stocks de C dans la biomasse et dans les sols 23	
4.3.2.1. Modélisation de l'évolution des stocks de C dans la biomasse d'un peuplement de chêne sessile sur une révolution complète	24
4.3.2.1.1. Simulations des itinéraires.....	24



4.3.2.1.2.	Calcul de la biomasse et de la séquestration de C.....	24
4.3.2.2.	Structure du modèle d'impact du travail du sol sur la dynamique du C dans le sol	25
4.3.2.3.	Méthodologie de calibration du modèle sur le site PILOTE de Chaux, aux stades juvéniles ...	25
4.3.2.4.	Premiers résultats de la calibration de l'évolution du C du sol sur le site PILOTE de Chaux sur cinq années après coupe et perspectives d'évolution du modèle.....	26
4.3.2.5.	Extension du modèle de l'impact du travail du sol sur la dynamique du C du sol à l'échelle d'une révolution forestière	26
4.4.	Tâche 4: Adoption des méthodes, transfert technologique.....	26
4.4.1.	Etude des freins à la diffusion des méthodes.....	27
4.4.1.1.	Adoption de l'innovation dans les pratiques forestières : cas de la Haute-Normandie.....	27
4.4.1.2.	Adoption de l'innovation dans les pratiques de plantation: utilisation des outils de PMS.....	27
4.4.1.3.	Bilan des actions de transfert sur l'utilisation des outils de PMS.....	28
4.4.1.4.	Elaboration d'une stratégie de diffusion des innovations	29
4.4.1.4.1.	Transfert de connaissances.....	29
4.4.1.4.2.	Animation et dynamisation des réseaux d'acteurs.....	30
4.4.2.	Actions de transfert menées vers les acteurs de la filière.....	30
5.	Conclusion	31
6.	Liste des actions de valorisation	33
6.1.1.	Publications scientifiques (publiées ou en préparation).....	33
6.1.2.	Publications techniques (publiées ou en préparation)	33
6.1.3.	Mémoires diplômants	34
6.1.4.	Organisation de colloques	34
6.1.5.	Vidéos	34
6.1.6.	Présentations dans des colloques	35
6.1.7.	Actions de formation initiale et continue.....	36
6.1.8.	Journées d'information et d'échange	36
6.1.9.	Autres action de communication et d'animation	37
	Références bibliographiques.....	37
	Index des tableaux et figures.....	40
	Sigles et acronymes	41
7.	Annexe 1 : Estimation des stocks et des flux de carbone dans les sols.....	42
7.1.	Objectifs et hypothèses.....	42
7.2.	Méthodologie.....	42
7.2.1.	Outils, sites d'études et stratégie d'échantillonnage.....	42
7.2.1.1.	Outils testés.....	42
7.2.1.2.	Sites d'études	43
7.2.1.3.	Stratégie d'échantillonnage	44
7.2.2.	Calcul des stocks de COS.....	45
7.2.3.	Qualité des stocks de COS.	46
7.2.4.	Fonctionnement du sol.....	47
7.2.4.1.	Minéralisation du COS (flux potentiel de CO ₂).	47
7.2.4.2.	Biomasse microbienne.	48
7.2.4.3.	C extractible à l'eau.....	48
7.2.4.4.	Traitements statistiques	48
7.3.	Principaux résultats et recommandations.....	48
7.3.1.	Stocks de COS des témoins et comparaison des 2 modes de calculs.....	48
7.3.2.	Effet du Scarificateur Réversible (SR) et du Sous-Soleur Multifonction (SSM) – Réseau ALTER ...	50
7.3.2.1.	Site de Bord-Louviers.....	50
7.3.2.1.1.	Mesure quantitative des stocks de COS.	50
7.3.2.1.2.	Mesure qualitative des stocks de COS.	52

7.3.2.1.3.	Fonctionnement du sol.....	54
7.3.2.2.	Autres sites du réseau ALTER.....	57
7.3.2.2.1.	Mesure quantitative des stocks de COS.....	57
7.3.2.2.2.	Fonctionnement du sol.....	59
7.3.3.	Effet du RAZherb (RAZ) combiné au Culti3B (C3B) - Réseau Pilote.....	60
7.3.3.1.	Mesure quantitative des stocks de COS sur Pilote.....	60
7.3.3.1.	Mesure quantitative des stocks de COS sur Chrono.....	61
7.3.4.	Synthèse des résultats et recommandations.....	62
7.3.4.1.	Sites ALTER : outils SR et SSM.....	63
7.3.4.2.	Sites PILOTE et CHRONO : modalité RAZ+C3B.....	64
7.4.	Références bibliographiques.....	64
8.	Annexe 2 : Analyse multivariée des impacts à court terme de la PMS.....	67
8.1.	Compilation des données techniques et économiques des différents itinéraires.....	67
8.2.	Valorisation des données de flore.....	67
8.3.	Données sur le carbone des sols.....	67
8.4.	Analyse multifactorielle des critères retenus.....	67
8.4.1.	Première analyse quantitative sur le maximum d'individus.....	68
8.4.2.	Seconde analyse quantitative sur le maximum de variables.....	70
8.4.3.	Troisième analyse avec une approche en groupe des variables : analyse en composantes multiples	71
9.	Annexe 3 : Evaluation à long terme de l'impact du travail du sol sur le C dans la biomasse et le sol. Approche par modélisation.....	74
9.1.	Modélisation de l'évolution des stocks de C dans la biomasse d'un peuplement de chêne sessile sur une révolution complète.....	74
9.1.1.	Simulations des itinéraires sylvicoles.....	74
9.1.2.	Calcul de biomasse et de la séquestration moyenne de carbone.....	75
9.2.	Modélisation de l'impact du travail du sol sur l'évolution des stocks de C dans la biomasse et sols lors des stades juvéniles.....	75
9.2.1.	Structure du modèle de dynamique du carbone du sol intégrant le travail du sol.....	75
9.2.2.	Données d'entrée du modèle de dynamique du carbone du sol intégrant le travail du sol.....	76
9.2.3.	Essai de calibration du modèle sur le site PILOTE de Chaux.....	76
9.2.3.1.	Estimation des apports de litière de chêne (Figure 3 a).....	76
9.2.3.2.	Estimation des apports de litière de la végétation concurrente (Figure 3 b et c).....	76
9.2.3.3.	Premiers résultats de la calibration de l'évolution du C du sol sur le site PILOTE de Chaux sur cinq années après coupe, perspective d'évolution du modèle.....	77
9.3.	Extension du modèle de l'impact du travail du sol sur la dynamique du C du sol à l'échelle d'une révolution forestière.....	78
9.4.	Bilan de l'approche d'intégration dans le temps.....	78
9.5.	Références bibliographiques.....	79



RÉSUMÉ

La plantation forestière constitue une voie privilégiée pour mettre en œuvre les stratégies d'atténuation et d'adaptation au changement climatique : elle permet d'effectuer les changements d'essence nécessaires pour installer des essences mieux adaptées aux conditions climatiques futures ou des essences fournissant des produits à forte capacité de substitution, et elle renforce la pérennité des forêts en assurant le renouvellement des peuplements endommagés.

La plantation suppose des opérations sylvicoles spécifiques, notamment une préparation mécanisée du site (PMS) qui favorise le développement des plants. Des méthodes innovantes, utilisant des engins mécaniques légers, ont été développées mais leurs performances restent encore mal caractérisées.

Le projet Capsol avait pour objectifs :

- D'étudier les effets de la PMS avant plantation sur deux composantes du bilan de carbone : le carbone organique du sol (COS) et la croissance des arbres.
- D'utiliser les résultats obtenus pour alimenter une évaluation plus complète des méthodes de PMS et des itinéraires techniques de conduite des plantations.
- D'élaborer un programme de transfert vers la filière forestière intégrant les nouvelles connaissances scientifiques et techniques.

L'étude a montré que la PMS a un effet négatif sur le stock de COS, limité à la zone travaillée. La réalisation d'un travail localisé dans la parcelle permet de réduire considérablement le déstockage de COS total à l'échelle de la parcelle en comparaison à des méthodes appliquées en plein. Les outils de PMS induisent une redistribution horizontale des COS à l'échelle de la parcelle et, dans la zone travaillée, une redistribution verticale dans le profil de sol. Un modèle de dynamique du carbone dans la biomasse et dans le sol a été calibré, qui permet de retrouver les observations effectuées dans les expérimentations et de simuler la dynamique à plus long terme.

L'analyse des performances multiples (croissance et survie des plants, coût des itinéraires, intensité des perturbations induites, impacts sur le bilan carbone et la biodiversité floristique) a permis d'identifier les méthodes prometteuses et, pour chacune d'elles, les performances qui doivent être améliorées.

Une démarche d'évaluation multicritère a été initiée, qui a abouti à une description des attentes des principaux acteurs concernés par la plantation, permettant de dégager des pistes de travail prioritaires, en particulier une meilleure prise en compte des performances sociétales des méthodes de plantation.

Les acteurs forestiers expriment de fortes attentes pour une évolution des pratiques de plantation, mais un faible niveau de connaissance et plus encore d'utilisation des outils innovants par les praticiens sont clairement observés. Poursuivre les actions et élargir l'effort de formation actuel pour essayer de toucher de nouvelles personnes, semble indispensable.

L'absence de mise en réseau des acteurs est apparue comme un frein fort à l'adoption des outils. Néanmoins, différents leviers ont été proposés aux praticiens pour y remédier, et aucun n'a convaincu. Ceci suggère qu'au-delà des innovations techniques sur les outils, des innovations sont également nécessaires dans l'organisation des interactions entre acteurs, passant par l'invention de nouvelles formes de collaboration et par l'acceptation de ces nouveautés par les acteurs concernés.

ABSTRACT

Forest plantation requires specific silvicultural operations, including mechanical site preparation (MSP) that favours seedling establishment and growth. New MSP methods, that use lightweight tools, were recently developed and their performances are not well established.

The objectives of the CAPSOL project were:

- Study the effects of MSP on two components of stand carbon balance: soil organic carbon (SOC) and tree growth
- Integrate the results on carbon into a comprehensive evaluation of MSP methods and of young plantation management.
- Prepare a knowledge transfer program towards the forest sector that integrate the news technical and scientific results.

The study showed that MSP has a negative effect on SOC stocks, which is limited to the area prepared by the MSP tool. Using localised MSP, where only the area close to the seedling is prepared and the rest of the stand is left undisturbed, considerably reduce SOC losses at stand scale, compared to methods that prepare the soil on the entire stand area. MSP leads to horizontal redistribution of SOC, at stand scale. In the prepared area, it leads to vertical redistribution of SOC within the soil profile. A model of tree and soil carbon dynamics was calibrated, used to fit the experimental data and to simulate carbon dynamics within the stand.

We analysed the multiple performances (seedling survival and growth, operation costs, disturbance intensity, carbon balance, vegetation biodiversity) of the MSP methods, to identify the most interesting methods and, for each method, the performances that need to be improved.

Using a Multi Criteria Decision Analysis approach, we described the expectation of the main stakeholders and we identified some actions to be developed. Evaluating the social performances of plantation methods should be given a high priority.

Most forest actors expect changes in plantation practices. However, low levels of awareness about innovating tools and use of these tools were observed among forest practitioners. Intensifying training activities and maintaining a diversity of training approaches, with the objective of reaching more people, is required.

The low level of networking among forest actors emerges as a main factor reducing the adoption of innovating tools by forest practitioners. However, no leverage to improve the adoption of innovative tools could be identified, suggesting that changes in the interactions among forest actors may also be required, that would favour new forms of collaboration.



PREAMBULE

Ce rapport présente le projet CAPSOL (2016-2019) et synthétise les principaux résultats obtenus. Une part des résultats est présentée de façon détaillée dans des rapports ou des articles de journaux déjà publiés ou en cours de publication (cités dans le texte). Dans les cas où des rapports ou articles ne sont pas encore disponibles (travaux en cours), des présentations plus détaillées des résultats sont fournies en annexe.

Le projet CAPSOL a bénéficié du lancement de projets compagnons :

- Projet PINNS, Promouvoir l'Innovation en Sylviculture (financement RMT AFORCE)
- Projet IPLOR, Innover la Plantation en Lorraine, (financement région Grand-Est)
- Bourse de thèse Edouard Quibel (financement région Normandie)
- Bourse de thèse Jean-Charles Miquel (co-financement INRA et région Grand-Est)

Le rapport restitue les résultats conjoints de ces différents projets.

1. Contexte du projet

La forêt contribue fortement à l'atténuation des émissions de GES, avec une progression régulière du puits de carbone forestier dans les dernières années (Colin 2014). Un rapport récent (Madignier et al 2015) suggère que la forêt pourrait encore accroître ce rôle de puits de carbone et donc participer largement aux objectifs de réduction des émissions. Les deux leviers évoqués sont l'accroissement de la séquestration de carbone en forêt, et une limitation des émissions via l'augmentation de l'utilisation des produits forestiers en substitution des énergies fossiles et de matériaux de construction plus énergivores. L'atteinte de ces objectifs repose sur différents leviers à articuler : séquestration du carbone en forêt, augmentation de la production de bois et renouvellement forestier associé à l'emploi d'essences à même de fournir des produits à forte capacité de substitution. Pour le gestionnaire, il s'agit de dynamiser les itinéraires sylvicoles des essences en place mais aussi d'installer de nouvelles essences plus adéquates.

L'adaptation des peuplements forestiers aux changements climatiques constitue un prérequis à tout objectif d'atténuation. La stratégie d'adaptation porte sur l'ajustement des couples essence-station aux conditions climatiques futures et sur le renforcement de leurs capacités de résilience aux perturbations (sécheresses, tempêtes, incendies). Le renouvellement des peuplements forestiers est le levier central de ces stratégies d'adaptation. Ces dernières décennies, les gestionnaires privilégiaient la régénération naturelle mais, depuis quelques années, la tendance est à un renouveau d'intérêt pour la plantation. Les plantations sont nécessaires pour opérer des changements d'essences et/ou de provenances. En outre, les échecs récurrents de régénération naturelle dans des contextes de végétation bloquante (ex : fougère, molinie) ou de terrains difficiles, ou encore lorsque l'état des peuplements ne permet plus d'assurer un ensemencement suffisant (peuplements dépérissants ou fortement endommagés), rendent nécessaire le recours à la plantation.

Conséquence de la forte réduction des surfaces plantées depuis les années 80, le savoir-faire des opérateurs en matière de plantation s'est altéré. Le RMT Aforce fait état d'une perte de référence des forestiers face aux facteurs clés de réussite des plantations dans de nombreuses régions (Rosa et al 2014), faisant ainsi suite aux constats du Ministère en charge des forêts (MAA) relatifs aux échecs de plantation (Goudet 2010). Par ailleurs, dans les contextes actuels, réglementaire, environnemental et social, les techniques de plantation traditionnelles ne sont plus toujours admises : forte limitation des intrants, interdiction des traitements chimiques dans les espaces ouverts au public (loi Labbé sur l'utilisation des produits phytosanitaires, 2014), crainte d'impacts potentiels sur la biodiversité et sur les sols, mauvaise acceptabilité sociale en lien avec une image très interventionniste sur un milieu "naturel". Pour répondre à ces enjeux nouveaux associés à la plantation, les acteurs de la gestion forestière et de la recherche ont mis en place des programmes de R&D visant à développer des itinéraires techniques de plantation innovants ainsi que des programmes de transfert visant à assurer la diffusion des pratiques recommandées.

La préparation du site avant plantation est une étape clé des itinéraires sylvicoles de plantation, tant sur le plan des performances techniques et économiques que des impacts environnementaux de ces itinéraires, et les méthodes de préparation du site traditionnelles demandent à être revues. Dans certains contextes de blocage de régénération causé par la végétation ou par les conditions édaphiques, les méthodes traditionnelles ne proposent pas de solution techniquement et économiquement efficace pour assurer le succès de la plantation. Certains de ces contextes sont fréquemment rencontrés en France et, plus largement, en Europe. De plus, à l'heure où les pratiques agricoles s'orientent vers des labours moins profonds et une permanence du couvert pour limiter les pertes de carbone des sols, la question de l'intensité du travail du sol à réaliser lors de l'installation des peuplements forestiers se pose également. Le travail du sol doit donc permettre la levée des contraintes à l'installation des

plants, tout en cherchant à réduire autant que possible les perturbations du milieu. De nouvelles méthodes de préparation mécanisée du site ont été développées en France pour répondre à ce double objectif, et sont en cours d'évaluation.

Dans le cadre de la COP21, le Ministre de l'Agriculture souhaite promouvoir un programme international pour augmenter la séquestration du C dans les sols de « 4 pour 1000 ». Les stocks de COS dans les sols forestiers sont compris entre 50 et 100 tC/ha et sont du même ordre de grandeur, voire supérieurs au stock de carbone aérien (Arrouays et al 2001). Même s'ils sont moins connus que les stocks aériens, ils évoluent comme en témoigne le rapport récent réalisé sur les sites du réseau Renecofor de l'ONF. Jonard et al (2013) constatent un gain moyen de 0,19 tC/ha/an en feuillus et même 0,49 tC/ha/an en résineux. Ce stockage n'est pas pris en compte actuellement dans le bilan national des GES, sauf en cas de changement d'usage des sols (passage forêt vers prairie ou culture).

Les stocks de COS en forêt sont tout particulièrement affectés lors du renouvellement des peuplements car la mise en lumière accélère la minéralisation de la matière organique. Cet effet transitoire est d'autant plus marqué que l'on perturbe fortement le sol. L'estimation des variations de stock est très variable selon les sites, néanmoins on peut estimer une perte maximale de l'ordre de 30 tC/ha (Arrouays 2002). Cependant, la dynamique des stocks de COS au cours du cycle sylvicole complet reste mal documentée (Hedde et al, 2008 ; Guillet et al, 2010) et a le plus souvent été étudiée sur des itinéraires sylvicoles différents des itinéraires actuellement préconisés (notamment des durées de révolution longues). Les travaux estimant le COS se focalisent majoritairement sur les stades matures et les données manquent encore dans les phases d'installation. Ces données sont donc particulièrement cruciales afin de pouvoir (1) identifier les pratiques sylvicoles perturbant le moins la séquestration de COS lors du renouvellement des peuplements et (2) estimer l'évolution des stocks sur l'intégralité du cycle sylvicole.

Le projet Capsol avait pour objectif général :

- D'étudier les effets de la préparation mécanisée du site (PMS) avant plantation sur deux composantes du bilan de carbone : le carbone organique du sol et la croissance des arbres.
- D'utiliser les résultats obtenus pour alimenter une évaluation plus complète des méthodes de PMS et des itinéraires techniques de conduite des plantations.
- D'élaborer un programme de transfert vers la filière forestière intégrant les nouvelles connaissances scientifiques et techniques.

2. Etat de l'art

2.1. Caractériser la dynamique du COS en forêt

Le COS constitue le premier pool en quantité au sein des écosystèmes terrestres et la gestion du COS est considérée comme l'une des voies possibles pour l'atténuation de l'augmentation du CO₂ atmosphérique (Lal 2004). Le COS étant sensible aux modifications des conditions environnementales, le sol peut être une source (minéralisation) ou un puits de carbone (séquestration) en particulier selon les pratiques de gestion. Plusieurs travaux (Arrouays et al 2002, Gis Sol 2011) ont montré que les forêts gérées sont des écosystèmes efficaces pour stocker du carbone et que le travail mécanique du sol constitue une pratique « déstockante ».

Au sein du stock de COS, il est important de distinguer différents pools de carbone selon leur temps de résidence, de quelques mois pour les pools les plus labiles à plusieurs centaines d'années pour les pools stables (Von Lützwow et al 2007, Balesdent et al, 2018). Ces pools réagissent différemment aux changements de pratiques de gestion (Six et al 2002). La séquestration du COS est d'autant plus efficace que le carbone est stocké sous une forme organique stable.

Cette distinction des pools de COS est utilisée dans les modèles conceptuels de dynamique des Matières Organiques (MO) dans les agrosystèmes (Stockmann et al 2013, Derrien et al, 2016). Leur adaptation au système forestier devrait intégrer la dynamique sylvicole (Hedde et al 2008, Guillet et al 2010) et les spécificités fonctionnelles des sols forestiers en termes de recyclage de la MO. La caractérisation des stocks de COS et la compréhension de leurs dynamiques sont actuellement des thématiques de recherches importantes pour comprendre comment certaines pratiques sylvicoles peuvent influencer les processus de séquestration du carbone.

2.2. Comparer les bilans de carbone selon différents scénarios sylvicoles

Un levier de l'atténuation des changements climatiques envisagé au niveau forestier est d'augmenter le stockage de carbone en forêt par un changement des pratiques de gestion, qui pourrait s'effectuer selon plusieurs voies (Lindner 1998). L'allongement de la révolution ou l'augmentation de la densité tout le long de l'itinéraire permettent une augmentation du stock de carbone, sans changer de système de production (Fortin et al 2012, Routa et al 2012). Des gains peuvent également être espérés en changeant d'essence, mais ils sont difficiles à évaluer car il



faut estimer à la fois les différences de productivité et de durée de révolution (Vallet 2005). De plus, la substitution d'essence passe nécessairement par la plantation et il faut alors également estimer les modifications de stock de COS induites par la plantation.

Ce levier reste difficile à démontrer. Un petit nombre d'outils récemment développés permettent d'effectuer des bilans de carbone dans des peuplements menés selon différents scénarios sylvicoles. Ces outils se basent sur des modèles de croissance des peuplements et des modèles de carbone déjà existants. La plupart de ces approches rencontrent plusieurs difficultés majeures : (1) la croissance juvénile est actuellement mal décrite dans les modèles de croissance disponibles pour les principales essences forestières en France, si bien que l'on ne peut pas comparer des itinéraires qui diffèrent dans les stades initiaux ; (2) le carbone du sol obéit dans les années qui suivent la plantation à une dynamique rapide et très différente de celle dans la phase adulte, considérée comme stationnaire, et qui est régie par des processus encore mal connus ; (3) le couplage des modèles de carbone et de croissance reflétant les interactions existantes entre les processus décrits est complexe.

2.3. Intégrer les stades juvéniles dans les modèles de croissance

La prise en compte des opérations sylvicoles réalisées dans les jeunes stades passe par l'intégration de ces stades dans les modèles de croissance, qui requiert :

1. Une description de l'impact immédiat des opérations sylvicoles sur le développement des arbres.

Les modèles qui estiment la croissance à l'issue de la phase juvénile selon la réalisation - ou non - de l'opération constituent une première approche (Knowe et al 1992). Ces modèles basés sur des relations dendrométriques phénoménologiques produisent généralement des prédictions robustes. Les principales limites sont la difficulté d'extrapoler les résultats obtenus à d'autres conditions et la difficulté d'utiliser ces résultats pour comprendre les facteurs qui limitent la croissance des jeunes arbres.

Ces limites peuvent être en partie levées par l'introduction dans le modèle de relations fonctionnelles décrivant l'impact de facteurs du milieu sur la croissance des arbres. Les modèles « hybrides » combinent ainsi des relations phénoménologiques de croissance et des relations fonctionnelles (Landsberg et Waring 1997). Ces modèles peuvent être efficacement mis en œuvre pour évaluer des pratiques culturales manipulant les facteurs du milieu et estimer leurs effets sur les arbres (Watt et al 2007). Le modèle 3PG a ainsi été utilisé pour décrire l'effet d'opérations sylvicoles (contrôle de la végétation, préparation du sol...) effectuées dans les jeunes stades (Mason 2004).

2. Une description de l'impact sur la révolution complète.

Pour estimer l'impact à long terme des opérations pratiquées dans les jeunes stades, il est nécessaire de disposer de longues séries de mesures ou sinon, par modélisation, de connecter les modèles juvéniles à des modèles adultes pour pouvoir effectuer les simulations attendues. Néanmoins, aboutir les modèles et utiliser les sorties des modèles juvéniles comme entrées des modèles adultes peut mener à des estimations erronées (Richardson et al 2006). L'intégration des deux phases dans un modèle unique est alors nécessaire. Celle-ci repose sur l'intégration des processus déterminant la croissance, différents selon les stades, ainsi que des variables utilisées pour caractériser la dynamique des peuplements.

2.4. Modéliser la dynamique du carbone sol- plante sur une révolution complète

Les modèles d'évolution du COS fonctionnant à l'échelle de la parcelle sont des modèles centrés sur la qualité des matières organiques, qui décrivent les flux entre des réservoirs de carbone de qualités distinctes. Les modèles comme RothC (Jenkinson et Rayner 1977) et Century (Parton et al 1987) intègrent des paramètres climatiques et pédologiques détaillés comme la composition initiale de la litière, la nature et le fonctionnement des décomposeurs, la température et l'humidité du sol qui jouent un rôle important dans les processus de décomposition de la MO du sol (Braakhekke et al 2011).

Les modèles décrivant à la fois le carbone aérien des arbres et le COS restent rares. La plupart sont découplés : les modèles de croissance aérienne alimentent les modèles sols mais, à l'inverse, les effets du fonctionnement intégré du sol sur la croissance ne sont généralement pas implémentés. Ces modèles sont de deux types :

- Basés sur des modèles de croissance à base écophysologique. En France, Castanea (forêts monospécifiques équiennes, Dufrêne et al 2005) ne permet pas d'aborder les jeunes peuplements, tandis que Graeco (pin maritime, Moreaux 2012) va plus loin et introduit le travail du sol à l'installation en modifiant l'architecture du modèle RothC. Dans le cas de jeunes peuplements, les apports de litières sont principalement le fait de la végétation herbacée spontanée. Ce dernier modèle est extrêmement prometteur pour décrire complètement le bilan carbone de différents itinéraires mais n'est disponible que pour le Pin maritime. Toutefois, l'initialisation de ce modèle nécessite des données historiques qui sont souvent difficiles à produire dès que le peuplement se trouve en dehors d'un site expérimental suivi sur le long terme par une équipe de recherche.

- Basés sur des modèles de croissance phénoménologiques. Dans une première approche, Vallet (2009) a pu alimenter le modèle Century par des chutes de litières calculées à partir de modèles de croissance (Fagacées, Simcop, Pnl). Actuellement, le modèle SCLD (Sainte-Marie et al 2014) développe une approche probabiliste qui permettra à terme une utilisation plus directe des modèles de croissance.

3. Objectifs et démarche générale

Le projet Capsol a été construit autour de **4 grandes questions** :

1. La première question concernait l'impact au cours des premières années suivant la plantation, de méthodes différenciées de préparation du sol sur la dynamique (stocks et flux) du COS, en termes de quantité mais aussi de qualité. Les méthodes de PMS favorables au maintien du stock de COS ont été identifiées.
2. L'intérêt de la PMS est en premier lieu de favoriser une bonne installation des plants pour optimiser leur croissance initiale. La seconde question était d'identifier les méthodes favorables au démarrage du peuplement en termes de survie et de croissance.
3. Le compromis entre les deux premiers bilans a ensuite été analysé pour proposer des méthodes d'installation du peuplement efficaces. D'autres facteurs associés, environnementaux et socio-économiques ont été intégrés à l'analyse. La question des bilans des différentes méthodes sur une révolution du peuplement a été abordée dans une approche plus prospective.
4. La dernière question concerne la diffusion des pratiques innovantes ainsi développées et s'est focalisée sur les freins à l'adoption de ces nouvelles pratiques par les acteurs socio-économiques et sur les leviers potentiels pour accélérer les évolutions techniques.

L'**objectif finalisé** est d'évaluer et promouvoir de nouvelles méthodes de PMS qui puissent s'appliquer à différentes conditions (station, essence, objectif de gestion...). Le projet se focalise plus particulièrement sur des méthodes basées sur l'utilisation d'engins mécaniques légers (mini-pelle) portant différents outils. Il intégrera également de façon ponctuelle pour l'analyse, des performances environnementales et économiques des techniques innovantes avec des outils montés derrière tracteur forestier, engin plus lourd mais de plus grande productivité. Chaque outil a été conçu pour lever un ensemble spécifique de contraintes à l'installation des plants liées à la végétation (fougère, graminées...) ou au sol (compaction, hydromorphie, sécheresse estivale...). Les outils montés sur mini-pelle constituent une alternative intéressante aux herbicides car ils permettent un contrôle efficace de la végétation, ainsi qu'aux méthodes mécaniques classiques utilisant des outils montés sur engins lourds, car ils ont un impact plus réduit sur le milieu. Ces méthodes ont été intégralement développées en France et ne comportent actuellement que peu d'analogues dans les autres pays.

Le projet s'est appuyé sur des réseaux expérimentaux existants. Le réseau Alter teste des méthodes alternatives aux herbicides pour maîtriser la végétation dans des premières années de plantations. Le réseau comporte huit plantations expérimentales installées dans des situations bloquantes qui croisent deux essences et différentes modalités de PMS. Le réseau Pilote vise à évaluer la faisabilité technique et la performance économique de divers itinéraires techniques de plantation utilisant une large gamme de méthodes de PMS. Le réseau comportait au début du projet dix sites avec des essences différentes. Une description des réseaux Alter et Pilote est disponible à : www.inra.fr/renfor/Reseaux-d-experimentation

Le dispositif Icf teste plus particulièrement des itinéraires de production de biomasse et de petits produits bois résineux en croisant des techniques d'installation (préparation physique et chimique des sols), des essences et des itinéraires sylvicoles. Le dispositif Chrono (1994) permet d'effectuer une comparaison d'itinéraires de plantation et de régénération naturelle sur une durée longue. L'ensemble des dispositifs se distribue sur une part importante du territoire national et couvre ainsi différentes situations pédoclimatiques. Il représente des situations de plantations souvent problématiques, très classiquement rencontrées en France. Deux grands contextes ont été sélectionnés : stations acides sèches dominées par la fougère, et stations acides hydromorphes dominées par la molinie.

L'étude de la croissance des arbres et de la dynamique du COS dans les jeunes stades a reposé sur une approche combinant expérimentation et modélisation, qui a mobilisé les données issues des différents réseaux expérimentaux acquises pendant la durée du projet ou préalables au projet, et des données complémentaires issues de réseaux extérieurs.



Les réseaux Alter, Pilote et Icif sont également le support d'études des performances économiques et environnementales (sol, végétation) des méthodes de PMS. Les résultats de ces études ont permis d'alimenter l'analyse des performances multiples de la PMS.

La réflexion sur la stratégie à mettre en œuvre pour assurer le transfert des méthodes s'est basée sur un travail d'enquêtes et des ateliers de réflexion impliquant les différents acteurs du secteur forestier concernés par la plantation et par l'utilisation de la PMS.

Le projet Capsol était structuré en 4 tâches. Les bilans détaillés de chaque tâche sont présentés dans la section suivante.

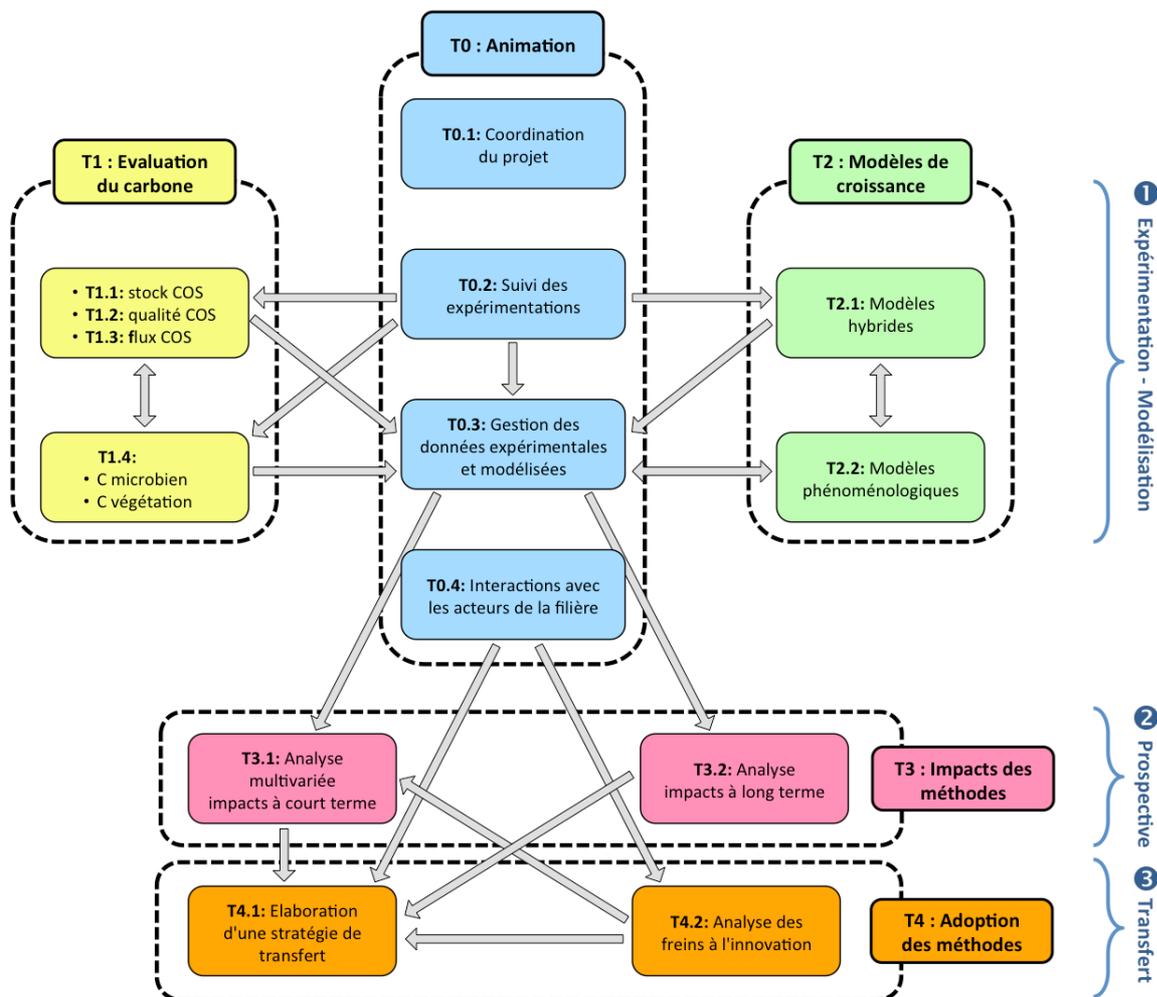


Figure 1: Diagramme opérationnel du projet : contenu des tâches et interactions

4. Bilan / Principaux résultats obtenus

4.1. Tâche 1: Estimation des stocks et des flux de carbone dans les sols

Contributeurs : F. Bureau, E. Quibel, L. Cécillon, R. Levailant, M. Aubert, L. Vincenot, L. Lesaint, C. Guenordeau, H. Le Glatin, T. Langlois

Nous présentons ici une synthèse des principaux résultats sur les stocks de C dans les sols, et une présentation plus détaillée de ce travail est fournie en annexe 1.

L'objectif de cette tâche est d'évaluer les conséquences des travaux de préparation mécanique du sol (PMS) lors de la phase de plantation des peuplements forestiers sur (i) les stocks de Carbone Organique du Sol (COS), (ii) la variabilité spatiale de ces stocks et (iii) les flux de C sous forme de CO₂.

Les résultats obtenus dans cette tâche proviennent du travail de doctorat d'Edouard Quibel intitulé « *Impacts de la préparation du sol lors de la phase de plantation sur la dynamique des matières organiques et la fonction de stockage du Carbone dans les sols forestiers* ». Financée pour une durée de 3 ans par une bourse de la région Normandie, cette thèse a débuté en octobre 2016 et la soutenance est prévue en juin 2020.

4.1.1. Matériel et méthodes

4.1.1.1. Outils testés, sites d'études et stratégie d'échantillonnage

Quatre types d'outils sont testés : Le Scarificateur Réversible® (SR), le Sous-Soleur Multifonction® (SSM), le RAZherb® (RAZ) et le Culti 3B® (C3B). Ces outils sont utilisés seuls ou en combinaison. Dans le cadre de cette tâche, nous avons testés les modalités suivantes :

- Le Scarificateur Réversible® utilisé seul (modalité SR) qui permet d'éliminer les espèces herbacées concurrentes ayant des systèmes racinaires profonds (ex Fougère aigle) ;
- Le Scarificateur Réversible® utilisé en combinaison avec le Sous-Soleur Multifonction® (modalité SR+SSM); l'outil SSM intervient après le passage du SR, il décompacte le sol jusqu'à 60 cm de profondeur et permet la création d'un billon ; cette combinaison d'outils est adaptée aux sols acides oligotrophes envahis par la Fougère aigle.
- le RAZherb® (RAZ) utilisé en combinaison avec le Culti3B® (C3B) (modalité RAZ+C3B), l'outil RAZ permet un désherbage du tapis herbacé par raclage superficiel. L'outil C3B passe ensuite pour décompacter le sol entre 40 et 60cm et réaliser un billon surélevé de 10 à 30 cm; cette combinaison d'outils est adaptée aux sols hydromorphes envahis par la Molinie.

Ces trois modalités sont systématiquement comparées avec une modalité témoin (T) pour laquelle il n'y a pas eu de PMS avant la plantation.

La tâche 1 a été réalisée sur 10 sites au total appartenant aux 2 réseaux (ALTER et PILOTE) et un dispositif de l'ONF (CHRONO). Les modalités SR et SR+SSM ont été testées sur 6 sites du réseau ALTER : Bord-Louviers, Haguenau (parcelles 32, 35 et 150), Villecartier et Escource. La modalité RAZ+C3B a été testée sur 3 sites du réseau PILOTE (Chaux parcelle 212/1026, Chinon et Rennes). Aux 3 sites PILOTE, il faut ajouter le dispositif CHRONO (Chaux parcelle 213) mise en place en 1994. Ce dispositif permet d'avoir un temps de différenciation depuis la réalisation de la préparation mécanisée du site plus important : 24 ans contre seulement 2 à 4 ans pour les 3 sites PILOTE retenus.

Pour appréhender la variabilité spatiale et le niveau des stocks de COS au sein des parcelles expérimentales des réseaux ALTER et PILOTE, l'échantillonnage des sols s'est fait sur 9 transects élémentaires par modalité, soit 3 transects élémentaires par parcelle unitaire au sein des dispositifs expérimentaux en blocs. Chaque transect élémentaire est centré sur la ligne de la plantation et comporte 3 points de prélèvement au maximum : l'inter-rang, la ligne de plantation et l'andain. Ce dernier point correspond à la zone de dépôt à la surface du sol de l'ensemble des débris végétaux extraits du sol par SR ; l'utilisation de la modalité RAZ+C3B ne crée pas d'andain sur les sites Pilote. Pour chacun de ces points de prélèvements, l'échantillonnage du sol est réalisé sur un profil pédologique de 60 cm de profondeur, creusé à la main. Sur chaque profil, les échantillons de sol sont prélevés systématiquement sur les couches suivantes : OL, OF+OH (si présent), 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-45 cm et 45-60 cm. Les échantillons de sol ainsi prélevés sur les 3 transects élémentaires sont regroupés par point de prélèvement identique (inter-rang, ligne de plantation et andain) et par profondeur équivalente (OL / OF+OH / 0-10 cm / 10-20 cm / 20-30 cm / 30-45 cm et 45-60 cm) pour constituer 1 transect composite par parcelle unitaire. Au final, on obtient 3 transects composites par modalité. Les échantillons composites sont réalisés au laboratoire après tamisage à 5 mm : un échantillon composite correspond au mélange de trois échantillons de poids identique (100g). La réalisation d'échantillons composites permet de gommer l'hétérogénéité spatiale par point de prélèvement (inter-rang, ligne de plantation et andain) et donc d'obtenir une meilleure représentativité en termes d'échantillonnage. La stratégie d'échantillonnage décrite ci-dessus a dû être adaptée pour le sol très caillouteux du site ALTER de Bord Louviers (voir le détail en annexe 1).

4.1.1.2. Calcul des stocks de COS.

Le calcul des stocks de COS ($\text{MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$) prend en compte la teneur en C organique, la densité apparente et l'épaisseur de chaque couche de sol. Le stock de COS est calculé selon la formule proposée par Jonard et al (2017). Les stocks de COS ont été calculés à profondeur constante et à masse de sol équivalente (Wendt et al 2013). Le stock de COS est également calculé à l'échelle du peuplement en additionnant les stocks calculés pour chaque zone de prélèvement (ligne de plants, inter-rangs, andains) et en tenant compte de la surface relative que chacune de ces zones représente à l'échelle de la parcelle.

D'un point de vue méthodologique, il est important de signaler que la comparaison de ces 2 méthodes de calcul des stocks de COS ne fait pas apparaître de différences significatives entre les stocks calculés à profondeur



constante et les stocks calculés à masse équivalente pour la majorité des sites (test de Kruskal-Wallis ; p-value =0,8565). Seul le site de Chaux p213 du dispositif CHRONO ne suit pas cette tendance. Dans la suite de cette partie, les stocks sont donc présentés à profondeur constante sauf sur le dispositif PILOTE ou pour des raisons de comparaison avec le dispositif CHRONO, les stocks présentés seront à masse équivalente.

4.1.1.3. Qualité des stocks de COS et paramètres fonctionnels

La qualité des stocks de COS est mesurée à l'aide de l'analyse thermogravimétrique par pyrolyse Rock Eval (Lafargue et al, 1998). Cette analyse est aujourd'hui de plus en plus utilisée pour déterminer la composition du carbone organique total (COT) dans un échantillon de sol et permet d'appréhender rapidement les pools labiles et stables de COS (Disnar, 2003 ; Carrie et al, 2012 ; Saenger et al, 2015 ; Cécillon et al, 2018). Nous avons utilisé six indices décrivant la stabilité thermique du COS issus de la littérature (HI, OIRE6, I, R, T50_CH_pyr et T50_CO2_ox) dont les caractéristiques sont détaillées dans l'annexe 1.

Pour mesurer l'impact de la PMS lors de la phase de plantation, nous avons suivi des paramètres permettant d'aborder le fonctionnement actuel du sol en relation avec la dynamique du C à savoir : la minéralisation potentielle du C (Hopkins, 2008), le C de la biomasse microbienne (Vance et al, 1987) et le C extractible à l'eau (Corvasce et al, 2006).

4.1.1.4. Traitements statistiques

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2019) et des packages Agricolae (Felipe de Mendiburu, 2019) et ADE4 (Thioulouse et al, 2004). La normalité et l'homoscedasticité ont été testées sur les différents jeux de données (stocks COS, paramètres fonctionnels). Dans l'ensemble des cas, les conditions pour effectuer des tests paramétriques n'étaient pas réunies. Lorsque les tests de comparaison des stocks de COS ou de paramètres fonctionnels entre les différentes modalités de travail mécanique du sol sont effectués site par site (Bord-Louviers, PILOTE et CHRONO), un test non paramétrique de Kruskal-Wallis est utilisé. L'analyse globale pour les 5 sites du réseau ALTER a été effectuée grâce à des tests de Scheirer-Ray-Hare (Sokal and Rohlf, 1995), pendant non paramétrique de l'ANOVA à 2 facteurs. Dans ce cas, on teste l'effet « site », l'effet « modalité » et l'effet d'interaction « site * modalité » sur les stocks de COS et les paramètres fonctionnels mesurés. Pour l'ensemble des différents tests statistique utilisés, la différence est considérée comme significative pour une p-value < 0.05 ; dans le cas contraire, les résultats non-significatifs sont notés « NS ».

4.1.2. Effet du Scarificateur Réversible et du Sous-Soleur Multifonction – Réseau ALTER

Il s'agit ici de présenter l'impact des outils montés sur mini-pelle adaptés à lutter contre la végétation concurrente de type Fougère aigle sur sols peu fertiles. Ces outils ont été testés sur le réseau ALTER. Compte tenu de ses caractéristiques pédologiques qui ont conduit à adapter la stratégie d'échantillonnage, le site de Bord Louviers a été traité séparément (les résultats détaillés sont donnés en annexe 1). Les résultats obtenus dans les 5 autres sites ALTER ont fait l'objet d'une analyse comparative globale.

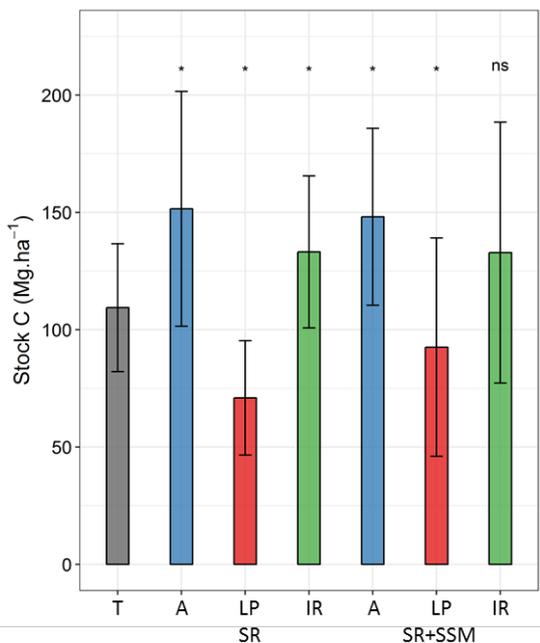
Sur les sites ALTER, les stocks de COS se situent globalement autour d'une centaine de tonnes de COS par hectare sur 0-60 cm. Le site d'Haguenau p35 présente le stock le plus élevé de C organique dans les horizons minéraux (128,34 MgC.ha⁻¹) et le site de Bord-Louviers dans les horizons O de litière (72,60 MgC.ha⁻¹). Ces stocks de COS se situent globalement dans les valeurs moyennes voire les valeurs supérieures des stocks donnés par Jonard et al (2017) pour le réseau RENECOFOR.

Les modalités SR et SR+SSM affectent les stocks de COS en les diminuant significativement par rapport au témoin. Cet impact est localisé aux zones travaillées par les outils c'est-à-dire sur les lignes de plantation (figure 2). Cette diminution atteint 16 à 35 % du stock de COS présent dans le sol minéral du témoin (0-60 cm) et 20 à 37 % de son stock total litière comprise (litière + 0-60 cm). Ces valeurs peuvent être plus élevées pour des sols présentant une forte accumulation de litière (humus de type mor) : sur le site de Bord-Louviers, la diminution sur les lignes de plantation atteint 40 à 50 % du stock de COS présent dans le sol minéral du témoin et 60 à 70 % de son stock total. Les modalités SR et SR+SSM impactent à la fois les horizons supérieurs (0-30 cm) et profonds (30-60 cm) dans la ligne de plantation mais de manière différente (figure 2) : l'outil SR diminue les stocks de COS de ces deux compartiments du sol alors que le passage de l'outil SSM mélange ces deux compartiments et redistribue le COS sur l'ensemble du profil 0-60 cm.

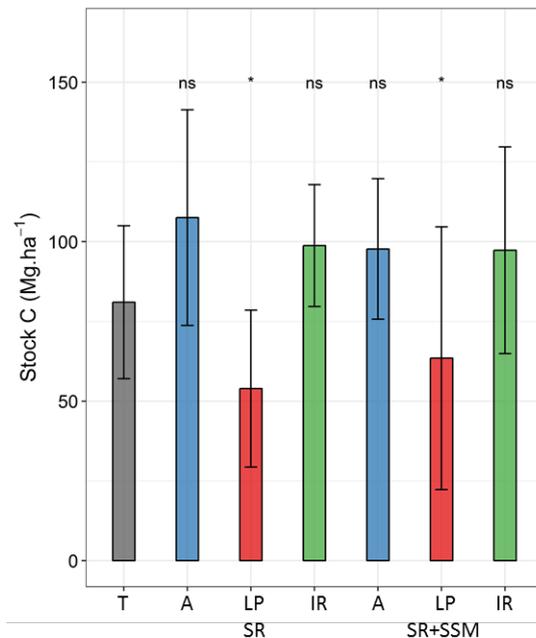
Cette diminution des stocks de COS dans la zone travaillée suite à la PMS par les modalités SR et SR+SSM n'est pas uniquement attribuable à un déstockage du COS sous forme de CO₂ par minéralisation. En effet, l'utilisation de SR conduit à la création d'inter-rangs non travaillés mais aussi de zones d'accumulation riches en matière organique, les andains. Le stock superficiel de COS éliminé dans la ligne de plantation est donc, en partie, déplacé vers les andains. L'utilisation de l'outil SR dans les 2 modalités induit donc une répartition différente des stocks de COS des horizons superficiels (litière + 0-30 cm) entre zones travaillées et zones non travaillées à l'échelle de la parcelle (i.e. du peuplement). C'est pour cette raison que l'extrapolation à l'échelle du peuplement montre que les

stocks de COS calculés jusqu'à 60 cm de profondeur (avec ou sans litière) ne présentent pas de différence significative avec le témoin. A cette échelle, seuls les stocks de COS sur l'épisolum humifère (Litière + 0-10 cm) peuvent présenter des différences significatives avec le témoin dans certaines situations (Bord-Louviers, Haguenau P32).

Stock de COS sur 0-60 cm



Stock de COS sur 0-30 cm (topsoil)



Stock de COS sur 30-60 cm (subsoil)

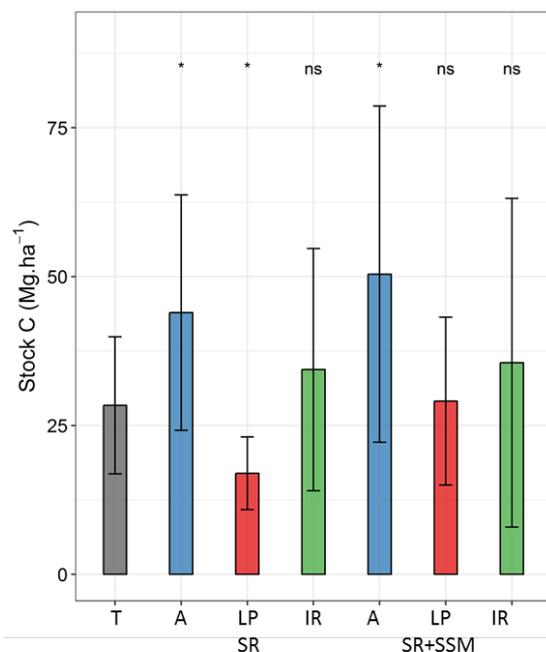


Figure 2: Stocks de COS (MgC.ha⁻¹) à l'échelle du transect calculés sur 0-60 cm, sur le topsoil (0-30 cm) et sur le subsoil (30-60 cm) dans les 5 sites Alter (A = andain ; LP = ligne de plantation ; IR = inter-rang ; Scheirer-Ray-Hare, p<0,05).

L'impact des deux modalités SR et SR+SSM sur les stocks de COS dans la ligne de plantation s'accompagne d'une différence de fonctionnement en termes de dynamique du COS. Sur l'horizon 0-10 cm, la minéralisation potentielle du COS s'ajuste aux valeurs des stocks de COS mesurés précédemment : faibles dégagements de CO₂ dans les lignes de plantation et plus fort dégagement de CO₂ sur les andains. Le taux de minéralisation dans les 2

modalités travaillées suit exactement les mêmes tendances : diminution significative par rapport au témoin dans les lignes de plantation et des valeurs similaires au témoin au niveau de l'inter-rang et de l'andain. Ces résultats s'accompagnent d'une baisse du C microbien sur les lignes de plantation par rapport aux zones non travaillées. Par ailleurs, les stocks de C extractible à l'eau diminuent dans les zones travaillées et sa répartition en profondeur au sein du profil de sol est homogénéisée.

L'approche qualitative du COS menée par l'analyse Rock-Eval permet de montrer que la diminution du stock de COS dans les zones travaillées s'accompagne d'une redistribution verticale des pools de COS au sein des profils de sol travaillés par la modalité SR + SSM notamment (voir les détails de l'ACP en annexe 1). L'outil SR semble lui favoriser la présence de MO labile en profondeur ce qui est susceptible de provoquer un « priming effect » et donc un déstockage du carbone stabilisé depuis longtemps dans le sol. Bien que les outils SR et SSM sont considérés ne pas bouleverser fondamentalement l'organisation des horizons pédologiques, les résultats obtenus ici montrent qu'ils provoquent un mélange des horizons qui impacte la distribution des pools de COS. Ces premiers résultats obtenus sur le site de Bord Louviers devront être confirmés sur les autres sites du réseau ALTER soumis à l'analyse RE6.

Les effets de ces changements de fonctionnement localisés dans la ligne de plants restent difficiles à appréhender sur le moyen et le long terme, notamment en termes de dynamique de reconstitution des stocks de COS dans les lignes de plantation avec le développement des arbres. A court terme, on peut aussi penser que le flush de minéralisation de la MO qui suit sans doute le travail des outils lors de la mise en place des plantations peut avoir un effet positif sur la croissance des jeunes plants, ceux-ci bénéficiant des éléments minéraux libérés par ce processus et ce, d'autant plus dans des sols contraignants d'un point de fertilité minérale comme ceux du réseau ALTER.

Par rapport à l'impact des outils SR et SSM sur les stocks de COS, les résultats obtenus nous permettent de formuler les recommandations suivantes :

- Si les conditions stationnelles le permettent (sol peu tassé), privilégier l'utilisation du scarificateur réversible (SR) seul pour lutter contre la végétation concurrente car il a moins d'impact sur la redistribution du COS au sein du profil de sol travaillé ;
- Quand les conditions stationnelles le nécessitent (sol tassé), l'utilisation du scarificateur réversible associé au sous-soleur multifonction (SR+SSM) pour lutter contre la végétation concurrente est possible mais dans ce cas, il est nécessaire d'associer à la réflexion sur la densité d'arbres nécessaire à la réussite de la plantation, une réflexion sur la proportion surface travaillée *versus* non travaillée qui doit être réalisée au sein de la parcelle pour minimiser l'effet de la préparation mécanique sur le sol. Ce point est d'autant plus important pour les plantations sur sol à forte accumulation de litière (mor).

4.1.3. Effet du RAZherb combiné au Culti3B - Réseau PILOTE

Pour le réseau PILOTE, le site de Chaux p216/1026 présente le stock le plus élevé de C organique dans les horizons minéraux ($107,07 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$ sur 0-60 cm) et le site de Chinon dans les horizons O ($38,31 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$). L'effet de la modalité RAZ+C3B sur les stocks de COS varie selon les sites :

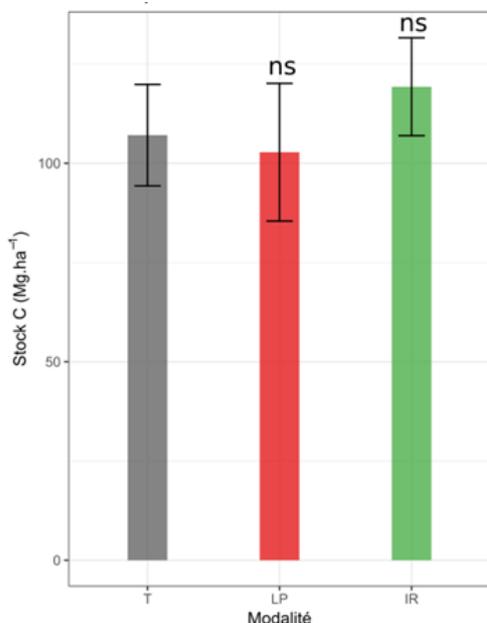
- A Chaux (p212/1026), la modalité RAZ+C3B n'a pas d'effet significatif sur les stocks de COS.
- A Chinon, la modalité RAZ+C3B augmente le stock de COS sur l'inter-rang et dans les horizons supérieurs (30-60 cm).
- A Rennes, la modalité RAZ+C3B augmente le stock de COS sur la ligne de plantation (voire sur l'inter-rang) et dans les horizons supérieurs.

Ces différences de réponses s'expliquent par la manière dont les outils Razherb et Culti-3B agissent sur le profil de sol. L'augmentation du stock de COS sur l'inter-rang s'explique parce que le Razherb permet un désherbage par décapement superficiel. L'outil élimine par raclage le tapis herbacé et les surplus de décapage se retrouvent ponctuellement de part et d'autre de la bande travaillée autrement dit dans les futurs inter-rangs. Cet outil peut donc être à l'origine d'un « andainage » ponctuel sur l'inter-rang et donc d'une augmentation du stock de COS observée à Chinon. L'augmentation sur la ligne de plants, observée à Rennes, est probablement due à une redistribution de ces surplus de raclage du tapis herbacé déposés sur l'inter-rang par l'outil Razherb qui seraient ensuite remobilisés quand le Culti3B passe à son tour pour faire le billon de la future ligne de plants.

La comparaison entre le site CHRONO, qui a subi un labour en plein ainsi qu'un billonnage à l'aide d'une charrue à disque en 1994, et le site Pilote de Chaux installé en 2014 à proximité est intéressante (figure 3). En effet, si la modalité RAZ+C3B n'a pas d'effet sur les stocks de COS sur le site Pilote de Chaux, le travail de préparation du sol sur le site CHRONO a conduit à une diminution significative du stock de COS sur l'inter-rang par rapport au témoin non labouré. Vingt-quatre ans après la mise en place du site, on décèle donc un effet encore visible sur les stocks de COS de l'inter-rang sur CHRONO. Cette différence entre les 2 sites est sans doute à mettre en rapport avec l'intensité de la préparation mécanique des sols : labour en plein sur CHRONO contre travail localisé aux

seules lignes de plantation sur le site Pilote de Chaux. Ceci nous conduit à proposer la même recommandation que précédemment à savoir : les travaux de préparation mécanique du sol avant plantation doivent intégrer une réflexion sur la proportion de surface travaillée *versus* non travaillée qui doit être réalisée au sein de la parcelle pour minimiser l'effet de la préparation mécanique sur le sol.

Pilote - Chaux p212/1026



Chrono – Chaux p213

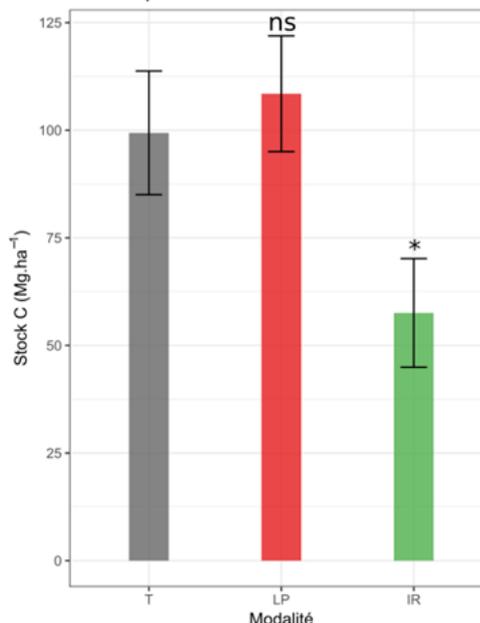


Figure 3 : Stocks de COS calculés sur « Litière + 0-60 cm » (en MgC.ha⁻¹) dans le site Pilote de Chaux et le dispositif Chrono. Les stocks sont ici calculés à masse équivalente (Kruskal-Wallis, $p < 0,05$).

4.2. Tâche 2: Etude de la croissance juvénile

Contributeurs : A. Berthelot, **C. Collet**, C. Deleuze, N. Dumas, M. Fortin, J.C. Miquel, J. Pitaud, C. Trouvé

Cette tâche a reposé en grande partie sur le travail de thèse de Jean-Charles Miquel intitulé "Modélisation des effets de la compétition interspécifique sur la disponibilité en ressources et la croissance de jeunes plants forestiers. Application à l'évaluation de l'impact du travail du sol dans les plantations", qui se terminera en Juin 2020.

L'objectif général est d'analyser les effets de la PMS sur la croissance des plants et d'élaborer des modèles de croissance des arbres dans les années qui suivent la plantation, qui puissent prendre en compte des interventions sylvicoles réalisées dans les jeunes stades, notamment des opérations de contrôle de la végétation accompagnatrice. Deux approches de modélisation ont été menées en parallèle : l'élaboration de modèles phénoménologiques décrivant la croissance des arbres selon différents traitements sylvicoles, et l'élaboration de modèles mécanistes décrivant la réduction de croissance induite par la compétition pour les ressources qui s'opère entre les jeunes arbres et la végétation. Ces modèles pourront ensuite être combinés pour aboutir à des modèles dits "hybrides".

4.2.1. Analyse des effets de la PMS sur la survie et la croissance des jeunes plantations

Le réseau expérimental Alter permet d'évaluer les effets de PMS réalisée à l'aide d'outils montés sur mini-pelle sur la survie et la croissance de jeunes chênes et de jeunes pins dans des contextes stationnels difficiles, caractérisés notamment par une forte compétition exercée par la molinie ou par la fougère aigle. Deux outils (le sous soleur multifonction et le scarificateur réversible) ont été testés et comparés à des modalités témoin, herbicides ou mécanisées classiques.

La survie en première année montre des résultats très contrastés entre les différents dispositifs expérimentaux, selon les causes de la mortalité. Les étés marqués par de fortes sécheresses ont induit des mortalités plus faibles dans les modalités SR et SSMF. A l'inverse, des gels hivernaux ont induit des mortalités plus fortes dans ces mêmes modalités. Les dispositifs installés lors d'années favorables ont vu des très bons taux de survie sur



l'ensemble des modalités. L'occurrence d'un gel hivernal a vu l'ensemble des plants de toutes les modalités mourir. De même des attaques de hanneton ont eu des effets identiques dans toutes les modalités. Ces résultats montrent que le classement des modalités par rapport à la mortalité en première année est très instable selon des conditions de l'année. Ils illustrent la difficulté à prévoir la mortalité initiale des plants, très dépendante des conditions climatiques et biotiques de l'année qui suit la plantation. Un grand nombre de répétitions (sites, années, ...) est ainsi nécessaire pour obtenir des résultats robustes.

En revanche, la survie à plus long terme (4 ans) montre des schémas de variation plus réguliers entre modalités et qui se rapprochent de ceux observés pour la croissance des plants.

Une première analyse des 11 dispositifs du réseau Pilote confirme que la mortalité en première année est très dépendante des conditions climatiques du printemps et de l'été qui suivent la plantation. Les années défavorables montrent de grosses différences entre modalités, avec les PMS les plus intensives (et les plus coûteuses) permettant les meilleurs taux de reprise des plants. A l'inverse, les années favorables à l'installation des plants permettent des bons taux de reprise dans toutes les modalités y compris les moins intensives. Ces résultats indiquent que l'investissement dans une PMS plus intensive et plus coûteuse sera peu visible, en termes de reprise des plants, les années favorables. En revanche, il s'avèrera très rentable les années où l'été est sec.

Pour les pins dans les deux contextes (molinie et fougère) et pour les chênes des contextes fougère, les arbres des modalités herbicides et SSMF montrent les meilleures croissances. En revanche, la croissance après 4 ans des chênes dans la molinie montre des résultats très variables entre les sites, qui semblent difficiles à généraliser.

L'étude du réseau Alter fait l'objet d'une publication en préparation (Dumas et al. 2019).

4.2.2. Elaboration de modèles phénoménologiques

L'objectif était d'établir des modèles de croissance de jeunes arbres soumis à différentes modalités de travaux préparatoires, dans les premières années qui suivent la plantation, pour analyser et comparer les effets de ces travaux sur la croissance d'essences communément utilisées en plantation.

Un jeu de données a été recueilli auprès de FCBA, de l'ONF et de l'INRA, portant sur 8 essences (*Quercus robur* & *petraea*, *Pseudotsuga menziesii* spp., *Picea abies*, *Larix* sp., *Populus* sp., *Pinus sylvestris*, *Pinus nigra*), et provenant de 24 expérimentations (dont le réseau Alter, données de croissance présentées dans la section précédente). Ces expérimentations ont permis de comparer 7 grands types de travaux préparatoires : préparation mécanisée, fertilisation, herbicide, mixte fertilisation et mécanisée, mixte herbicide et mécanisée, amendement, témoin sans préparation.

Des modèles non-linéaires prédisant la croissance en diamètre et en hauteur en fonction des travaux réalisés ont été établis pour les différentes essences, sur des durées allant de 4 à 20 ans après la plantation. La préparation du site améliore fortement la croissance des plants, pour toutes les essences. La fertilisation a un effet contrasté selon les essences et selon les sites. Les traitements herbicides et mécanisés ont des effets similaires et montrent de bonnes performances. Pour toutes les essences, les traitements mixtes alliant la fertilisation aux herbicides ou à la mécanisation permettent les meilleurs résultats. Les modèles établis fournissent des fonctions qui pourront être utilisées pour décrire les phases initiales de croissance des arbres en plantation, généralement absentes des modèles ajustés sur les phases adultes.

Cette étude a fait l'objet d'une publication soumise European J Forest research (Miquel et al. 2019).

4.2.3. Elaboration de modèles fonctionnels et de modèles hybrides

L'objectif est d'établir des modèles de croissance qui intègrent une description du partage des ressources (eau et lumière) entre les jeunes arbres et la végétation spontanée.

Pour cela, une expérimentation a été installée en 2016, dans laquelle des jeunes pins sylvestres croissent en compétition avec de la fougère aigle. Différentes modalités de compétition ont été aménagées, qui permettent de découpler les niveaux de compétition pour l'eau du sol et pour la lumière. La croissance des plants, de la fougère et la disponibilité en eau et en lumière autour des plants ont été suivis pendant 2 saisons de végétation et sont actuellement en cours d'analyse.

Une étude bibliographique nous a permis de nous orienter vers un modèle hybride établissant la croissance des semis en fonction d'une somme de lumière interceptée par les plants et modulée principalement par la disponibilité en eau du sol et la température de l'air (Mason et al, 2007). Différents modulateurs de croissance par la lumière, l'eau du sol et la température sont actuellement testés pour être incorporés dans le modèle de croissance.

4.3. Tâche 3: Evaluation des performances des méthodes de PMS

Contributeurs : E. Akroume, V. Boulanger, F. Bureau, S. Carmon, **C. Collet**, **C. Deleuze**, **D. Derrien**, M. Duperat, N. Dumas, C. Lebrun, E. Quibel, J. Pitaud, H. Rakotoarison, C. Trouvé, J.P. Renaud, E. Ulrich

La tâche 3 propose une mise en perspective des résultats des tâches 1 et 2 concernant les impacts des méthodes de PMS sur le bilan de carbone des plantations et la croissance des plants, dans l'objectif général d'évaluer et comparer les performances des différentes méthodes. Elle se compose de deux volets : (1) l'intégration des résultats des tâches 1 & 2 dans l'analyse des performances multiples des méthodes, dans une fenêtre temporelle limitée aux premières années après la plantation, (2) sur le seul critère de la séquestration de carbone dans le sol et dans les arbres, une mise en perspective temporelle à l'échelle d'une révolution complète des résultats des tâches 1 et 2.

4.3.1. Evaluation des performances multiples des méthodes de PMS

Les acteurs forestiers expriment de fortes attentes pour une évolution des pratiques de plantation qui, idéalement, doivent permettre une bonne installation des plants, à coût réduit, avec un impact environnemental contrôlé et en respectant les attentes sociales du public et des opérateurs. L'ensemble de ces performances -techniques, économiques, environnementales et sociales- doivent être prises en compte dans le développement de nouveaux outils et méthodes et doivent ensuite être renseignées par les développeurs pour chaque outil et méthode, de façon à permettre le meilleur choix de méthode par les gestionnaires.

Le projet Capsol s'est attaché à quantifier les performances techniques (survie et croissance des plants), économiques (productivités des outils, coûts annuel des itinéraires) et environnementales (impacts sur la structure des sols, sur les COS, sur la flore spontanée, indicateurs d'intensité de perturbation de l'itinéraire) de différentes méthodes de PMS, à l'aide des données recueillies dans les réseaux Alter et Pilote.

Dans une première étape, une analyse multivariée de l'ensemble des variables recueillies a été réalisée pour étudier les performances de chaque méthode de PMS, et effectuer une première comparaison des méthodes (outils R : package ADE4, Thioulouse et al, 2004). Dans une deuxième étape, une démarche d'évaluation multicritère a été initiée pour permettre des comparaisons et des classements de méthodes intégrant les préférences des acteurs.

4.3.1.1. Variables disponibles

Les différents dispositifs des réseaux Alter et Pilote fournissent des données sur la survie et la croissance des plants (selon un pas de temps de 1 à 3 ans) pour l'ensemble des méthodes de PMS testées (cf tâche 2).

Le réseau Pilote a été conçu pour pouvoir quantifier la productivité des opérations sylvicoles effectuées dans les parcelles. Ces données ont été combinées à des mercuriales de prix de travaux forestiers disponibles auprès des partenaires de gestion, pour évaluer les coûts des différentes opérations et les coûts d'itinéraires de jeunes plantation complets (Trouvé 2018).

L'impact de la PMS sur la structure des sols a été évalué dans 3 dispositifs Alter (Haguenau, Bord-Louviers, Villecartier) et 5 dispositifs Pilote (Chaux, Rennes, Chinon, Toul, Hémilly), par la méthode du profil cultural. Cette méthode étant coûteuse en temps de mesure, l'étude a été limitée à 2 ou 3 méthodes par dispositif (Vast et al 2019, Collet et al. 2019).

L'impact de la PMS sur le COS a été évalué pour plusieurs méthodes de PMS, dans certains dispositifs Alter et Pilote (cf. tâche 1).

Des variables reflétant l'intensité des interventions dans l'itinéraire ont pu être estimées à partir de comptes-rendus de suivi des dispositifs Pilote (nombre d'interventions pratiquées) ou de mesures complémentaires (surface de sol perturbée lors des interventions) réalisées dans certains dispositifs Alter et Pilote.

Dans l'ensemble des dispositifs des réseaux Alter et Pilote, des relevés de flore sont effectués, qui permettent d'estimer l'impact de la PMS sur le couvert végétal, la diversité floristique, diversité fonctionnelle (Duperat 2017, Lebrun 2018).

Une base de données réunissant l'ensemble des variables disponibles est actuellement en cours de construction.

4.3.1.2. Analyse multivariée

Les détails de l'analyse multivariée sont présentés dans l'annexe 2.

4.3.1.2.1. Compilation des données et analyses effectuées

Les variables suivantes ont été retenues pour l'analyse:

- Indicateurs économiques : coût cumulé sur 5 ans et part de la première année dans ce coût ;
- Indicateurs techniques : survie à 1, 3 ou 5 ans; hauteur à 3 ou 5 ans; âge auquel les plants sont sortis des 3 mètres de concurrence de la végétation ;
- Indicateurs de perturbation, nombre d'application d'herbicides; nombre de passage d'engins et leur poids; surface de sol travaillée et surface perturbée en proportion ;



- Indicateurs de COS : stocks de carbone dans différents horizons (0-60 cm, 0-60 cm plus la litière); informations de répartition verticale avec la part de stock dans 0-30 cm ou 0-10 cm; informations d'hétérogénéité spatiale du carbone, notamment entre la ligne de plants et l'inter-rang.

Les données recueillies ont été scindées selon le contexte stationnel et (pour les performances techniques) selon l'essence plantée. Trois contextes principaux ont été retenus, définis selon la végétation spontanée dominante (molinie, fougère, ligneux divers), et trois groupes d'essences ont été retenus (chênes, pins, douglas). Les différentes performances des méthodes de PMS peuvent varier grandement selon ces conditions, que l'on ne peut donc réunir dans des données groupées.

Les méthodes prises en compte dans l'analyse sont des outils montés sur mini-pelle (Sous-Soleur Multifonction, Scarificateur Réversible, Razherb, DB10), sur pelle mécanique lourde (bident Maillard) ou sur tracteur (Culti-3B, sous soleur, broyeur, labour) et les méthodes utilisant les herbicides. Ces méthodes sont comparées à des traitements témoin, sans préparation.

Plusieurs difficultés pour mener l'analyse sont apparues :

- Des variantes (parfois importantes) dans les méthodes ont pu être appliquées dans les différents dispositifs.;
- Certains dispositifs sont encore trop jeunes pour fournir les données attendues ;
- Le croisement contexte x outil x essence x variable mesurée est très incomplet dans l'ensemble du jeu de données.

Une analyse globale de l'ensemble des données n'étant pas possible, une approche combinant des analyses permettant de maximiser le nombre de variables retenues (sur moins de sites) ou de maximiser le nombre de sites et d'essences retenus (avec moins de variables) a été mise en œuvre.

4.3.1.2.2. Résultats

Les analyses font ressortir des différences marquées entre dispositifs, dont certaines peuvent être attribuées à la fertilité du site. En revanche, seules des différences faibles entre contextes apparaissent (le contexte molinie se démarque avec une survie des plants un peu plus faible et des stocks de COS un peu plus élevés), mais sont masquées par la forte variabilité inter-dispositif au sein d'un même contexte, en lien notamment avec des différences dans l'historique de gestion de la parcelle, les conditions climatiques de l'année de plantation, ou le niveau d'hydromorphie du site.

L'ensemble des analyses montrent des corrélations entre variables : survie des plants, surface de sol travaillée et surface perturbée, nombre d'interventions varient dans le même sens, et sont corrélées négativement au stock de COS de la parcelle. Il est intéressant de noter que la survie des plants est liée à l'effort d'intervention, alors que la hauteur des plants à 3 ans semble perpendiculaire à ce groupe de variables et semble dépendre plus fortement de la fertilité du site.

Par ailleurs, les deux variables qui indiquent une répartition spatiale hétérogène du COS au sein de la parcelle s'avèrent perpendiculaires au stock de COS total : la part de carbone sur la ligne de plants est opposée à la surface de sol travaillée, mais peu liée au stock total. C'est intéressant car cela peut suggérer des marges de manœuvre pour améliorer les performances techniques des méthodes de PMS sans dégrader le stockage total de COS.

La comparaison des méthodes de PMS fait tout d'abord ressortir les témoins sans interventions : survie faible, coûts limités, perturbations faibles et stock de C forts. Les itinéraires utilisant les herbicides s'en rapprochent, avec la survie des plants qui dépend fortement du nombre d'applications : survie faible quand les applications d'herbicides sont limitées à la première année (donc très proche de la modalité témoin), survie forte quand les applications se poursuivent sur plusieurs années. Dans tous les cas, les coûts et les perturbations du sol restent limités et les stocks de COS élevés. Ainsi, lorsqu'on représente les performances des itinéraires avec ce jeu de variables, les itinéraires recourant à l'application d'herbicides répétées sur plusieurs années sont performants. Il est fort probable que l'introduction dans l'analyse de variables supplémentaires reflétant la contamination possible des eaux, des sols et de l'air aurait amené à un classement très différent.

Le Sous Soleur Multifonction présente globalement des coûts importants, des très bons taux de survie, et un stock de COS total réduit par rapport au témoin. Le scarificateur réversible montre des performances similaires mais avec une moins bonne survie des plants. Le Culti-3B constitue un intermédiaire entre le témoin et le Sous Soleur Multifonction.

La comparaison des méthodes repose actuellement sur des données partielles et des échantillonnages déséquilibrés, ce qui limite leur portée générale. Néanmoins, le bilan effectué permet d'identifier les méthodes les plus prometteuses et, pour ces méthodes, les performances qui pourraient être améliorées. En outre, il permet d'identifier les variables, les contextes stationnels, les essences, sur lesquels faire porter prioritairement l'effort de mesure pour mieux renseigner les méthodes de PMS qui semblent les plus intéressantes.

4.3.1.3. Evaluation multicritère

Le projet CAPSOL comportait l'initiation d'une réflexion sur l'Evaluation Multi-Critère (EMC) des méthodes de PMS, pour prolonger l'analyse multivariée. Le travail réalisé dans le cadre conjoint des projets CAPSOL et PINNS a été bien au-delà de cet objectif initial.

L'analyse multivariée, présentée dans la section précédente, permet de quantifier les différences performances de chaque méthode de PMS et de mettre en évidence des corrélations ou des antagonismes entre performances. Sur ces bases, elle permet la comparaison des différentes méthodes. En revanche, cette approche est peu efficace quand il s'agit de choisir la méthode qui permet le meilleur compromis entre performances potentiellement antagonistes. Il existe différentes approches pour répondre à ce type de questions et, parmi ces approches, les méthodes d'EMC sont des outils d'aide à la décision conçus spécifiquement pour identifier les meilleurs compromis entre options possibles.

Les acteurs impliqués dans la conduite des plantations sont nombreux et les choix effectués quant aux itinéraires de plantation se doivent d'intégrer les attentes de ces différents acteurs pour y répondre au mieux. Les acteurs portent sur la question des regards qui peuvent différer fortement. Les compromis à rechercher lors du choix de l'itinéraire de plantation portent alors sur deux niveaux : (1) les compromis entre performances à trouver par chaque acteur en fonction de ses propres attentes, (2) les compromis entre les attentes, potentiellement contradictoires, des différents acteurs. L'EMC propose un large panel de méthodes pour définir ces différents compromis.

L'EMC est maintenant largement utilisée pour évaluer les systèmes de production agricoles et de nombreux outils et méthodes d'analyse ont été développés, notamment en France, qui ont permis l'élaboration d'outils d'aide à la décision opérationnels. Dans le domaine forestier, ces méthodes ont également été appliquées, mais dans une moindre mesure.

L'élaboration d'un modèle d'EMC se décompose classiquement en plusieurs étapes : (1) identification des acteurs concernés par l'évaluation, (2) définition du système évalué et des objectifs de l'évaluation, (3) identification des critères, (4) construction des indicateurs, (5) analyse des préférences des acteurs et élaboration des règles d'intégration des indicateurs. Le travail réalisé dans CAPSOL et PINNS a principalement porté sur les 3 premières étapes et a permis d'amorcer les étapes suivantes.

Une démarche combinant ateliers de travail réunissant des experts et enquêtes réalisées auprès des différents acteurs, menées par les participants du projet et intégrant un projet d'étudiants d'AgroParisTech, a été mise en œuvre.

Par ailleurs projet Capsol nous a permis de mener deux initiatives : (i) un séminaire en juin 2016 à Agro-Paris-Tech de Nancy sur « L'analyse multicritère pour évaluer des scénarios de gestion des milieux naturels et des forêts ». Cette approche étant nouvelle en forêt, ce séminaire a été la première occasion de découvrir les méthodes utilisées par les collègues du domaine agricole et de voir un exemple déjà réalisé sur des systèmes forestiers. (ii) une école chercheurs, organisée en 2019 par l'INRA, avec la contribution de C. Collet, sur « L'EMC pour la gestion des écosystèmes forestiers, prairiaux et aquatiques ». 4 personnes du projet CAPSOL y ont participé, et différentes pistes de collaboration y ont émergé, notamment pour construire des indicateurs, réfléchir aux différentes méthodes proposées par rapport aux besoins sur nos données et aux méthodes d'assemblage des critères retenus.

4.3.1.3.1. Acteurs concernés par la plantation

Les principaux acteurs concernés par la plantation forestière sont représentés en figure 4 :

- Les praticiens forestiers, directement impliqués dans la conduite de la plantation, qui se divisent en :
 - les propriétaires (privés, publics) qui possèdent les parcelles,
 - les prescripteurs qui choisissent les interventions à réaliser,
 - les opérateurs (entrepreneurs de travaux, pépiniéristes) qui les réalisent.
- Les financeurs et investisseurs, publics et privés
- Les pouvoirs publics
- Les organismes de certification
- Les organismes de développement
- La société
- Les professionnels de la filière bois.



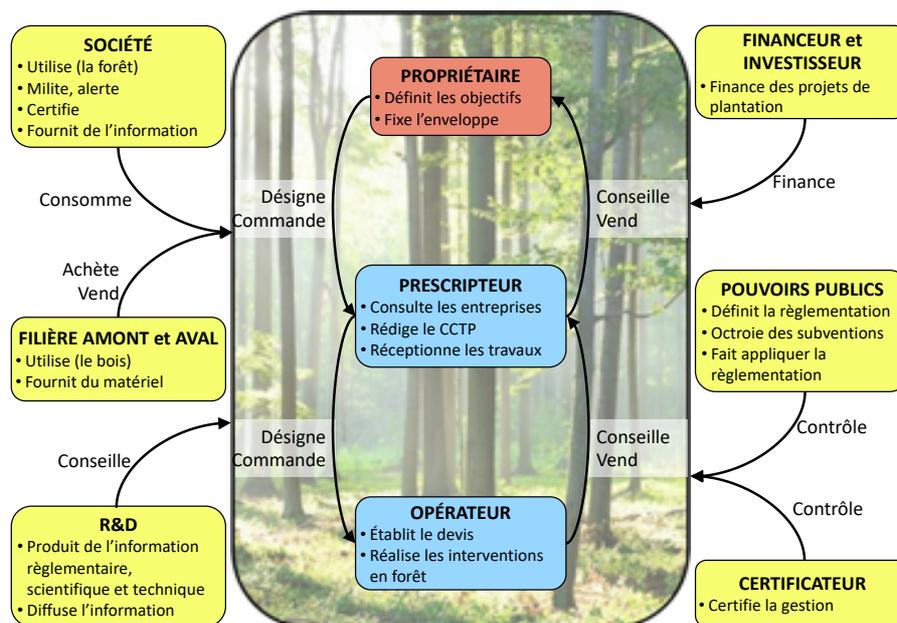


Figure 4 Acteurs concernés par la plantation forestière: rôles et interactions

4.3.1.3.2. Délimitation du système étudié

L'analyse se focalise sur les itinéraires de plantation. L'itinéraire est défini comme la suite logique des opérations réalisées en vue de réussir la plantation. Dans notre travail, l'itinéraire se définit et est évalué à l'échelle de la parcelle de gestion.

La plantation s'insère dans le cycle de gestion forestière complet. Sur la parcelle, l'itinéraire de plantation débute après l'exploitation du peuplement en place. Il comporte trois phases successives :

- *La préparation du site.* Cette préparation intègre le traitement des rémanents. Elle peut être mécanisée, et peut comporter l'utilisation d'engrais ou de pesticides.
- *La plantation proprement dite.* L'installation des plants est généralement manuelle, rarement mécanisée. Cette phase peut être complétée par la pose de protections contre les ongulés.
- *Les entretiens.* Ils visent essentiellement à contrôler le développement de la végétation spontanée qui entre en compétition avec les plants installés. Ces entretiens peuvent être manuels ou mécanisés.

La phase de renouvellement se termine lorsque les arbres atteignent une hauteur d'environ 3 à 4 m. Cette hauteur correspond à un seuil au-delà duquel les arbres sont supposés libérés de la compétition exercée par la strate herbacée et insensibles à l'abroustissement par les ongulés sauvages. Selon les essences et selon les conditions du milieu, ce seuil est généralement atteint 5 à 10 ans après la plantation. Dans certaines conditions difficiles, cette durée peut s'avérer plus longue.

4.3.1.3.3. Identification des critères et des indicateurs qualifiant les itinéraires de plantation

Nous avons cherché à identifier l'ensemble des critères qualifiant le succès d'une plantation, énoncés par les différents acteurs concernés par la thématique, et représentant ainsi l'ensemble des attentes des acteurs. Cette liste exhaustive de critères pourra ensuite servir de base pour élaborer des modèles d'EMC.

Une enquête par entretiens semi-directifs a été menée en 2017 auprès de 58 acteurs ayant fait le choix de la plantation. Les critères énoncés par les acteurs ont été synthétisés et organisés en un arbre hiérarchique, à la fois exhaustif et non redondant.

L'arbre se décompose en cinq niveaux hiérarchiques. Le premier niveau représente le critère racine : contribution au développement durable. Au deuxième niveau, se retrouvent les critères agrégés classiquement rencontrés en agroécologie, qui représentent les quatre dimensions du développement durable : performances techniques,

économiques, environnementales et sociétales. Le cinquième niveau, le plus détaillé, comporte 53 critères basiques (Collet et al. 2018).

Une analyse très préliminaire de l'importance attribuée aux différents critères montre que les attentes exprimées par les acteurs enquêtés portent avant tout sur les performances technico-économiques, patrimoniales et environnementales des itinéraires, à travers des critères de réussite et coûts des interventions, de gain de la valeur patrimoniale de la forêt et de conservation de la biodiversité. Ceux liés à la pénibilité du travail, à l'acceptabilité sociale des pratiques, à leurs impacts sur la durabilité des sols et la contamination des eaux viennent en second lieu. Les autres critères énoncés semblent avoir une plus faible importance.

4.3.1.3.4. *Poursuite de la démarche d'EMC*

La liste exhaustive de critères établie dans le projet pourra servir de point de départ pour analyser les préférences des différents acteurs et identifier les objectifs qu'ils assignent prioritairement à la conduite des plantations. En parallèle, les principaux critères retenus devront être traduits en indicateurs, et ces indicateurs devront être renseignés pour différents itinéraires de gestion (à l'aide de données issues d'expérimentations, de simulations, ou de la bibliographie). Cette étape prendra comme point de départ les résultats de l'analyse multivariée présentée dans la section précédente et nécessitera des interactions avec les experts de chaque domaine pour proposer des indicateurs complémentaires. Enfin, l'élaboration de règles d'agrégation des différents indicateurs permettra d'élaborer un modèle d'EMC des itinéraires de plantation. Cette dernière étape ne pourra se faire qu'en interaction forte avec des groupes d'acteurs différenciés, dans un projet dédié.

La construction d'un modèle d'EMC comme outil d'aide à la gestion opérationnel semble donc être un objectif atteignable seulement à moyen ou long terme. Néanmoins, au-delà de cet objectif assez lointain, la mise en œuvre de la démarche d'EMC présente plusieurs intérêts majeurs :

1. Elle constitue pour les organismes de R&D un outil de structuration des programmes de recherche. Tout d'abord, en identifiant les attentes prioritaires des acteurs, elle permet de déceler les écarts dans les connaissances disponibles (ou en cours d'acquisition) et les connaissances attendues. Ainsi, le travail effectué dans le projet a clairement mis en évidence l'absence de connaissances et de données sur les performances sociétales des itinéraires de plantation. Ensuite, la traduction des attentes en critères et en indicateurs mesurables permet de définir précisément les variables à acquérir, et la concaténation des jeux de données disponibles pour la construction de modèles cohérents permet d'identifier les options pour lesquelles les données sont encore manquantes. Ainsi le travail réalisé nous a permis de définir certaines variables à privilégier dans les suivis de mesures, et d'identifier les contextes et outils sur lesquels travailler en priorité. Ces différentes informations permettent de dégager des pistes claires pour la poursuite du travail.
2. Elle incite les différents organismes de R&D à collaborer et demande la construction de collectifs de recherche larges, en raison de la quantité de données attendue et de la variété des compétences nécessaires, qui semblent hors de portée d'une équipe de recherche unique.
3. Elle constitue un outil d'animation du débat multiacteurs au sein du secteur forestier. La démarche repose sur la co-construction de chaque étape du modèle avec les différents acteurs et demande donc d'organiser de multiples échanges entre les acteurs. Le travail effectué dans CAPSOL s'est ainsi basé sur l'organisation d'ateliers de travail réunissant des experts de différents organismes, des enquêtes et des entretiens individuels. Cette animation permet la confrontation des idées entre les différents acteurs. La poursuite des travaux, notamment sur l'expression des préférences des acteurs devrait permettre d'approfondir ces échanges.

4.3.2. **Modélisation de l'impact du travail du sol sur l'évolution des stocks de C dans la biomasse et dans les sols**

Nous présentons ici une synthèse du travail de modélisation des stocks de C, et une présentation plus détaillée de ce travail est fournie en annexe 3.

Nous présentons successivement les approches de modélisation qui ont été conduites afin de simuler l'impact du travail du sol (i) sur l'évolution du stock de C dans la biomasse aérienne d'un peuplement à l'échelle d'une révolution complète et (ii) dans le sol lors des stades juvéniles. Nous reportons également (iii) l'étude qui a été conduite afin d'établir l'approche la plus pertinente pour conduire la modélisation du stock de C dans le sol à l'échelle d'une révolution forestière.



4.3.2.1. Modélisation de l'évolution des stocks de C dans la biomasse d'un peuplement de chêne sessile sur une révolution complète

4.3.2.1.1. Simulations des itinéraires

Nous avons réalisé des simulations d'itinéraires sylvicoles sur une révolution forestière complète, afin d'évaluer l'effet de différents itinéraires de PMS sur la dynamique de la biomasse aérienne. Les simulations ont été initialisées à partir d'un peuplement dans des conditions stationnelles proches de celles de Chaux et pour lequel nous disposons des données (fertilité et inventaires) nécessaires au modèle de croissance Fagacées (Le Moguedec et Dhôte, 2012) utilisé dans le module Sydy (Philippe Dreyfus) de la plateforme CAPSIS (Dufour-Kowalski et al. 2011). Plusieurs itinéraires ont été simulés : (i) un itinéraire en régénération naturelle ; (ii) des itinéraires en plantation à 1500t/ha, dont la densité initiale est ajustée en fonction de la mortalité observée dans les différentes modalités (RACB, TEM) ; (iii) une plantation à 1500t/ha, avec une mortalité moyenne de 22%, observée sur les témoins plantés sans travail du sol. Les itinéraires sylvicoles sont basés sur la sylviculture classique du chêne en futaie régulière en zone continentale, pour la classe de fertilité 2 (Guide de la chênaie continentale, ONF, 2008), avec un diamètre d'exploitabilité entre 65 et 75 cm.

Les données de croissance juvénile du site PILOTE de Chaux mettent en évidence un décalage de 1 à 2 ans entre le témoin et les modalités les plus efficaces en termes de croissance (RACB et MECB). On a donc fait l'hypothèse d'une fertilité moindre d'1 an pour les témoins, ce qui entraîne un allongement de presque 10 ans de la révolution. De même on a fait l'hypothèse d'un gain de 2 ans pour les meilleures modalités de PMS.

4.3.2.1.2. Calcul de la biomasse et de la séquestration de C

La biomasse et le carbone sont issus de la chaîne de calcul mise au point dans le cadre des projets RESPIRE et GERBOISE (Saint-André et al., 2019 ; Cacot et al., 2018) : calcul du volume par les fonctions issues du projet EMERGE (Deleuze et al., 2014) puis conversion en biomasse (en t/ha) puis en quantité de carbone, déterminée à partir des équations établies dans le projet GERBOISE. Cette chaîne de calcul permet d'estimer également la biomasse de litière foliaire à l'échelle du peuplement (litière = log(surface terrière), équation du projet GERBOISE), nécessaire comme entrée du modèle de dynamique du C (input de C aérien et racinaire, cf §II.2). Une séquestration moyenne de carbone a été ensuite calculée sur la révolution entière pour chaque itinéraire (Figure 5).

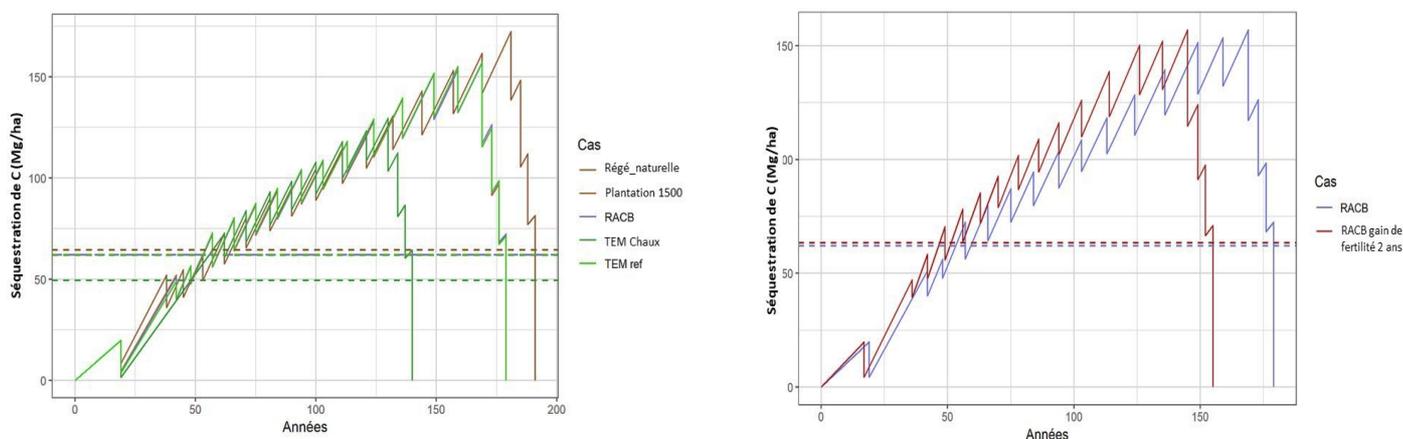


Figure 5: Séquestration de C (t/ha) sur une révolution complète pour les itinéraires testés (gauche) et séquestration de carbone avec hypothèse d'un gain de fertilité (2 ans sur la H0) dû au travail du sol (droite)

La séquestration de carbone moyenne est de 62 t/ha pour la plupart des itinéraires, avec une valeur légèrement supérieure pour la régénération naturelle. Le témoin du dispositif de Chaux avec une forte mortalité et une révolution beaucoup plus courte séquestre en moyenne de 50t/ha, soit 10t/ha de moins que la modalité travaillée. L'hypothèse de gain de fertilité sur l'itinéraire en plantation conduit à une augmentation de la production de biomasse et à une augmentation très légère de la séquestration moyenne de C, peu notable car la rotation est raccourcie. La perte de fertilité des témoins diminue par rapport au RACB (= Razherb + Culti-3B) la séquestration moyenne d'autant plus que la mortalité est importante (peu notable à 20% de mortalité mais séquestration < 50t/ha pour la forte mortalité). Notons néanmoins que Fagacées ne permet pas la prise en compte du recru ligneux (taillis, sous-étage), non négligeable dans les peuplements ouverts.

4.3.2.2. Structure du modèle d'impact du travail du sol sur la dynamique du C dans le sol

Nous avons ici mis au point une première version de modèle de dynamique du C dans les sols forestiers soumis au travail du sol à la plantation (Figure 6).

Le modèle distingue trois horizons : la couche 0-10 cm combinée avec l'horizon organique, la couche 10-30cm et la couche 30-60cm. Pour chaque horizon, on considère un compartiment de C labile et un compartiment de C stable. La taille relative des compartiments labile et stable et leurs constantes de décomposition sont basées sur celles publiées dans les travaux de méta-analyse de Balesdent et al (2018) (voir annexe 3).

Le modèle considèrera prochainement l'impact du travail du sol sur la redistribution du C sur le profil (données expérimentales nécessaires pour réaliser cette paramétrisation prochainement disponibles).

Pour réaliser des simulations, il est nécessaire de renseigner les apports aériens et souterrains des arbres et de la végétation concurrente en fonction de l'âge de la plantation. Il est également nécessaire d'initialiser le modèle avec le contenu en COS des différents horizons avant la coupe.

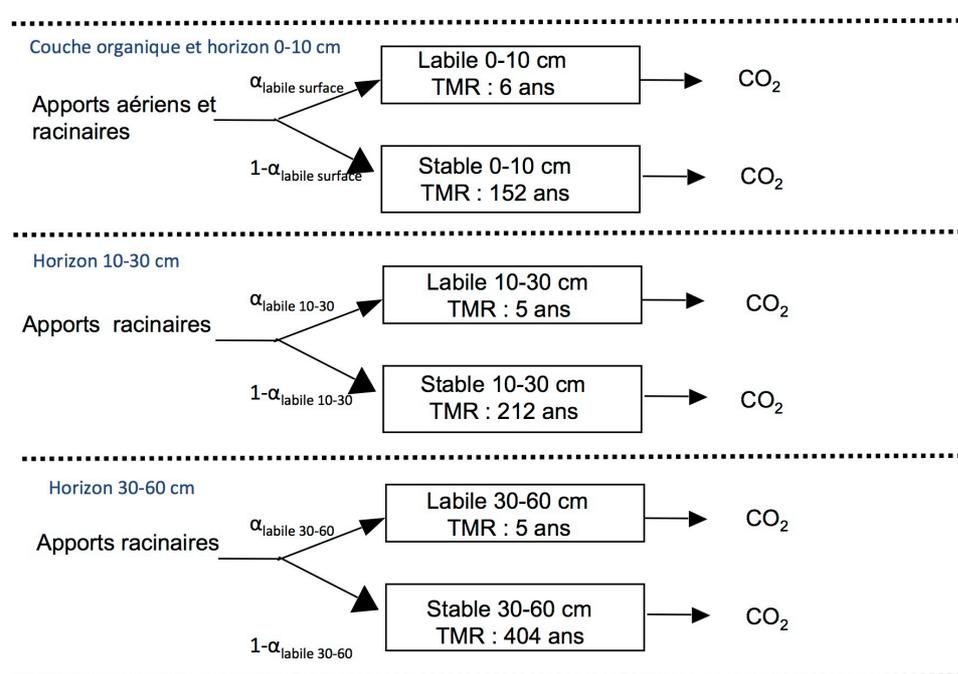


Figure 6: Structure du modèle. La redistribution liée au travail du sol n'est pas prise en compte dans cette version préliminaire

4.3.2.3. Méthodologie de calibration du modèle sur le site PILOTE de Chaux, aux stades juvéniles

Nous avons réalisé un premier essai de calibration du modèle sur le site PILOTE de Chaux pour lequel nous disposons de données de COS à 5 ans après le travail du sol, ainsi que de données sur un peuplement mature, considéré comme l'état initial et stationnaire du sol forestier avant coupe. Sur ce dispositif PILOTE, nous disposons également du suivi annuel de la croissance en hauteur des plants de chêne et de la dynamique de la végétation concurrente (de 2013 à 2018). Les apports de C aérien au sol ont été estimés à partir de ces données en utilisant des équations détaillées en annexe 3. Les apports de C racinaires ont été définis sur la base des apports aériens. Leur distribution sur le profil de sol est identique à la distribution de la biomasse racinaire donnée par Jobbagy et Jackson (2000).

La calibration du modèle a été réalisée pour les 2 modalités pour lesquelles les sols ont été échantillonnés : modalité témoin sans travail du sol et modalité RACB. Elle a été conduite en ajustant les paramètres d'allocation des entrées végétales pour chacun des trois horizons de sol façon à obtenir l'état stationnaire pour le peuplement mature présent avant la coupe.



4.3.2.4. Premiers résultats de la calibration de l'évolution du C du sol sur le site PILOTE de Chaux sur cinq années après coupe et perspectives d'évolution du modèle

La calibration du modèle permet de reproduire les observations de stock sous peuplement mature. Ce peuplement mature est bien à l'état stationnaire : les stocks ne varient pas pour une simulation réalisée sur un siècle (Figure 7a).

Les simulations de la dynamique du stock de C sur le sol sous peuplement juvénile permettent de visualiser un petit effet de la coupe deux et trois ans après. Il est lié ici à la diminution des apports après la coupe, plus marquée initialement pour la modalité travail du sol. (Figure 7b et c).

Les observations de terrain réalisées cinq ans après la coupe sont très hétérogènes. On observe toutefois une légère diminution du stock de surface et une légère augmentation du stock de profondeur, non significatives, qui ne sont pas reproduites par les simulations.

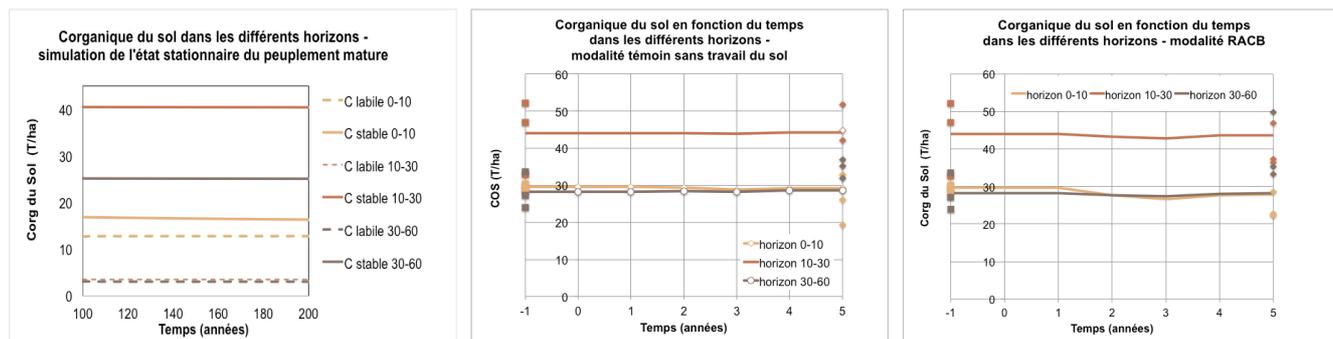


Figure 7: Simulations réalisées par le modèle. a- état stationnaire du peuplement mature réalisé sur un siècle. b- peuplement témoin. c- peuplement avec travail du sol par RACB. La coupe à lieu juste après le temps 0. On considère qu'il n'y a pas d'apports de rémanents de coupe, on néglige également les apports des souches et du système racinaire. Les points correspondent aux données observées, les courbes aux données simulées.

Sur la base de ces premières simulations très exploratoires, nous allons prochainement pouvoir bénéficier de données expérimentales complémentaires afin de valider la structure du modèle et affiner la calibration (voir détail des actions en Annexe 3). Le modèle sera testé également sur le site de Bord Louviers, en adoptant une procédure d'ajustement systématique des paramètres (par ex. minimisation du critère RMSE).

4.3.2.5. Extension du modèle de l'impact du travail du sol sur la dynamique du C du sol à l'échelle d'une révolution forestière

Pour étendre le modèle jusqu'au stade mature, deux options se présentent : (i) considérer que le stock de C du sol forestier tend au terme d'une révolution forestière vers une quantité maximale, liée aux caractéristiques minéralogiques du sol (Hassink, 1997; Stewart et al., 2007), quel que soit le mode de travail du sol adopté (*hypothèse saturation en C du sol*) ; (ii) considérer qu'à l'échelle d'une révolution forestière le travail du sol impacte durablement les entrées de C au sol et la redistribution des stocks sur le profil et conduit donc à des stocks distincts en fonction des modalités (*hypothèse impact durable*).

Nous avons mené en début de projet un travail d'analyse bibliographique qui nous a conduit à rejeter l'hypothèse de saturation en C organique des sols. Ce travail qui a été publié dans Biogéosciences Discussions (Barré et al. 2017).

Nous choisirons donc la seconde option (impact durable) pour étendre le futur modèle simulant l'impact du travail du sol sur la dynamique du C du sol aux échelles de temps de la révolution forestière dans le cadre des travaux de thèse d'Edouard Quibel qui se termineront un an après la fin du projet CAPSOL.

4.4. Tâche 4: Adoption des méthodes, transfert technologique

Contributeurs : M. Antoine, F. Bernio, **A. Berthelot**, M. Blondet, C. Collet, A. Petit, **C. Richter**

Cette tâche avait pour objectif général d'assurer le transfert des connaissances acquises dans le projet. Elle se divise en deux volets : (1) une réflexion sur le processus de transfert de connaissances qui se propose d'étudier les freins et les leviers à la diffusion de l'innovation au sein du secteur forestier, et d'élaborer une stratégie de diffusion des innovations ; (2) la mise en œuvre d'actions de diffusion des résultats du projet.

Les échanges effectués avec l'ADEME lors du montage du projet Capsol avaient souligné l'intérêt de l'étude de la diffusion des pratiques innovantes et des freins à l'acceptation de l'innovation par les acteurs socio-économiques et avaient suggéré que ces questions soient davantage développées. Le projet PINNS (financement RMT AFORCE) qui a débuté en juin 2017 a permis d'approfondir certaines de ces questions.

4.4.1. Etude des freins à la diffusion des méthodes

La sylviculture, comme toute pratique, fait l'objet d'innovations régulières. Ces innovations sont centrales pour adapter la gestion forestière aux évolutions attendues, et le soutien à l'innovation est considéré comme une priorité par les politiques forestières. Un processus d'innovation et ses moteurs sont spécifiques au secteur économique et aux activités considérées. En Europe, les études sur le processus d'innovation dans le secteur forêt-bois sont récentes et très peu d'entre elles portent sur les pratiques sylvicoles. Il est donc difficile de proposer des mesures efficaces pour promouvoir l'innovation en sylviculture.

Dans cette étude, nous avons souhaité en partie combler ce manque en nous concentrant sur la pratique innovante d'utilisation d'outils de PMS avant plantation. Le projet vise à analyser les conditions d'appropriation par les praticiens des outils de PMS. Plus spécifiquement, nous avons souhaité :

- Estimer le niveau de connaissance et d'utilisation des outils innovants de PMS par les praticiens.
- Identifier les freins à l'utilisation des outils innovants par les praticiens.
- Identifier les actions qui pourraient favoriser cette utilisation.

Cette étude s'est organisée autour de deux stages de Master et d'une collaboration avec le projet PINNS. Elle se base sur une enquête ethnographique menée en Haute Normandie en 2016, deux enquêtes en ligne réalisées à l'échelle nationale en 2017 et 2018, et un atelier regroupant une dizaine de participants en 2019. Cet atelier a permis d'échanger sur les résultats obtenus et sur la stratégie à mettre en œuvre pour améliorer le transfert et faciliter l'adoption des techniques innovantes de préparation mécanisée du site.

4.4.1.1. Adoption de l'innovation dans les pratiques forestières : cas de la Haute-Normandie

Une enquête ethnographique a été réalisée en Haute-Normandie de février à mai 2016 au cours d'un stage de M2 (Adrien Petit, 2016). En Haute-Normandie, comme dans les autres régions françaises, les outils de PMS ne sont toujours pas pleinement intégrés dans les pratiques de gestion. L'étude avait pour objectif d'identifier les facteurs influençant le processus de diffusion et d'adoption des innovations par les différents acteurs.

Trente-quatre entretiens semi-directifs en face-à-face ont été réalisés auprès d'un échantillon d'acteurs préalablement identifiés comme concernés par la pratique de la plantation forestière. Il s'agissait, d'une part, de gestionnaires et de propriétaires forestiers, potentiels prescripteurs de l'utilisation de nouveaux outils et, d'autre part, d'opérateurs et entrepreneurs de travaux forestiers potentiels propriétaires de ces outils. L'approche par entretiens semi-directifs permet un recueil d'informations à partir du discours des personnes, centré sur des thèmes préalablement définis par l'enquêteur, et s'intégrant dans le fil discursif de l'enquêté lui laissant ainsi la liberté de développer et d'orienter son propos.

Cette première étude a mis en évidence :

- Pour l'ensemble des acteurs, une attitude globalement ouverte vis-à-vis de l'innovation technologique, que les acteurs parviennent à concilier avec leurs valeurs et leurs pratiques.
- Pour l'ensemble des acteurs, une faiblesse des réseaux sociotechniques locaux qui mène à une mauvaise circulation de l'information, et à l'absence de vision partagée et d'objectifs communs entre les différents acteurs locaux qui les inciteraient à changer leurs pratiques.
- Pour les entreprises de travaux forestiers, plus particulièrement, une réticence à l'investissement dans du nouveau matériel, dans un contexte économique perçu comme très incertain.

Ces observations suggèrent qu'un des principaux leviers possibles serait une meilleure mise en réseau des acteurs locaux, à travers différents liens fonctionnels : partage d'information, échanges de services, construction de partenariats économiques à plus long terme.

4.4.1.2. Adoption de l'innovation dans les pratiques de plantation: utilisation des outils de PMS

L'objectif de cette deuxième étude était de compléter et d'étendre l'enquête réalisée en Normandie, tout d'abord en détaillant les freins possibles, puis en quantifiant l'importance relative de ces différents freins par l'intégration d'un échantillon de praticiens interrogés plus grand et géographiquement plus étendu. Ce travail a fait l'objet d'un stage de M2 (Flavia Bernio, 2017).

Une enquête quantitative, à l'aide d'un questionnaire en ligne, a été menée à une échelle multi-régionale (Grand-Est, Hauts-de-France, Centre-Val-de-Loire, Bourgogne Franche-Comté, principalement). Le questionnaire, conçu et publié sur Internet à l'aide du logiciel libre LimeSurvey, comportait 16 questions regroupées en 5 groupes



thématiques. Il a été mis en ligne en Décembre 2017, pour une durée d'environ 3 mois. 413 réponses utilisables ont été collectées et analysées.

Le taux d'adoption des outils innovants de PMS est dans l'ensemble assez faible, confirmant le ressenti des acteurs de la R&D impliqués dans le développement d'outils de PMS : Sur une liste de 17 outils innovants cités, un quart des répondants ne connaît aucun outil et plus de la moitié n'en utilise aucun. Les gestionnaires et les opérateurs connaissent très majoritairement l'existence d'au moins deux outils (70 à 90%), mais 53 % ne les utilisent pas. Chez les propriétaires forestiers, le niveau de connaissance est nettement plus faible, de même que l'utilisation.

La première raison évoquée par toutes les catégories d'acteur pour l'utilisation d'un outil sont ses performances et, parmi celles-ci, les performances techniques priment, loin devant les performances environnementales et ergonomiques. Au-delà des performances intrinsèques des outils, la disponibilité locale des outils et des opérateurs qualifiés, l'investissement financier nécessaire pour disposer des outils, constituent autant de facteurs externes apparaissant comme essentiels à l'utilisation des outils.

Parmi les actions susceptibles d'améliorer l'utilisation des outils innovants, le transfert de connaissance est plébiscité (formation initiale, journées de démonstration, diffusion écrite des connaissances). A contrario, les actions visant à faciliter les interactions entre acteurs sont perçues comme peu efficaces et difficiles à mettre en œuvre.

L'étude montre un décalage entre les freins à l'innovation identifiés par les acteurs et les leviers qu'ils jugent les plus intéressants. Les leviers retenus prioritairement consistent en des actions qui ont déjà fait preuve de leur efficacité (diffusion de connaissances, formation continue) même si le frein correspondant (connaissances insuffisantes des outils) n'est pas considéré comme majeur. En revanche, la faiblesse de la mise en réseau des acteurs apparaît comme un frein important, visible à travers l'importance de facteurs comme la disponibilité locale des outils et des opérateurs et la difficulté à trouver les ressources financières nécessaires, mais les leviers proposés dans l'enquête pour lever ces freins n'ont pas été retenus. Une cause de ce décalage réside possiblement dans les réticences des acteurs à se lancer dans certaines formes d'innovations, notamment organisationnelles.

4.4.1.3. Bilan des actions de transfert sur l'utilisation des outils de PMS

Différents types d'actions de transfert sur les outils de PMS avant plantation ont été réalisées depuis une dizaine d'années, dans différentes régions en France : production de documents techniques, organisation de sessions de formation, de journées de démonstration... Ces actions ciblaient l'ensemble des praticiens forestiers : propriétaires, gestionnaires et opérateurs, en forêt privée et publique. L'objectif de cette troisième étude est de réaliser un bilan des actions de transfert menées par le passé et des attentes des différents types d'acteurs vis-à-vis de ces actions.

Une enquête quantitative, à l'aide d'un questionnaire en ligne, a été menée à une échelle nationale. Le questionnaire, conçu et publié sur Internet à l'aide du logiciel Google Form, a été mis en ligne en Juillet 2018 pour une durée d'environ 3 mois. 300 réponses utilisables ont été collectées et analysées (188 gestionnaires, 58 conseillers, 20 opérateurs, 13 propriétaires et 21 autres).

La perception de l'innovation par les répondants est très centrée sur l'innovation technique (changement des pratiques) et ne révèle pas de défiance particulière vis-à-vis de l'innovation. Les innovations sont perçues essentiellement dans le domaine de la mécanisation forestière, soit le domaine où les résultats sont les plus visibles à court terme et la fréquence d'innovations la plus importante. Viennent ensuite l'entretien des forêts et les travaux de plantation. C'est dans le secteur du matériel végétal que les personnes interrogées voient le moins d'innovation (un peu moins de 50%).

Les principaux canaux d'information des répondants sont les canaux relationnels (relations avec les collègues d'un même organisme ou d'autres organismes), les démonstrations sur le terrain, et la presse spécialisée. Les autres canaux cités sont essentiellement les canaux d'information internes à l'organisme (formations, intranet) et les foires ou autres manifestations forestières. Les personnes ayant suivi des actions de communication ont généralement suivi au moins 2 ou 3 types différents d'actions.

Les attentes autour de nouvelles actions de communication se sont articulées autour de formations courtes (1 jour) et de démonstration sur le terrain, mais aussi, au niveau individuel de vidéos accessibles sur internet et de fiches techniques téléchargeables.

Globalement les actions de communication sont très appréciées, avec très peu de personnes insatisfaites (sauf peut-être en matière de documentation remise) et jugées très efficaces. Elles permettent de faire évoluer la perception des pratiques de la plantation ou de régénération (plus de 60% des répondants) et de changer les pratiques (plus de 50% des répondants). Les connaissances acquises lors de ces formations sont très largement transmises à l'entourage et les actions de communication qui ont été suivies sont généralement conseillées (plus de 80% des répondants).

4.4.1.4. Elaboration d'une stratégie de diffusion des innovations

Un atelier réunissant des acteurs de la R&D, des enseignants et des formateurs, a été organisé en Février 2019, pour discuter des résultats issus des enquêtes et rassembler des éléments pour l'élaboration d'une stratégie de transfert des connaissances et de diffusion de l'innovation sur le thème de la plantation, vers les praticiens forestiers.

4.4.1.4.1. Transfert de connaissances

D'une façon générale, il convient de poursuivre l'effort entrepris concernant le transfert de connaissances sur les méthodes innovantes de plantation, en mobilisant à la fois les canaux de la formation initiale, de la formation continue et de l'autoformation.

Dans les formations initiales (notamment Bac Pro Forêt et BTSA Gestion Forestière), l'importance donnée aux thématiques en lien avec la plantation semble fortement modulée par le contexte régional dans lequel se trouvent les lycées. Dans de nombreux lycées (sauf dans les régions très marquées par les sylvicultures de plantation), les volumes horaires consacrés à la thématique sont généralement faibles. Cette faiblesse s'explique à la fois par la place limitée de la thématique dans les référentiels de diplôme Bac Pro et BTSA forestiers, et par un désintérêt (voire un rejet) pour ces questions de la part de nombreux enseignants en sylviculture. Elle aboutit à une mauvaise connaissance des enjeux, des méthodes, et des difficultés dans la pratique de la plantation par les jeunes diplômés, qui doivent alors se former sur ce thème après leur entrée dans le monde du travail.

Dans ce contexte, la formation continue et l'auto-formation sur les pratiques de plantation revêtent une importance particulière pour assurer un bon niveau de compétence des praticiens. Une démarche en deux temps est préconisée pour leur transférer les connaissances sur les innovations concernant la plantation :

1. Tout d'abord, des actions d'information s'adressant à l'ensemble du public concerné par la thématique. Cette information se veut généraliste et doit être délivrée sous une forme très synthétique. Idéalement, l'information doit s'adresser simultanément à différents publics et doit permettre les échanges entre les acteurs. Cette étape permet ainsi de préparer la suivante, en suscitant l'intérêt des acteurs pour un approfondissement de l'information et l'acquisition de connaissances plus détaillées et immédiatement opérationnelles. De plus, en délivrant une information commune à différents acteurs de la filière et en provoquant des échanges entre acteurs sur cette information, elle constitue un premier mode d'animation des réseaux d'acteurs (voir section suivante 3.4.1.4.2).
2. Ensuite, des actions de formation doivent être organisées, s'adressant à un public particulier, qui peut être défini selon plusieurs critères : rôle (prescripteur, décideur, ou opérateur), contexte de gestion (type d'établissement ou de structure, région), individu (niveau d'éducation, âge), ... Le contenu des formations est beaucoup plus détaillé et parfaitement adapté au public cible, et doit répondre à des attentes plus fortes en termes d'impact réel sur les pratiques.

Il est nécessaire de diversifier autant que possible la palette de méthodes de transfert utilisées (communication écrite, vidéos, placettes de démonstration, échanges directs entre chercheurs, développeurs et praticiens, informations en ligne) pour "faire savoir" et "faire voir".

La multiplicité des médias utilisés, indispensable pour atteindre l'ensemble des publics cibles et répondre à leurs différentes attentes, pose deux difficultés :

- Tout d'abord, le temps nécessaire à leur élaboration par les organismes de R&D, qui enflent rapidement avec le nombre de médias développés, alors que les moyens financiers et humains alloués à ce type d'activités sont limités. Dans de nombreux programmes, cette étape se révèle un maillon faible de la chaîne R&D-Innovation et il est important de s'assurer que des moyens suffisants seront disponibles.
- Ensuite, la possibilité pour le public cible de prendre connaissance de l'information diffusée, dans un contexte de surinformation générale qui tend à noyer l'information disponible. S'assurer que l'information produite atteint son public demande d'utiliser les canaux de communication existants qui ont fait la preuve de leur efficacité (lettres d'information, listes de diffusion, sites web, réseaux sociaux, ..., animés par des différents organismes en lien avec la forêt). Ces canaux doivent être utilisés de façon systématique pour informer le public des nouvelles réalisations disponibles. En revanche, la création de nouveaux canaux de diffusion s'avère peu efficace, surtout s'ils sont éphémères (par exemple, réseau social ou site web lié à un projet temporaire), et doit être évitée. Par ailleurs, la création d'un centre de ressource (portail web?) qui constituerait un lieu unique pour rassembler toute l'information liée à la plantation forestière faciliterait la recherche de l'information par les publics intéressés. Pour être efficace, ce centre de ressource devrait être ouvert à tous les publics et devrait être pérenne.

Les informations à destination des praticiens doivent être faciles d'accès, tant sur le plan du contenu (la demande des lecteurs porte en premier lieu sur des informations "prédigérées" qu'ils peuvent mettre directement en application), de la localisation (les documents doivent être facilement accessibles, les formations doivent être



organisées au plus près géographiquement), ou de la durée à y consacrer (la surcharge des personnels en terme d'information fait que les documents longs ne sont pas lus et que les formations longues sont de moins en moins suivies). A l'inverse, il est nécessaire de produire des supports plus complexes à destination des formateurs.

Les démonstrations sur le terrain sont particulièrement demandées et se révèlent efficaces pour le transfert de connaissances opérationnelles : elles permettent aux participants de voir par eux-mêmes les outils mis en œuvre et leurs impacts sylvicoles, elles fournissent généralement des informations pratiques directement applicables par les participants, et elles sont contextualisées (contexte régional, contexte de gestion, ...). L'organisation de journées de démonstration, la mise à la disposition des formateurs de parcelles expérimentales bien documentées, la rédaction de supports pédagogiques pour les visites ou la réalisation de travaux pratiques de terrain, sont des exemples d'actions permettant de répondre aux demandes exprimées par les praticiens et les formateurs.

4.4.1.4.2. Animation et dynamisation des réseaux d'acteurs

Les deux enquêtes (sections 3.4.1.1 et 3.4.1.2) ainsi que l'atelier de discussion ont fait ressortir la faiblesse des réseaux d'acteurs, tout particulièrement l'absence de vision commune aux différents acteurs et le faible partage du risque lié à l'investissement dans des pratiques et des matériels innovants, comme un frein majeur à la diffusion des innovations au sein du secteur forestier.

Lors des enquêtes et de l'atelier, différentes actions ont été suggérées pour animer et dynamiser les réseaux d'acteurs : développer des projets d'investissement mutualisés entre acteurs, mutualiser la recherche et la réalisation de chantiers forestiers, mettre en place des projets collectifs et multiacteurs, accueillir des professionnels dans les structures de R&D pour développer des nouveaux outils, accueillir des personnels de la R&D dans les entreprises, accompagner l'investissement des entreprises, mettre en œuvre du coaching d'entreprise, proposer des formations et des journées d'échanges multiacteurs. Néanmoins, hormis pour l'organisation de journées d'échanges entre acteurs, les personnes interrogées se déclarent très sceptiques sur la faisabilité opérationnelle de telles actions et seraient très réticentes à s'y investir. Un questionnement ouvert sur les actions qui pourraient être mises en œuvre n'a pas permis de récolter de suggestions intéressantes.

Ainsi, s'il apparaît clairement que la consolidation des réseaux d'acteurs devrait constituer une priorité dans la mise en œuvre d'une stratégie de dissémination des innovations, il est actuellement difficile d'identifier les actions qui permettraient cette consolidation. Une bonne compréhension des réticences des différents acteurs à s'investir dans des actions facilitant les échanges entre eux est malheureusement actuellement manquante, alors qu'elle semble nécessaire pour pouvoir élaborer et proposer des actions concrètes et, in fine, parvenir à animer et dynamiser le réseau d'acteurs.

4.4.2. Actions de transfert menées vers les acteurs de la filière

Le projet CAPSOL a donné lieu à de nombreuses actions de valorisation et de transfert de connaissances, en lien avec la réalisation du projet. En Septembre 2019, le bilan s'établit comme suit :

- Publications scientifiques (publiées ou en préparation) : 3
- Publications techniques (publiées ou en préparation) : 12
- Mémoires diplômants : 14
- Organisation de colloques : 3 régionaux et 1 national
- Vidéos : 5
- Présentations dans des colloques : 22
- Actions de formation initiale et continue : 11
- Journées d'information et d'échange : 15
- Autres actions de communication et d'animation : 6

La liste détaillée des actions est fournie en section 6.

Le colloque intitulé « dernières innovations sur la plantation forestière », soutenu par le Ministère de l'Agriculture, l'ADEME, le LabEx ARBRE et France Bois Forêt, a été un moment fort du début de l'année 2019. Plus de 200 participants ont pu apprécier les interventions variées sur le thème de la plantation. L'originalité de cette manifestation résidait dans les différents angles proposés pour appréhender ce mode de renouvellement de la forêt. A côté des aspects technico-économiques évidemment primordiaux, l'influence environnementale de la préparation mécanisée du site (stock de carbone du sol, biodiversité) a été documentée ainsi que les attentes sociétales. Plusieurs nouveaux modes de financement des plantations ont également pu être présentés. Le projet CAPSOL a largement contribué à alimenter les réflexions sur la base de résultats acquis dans les réseaux expérimentaux mis en place précédemment (Projets PILOTE et ALTER).

Une analyse rapide des 243 inscrits au colloque (certains n'ont pas pu participer compte-tenu de la capacité de la salle), montre une majorité de représentants de la forêt privée, des administrations concernées et de l'Office

National des Forêts, mais aussi une bonne mobilisation des professionnels directement impliqués dans les opérations de reboisement, ce qui traduit sans aucun doute de fortes attentes sur la thématique (Figure 8).

Le colloque a été largement repris dans la presse professionnelle :

- Article dans La Forêt Privée n°367 Mai -Juin 2019, pp 35-46 (Nathalie Jaupart-Chourrou))
- Article dans Forêt de France n°625 juillet/août 2019, pp 23-38 (dossier coord. par Pascal Charroy)
- Article sur le site internet Forestopic (reprise du dossier Forêt de France) : www.forestopic.com/fr/agora/publications/950-plantation-forestiere-enjeux-cout-changement-climatique
- Article à paraître dans Forêt-Entreprise, rédigé par les organisateurs du colloque.

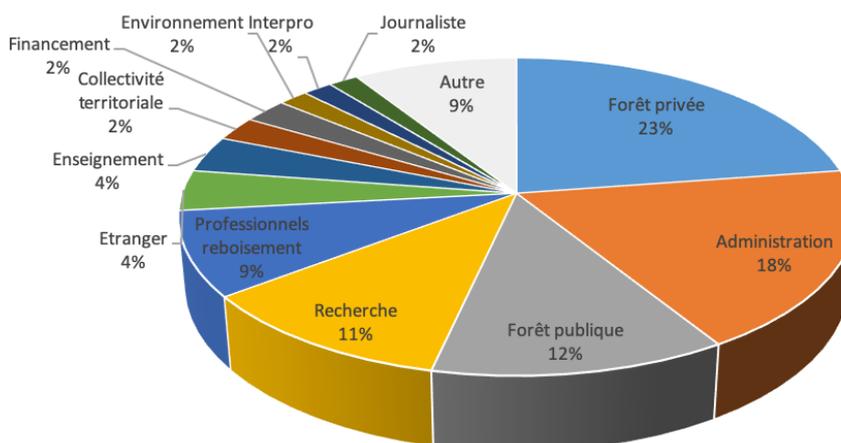


Figure 8: Répartition des inscrits au colloque du 19 mars 2019.

5. Conclusion

Le projet Capsol avait trois objectifs généraux :

1. Etudier les effets de la PMS avant plantation sur deux composantes du bilan de carbone : le carbone organique du sol et la croissance des arbres.

Une originalité de l'étude expérimentale est de s'être penchée sur des méthodes de PMS réalisant une préparation du sol localisée dans la parcelle, et de chercher à estimer dans quelle mesure la préparation localisée permet de réduire la perturbation occasionnée, en comparaison avec une préparation réalisée en plein. L'étude a montré, dans l'ensemble des dispositifs suivis, un impact négatif de la PMS sur le stock de COS dans la zone travaillée, confirmant ainsi des résultats bibliographiques déjà établis en parcelles agricoles et forestières. Dans la zone travaillée, la diminution du stock de COS dans les horizons de 0 à 60 cm, par rapport au témoin non perturbé, peut atteindre des valeurs maximales de 60 à 70% dans les sols présentant une forte accumulation de litière. Pour les différents outils de PMS testés, la diminution du stock de COS était limitée à la ligne de plantation (zone travaillée) et n'était pas attribuable uniquement à un déstockage de carbone sous forme de CO₂ par minéralisation, mais était également causée par un déplacement de la matière organique par les outils de PMS depuis la ligne de plantation vers l'andain voire l'inter-rang. Une estimation du stock de COS à l'échelle de la parcelle entière révèle des valeurs semblables pour les parcelles préparées et les parcelles témoin. La préparation localisée permet donc bien de réduire, voire annuler, l'impact négatif de la PMS sur le stock total de COS dans la parcelle. Elle constitue ainsi une alternative intéressante aux outils de PMS qui travaillent le sol en plein, et une réflexion sur la surface maximale de sol à travailler doit être menée, selon les outils de PMS, et selon les types de sol et la sensibilité de leur stock de COS à la PMS.

La qualité des stocks de COS a été évaluée, permettant de séparer le pool en carbone labile et carbone stable. Les premiers résultats montrent une redistribution importante du carbone entre les horizons à différentes profondeurs, qui varie selon les outils de PMS. Une analyse approfondie et une comparaison des différents dispositifs sont prévues dans les mois à venir, qui permettra notamment de mieux caractériser les perturbations causées par les différents outils. Les réponses à moyen et long terme des différents pools de carbone à ces perturbations restent pour l'instant difficiles à appréhender.

Une approche de modélisation a été menée pour évaluer les impacts à moyen et long terme de la PMS sur le carbone dans la biomasse et dans le sol.



Une première étude a permis d'élaborer des relations de croissance pour les stades juvéniles des principales essences de plantation en France, selon les grands types de préparation du site (PMS, herbicides, fertilisation, amendement, méthodes mixtes). Ces modèles fournissent des fonctions qui pourront être utilisées pour décrire les phases initiales de croissance des arbres en plantation, généralement absentes des modèles de croissance pour les phases adultes.

Ensuite, un modèle décrivant l'évolution des stocks de carbone dans la biomasse et dans le sol sur la durée de la révolution, a été élaboré et des simulations utilisant les données de COS récoltées dans le projet ont été réalisées. Le modèle suggère que les gains de croissance et de survie dus à la PMS ont peu d'impact sur le carbone dans la biomasse à l'échelle de la révolution, sauf dans les cas où la mortalité serait très forte (et où la pratique habituelle de regarnissage ne serait pas appliquée).

Dans sa version actuelle, le module sur la dynamique du COS considère trois horizons et deux niveaux de qualité des COS (labile ou stable), mais il n'intègre pas la redistribution du carbone dans le sol. La calibration du modèle permet de reproduire la dynamique de stock de COS sous peuplement mature classiquement observée.

Pour l'instant, les simulations de l'impact de la PMS sur les COS ont été effectuées sur des durées courtes (5 ans). Elles mettent en évidence des effets assez faibles de la PMS, qui correspondent aux observations réalisées dans les parcelles. Pour étendre le modèle sur la durée de la révolution, il sera nécessaire d'intégrer la redistribution verticale et horizontale du carbone dans le sol (résultats prochainement disponibles) et de considérer que les stocks de carbone dans les différents volumes de sol et de différentes qualités possèdent des dynamiques propres qui demandent à être calibrées individuellement dans le modèle.

2. Utiliser les résultats obtenus pour alimenter une évaluation plus complète des méthodes de PMS et des itinéraires techniques de conduite des plantations.

Les dispositifs des réseaux Alter et Pilote visaient à quantifier différentes performances pour les méthodes étudiées, notamment la croissance et la survie des plants, le coût des itinéraires, l'intensité des perturbations induites, les impacts sur le bilan carbone et la biodiversité floristique. Ces données ont été intégrées dans des analyses multivariées et ont servi à initier une démarche d'évaluation multicritère.

Ce travail a tout d'abord permis d'identifier les méthodes de PMS et les itinéraires techniques les plus prometteurs et d'identifier pour chacun d'entre eux, les performances qui doivent être améliorées. Les méthodes qui réalisent un travail localisé dans la parcelle permettent de réduire notablement les perturbations induites (COS, biodiversité végétale) et certaines d'entre elles permettent une bonne installation des plants, même dans des situations réputées difficiles (contextes de fougère ou de molinie abondante). Parmi ces méthodes, les outils montés sur mini-pelle sont intéressants quant à leurs performances techniques et environnementales, mais ont une productivité qui est faible, comparé aux outils tractés.

Les performances des méthodes sont fortement dépendantes de leurs conditions d'application (conditions stationnelles et climatiques) et les données disponibles concernant les différentes performances des outils sont encore parcellaires pour de nombreux outils, réduisant la portée des conclusions que nous pouvons tirer. La compilation des différents jeux de données a permis de préciser les situations (outils à tester, conditions stationnelles et climatiques à tester, performances à suivre) sur lesquelles il faudrait travailler en priorité. En outre, des indicateurs ont été définis pour chacune des performances suivies, de façon à réduire la variation dans les indicateurs actuellement mesurés qui complique fortement la compilation des jeux de données de différentes origines.

Une démarche d'EMC a été initiée et a débuté par l'identification des acteurs concernés par la thématique de la plantation forestière, largement au-delà des intervenants en forêts. Les attentes portées par les différents acteurs vis-à-vis de la plantation ont été déterminées. Une analyse préliminaire des principales attentes montre un certain décalage avec les connaissances actuellement disponibles, et pourrait mener à de nouvelles définitions des priorités de travail, notamment une meilleure prise en compte des performances sociétales des itinéraires de plantation.

L'EMC constitue un outil d'animation du débat multiacteurs, car il repose sur la co-construction du modèle par les différents acteurs concernés par la thématique. Le travail effectué dans CAPSOL s'est ainsi basé sur l'organisation d'ateliers de travail réunissant des experts de différents organismes, des enquêtes et des entretiens individuels. Cette animation permet la confrontation des idées entre les différents acteurs. La poursuite des travaux, notamment sur l'expression des préférences des acteurs devrait permettre d'approfondir ces échanges.

3. Elaborer un programme de transfert vers la filière forestière intégrant les nouvelles connaissances scientifiques et techniques.

Les acteurs forestiers expriment de fortes attentes pour une évolution des pratiques de plantation, mais un faible niveau de connaissance et plus encore d'utilisation des outils innovants par les praticiens est clairement observé, mettant en évidence le besoin de mettre en place les conditions d'une meilleure diffusion des innovations.

Aucune défiance particulière par rapport à l'innovation n'a été observée, et les actions de formation menées par les organismes de R&D sont globalement jugées efficaces bien qu'insuffisantes en nombre. Poursuivre les actions et élargir l'effort de formation actuel pour essayer de toucher de nouvelles personnes, semble important.

Dans les formations initiales, l'importance donnée aux thématiques en lien avec la plantation ne semble pas toujours à la hauteur des enjeux actuels associés à la thématique. La formation continue et l'auto-formation sur les pratiques de plantation constituent alors les éléments essentiels pour assurer un bon niveau de compétence des praticiens. Une démarche en deux temps est préconisée pour transférer les connaissances : tout d'abord des actions d'information généralistes et synthétiques, s'adressant à l'ensemble du public concerné ; puis des actions de formation, plus détaillées et plus opérationnelles, ciblées sur des publics et des demandes spécifiques.

Par ailleurs, l'absence de mise en réseau des acteurs est apparue comme un frein fort à l'adoption des outils. Néanmoins, différents leviers ont été proposés aux praticiens pour y remédier, et aucun n'a convaincu. Ceci suggère qu'au-delà des innovations techniques sur les outils, des innovations sont également nécessaires dans l'organisation des interactions entre acteurs, passant par l'invention de nouvelles formes de collaboration et par l'acceptation de ces nouveautés par les acteurs concernés.

Ainsi, il apparaît clairement que la consolidation des réseaux d'acteurs devrait constituer une priorité dans la mise en œuvre d'une stratégie de dissémination des innovations, mais il est actuellement difficile d'identifier les actions qui permettraient cette consolidation. Une bonne compréhension des réticences des différents acteurs à s'investir dans des actions facilitant les échanges entre eux est malheureusement actuellement manquante, alors qu'elle semble nécessaire pour pouvoir élaborer et proposer des actions concrètes et, in fine, parvenir à animer et dynamiser le réseau d'acteurs.

6. Liste des actions de valorisation

Le projet CAPSOL a donné lieu à de nombreuses actions de valorisation et de transfert de connaissances, présentant les résultats issus du projet.

Les principales publications sont disponibles à : www.inra.fr/renfor/Projets/Capsol.

6.1.1. Publications scientifiques (publiées ou en préparation)

1. Collet C., Vast F., Richter C., Pousse N., Koller R. 2019. The cultivation profile : a visual evaluation method of soil structure to analyse the impacts of mechanical site preparation in forest plantations. Soumis.
2. Miquel J.C., Fortin M., Berthelot A., Deleuze C., Bélanger N., Collet C. 2019. Modelling the early growth responses of broadleaf and coniferous planted tree species to different site preparation methods. Soumis.
3. Dumas N., Arnaudet L., Dassot M., Fraysse J.Y., Piat J., Richter C., Collet C. 2019. Four-year performance of oak and pine seedlings following lightweight mechanical site preparation. En préparation.

6.1.2. Publications techniques (publiées ou en préparation)

1. Petit A. 2017. Adoption de l'innovation dans les pratiques sylvicoles. Rapport de synthèse INRA MGVF, 20 p
2. Dassot M., Duez F., Wehrén L., Collet C. 2017. Fiche technique : La Bi-dent Maillard. Fiche technique INRA MGVF - ONF, 4p.
3. Collet C., Blondet M., Richter C., de Morogues F., Bouvet A., Thomas J., Antoine M., Bernio F. 2018. Diffusion de l'innovation dans les pratiques de plantation : utilisation des outils de préparation mécanisée du site. Rapport de synthèse de tâche 1 - projet Pinns et Capsol, 18p.
4. Collet C., Blondet M., Deleuze C., Richter C., Richert L. 2018. Définition d'un jeu de critères pour évaluer les performances multiples des itinéraires de plantation. Rapport de synthèse de tâche 2 - projet Pinns et Capsol, 16p.
5. Bouvet A., de Morogues F., Blondet M., Collet C., Deleuze C., Richter C., Thomas J. 2018. Bilan des actions de transfert sur l'utilisation des outils de préparation mécanisée du site. Rapport de synthèse de tâche 3 - projet Pinns et Capsol, 20p.
6. Dassot M., Duez F., Collet C., Wehrén L., Ulrich E., Richter C., Touffait R., Piat J. 2018. Fiche technique : La fougère aigle (*Pteridium aquilinum*) - comment lutter ? Fiche technique INRA RENFOR - ONF, 6p
7. Berthelot A., Borde B. 2019. La préparation du sol avant plantation : un atout pour réussir son reboisement, même en année difficile ! Forêts Privées de Bourgogne Franche Comté, n° 4, février 2019, 10p
8. Collet C., Bilot N., Boulanger V., Deleuze C., Dumas N., Fiquepron J., Gentils M., Helou T.E., Le Bouler H., Orazio C., Richter C., Sevrin E., Peyron J.L. 2019. Dernières innovations sur la plantation forestière. Contribution de la R&D pour accompagner les évolutions attendues dans les pratiques. à paraître dans Forêt Entreprise



9. Collet C., Blondet M., Richter C., Deleuze C., de Morogues F., Bouvet A., Thomas J. 2019. PINNS : Le Processus d'INNOvation technologique en Sylviculture : exemple des outils mécaniques de préparation du sol avant plantation. à paraître dans Forêt Entreprise
10. Vast F., Collet C., Koller R., Richter C., Pousse N. 2019. Le profil cultural : une méthode d'observation pour analyser les impacts de la préparation mécanisée des sites sur la structure du sol. à paraître dans Rendez-Vous Techniques
11. Dassot M., Escurat J.M., Collet C., Wehrlen L., Ulrich E., Richter C., Touffait R., Piat J. 2018. Fiche pédagogique : Travaux préparatoires à la plantation sur les stations à fougère aigle. 14p
12. Dassot M., Escurat J.M., Collet C., Ulrich E., Richter C., Touffait R., Piat J. 2019. Fiche pédagogique : Travaux préparatoires à la plantation sur les stations à molinie. En préparation.

6.1.3.Mémoires diplômants

1. Dupérat M. 2016. Dynamique de la végétation à un stade primaire de plantation forestière. Stage Master 2 FAGE, AgroParisTech Université de Lorraine, 37 p
2. Petit A. 2016. L'Adoption de l'Innovation dans les pratiques forestières. Le cas des forestiers de Haute-Normandie. Stage Master 2 Evolution Patrimoine Naturel et Sociétés spécialité EDTS, MNHN, 116 p
3. Dantant M. 2017. Structure du sol et croissance de la plantation forestière suite à différentes méthodes de préparation mécanique. Stage DUT Génie biologique, IUT Nancy-Brabois, , 45 p
4. Leglatin H. 2017. Impact de la préparation mécanique des sols avant plantation sur les stocks de carbone organique des sols forestiers. Stage Master 1 Biodiversité Ecologie Evolution, Université de Grenoble, 18 p
5. Husson J. 2018. Evaluation technique de l'impact des méthodes de préparation de site avant plantation forestière. Stage Master 1 FAGE, Université de Lorraine, Nancy.
6. Neupert M. 2018. Impact de la préparation mécanique des sols sur les communautés fongiques du site ALTER de Bord-Louviers. Stage Master 1 Gestion de l'Environnement. Université de Rouen.
7. Langlois T. 2018. Impact de la préparation mécanique des sols avant plantation sur les stocks de carbone organique des sols forestiers. Stage Master 1, Université de Rouen, 16p
8. Belfort T. 2018. Impact de la préparation mécanique des sols avant plantation sur les stocks de carbone organique des sols forestiers. Stage Licence 3, Université de Rouen, 11p
9. Lesaint L. 2018. Impact de la préparation mécanique des sols avant plantation sur les stocks de carbone organique des sols forestiers. Stage Licence 3, Université de Rouen, 25p
10. Trouvé C. 2018. Evaluation multicritère de moyens innovants de travail du sol avant plantation en contexte de blocage par la végétation concurrente. Les projets Alter et Pilote. Stage Ingénieur par apprentissage, AgroParisTech. 68p
11. Lebrun C. 2018. Vers une évaluation environnementale des techniques alternatives aux herbicides en forêt : croisement entre approches à court et long terme. Stage Master 2 Biologie Santé Ecologie, Ecole Pratique des Hautes Etudes, 38p
12. Lesaint L. 2019. Impact de la préparation mécanique des sols avant plantation sur les stocks de carbone organique des sols forestiers : Mesure du carbone extractible à l'eau. Stage Master 1, Université de Rouen, 43p
13. Guenordeau C. 2019. Étude des effets des outils mécaniques sur les stocks de carbone de sols forestiers : cas des sols hydromorphes de la Forêt de Chaux Stage Master 1, Université de Rouen.
14. Carmon S. 2019. Comment prendre en compte le travail du sol dans les bilans carbone des perspectives de séquestration dans les écosystèmes forestiers ? Stage M2 Gestion de l'Environnement, Université de Rouen.

6.1.4.Organisation de colloques

1. Colloque régional. 2017. Planter autrement la forêt de demain, 6 octobre 2017, Compiègne (60). Organisation: CRPF, INRA, ONF. 104 participants.
2. Colloque régional. 2018. Planter autrement la forêt de demain, 17 octobre 2018, Rennes (35). Organisation: CRPF, INRA, ONF, Abibois. 80 participants.
3. Colloque régional. 2019. Planter autrement la forêt de demain, 9 octobre 2019, Hémiilly (57). Organisation: INRA, CRPF, ONF, Fibois. environ 100 participants.
4. Colloque national. 2019. Dernières innovations sur la plantation forestière, 19 Mars 2019, Paris (75). Organisation: INRA, ONF, IDF, GCF, MAA, FNEDT, FNE, ECOFOR, EFIPLANT, ADEME. 243 participants.

6.1.5.Vidéos

1. Ecosustain, INRA, ONF. 2017. Des méthodes mécaniques innovantes pour réussir les plantations - Le sous-soleur multifonction. Chaîne You Tube centre INRA Grand Est Nancy
2. Ecosustain, INRA, ONF, 2017. Réussir la plantation forestière sur les sols engorgés. Le culti 3B. Chaîne You Tube centre INRA Grand Est Nancy
3. Vic Production, ONF. 2017. Tournage aérien en drone et tournage au sol en liaison sur des outils de préparation en forêt de Compiègne (dispositif Alter + journée interpro 2017).
4. Imagéo, ONF. 2018. Tournage clip vidéo portrait-métiers ONF avec présentation du dispositif Alter. Chaîne You Tube ONF
5. Vic Production, INRA, 2019. Travaux préparatoires au renouvellement : quels impacts sur le sol ? - La méthode du profil cultural. En préparation.

6.1.6. Présentations dans des colloques

1. Collet et al. 2017. Innovating forest plantation practices: science, technical development and knowledge exchange. IUFRO International Congress Sustainable restoration of Mediterranean forests, Analysis and perspective within the context of bio-based economy development under global changes. 17-21 avril 2017.
2. Collet et al. 2017. Collet et al. Septembre 2017. New mechanical approaches for the establishment of young plantations. IUFRO Conference 3rd Restoring Forests: Regeneration and Ecosystem Function for the Future. 12-14 septembre 2017
3. Arnaudet L., Richter C. 2017. Séminaire d'échanges et de réflexions sur le fonctionnement hydrique de l'écosystème forestier sur sols à engorgement temporaire. Présentation des essais Alter, Pilote et Regebloc. Séminaire IRSTEA/ONF du 27 janvier 2017. chercheurs et développeurs. Paris.
4. Quibel E., Juarez S., Aubert M., Copard Y., Richter C., Cécillon L., Collet C. & Bureau F. 2017. Séminaire annuel de la SFR SCALE, 27 septembre 2017
5. Quibel E., Juarez S., Aubert M., Copard Y., Richter C., Cécillon L., Collet C. & Bureau F. 2017. Colloque RENECOFOR, Octobre 2017
6. Quibel E., Juarez S., Aubert M., Copard Y., Richter C., Cécillon L., Collet C. & Bureau F. 2017. Séminaire R&D ADEME, Décembre 2017.
7. Quibel E., Juarez S., Michaël Aubert M., Copard Y., Richter C., Cécillon L., Collet C. & Bureau F. 2018. Colloque RESMO, Trécastel, Février 2018.
8. Quibel E., Juarez S., Aubert M., Copard Y., Richter C., Cécillon L., Collet C. & Bureau F. 2018. Journées de l'Ecole Doctorale EDNBISE, Mars 2018
9. Vincenot L., Richard B., Margerie P., Neupert M., Piat J., Collet C., Richter C., Bureau F. 2018. Réponses des communautés fongiques à la préparation mécanique d'un sol forestier avant plantation. Journées d'études des sols, juillet 2018
10. Vincenot L., Richard B., Margerie P., Neupert M., Piat J., Collet C., Richter C., Bureau F. 2018. Réponses des communautés fongiques à la préparation mécanique d'un sol forestier avant plantation. Journées DSS biodiversité Irstea
11. Quibel E., Aubert M., Copard Y., Richter C., F,ELIE, Cécillon L., Collet C. & Bureau F. 2018. . Journées d'études des sols, juillet 2018
12. Quibel E., Aubert M., Copard Y., Richter C., F,ELIE, Cécillon L., Collet C. & Bureau F. 2018. . Journées du Domaine Scientifique Stratégique "Biodiversité et Fonctionnalité des écosystèmes terrestres gérés" Irstea, novembre 2018
13. Galamez L., Soucemariénadin L., Baudin F., Savignac F., Meredieu C., De Boissesson J-M., Berthelot A., Merzeau D., Barré P., Cécillon L. 2019. Soil organic carbon stocks and stability in maritime pine forests under contrasted pedoclimates and management practises. EGU (European Geosciences Union) General Assembly 7-12 avril 2019, Vienne, Autriche
14. Quibel E., Aubert M., Copard Y., Richter C., Elie F., Cécillon L., Collet C. & Bureau F. 2019. Assessment of soil mechanical preparation works during plantation phase in managed forests : impacts on soil organic carbon at soil profile and stand level. EGU (European Geosciences Union) General Assembly 7-12 avril 2019, Vienne, Autriche
15. Quibel E., Aubert M., Copard Y., Richter C., Elie F., Cécillon L., Collet C. & Bureau F. 2019. Assessment of soil mechanical preparation works during plantation phase in managed forests : impacts on soil organic carbon at soil profile and stand level. Journées de l'Ecole Doctorale EDNBISE, Mars 2019
16. Quibel E., Aubert M., Copard Y., Richter C., Elie F., Cécillon L., Collet C. & Bureau F. 2019. Assessment of soil mechanical preparation works during plantation phase in managed forests : impacts on soil organic carbon at soil profile and stand level. Séminaire annuel de la SFR SCALE, 24 mai 2019
17. Boulanger V., Vincenot L. 2019. Réponses de la biodiversité à la lutte contre les espèces concurrentielles dans les plantations. Colloque Dernières innovations sur la plantation forestière, 19 Mars 2019, Paris



18. Vast F., Collet C., Koller R., Pousse N. 2019. Faut-il préparer le sol ? Ce que nous dit l'observation de la structure du sol Apports de la méthode du profil cultural. Colloque Dernières innovations sur la plantation forestière, 19 Mars 2019, Paris
19. Bureau F., Quibel E., Derrien D., Cécillon L. 2019. Travaux de préparation mécanique en contexte de plantation forestière et stocks de carbone du sol. Colloque Dernières innovations sur la plantation forestière, 19 Mars 2019, Paris
20. Berthelot A., Cotten L., Ulrich E., Richter C., Collet C., Pastuszka P. 2019. Quelle est la place de la mécanisation dans les itinéraires de plantation ? Colloque Dernières innovations sur la plantation forestière, 19 Mars 2019, Paris
21. Blondet M., Bouvet A., de Morogues F., Richter C., Collet C. 2019. Quelle adoption de l'innovation dans les pratiques de plantation : freins, leviers, canaux de diffusion ? Colloque Dernières innovations sur la plantation forestière, 19 Mars 2019, Paris
22. Collet C., Richter C., Deleuze C., Sevrin E., Thomas J., Blondet M. 2019. Quelles attentes des acteurs vis-à-vis de la plantation? Colloque Dernières innovations sur la plantation forestière, 19 Mars 2019, Paris

6.1.7. Actions de formation initiale et continue

1. Vincenot L.. 2017. Sortie de terrain pour suivi mycologique sur le dispositif ALTER en forêt de Bord-Louviers. Master 1 BIODIV, Université de Rouen - 26/10/2017. Etudiants de Master. Mont-Saint-Aignan, Bord-Louviers (76)
2. CNPF-ONF-MGVF. 2017. Préparer une plantation forestière. Stage CNPF/ONF/MAAF, 29 mai-1 juin 2017. personnels techniques. Croigny (10)
3. CNPF-ONF-MGVF. 2017. Préparer une plantation forestière. Stage CNPF/ONF/MAAF, 12-15 juin 2017. personnels techniques. Rorschwihr (68)
4. Ulrich E, Piat J. 2017. Préparation mécanisée en contexte fougère. Stage ONF, 22 juin 2017. prescripteurs et opérateurs ONF. Bord-Louviers (76)
5. CNPF-ONF-MGVF. 2017. Entretenir une plantation. Stage CNPF/ONF/MAAF, 2-6 septembre 2017. personnels techniques. Marcoux (42)
6. CNPF-ONF-MGVF. 2017. Entretenir une plantation. Stage CNPF/ONF/MAAF, 18-21 septembre 2017. personnels techniques. Marcoux (42)
7. Wehrlen L. 2017. Préparation à la plantation. Module de formation Lycée agricole et forestier Croigny, 6-9 mars 2017. étudiants Licence Pro Agroforesterie. Croigny (10)
8. Vincenot L. 2018. Sortie de terrain pour suivi mycologique sur le dispositif ALTER en forêt de Bord-Louviers. Université de Rouen - 18/10/2018. Etudiants de Master 1 Gestion de l'Environnement. Mont-Saint-Aignan, Bord-Louviers (76)
9. Ulrich E, Piat J. 2018. Préparation mécanisée en contexte fougère et molinie. Stage ONF, 10 et 11 octobre 2018. Prescripteurs et opérateurs ONF. Bord-Louviers (76)
10. Dumas N., Vast F. 2019. Formation FOGEFOR : présentations "préparation mécanisée du site avant plantation" et "profils culturaux". Formation CRPF Alsace-Lorraine - Fogefor, 3 mai 2019. Propriétaires privés. Bugnéville (88)
11. Pitaud J., Vast F., Akroume E. 2019. Itinéraires techniques de plantation. Formation BTS-GF lycée agricole de Châteaufarine. Etudiants BTS et Licence Pro. Forêt de Chaux (39)

6.1.8. Journées d'information et d'échange

1. INRA. 2016. Planter autrement la forêt de demain. Journée interCetef régionale, 6 octobre 2016. propriétaires privés et personnels techniques CRPF. Maron (36). 120 participants
2. INRA. 2017. Journée plantation, 16 mars 2017. Propriétaires et personnels techniques. Boncourt (55). 20 participants
3. INRA. 2017. Journée travail du sol, démonstration de matériel, 7 avril 2017. Propriétaires. Matougues (51). 50 participants
4. INRA. 2017. Démonstration outils mini-pelle : DB10 et ModulD, 3 mai 2017. prescripteurs et opérateurs. Argonne (55). 20 participants
5. INRA. 2017. Compétition herbacée en plantation. Réunion nationale du DSF, 16 mai 2017. CO DSF. Chaux (39). 35 participants
6. INRA. 2017. Travail du sol . Tournée CRPF Bourgogne, 19 mai 2017. personnels techniques CRPF. Haye (54). 30 participants
7. INRA. 2017. Travail du sol et plantation. Tournée agence de Colmar, 19 juin 2017. personnels techniques ONF. Foug et Mondon (54). 15 participants

8. INRA. 2017. Travail du sol et plantation. Tournée agence de Colmar, 12 juillet 2017. personnels techniques ONF. Guebwiller (68). 8 participants
9. INRA, F&BE. 2017. Démonstration matériel, 6 septembre 2017. tout public forestier. Toul (54). 40 participants
10. SF-SCD. 2017. Préparation mécanisée en renouvellement Douglas (Morvan). Personnels SF CDC Agence de Joigny. Villiers-Nonain. 12 participants
11. FCBA, INRA, SF-CDC. 2018. Travail du sol avant plantation. Groupe de travail Douglas du CETEF de Bourgogne-Franche-Comté sur le site de Villiers-Nonains, le 16 mai 2018. Propriétaires forestiers + ETF. Villiers-Nonain (89). 20 participants
12. INRA. 2018. Journée profils culturels, 6 juillet 2018. tout public forestier. Toul (54). 40 participants
13. INRA. 2018. Journée démonstration d'outils de PMS, 14 septembre 2018. partenaires projets IPLor et Regiowood. Hémilly (57). 10 participants
14. INRA. 2019. Tournée dispositifs plantation en région Grand Est. Tournée en région Grand Est, les 14 et 15 mai 2019. partenaires IPLor et Regiowood. Hémilly (57). 15 participants
15. INRA. 2019. Journée profils culturels, 13 septembre 2019. tout public forestier. Hémilly (57). 30 participants

6.1.9. Autres actions de communication et d'animation

1. Petit A., Collet C., Blondet M. 2016. Adoption de l'innovation dans les pratiques forestières, restitution de l'enquête, 5 octobre 2016. Acteurs forestiers Haute Normandie, Rouen (76). 15 participants.
2. Richter C. et al. 2018. Atelier d'échanges et de réflexion sur les travaux mécanisés préparatoires au renouvellement et l'étude de leurs effets sur les sols avec présentation du dispositif Alter Compiègne. Atelier d'échanges en FD de Compiègne, 19 & 20 avril 2018. chercheurs et développeurs. Compiègne (60). 29 participants
3. Dumas N. 2019. Réunion du réseau expérimental Pilote, 23 septembre 2019. Paris (93). 20 participants
4. Dumas N., Berthelot A. 2018. Outils de préparation du sol avant plantation Pôle RENFOR sur le stand FCBA à EUROFOREST, Saint Bonnet de Joux (71)
5. Berthelot A. 2018. Actualités BAOGREFF : Outil de préparation du sol avant plantation. http://base-sylviculture-genetique.fcba.fr/wp-content/uploads/2018/02/Actu_Baogreff_Outils_prepa_sol.pdf. Personnels BSA FCBA et visiteurs du site BAOGREFF
6. Deleuze C., Pitaud J., Renaud J.P., Collet C. 2019. Evaluation Multi Critère des itinéraires de plantation. Journée Atelier du projet CAPSOL, 17 septembre 2019, Paris. Chercheurs et praticiens forestiers, 25 participants.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

La liste des références bibliographiques ne répertorie pas les publications citées dans le texte, produites par CAPSOL. Celles-ci sont listées dans la section 6.

- Arrouays D, Balesdent J, Germon JC, Jayet PA, Soussana JF, Stengel P 2002. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Rapport d'expertise réalisé par l'INRA à la demande du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, octobre 2002, 334 p.
- Balesdent J., Basile-Doelsch I., Chadoeuf J., Cornu S., Derrien D., Fekiacova Z., Hatté C. 2018. Atmosphere–Soil Carbon Transfer as a Function of Soil Depth. *Nature* 559 (7715): 599-602.
- Barré, P., Angers D., Basile-Doelsch I., Bispo A., Cécillon L., Chenu C., Chevallier T., Derrien D., Eglin T.K., Pellerin S. 2017. Ideas and Perspectives: Can We Use the Soil Carbon Saturation Deficit to Quantitatively Assess the Soil Carbon Storage Potential, or Should We Explore Other Strategies? *Biogeosciences Discussions*, septembre, 1-12.
- Braakhekke, M., C. Beer, M. Hoosbeek, M. Reichstein, B. Kruijt, M. Schrumpf and P. Kabat 2011. SOMPROF: A vertically explicit soil organic matter model. *Ecological Modelling* 10: 1712-1730.
- Cacot E., Deleuze C., Boldrini C. (coord.) 2018. Observatoire des pratiques de récolte du bois énergie et évaluation d'outils de flux. Projet GERBOISE – Gestion raisonnée du bois énergie. Verneuil-sur-Vienne : FCBA, Angers : ADEME, 51 p. + annexes.
- Carrie, J., Sanei, H., Stern, G., 2012. Standardisation of Rock–Eval pyrolysis for the analysis of recent sediments and soils. *Organic Geochemistry*. Vol. 46, 38–53.



Cécillon, L., Baudin, F., Chenu, C., Houot, S., Jolivet, R., Kätterer, T., Lutfalla, S., Macdonald, A., van Oort, F., F. Plante, A.F., Savignac, F., Soucémariadin, L. N., Barré, P., 2018. A model based on Rock-Eval thermal analysis to quantify the size of the centennially persistent organic carbon pool in temperate soils. *Biogeosciences*. Vol. (15), 2835–2849

Colin A 2014. Emissions et absorptions de gaz à effet de serre liées au secteur forestier dans le contexte d'un accroissement possible de la récolte aux horizons 2020 et 2030. Contribution de l'IGN aux projections du puits de CO₂ dans la biomasse des forêts gérées de France métropolitaine en 2020 et 2030, selon différents scénarios d'offre de bois. IGN, 50p + annexes.

Corvasce, M., Zsolnay, A., D'Orazio, V., Lopez, R., Miano, T. M., 2006. Characterization of water extractable organic matter in a deep soil profile. *Chemosphere*. Vol. 62, 1583–1590.

Deleuze C., Rivoire M., Hervé J-C., 2014. Estimation harmonisée du volume de tige à différentes découpes, *Rendez-Vous Techniques*, ONF, n44, p 33-42,

Disnar, J.R., Guillet, B., Keravis, D., Di-Giovanni, C., Sebag, D., 2003. Soil organic matter (SOM) characterization by Rock-Eval pyrolysis: scope and limitations. *Org. Geochem*. Vol. 34, 327–343.

Dufour-Kowalski S., Courbaud B., Dreyfus P., Meredieu C., Coligny F. 2011. Capsis: an open software framework and community for forest growth modelling. *Annals of Forest Science*, novembre. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0140-9>.

Dufrêne, E., H. Davi, C. François, G. le Maire, V. Le Dantec, and A. Granier. 2005. Modelling carbon and water cycles in a beech forest: Part I: Model description and uncertainty analysis on modelled NEE. *Ecological Modelling* 185, no. 2: 407-436.

Felipe de Mendiburu. (2019). *Agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research*.

Fortin M, Ningre F, Robert N, Mothe F 2012. Quantifying the impact of forest management on the carbon balance of the forest-wood product chain: A case study applied to even-aged oak stands in France. *Forest Ecology and Management* 279: 176-88.

Gis Sol, 2011. L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 188 p.

Goudet M 2010. Suivi des plantations. Département Santé des Forêts, MAAF.

Guillet B., Disnar J.R., Loustau D. et Balesdent J., 2010. Dynamics of soil carbon and moder horizons related to age in pine and beech stands. In D. Loustau (ed) "Forests, carbon Cycle and Climate Change", éditions QUAE, p. 55-78.

Hassink, Jan. 1997. « The Capacity of Soils to Preserve Organic C and N by Their Association with Clay and Silt Particles ». *Plant and Soil* 191 (1): 77-87. <https://doi.org/10.1023/A:1004213929699>.

Hedde, M., M. Aubert, T. Decaens, and F. Bureau. 2008. Dynamics of soil carbon in a beechwood chronosequence forest. *Forest Ecology and Management* 255:193-202.

Hopkins, D.W., 2008. Carbon Mineralization. In *Soil Sampling and Methods of analysis*, edited by Carter, M.R., and Gregorich, E.G., Canadian Society of soil Science, CRC Press, 1224 p.

Jenkinson, D. S. and J. H. Rayner 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Science* 123(5): 298-305.

Jobbagy E.G., Jackson R.B. 2000. « The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications* 10 (2): 14

Arrouays D, Balesdent J, Dupouey JL 2001. Carbon wells tied to agriculture: Potentials and limits of sequestration in the soil and forests. *Petrole et Techniques*, n°435: 30-34.

Jonard, M, Caignet I, Ponette Q, Nicolas M 2013. Evolution du carbone des sols forestiers de France métropolitaine. Détection et quantification à partir des données mesurées sur le réseau RENECOFOR. UCL, ONF, 2013.

Jonard, M., Nicolas, M., Coomes, D. A., Caignet, I., Saenger, A., Ponette, Q., 2017. Forest soils in France are sequestering substantial amounts of carbon. *Science of the Total Environment*. Vol. 574, 616–628.

Knowe SA, Harrington TB, Shula RG 1992 Incorporating the effects of interspecific competition and vegetation management treatments in diameter distribution models for Douglas-fir saplings. *Can J For Res* 22 : 1255-1262.

Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123:1-22

Landsberg JJ, Waring RH 1997 A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *For. Ecol. Manage.* 95 : 209-228.

Lauvin D. 2018. « Les modèles de croissance : un outil de la recherche transférable à la gestion ? »

Lindner M 1998. Implementing Carbon Mitigation Measures in the Forestry Sector — a Review. In *Carbon Dioxide Mitigation in Forestry and Wood Industry*, 167-84. Springer Berlin Heidelberg, 1998.

- Le Moguédec, G., Dhôte J.F. 2012. Fagacées: A Tree-Centered Growth and Yield Model for Sessile Oak (*Quercus Petraea* L.) and Common Beech (*Fagus Sylvatica* L.). *Annals of Forest Science* 69 (2): 257-69.
- Madignier ML, Guillaume B, Roy C 2015. Les contributions possibles de l'agriculture et de la forêt à la lutte contre le changement climatique. CGAAER, février 2015, 83 p.
- Mason EG 2004 Effects of soil cultivation, fertilisation, initial seedling diameter and plant handling on the development of maturing *Pinus radiata* D.Don on Kaingaroa gravelly sand in the Central North Island of New Zealand. *Bosque* 25 : 43-55.
- Mason EG., Rose RW., Rosner L.S. 2007. Time vs. light: a potentially useable light sum hybrid model to represent the juvenile growth of Douglas-fir subject to varying levels of competition. *Can J For Res* 37:795-805
- Moreaux V 2012. Observation et modélisation des échanges d'énergie et de masse de jeunes peuplements forestiers du Sud-Ouest de la France. Thèse de l'université Bordeaux 1.
- Parton W.J., D. S. Schimel, C. V. Cole and D. S. Ojima 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal* 51: 1173-1179.
- Richardson B, Watt MS, Mason EG, Kriticos DJ 2006 Advances in modelling and decision support systems for vegetation management in young forest plantations. *Forestry* 79 : doi:10.1093/forestry/cpi059
- Rosa J et al. 2014 Conduite de la création et du renouvellement des peuplements. Groupe technique n°3 du RMT AFORCE. 3ème colloque de restitution des projets d'AFORCE, 4 et 5 décembre 2014, Pierroton
- Routa, J., Kellomäki, S., Strandman, H., 2012. Effects of Forest Management on Total Biomass Production and CO2 Emissions from use of Energy Biomass of Norway Spruce and Scots Pine. *BioEnergy Research* 5, 733–747.
- Saenger, A., Cécillon, L., Poulénard, J., Bureau, F., De Daniéli, S., Gonzalez, J.M., Brun, J.-J., 2015. Surveying the carbon pools of mountain soils: A comparison of physical fractionation and Rock-Eval pyrolysis. *Geoderma*. Vol. 241–242, 279–288.
- Saint-André L., Buée M., Aubert M., Richter C., Deleuze C., Rakotoarison H., Abildtrup J., Akroume, E., Bach C., Berthe T., Bilot N., Bouvet A., Chauvat M., Dreyfus P., Echevarria G., Elie F., Fauchery, L., Fuente P., Gérard D., Lauvin D., Leban J-M., Leblanc M., Leduc V., Maillard F., Normand M., Quibel E., Raveloson C., Renaud J-P., Roy S-J, Stenger A., Viaud P., Vincenot L., Zeller B. 2019. RESPIRE – Récolte des menus bois en forêt - Potentiel, Impact, Indicateurs et remédiations par épandage de cendres de bois. 111 p.
- Sainte-Marie, J., Saint-André, L., Nouvellon, Y., Laclau, J.-P., Roupsard, O., le Maire, G., Delpierre, N., Henrot, A., Barrandon, M., 2014. A new probabilistic canopy dynamics model (SLCD) that is suitable for evergreen and deciduous forest ecosystems. *Ecological Modelling*, Special Issue of the 4th International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA'12) Special Issue of PMA'12 290, 121–133.
- Sardin T., Legay M., Bock J., Conrard F., 2008. Guide de sylviculture des Hêtraies continentales,
- Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter : implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241:155-176.
- Sokal, R.R., Rohlf, F.J., 1995. *Biometry: the Principles of Statistics in Biological Research*. W. H. Freeman, 887 p.
- Stewart, Catherine E., Keith Paustian, Richard T. Conant, Alain F. Plante, et Johan Six. 2007. « Soil Carbon Saturation: Concept, Evidence and Evaluation ». *Biogeochemistry* 86 (1): 19-31. <https://doi.org/10.1007/s10533-007-9140-0>.
- Stockmann U., Adams M. A., Crawford J. W, Field D. J., Henakaarchchi N., Jenkins M., Minasny B., Alex B. McBratney, de Remy de Courcelles V., Singh K., Wheeler I., Abbott L., Angers D.A., Baldock J., Bird M., Brookes P.C., Chenu C., Jastrow J. D., Lal R., Lehmann J., O'Donnell A. G., Parton W. J., Whitehead D., Zimmermann M., 2013. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 164:80-99.
- Thioulouse J., Dufour A.B., Chessel D., 2004. Ade4: Analysis of Environmental Data: Exploratory and Euclidean methods in Environmental sciences, R package version 1.3–3.
- Vallet P 2005. Impact de différentes stratégies sylvicoles sur la fonction "puits de carbone" des peuplements forestiers. Modélisation et simulation à l'échelle de la parcelle. Thèse de Doctorat ENGREF, 209 p.
- Vallet, P., Meredieu, C., Seynave, I., Béluouard, T., Dhôte, J.F., 2009. Species substitution for carbon storage: Sessile oak versus Corsican pine in France as a case study. *Forest Ecology and Management* 257, 1314–1323.
- Vance, E.D., Brookes, P.C., Jenkinson, D.S., 1987. An extraction method for measuring microbial biomass C. *Soil Biol.Biochem.* Vol (19), 703-707.



Von Lützw m., Kögel-Knabner I., Ekschmitt K., Flessa H., Guggenberger G., Matzner E., Marschner B., 2007. SOM fractionation methods: relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biology and Biochemistry*, 39:2183-2207.

Watt MS, Kimberley MO, Coker G, Richardson B, Estcourt G 2007 Modelling the influence of weed competition on growth of young *Pinus radiata*. Development and parameterization of a hybrid model across an environmental gradient. *Can J For Res* 37 : 607-616.

Wendt, J. W., & Hauser, S., 2013. An equivalent soil mass procedure for monitoring soil organic carbon in multiple soil layers. *European Journal of Soil Science*. Vol. 64(1), 58–65.

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

Figure 1: Diagramme opérationnel du projet : contenu des tâches et interactions	12
Figure 2: Stocks de COS (MgC.ha ⁻¹) à l'échelle du transect calculés sur 0-60 cm, sur le topsoil (0-30 cm) et sur le subsoil (30-60 cm) dans les 5 sites Alter (A = andain ; LP = ligne de plantation ; IR = inter-rang ; Scheirer-Ray-Hare, p<0,05).....	15
Figure 3 : Stocks de COS calculés sur « Litière + 0-60 cm » (en MgC.ha ⁻¹) dans le site Pilote de Chaux et le dispositif Chrono. Les stocks sont ici calculés à masse équivalente (Kruskal-Wallis, p<0,05).....	17
Figure 4 Acteurs concernés par la plantation forestière: rôles et interactions	22
Figure 5: Séquestration de C (t/ha) sur une révolution complète pour les itinéraires testés (gauche) et séquestration de carbone avec hypothèse d'un gain de fertilité (2 ans sur la H0) dû au travail du sol (droite)	24
Figure 6: Structure du modèle. La redistribution liée au travail du sol n'est pas prise en compte dans cette version préliminaire	25
Figure 7: Simulations réalisées par le modèle. a- état stationnaire du peuplement mature réalisé sur un siècle. b- peuplement témoin. c- peuplement avec travail du sol par RACB. La coupe à lieu juste après le temps 0. On considère qu'il n'y a pas d'apports de rémanents de coupe, on néglige également les apports des souches et du système racinaire. Les points correspondent aux données observées, les courbes aux données simulées.	26
Figure 8: Répartition des inscrits au colloque du 19 mars 2019.	31
Figure A1.1 : Localisation des 10 sites sélectionnés pour réaliser la tâche 1 du projet CAPSOL. Les étiquettes de couleur marron clair correspondent aux 6 sites du réseau ALTER (Haguenau 32-35-150, Bords-Louviers, Villecartier et Escource), celles de couleur bleue aux 3 sites du réseau PILOTE (Chaux212/1026, Chinon et Rennes) et celle en blanc au dispositif Chrono (Chaux 213). (Fond de carte : Joly et al, 2010)	44
Figure A1.2 : Stocks moyens de COS sur le site de Bord Louviers pour les 3 modalités (témoin, SR et SR+SSM) estimés A/ à l'échelle du profil de la ligne de plantation sur « Litière + 0-60 cm », B/ à l'échelle du profil de la ligne de plantation sur 0-30 cm (topsoil), C/ à l'échelle du transect sur « Litière + 0-10 cm » et D/ à l'échelle du peuplement sur « Litière + 0-10 cm » (comparaison au témoin : * = significatif à p < 0,05 ; ns = non significatif ; Kruskal-Wallis).	52
Figure A1.3 : Plans factoriels des ACP sur les échantillons de sol des couches constitutives du profil de sol de la ligne de plantation dans les 3 modalités. Les échantillons de sol sont décrits à l'aide des 6 indices issus de l'analyse Rock-Eval (HI, OI, I, R, T50_CH_Pyr et T50-CO2_Ox). Les numéros indiqués dans les étiquettes à droite correspondent aux numéros des échantillons ; les étiquettes situées au barycentre des ellipses à gauche correspondent à la profondeur moyenne d'une couche de sol.	53
Figure A1.4 : Minéralisation potentielle du COS dans l'horizon 0-10 cm à l'échelle du transect (A = andain ; LP = ligne de plantation ; IR = inter-rang) pour les 3 modalités. A / Minéralisation potentielle du C exprimée en C dégagé sous forme de CO ₂ sur les 7 jours d'incubation (gC-CO ₂ .100g ⁻¹ de sol) ; B/ Taux de minéralisation du C (% du COT). (* = significatif à p < 0,05 ; ns = non significatif ; Kruskal-Wallis).	55
Figure A1.5 : C microbien (en mgC.kg ⁻¹ de sol et en % du COT) dans l'horizon 0-10 cm à l'échelle du transect (A = andain ; LP = ligne de plantation ; IR = inter-rang) pour les 3 modalités (Kruskal-Wallis, p<0,05).....	56
Figure A1.6 : Stocks de C organique extractible à l'eau sur 0-60 cm (en MgC.ha ⁻¹) et répartition de ces stocks de C dans le profil de sol de la ligne de plantation pour les 3 modalités à Bord-Louviers. Des minuscules différentes indiquent les différences au sein du profil de sol par modalité, des majuscules différentes indiquent les différences entre modalité (Kruskal-Wallis, p<0,05).	57
Figure A1.7: Stocks de COS (MgC.ha ⁻¹) à l'échelle du transect calculés sur 0-60 cm, sur le topsoil (0-30 cm) et sur le subsoil (30-60 cm) pour les 3 modalités (A = andain ; LP = ligne de plantation ; IR = inter-rang ; Scheirer-Ray-Hare, p<0,05)....	58
Figure A1.8 : A/ Minéralisation potentielle du COS (gC-CO ₂ .100g ⁻¹ de sol) et C microbien (mgC.kg ⁻¹) dans l'horizon 0-10 cm à l'échelle du transect (A = andain ; LP = ligne de plantation ; IR = inter-rang) pour les 3 modalités. (* = significatif à p < 0,05 ; ns = non significatif ; Scheirer-Ray-Hare).....	59

Figure A1.9 : Stocks de C organique extractible à l'eau sur 0-60 cm (en MgC.ha ⁻¹) et répartition de ces de stocks C dans le profil de sol de la ligne de plantation pour les 3 modalités. Des minuscules différentes indiquent les différences au sein du profil de sol par modalité, des majuscules différentes indiquent les différences entre modalité (Scheirer-Ray-Hare, p<0,05).	60
Figure A1.10 : Stocks de COS calculés sur « Litière + 0-60 cm » (en MgC.ha ⁻¹) dans les 3 sites pilote et le dispositif Chrono. Les stocks sont ici calculés à masse équivalente pour la comparaison avec le site Chrono (Kruskal-Wallis, p<0,05).	62
Tableau A2.1 : bilan des sites disponibles pour l'analyse multifactorielle, répartis par modalité de PMS, par essence et en rouge avec mesures de carbone du sol. Sont surlignés les doublons qui sont expliqués par de petites variations locales de modalité, explicitées dans les commentaires.	68
Figure A2.1 : à gauche représentation des variables sur les deux premiers axes de l'ACP sur le maximum d'individus et 6 variables ; à droite, représentation des différents placeaux colorés par réseau, avec les valeurs moyennes et ellipses de confiance à 95% de ces valeurs.....	69
Figure A2.2 : représentation des placeaux sur les deux premiers axes de l'ACP sur le maximum d'individus et 6 variables, colorés à gauche par site et à droite par essence.	69
Figure A2.3 : représentation des placeaux sur les deux premiers axes de l'ACP sur le maximum d'individus et 6 variables, colorés à gauche par modalité de PMS et à droite par catégorie d'engins.....	70
Figure A2.4 : à gauche représentation des variables sur les deux premiers axes de l'ACP sur le maximum de variables et 24 placeaux ; à droite, représentation des différents placeaux colorés par contexte de blocage, avec les valeurs moyennes et ellipses de confiance à 95% de ces valeurs.	70
Figure A2.5 : représentation des placeaux sur les deux premiers axes de l'ACP sur le maximum de variables et 24 placeaux, colorés à gauche par modalité de PMS d'engins et à droite par catégorie d'engins.	71
Figure A2.6 : Représentation des catégories de chaque variable sur les deux premiers axes de l'ACM sur le maximum de placeaux et 11 variables.	72
Figure A2.7 : Représentation des catégories de chaque variable sur les deux premiers axes de l'ACM sur le maximum de variables et 24 placeaux.	73
Figure A3.1 itinéraires complets en surface terrière (gauche) et production totale en surface terrière (droite).....	74
Figure A3.2 séquestration de C (t/ha) sur une révolution complète pour les itinéraires testés (gauche) et séquestration de carbone avec hypothèse d'un gain de fertilité (2 ans sur la H0) dû au travail du sol (droite)	75
Figure A3.3 (a) Apports de litière aérienne des chênes – la quantité d'apports racinaires est identique ; (b) apports aériens de la végétation concurrente ; (c) apports souterrains de la végétation concurrente.....	77
Table A3.1 : valeurs des paramètres du modèle	77
FigureA3. 4: simulations réalisées par le modèle. a- état stationnaire du peuplement mature réalisé sur un siècle. b- peuplement témoin, c peuplement avec travail du sol par RACB. La coupe à lieu juste après le temps 0. On considère qu'il n'y a pas d'apports de rémanents de coupe, on néglige également les apports des souches et du système racinaire. Les points correspondent aux données observées, les courbes aux données simulées.	78

SIGLES ET ACRONYMES

COS	Carbone organique du sol
EMC	Evaluation multicritère
PMS	Préparation mécanisée du site



7. Annexe 1 : Estimation des stocks et des flux de carbone dans les sols

7.1. Objectifs et hypothèses

L'objectif de la tâche 1 est d'évaluer les **conséquences des travaux de préparation mécanique du sol lors de la phase de plantation des peuplements forestiers sur (i) les stocks de Carbone Organique du Sol (COS), (ii) la variabilité spatiale de ces stocks et (iii) les flux de C sous forme de CO₂.**

Pour le premier point, il s'agit de mesurer les stocks totaux de COS en quantité mais aussi en qualité au sein des horizons organiques de litière et des horizons minéraux jusqu'à la profondeur maximale de travail des outils testés (60 cm). Pour le second point, il s'agit de tenir compte de la variabilité spatiale des stocks de COS induite par la préparation mécanique du sol en différenciant les zones travaillées (lignes de plantation) et les zones non travaillées (inter-rangs) par les outils à l'échelle de la parcelle forestière. Pour le dernier point, les flux de C sous forme de CO₂ sont estimés via des expériences de minéralisation potentielle du COS en conditions contrôlées au laboratoire. En complément, l'estimation du C de la biomasse microbienne permet d'appréhender la biomasse des organismes responsables du processus de minéralisation de la matière organique du sol (MOS). Ce paramètre se rattache au pool de C labile à temps de renouvellement rapide dans le sol, de quelques semaines à plusieurs mois (Chenu et al, 2015 ; Derrien et al, 2016; Stockmann et al, 2013).

Les **trois hypothèses** qui guident cette tâche sont les suivantes :

- **Hypothèse 1** : les travaux de préparation mécanique du sol lors de la phase de plantation, bien que limités dans le temps par rapport à la durée complète d'un cycle sylvicole, provoquent un déstockage du COS significatif à l'échelle du profil de sol travaillé par les outils.
- **Hypothèse 2** : le déstockage du C du sol à l'échelle du profil de sol travaillé par les outils touche majoritairement le pool labile (à temps de renouvellement rapide) de la matière organique du sol.
- **Hypothèse 3** : les travaux de préparation mécanique du sol lors de la phase de plantation induisent une variabilité dans la répartition spatiale des stocks de COS à l'échelle de la parcelle forestière. On suppose que cette variabilité spatiale est liée à un déstockage du COS significativement différent entre la ligne de plantation (zone travaillée par les outils) et l'inter-rang (zone non travaillée par les outils).

Pour compléter cette seconde hypothèse, il est nécessaire de préciser que les travaux de préparation du sol peuvent introduire selon le type d'outil une hétérogénéité spatiale supplémentaire (accumulation de matériel végétal sous forme d'andains par exemple ou création de billons) qui doit être prise en compte pour appréhender la variabilité spatiale et le niveau des stocks de COS à l'échelle de la parcelle forestière (i.e. *échelle du peuplement forestier*).

Les résultats obtenus dans cette tâche proviennent du travail de doctorat d'Edouard Quibel intitulé « *Impacts de la préparation du sol lors de la phase de plantation sur la dynamique des matières organiques et la fonction de stockage du Carbone dans les sols forestiers* ». Financée pour une durée de 3 ans par une bourse de la région Normandie, cette thèse a débuté en octobre 2016 et la soutenance est prévue en juin 2019. Ce travail n'est donc pas encore achevé au moment de la rédaction de ce rapport et des analyses complémentaires des résultats sont donc encore possible suite à la rédaction du présent rapport.

7.2. Méthodologie

7.2.1. Outils, sites d'études et stratégie d'échantillonnage

7.2.1.1. Outils testés

Dans le cadre de la tâche 1, quatre types d'outils sont testés. Une description succincte en est donnée ci-dessous.

▪ **Le Scarificateur Réversible® (SR) :**

Monté sur mini pelle, le scarificateur réversible (SR) est composé de 3 dents principales de 40 cm, 2 dents secondaires de 20 cm entre les dents principales ainsi que 3 obus de sous-solage pointus aux extrémités. L'outil va s'insérer sous le tapis végétal et le soulever verticalement. Quelques oscillations permettent de limiter l'exportation du sol pris avec les racines ou rhizomes. Le tapis végétal prélevé est déposé latéralement à la future ligne de plant. Cette masse végétale sera retournée et déposée racines en l'air. L'outil va ensuite pénétrer de nouveau dans le sol jusqu'à 30 ou 40cm selon le modèle pour effectuer une décompaction du sol avant de finir par un émiettement des plus gros agrégats.

▪ **Le Sous-Soleur Multifonction® (SSM) :**

Monté sur mini pelle également, le sous-soleur multifonction (SSM) est muni d'un corps vertical de 60 cm sur lequel 2 ailettes triangulaires sont situées de part et d'autre à différentes hauteurs. A la base du corps se situe

un obus de sous-solage. Il est utilisé en traction linéaire. Sur le sol dégagé du tapis herbacé et/ou de litière, la dent va plonger jusqu'à 60 cm de profondeur pour réaliser un piochage en 3 passes : une au centre (future ligne de plant), une à droite et une à gauche. A la suite de cette étape de piochage, la technique 3B (Billon Bombé Becker) est réalisée. Elle consiste à 2 passes latérales supplémentaires (une de chaque côté) qui ramènent le sol au centre de l'axe pour créer une butte surélevée de 20 à 30 cm par rapport au sol non travaillé. Il est dit que la phase de piochage ne remonte pas les horizons profonds en surface.

- **Le RAZherb® (RAZ) :**

Il s'agit d'une lame située à l'extrémité d'un godet monté sur mini pelle qui permet un désherbage par décapement superficiel. L'outil élimine par raclage le tapis herbacé. Sur sols sableux les griffes présentes sur le godet permettent un griffage du sol.

- **Le Culti 3B® (C3B) :**

Cet outil se fixe à l'arrière d'un tracteur et est composé de 2 parties distinctes. Une première partie est une dent de sous-solage rétractable de 87 cm sur laquelle sont fixées 2 ailettes triangulaires de part et d'autre de la dent à la même hauteur. La deuxième partie de l'outil est composée de 2 paires de disques fixées sur un cadre. Ces disques ont un profil tranchant indépendant et sont non motorisés. Le C3B permet de réaliser un billon surélevé de 10 à 30 cm et de décompacter le sol entre 40 et 60cm. Le tracteur passe une première fois dans l'axe de la future ligne de plant. La dent de sous-solage fracture le sol en profondeur et les disques travaillent sur 20 à 30cm et constituent le billon bombé. Ensuite, le tracteur passe une seconde fois, dans le même sens avec une vitesse un peu plus élevée (< 4km/h au premier passage et entre 5 et 6 km/h au deuxième passage) afin de surélever le billon créé au 1er passage.

Les outils testés peuvent être utilisés seul ou en combinaison. Précisément, dans le cadre de cette tâche du projet CAPSOL, nous avons testés les modalités suivantes :

- Le **Scarificateur Réversible® utilisé seul**, cette modalité de travail du sol est notée « **SR** » dans la suite de ce rapport, elle permet d'éliminer la végétation concurrente ;
- Le **Scarificateur Réversible® utilisé en combinaison avec le Sous-Soleur Multifonction®**, modalité de travail du sol notée « **SR+SSM** » par la suite ; l'outil SSM intervient systématiquement après le passage du SR pour faciliter la prospection racinaire des jeunes plants d'arbre en décompacter le sol jusqu'à 60 cm de profondeur et permettre la création d'un billon ; cette combinaison d'outils est adaptée aux sols acides oligotrophes envahis par la Fougère aigle.
- le **RAZherbe® (RAZ) utilisé en combinaison avec le Culti3B® (C3B)**, modalité notée « **RAZ+C3B** » par la suite ; l'outil C3B intervient systématiquement après le passage de l'outil RAZ; cette combinaison d'outils est adaptée aux sols hydromorphes envahis par la Molinie.

Ces trois modalités sont systématiquement comparées avec une modalité témoin (T) pour laquelle il n'y a pas eu de travail du sol lors de la plantation.

Les principaux avantages évoqués en termes de préparation mécanique du sol pour ces outils ou combinaison d'outils sont de plusieurs ordres :

- les mini pelles sont des engins légers qui disposent de chenilles ce qui minimise le risque de tassement du sol par rapport à des engins plus lourds (pelles mécaniques) et à pneus (tracteurs) ;
- les outils montés sur mini pelles permettent de réaliser un travail localisé (en bandes, en plateau ou en potets) par opposition à un travail en plein sur les parcelles forestières en phase de plantation ;
- les outils de type SR et SSM sont décrits par leurs concepteurs pour ne pas bouleverser fondamentalement l'organisation des horizons pédologiques puisqu'ils ne retournent pas les horizons de sol contrairement à un labour conventionnel avec charrue par exemple (Wehrle, 2012).

7.2.1.2. Sites d'études

La tâche 1 a été réalisée sur 10 sites au total appartenant à 2 réseaux expérimentaux nationaux (ALTER et PILOTE) et un dispositif de l'ONF (CHRONO). Ces sites sont répartis majoritairement sur la moitié Nord du territoire national (figure 1). Les modalités « SR » et « SR+SSM » ont été testées sur 6 sites du réseau ALTER, pour « ALTer native aux hERbicides en forêt », à savoir : Bord-Louviers, Haguenau (parcelles 32, 35 et 150), Villecartier et Escource. Le réseau ALTER a pour but de tester des méthodes de substitution aux produits phytopharmaceutiques pour les travaux préparatoires aux plantations. Les sites de ce réseau sont des dispositifs expérimentaux en blocs installés en 2011 (Bord Louviers) et en 2012 (Haguenau, Villecartier et Escource). Chacune des modalités de préparation du sol est répétée 3 fois au sein de 3 parcelles dites unitaires, disposées aléatoirement au sein du site expérimental, et dans lesquelles, les outils ont travaillé en bande. Les sites ALTER sont situés sur des sols acides à très acides, peu fertiles, peu riches en argiles, pour lesquels l'espèce végétale concurrente principale est la Fougère aigle. Sur ces 6 sites ALTER, les prélèvements de sol ont été effectués sur les modalités plantées en Chêne.

La modalité « RAZ+C3B » a été testée sur 3 sites du réseau PILOTE (Chaux parcelle 212/1026, Chinon et Rennes). Le réseau Pilote est un réseau initialement mis en place pour tester et promouvoir de nouvelles méthodes de



travaux préparatoires à la plantation. Les 3 sites de ce réseau ont été installés respectivement en 2014 (Chaux), 2015 (Chinon) et 2016 (Rennes). Les dispositifs expérimentaux sont constitués d'une zone pour chaque outil testé sur laquelle le travail de préparation du sol a été effectué sur des bandes de 100 à 200 m de long et de 1 à 2 m de large. Sur ces différentes zones travaillées par les outils, nous avons délimités 3 parcelles unitaires correspondant à 3 répétitions par modalité comme sur les sites du réseau ALTER. Aux 3 sites PILOTE, il faut ajouter le dispositif Chrono (Chaux parcelle 213) mise en place en 1994. Ce dispositif permet d'avoir un temps de différenciation depuis la réalisation du travail mécanique du sol plus important : 24 ans contre seulement 2 à 4 ans pour les 3 sites PILOTE retenus. Les sites PILOTE et le dispositif CHRONO sont situés sur sols hydromorphes acides, pour lesquels l'espèce végétale concurrente principale est la Molinie. Pour les sites PILOTE et CHRONO, les prélèvements ont été effectués sur les modalités plantées en Pin.

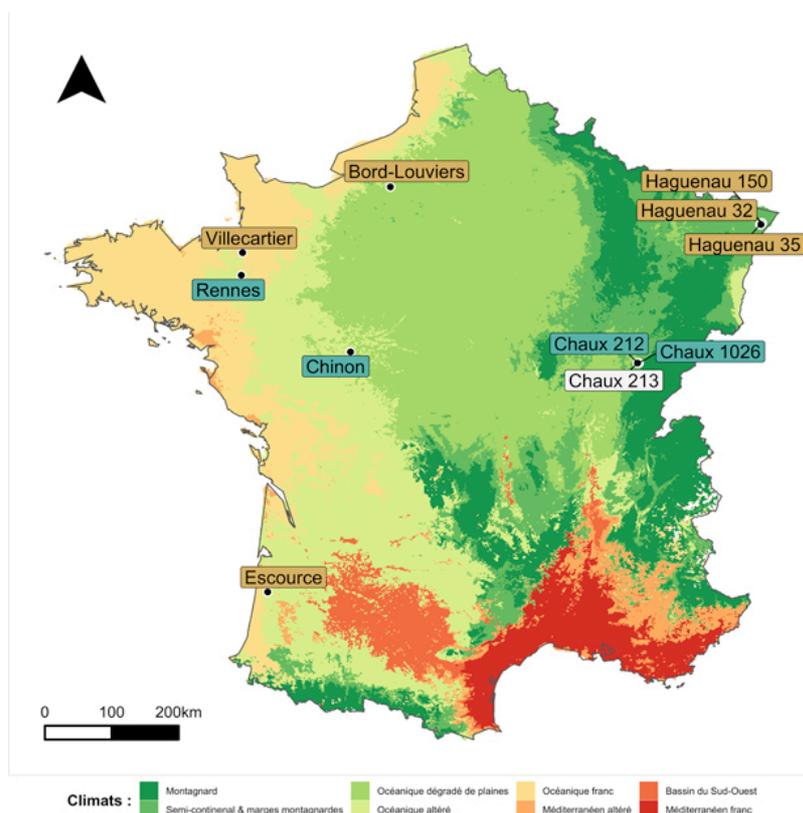


Figure A1.1 : Localisation des 10 sites sélectionnés pour réaliser la tâche 1 du projet CAPSOL. Les étiquettes de couleur marron clair correspondent aux 6 sites du réseau ALTER (Hagenau 32-35-150, Bords-Louviers, Villecartier et Escource), celles de couleur bleue aux 3 sites du réseau PILOTE (Chaux212/1026, Chinon et Rennes) et celle en blanc au dispositif Chrono (Chaux 213). (Fond de carte : Joly et al, 2010)

7.2.1.3. Stratégie d'échantillonnage

Pour appréhender la variabilité spatiale et le niveau des stocks de COS au sein des parcelles expérimentales du réseau ALTER, l'échantillonnage des sols s'est fait sur 9 transects élémentaires par modalité, soit 3 transects élémentaires par parcelle unitaire au sein du dispositif expérimental en blocs. Chaque transect élémentaire est centré sur la ligne de la plantation et comporte 3 points de prélèvement : l'inter-rang, la ligne de plantation et l'andain. Ce dernier point correspond à la zone de dépôt à la surface du sol de l'ensemble des débris végétaux extraits du sol par le sacrificateur (SR). Pour chacun de ces points de prélèvements, l'échantillonnage du sol est réalisé sur un profil pédologique de 60 cm de profondeur, creusé à la main. Sur chaque profil, les échantillons de sol sont prélevés systématiquement sur les couches suivantes : OL, OF+OH (si présent), 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-45 cm et 45-60 cm. Les échantillons de sol ainsi prélevés sur les 3 transects élémentaires sont regroupés par point de prélèvement identique (inter-rang, ligne de plantation et andain) et par profondeur équivalente (OL / OF+OH / 0-10 cm / 10-20 cm / 20-30 cm / 30-45 cm et 45-60 cm) pour constituer 1 transect composite par parcelle unitaire. Au final, on obtient 3 transects composites par modalité. Les échantillons composites sont réalisés au laboratoire après tamisage à 5 mm : un échantillon composite correspond au mélange de trois échantillons de poids identique (100g). La réalisation d'échantillons composites permet de gommer l'hétérogénéité spatiale par

point de prélèvement (inter-rang, ligne de plantation et andain) et donc d'obtenir une meilleure représentativité en termes d'échantillonnage. Au final, pour les sites ALTER (sauf Bord Louviers), cette stratégie d'échantillonnage conduit à analyser 810 échantillons de sol (pour un total de 2430 prélevés avant la réalisation des échantillons composites).

La stratégie d'échantillonnage décrite ci-dessus a dû être adaptée aux contraintes liées aux caractéristiques du sol du site ALTER de Bord Louviers. Ce sol est un PODZOSOL situé sur les anciennes terrasses de la Seine et se développe dans des alluvions fluviales grossières. Il présente une teneur importante en graviers et en cailloux qui augmente avec la profondeur et une forme d'humus de type MOR de plus de 10 cm d'épaisseur (18 cm maximum). Dans ce cas, l'estimation des stocks de COS jusqu'à 60 cm de profondeur s'est faite sur 3 profils de sol par modalité, creusés à la mini pelle, au niveau de la ligne de plantation. Sur chaque profil, les échantillons de sol sont prélevés systématiquement sur les couches suivantes : OL, OF+OH, 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm, 40-50 cm et 50-60 cm. La variabilité spatiale des stocks superficiels de COS par modalité a été mesurée à l'aide de 6 transects (2 transects par parcelle unitaire) centrés sur la ligne de plantation et comportant toujours les 3 points de mesure (inter-rang, ligne de plantation et andain). Sur ces transects, les prélèvements de sol ont été réalisés uniquement sur les horizons superficiels du sol suivants : OL, OF+OH et 0-10 cm. Au final, pour Bord Louviers, cette stratégie d'échantillonnage a conduit à prélever et analyser 234 échantillons de sol au total (162 sur les transects et 72 sur les profils).

Pour les 3 sites du réseau PILOTE et le site CHRONO, l'échantillonnage des sols s'est également fait à l'aide de 9 transects élémentaires par modalité, soit 3 transects élémentaires par parcelle unitaire au sein de la zone spécifiquement travaillée par un outil. Chaque transect élémentaire est centré sur la ligne de la plantation et ne comporte que 2 points de prélèvement (l'inter-rang et la ligne de plantation). La combinaison d'outils utilisés ici n'entraîne pas la création d'andain mais, à ce niveau, il est important de noter que, parfois, le surplus de désherbage du Rhazerb peut être déposé sur l'inter-rang avant le passage du culti3B. Pour chaque point de prélèvements, l'échantillonnage du sol est réalisé sur un profil pédologique de 60 cm de profondeur, creusé à la main, sur les couches suivantes : OL, OF + OH (si présent), 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-45 cm et 45-60 cm. Les échantillons de sol ainsi prélevés sur les 3 transects élémentaires sont regroupés par point de prélèvement identique et par profondeur équivalente comme précédemment pour constituer 1 transect composite. Au final, on obtient 3 transects composites par modalité. Pour PILOTE et CHRONO, cette stratégie d'échantillonnage conduit à analyser 288 échantillons de sol (pour un total de 864 échantillons prélevés avant la réalisation des échantillons composites).

7.2.2. Calcul des stocks de COS.

Le calcul des stocks de COS prend en compte la teneur en C organique, la densité apparente et l'épaisseur de chaque couche de sol. Le stock de COS est calculé selon la formule suivante (Jonard et al, 2017) :

$$\text{Stock COS (en MgC.ha}^{-1}\text{)} = \text{COS} \times \text{Da} \times \text{E} \times (1-F) \times 1/100$$

Avec : COS = Carbone Organique du Sol en mgC.g⁻¹ de sol

Da = Densité apparente en g.cm⁻³

E = Epaisseur de la couche de sol en cm

(1-F) = correction des éléments grossiers avec F = pierrosité en m³.m⁻³

La mesure de la teneur en C organique d'un échantillon de sol est réalisée à l'aide d'un analyseur élémentaire CHN (Thermo Scientific, Flash 2000, NC Soil Analyzer). Les sols étant tous acides à très acides, le C organique correspond au C total dans ce cas. La mesure de la densité apparente a été réalisée par la méthode dite des petits volumes, en utilisant des cylindres d'un volume de 100 cm³. Pour le site de Bord Louviers, la nature très caillouteuse du sol a nécessité l'utilisation d'un densitomètre à membrane. Lorsqu'ils sont présents, les horizons OL et OF+OH sont prélevés en totalité à l'aide d'un quadrat de 20 cm de côté. La hauteur de ces horizons est mesurée 10 fois afin d'obtenir une hauteur moyenne. Connaissant la surface prélevée sur une hauteur moyenne donnée, il est possible de calculer le volume prospecté. La mesure du poids de la litière rapportée à ce volume correspond à la densité apparente de ces horizons O. Pour les couches minérales sous la litière, les échantillons de sol ont été prélevés sur une épaisseur de 10 cm en surface (0-10 cm ; 10-20 cm ; 20-30 cm) et de 15 cm plus en profondeur (30-45 cm et 45-60 cm). Pour le site de Bord Louviers, le sol a été échantillonné par couche de 10 cm d'épaisseur. Les stocks de COS ont été mesurés sur les 10 sites retenus, soit 1332 échantillons analysés (pour un total de 3528 prélevés avant la réalisation des échantillons composites).

A l'échelle du peuplement, le stock de COS est calculé sur la base de l'organisation des parcelles expérimentales selon la formule suivante :

$$\text{Stock COS (en MgC.ha}^{-1}\text{)} = aA + bB + cC$$

Avec : a : % de surface représentée par l'andain

b : % de surface représentée par la ligne de plantation



- c : % de surface représentée par l'inter-rang
- A : Stock de COS de l'andain (en MgC.ha⁻¹)
- B : Stock de COS de la ligne de plantation (en MgC.ha⁻¹)
- C : Stock de COS de l'inter-rang (en MgC.ha⁻¹)

Les stocks de COS sont exprimés à profondeur constante d'une part et à masse de sol équivalente d'autre part (Toriyama et al 2011, Wendt et al 2013). Pour le calcul à profondeur constante, le stock de COS est systématiquement calculé sur 60cm de profondeur dans toutes les modalités en additionnant les stocks des couches successives de 0 à 60cm auxquels s'ajoutent les stocks des horizons O présents. Cette méthodologie permet d'exprimer le stock de COS sur les horizons minéraux de sol jusqu'à 60 cm de profondeur (0-60cm). Il est aussi courant dans la littérature scientifique d'exprimer le stock de COS en séparant le sol superficiel sur 0-30 cm (le topsoil des anglo-saxons) et le sous-sol (le subsoil) correspondant à 30-60 cm dans notre cas.

Pour l'estimation à masse constante, le calcul a été effectué à posteriori c'est-à-dire après les prélèvements systématiques à 60 cm de profondeur sur le terrain. Sur la modalité témoin, on estime la masse de la colonne de sol prélevée sur 60 cm, cette masse sert ensuite de référence. Pour les modalités travaillées, il faut ensuite calculer la profondeur à laquelle il aurait fallu échantillonner pour prélever l'équivalent de cette masse de référence. Les profondeurs minimales de prélèvement calculées sont ainsi de 48,7 cm pour la modalité SR (à Haguenau 35, ligne de plantation), de 57,4 cm pour la modalité SR+SSM (à Haguenau 35, ligne de plantation) et de 51,6 cm pour la modalité RAZ+C3B (à Chaux 213, inter-rang). Les profondeurs maximales de prélèvement calculées sont, quant à elles, de 74,4 cm pour la modalité SR (à Haguenau 150, andain), de 72,0 cm pour la modalité SR+SSM (à Escource, andain) et de 70,0 cm pour la modalité RAZ+C3B (à Chinon, inter-rang). Pour ces derniers cas, on attribue au complément à 60 cm pour atteindre la profondeur maximale calculée (soit 14,4 cm, 12 cm et 10 cm respectivement), les valeurs de Da et de COS correspondant à celle de la dernière couche systématiquement prélevée sur le terrain (45-60 cm) pour les calculs des stocks de COS. Nous assumons ici que les valeurs de Da et de COS utilisées sont représentatives de l'épaisseur ajoutée ou soustraite. L'estimation des stocks de COS est réalisée sur les échantillons poolés des transects composites de l'ensemble des sites ALTER, PILOTE et CHRONO. Sur le site Pilote de Rennes, il est important de préciser que sur la modalité témoin, aucun prélèvement n'a pu être effectué au-delà de 30 cm de profondeur à cause de la présence d'une forte charge en cailloux à partir de cette profondeur. Le calcul des stocks à profondeur constante s'est donc fait sur 30 cm afin de pouvoir comparer la modalité avec le témoin. A masse constante, la masse de référence a été faite également à 30 cm sur le témoin.

7.2.3. Qualité des stocks de COS.

Les modèles actuels de dynamique de la matière organique du sol font aujourd'hui la distinction entre plusieurs pools cinétiques au sein de la matière organique (Chenu et al, 2015 ; Falloon et al, 1998) : le pool labile (ou actif) à temps de renouvellement se comptant en semaines ou en mois, le pool intermédiaire (ou lent) à temps de renouvellement en années ou en décennies et, enfin, le pool passif à inertie avec des taux de renouvellement en siècles ou en millénaires. Dans notre cas, nous avons choisi de combiner l'analyse thermogravimétrique par pyrolyse Rock Eval avec une mesure du carbone organique oxydable au permanganate de potassium et un fractionnement physique des MOS afin d'appréhender la qualité des stocks de COS.

L'analyse thermogravimétrique par pyrolyse Rock Eval (Lafargue et al, 1998) est aujourd'hui de plus en plus utilisée pour déterminer la composition du carbone organique total (COT) dans un échantillon de sol et permet d'appréhender rapidement les pools labiles et stables de COS (Disnar, 2003 ; Carrie et al, 2012 ; Saenger et al, 2015 ; Cécillon et al, 2018). Classiquement, cette technique est utilisée pour déterminer la proportion de carbone pyrolysable et de carbone résiduel. Le carbone pyrolysable est couramment subdivisé en trois fractions identifiées grâce à trois pics sur les thermogrammes : (i) le pic S1 correspondant principalement à des molécules d'hydrocarbures (HC) volatiles, (ii) le pic S2 correspondant à des molécules d'hydrocarbures (HC) et (iii) le pic S3 correspondant aux molécules organiques oxygénées. Le carbone résiduel est donc, quant à lui, constitué de composés fortement résistants et réfractaires (Peters et al, 2005). Dans notre cas, l'analyse Rock-Eval a été réalisée avec un Rock-Eval 6 Turbo (Vinci Technologies). En pratique, l'analyse comprend une étape de pyrolyse sur le COT de l'échantillon suivie d'une étape d'oxydation du C résiduel. La pyrolyse a été effectuée de 200 à 650° C dans une atmosphère d'azote, tandis que l'oxydation a été effectuée de 300 à 850° C en présence d'oxygène. Les effluents d'hydrocarbures volatils provenant de la pyrolyse sont détectés et quantifiés par détection par ionisation de flamme (FID), tandis que les gaz CO et CO₂ sont quantifiés par détection infrarouge pendant les étapes de pyrolyse et d'oxydation. Au final, l'analyse génère cinq thermogrammes par échantillon : 1) les effluents d'hydrocarbures volatils (HC) pendant la pyrolyse, 2) le CO₂ pendant la pyrolyse, 3) le CO₂ pendant l'oxydation, 4) le CO pendant la pyrolyse et 5) le CO pendant l'oxydation. A partir de ces thermogrammes, il est possible de calculer différents paramètres permettant de d'appréhender la qualité du COS. Nous avons utilisé deux paramètres couramment utilisés pour décrire la chimie du COS (HI et OIRE6) ainsi que quatre indices décrivant la stabilité thermique du COS issus de la littérature (I, R, T50_CH_pyr et T50_CO₂_ox) :

- **HI (Hydrogen Index)** correspond à la quantité d'hydrocarbures (HC) formés lors de la pyrolyse de l'échantillon (pic S2 en mg HC.g⁻¹) divisée par le COT de l'échantillon ($HI = S2/COT \times 100$) ; il est exprimé en mg HC.g⁻¹ COT (Lafargue et al, 1998).
- **OI (Oxygen Index)** correspond à la quantité de molécules organiques oxygénée détectées lors de la pyrolyse de l'échantillon (pic S3 en mg CO₂.g⁻¹) divisée par le COT de l'échantillon ($OI = S3/COT \times 100$) ; il est exprimé en mg CO₂.g⁻¹ COT. Nous avons calculé l'indice OI_{RE6} en utilisant la formule proposée par Lafargue et al (1998) : $OI_{RE6} = (16/28 \times OI_{CO}) + (32/44 \times OI_{CO2})$ avec $OI_{CO} = 100 \times S3 \text{ CO}/COT$ et $OI_{CO2} = 100 \times S3 \text{ CO}_2/COT$; OI_{RE6} s'exprime en mg O₂.g⁻¹ COT.
- **Indice I** (I pour MO immature) est un indicateur de la préservation des MOS immatures thermiquement labile. Il se calcule de la manière suivante : $Indice I = \log_{10} ((A1 + A2)/A3)$ avec (A1 + A2) qui correspond à l'aire du thermogramme HC en dessous de 400 °C et (A3) à l'aire du thermogramme HC entre 400 °C et 460 °C. (Sebag et al, 2016)
- **Indice R** (R pour MO récalcitrante) est un indicateur de la proportion de SOC thermiquement stable. Il correspond à l'aire du thermogramme HC au-dessus de 400 °C sur la surface totale du signal HC (Disnar et al, 2003 ; Sebag et al, 2016). Il se calcule de la manière suivante : $R\text{-index} = (A3+A4+A5) / 100$.
- **T50_CH_pyr** est la température à laquelle 50% des hydrocarbures pyrolysables ont été effectivement pyrolysés (Soucemarianadin et al, 2018, Cécillon, 2018) ;
- **T50_CO₂_ox** est la température à laquelle 50% des matières organiques résiduelles sont oxydées en CO₂ pendant la phase d'oxydation (Soucemarianadin et al, 2018, Cécillon et al, 2018).

Ces deux derniers paramètres au même titre que HI sont considérés comme de bons indicateurs thermiques de la stabilité biogéochimique de la matière organique du sol (Gregorich et al, 2015 ; Barré et al, 2016). L'intégration du signal des thermogrammes et le calcul des différents indices (HI, OI, I, R, T50_CH_pyr et T50_CO₂_ox) ont été réalisés avec le logiciel R (R Core Team, 2019) et les packages "hyperSpec" (Beleites et Sergo, 2014), "pracma" (Borchers, 2015) et "stringr" (Wickham, 2015). A ce niveau, il nous faut indiquer que si la pyrolyse RE a été réalisée sur l'ensemble des échantillons des sites ALTER, seuls les résultats du site de Bord-Louviers ont été analysés et sont présentés ici. L'analyse complète des résultats RE6 fera l'objet d'un chapitre spécifique dans le manuscrit de thèse d'Edouard Quibel (en préparation).

En complément de l'analyse par pyrolyse RE6, deux autres types d'analyses ont donc été menées afin d'appréhender la dynamique du C labile qui fait plus spécifiquement l'objet de l'hypothèse 2 de la tâche 1. La détermination du C oxydable au permanganate de potassium (Permanganate Oxydable Carbon ou POXC) permet ainsi d'estimer le pool de C biologiquement actif du sol. La méthode utilisée est celle proposée par Weil (2013). Le POXC se rattache à la fraction labile du COS en étant notamment corrélé à la biomasse microbienne et au C organique particulaire du sol (Culman et al, 2012). De ce fait, le POXC est considéré comme un indicateur sensible aux changements de la qualité du sol induits par les pratiques agricoles. La seconde analyse concerne le fractionnement physique de la matière organique du sol (Feller, 1979 ; Balesdent, 1996 ; Christensen et al, 2001, Von Lützw et al, 2007) qui permet de séparer les matières organiques particulières appartenant également au pool labile (MOP, débris végétaux de 50 à 2000 µm), des matières organiques stables, associées à la fraction minérale notamment (fraction < 50 µm). Le fractionnement a été réalisé selon la méthode normalisée NF X31-516, 2007. Le POXC a été mesuré sur l'ensemble des sites ALTER alors que le fractionnement, plus consommateur de temps, a été réalisé sur les lignes de plantation des sites de Bord-Louviers, d'Haguenau p32 et de Villecartier. Au moment de la rédaction de ce rapport, si l'ensemble des analyses relatives à la mesure du POXC et des MOP par fractionnement ont été acquises, l'analyse des résultats est en cours. Il est donc également prévu de traiter ces résultats dans le cadre du travail de thèse d'Edouard Quibel.

7.2.4. Fonctionnement du sol.

Pour mesurer l'impact du travail mécanique du sol lors de la phase de plantation, nous avons suivi des paramètres permettant d'aborder le fonctionnement actuel du sol en relation avec la dynamique du C à savoir : la minéralisation potentielle du C, le C de la biomasse microbienne et le C extractible à l'eau.

7.2.4.1. Minéralisation du COS (flux potentiel de CO₂).

La minéralisation potentielle du C a été estimée au laboratoire par des incubations en conditions contrôlées (Hopkins, 2008). Ces incubations ont consisté à doser le CO₂ émis par les microorganismes durant 7 jours dans des conditions optimales de température et d'humidité. Pour cela, 50 g de sol prélevé sur 0-10 cm sont placés à 28°C dans des bocaux hermétiques. Leur humidité est ajustée à 60% de l'humidité à la capacité de rétention. Dans chaque bocal, un flacon de 20mL de NaOH 0,5N est placé pour piéger le CO₂ émis par la respiration des microorganismes. La quantité de CO₂ piégée est déduite de la mesure de conductivité de la solution de NaOH (Wollum et Gomez, 1970). Le CO₂ dégagé lors de ces incubations de courte durée provient de la minéralisation du



C facilement minéralisable (C labile) et correspond à une mesure de la respiration basale hétérotrophe qui reflète l'activité microbienne des sols.

La respiration basale du sol a été mesurée sur les échantillons de sol superficiel prélevés sur la couche 0-10 cm des transects élémentaires. Les incubations sont réalisées sur les échantillons poolés des transects composites de l'ensemble des sites ALTER, PILOTE et CHRONO. Les résultats sont donnés en $\text{gC-CO}_2 \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de sol et sont également exprimés sous la forme d'un taux de minéralisation (exprimé en %) qui est obtenu en divisant la quantité totale de C dégagé sous forme de CO_2 pendant la durée de l'incubation par la teneur en C organique de l'échantillon. Ces deux modes d'expression (CO_2 cumulés et taux de minéralisation) constituent des indicateurs biologiques de la qualité de la fraction labile des MOS.

7.2.4.2. Biomasse microbienne.

La biomasse microbienne totale est déterminée par la mesure du C microbien selon la méthode décrite par Vance et al (1987). Après extraction au K_2SO_4 0,5M, le C microbien est dosé à l'aide d'un analyseur TOC (Shimatzu® TOC-L Analyzer). La biomasse microbienne est un indicateur biologique qui donne la taille des communautés microbiennes responsables de la respiration hétérotrophe du sol, autrement dit, réalisant le processus de minéralisation du C organique sous forme de CO_2 . Par ailleurs, le C microbien appartient au pool labile des MOS. Le C microbien a été mesuré sur les échantillons de sol superficiel prélevés sur la couche 0-10 cm des transects élémentaires. La mesure est donc réalisée sur les échantillons poolés des transects composites de l'ensemble des sites ALTER. Les résultats sont donnés en $\text{mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$ de sol sec et sont également exprimés en pourcentage du carbone organique total.

7.2.4.3. C extractible à l'eau.

Le C extractible à l'eau (Water extractable organic carbone ou WEOC) a été mesuré par extraction dans une solution saline de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ à 10mM de même force ionique que l'eau interstitielle selon le protocole proposé par Corvasce et al (2006). Le C extrait est dosé à l'aide d'un analyseur TOC (Shimatzu® TOC-L Analyzer). Cette extraction permet d'extraire le carbone appartenant à la matière organique dissoute du sol. Celle-ci est définie comme la matière organique du sol inférieure à $0,45 \mu\text{m}$ en science du sol (Zsolnay, 2003). Elle représente généralement moins de 1 % du carbone organique dans les sols agricoles et un faible pourcentage du COT dans les sols forestiers. Elle est composée d'un mélange de molécules, allant de molécules de faible poids moléculaire à des fragments colloïdaux, et son taux de renouvellement est variable, associant des composants labiles à une MO qui a des temps de renouvellement décennal (Haynes, 2005 ; Kalbitz et al., 2000 ; Zsolnay, 2003). Le C extractible à l'eau correspond donc au C mobile ou facilement mobilisable dans la solution du sol.

La mesure du C extractible à l'eau a été réalisée uniquement sur les échantillons de sol prélevé sur la ligne de plantation des sites ALTER. Les résultats sont exprimés en concentration ($\mu\text{g C} \cdot \text{g}^{-1}$ sol sec) ou comme un pourcentage du carbone organique total. Le stock de C organique extractible à l'eau a été calculé à partir de la formule indiquée précédemment (Jonard et al. 2017) ou COS a été remplacé par le C extractible (en $\text{gC} \cdot \text{kg}^{-1}$ de sol).

7.2.4.4. Traitements statistiques

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2019) et des packages Agricolae (Felipe de Mendiburu, 2019) et ADE4 (Thioulouse et al, 2004). La normalité et l'homoscedasticité ont été testées sur les différents jeux de données (stocks COS, paramètres fonctionnels). Dans l'ensemble des cas, les conditions pour effectuer des tests paramétriques n'étaient pas réunies. Lorsque les tests de comparaison des stocks de COS ou de paramètres fonctionnels entre les différentes modalités de travail mécanique du sol sont effectués site par site (Bord-Louviers, PILOTE et CHRONO), un test non paramétrique de Kruskal-Wallis est utilisé. L'analyse globale pour les 5 sites du réseau ALTER a été effectuée grâce à des tests de Scheirer-Ray-Hare (Sokal and Rohlf, 1995), pendant non paramétrique de l'ANOVA à 2 facteurs. Dans ce cas, on teste l'effet « site », l'effet « modalité » et l'effet d'interaction « site * modalité » sur les stocks de COS et les paramètres fonctionnels mesurés. Pour l'ensemble des différents tests statistique utilisés, la différence est considérée comme significative pour une $p\text{-value} < 0.05$; dans le cas contraire, les résultats non-significatifs sont notés « NS ».

7.3. Principaux résultats et recommandations

7.3.1. Stocks de COS des témoins et comparaison des 2 modes de calculs.

Dans cette partie, il s'agit de présenter le niveau moyen des stocks de COS obtenus sur la modalité témoin sans travail mécanisé du sol et de resituer ces valeurs par rapport à ceux de la littérature. En préambule, il est important de signaler que la comparaison des méthodes de calcul des stocks de COS ne fait pas apparaître de différences significatives entre les stocks calculés à profondeur constante et les stocks calculés à masse équivalente pour la majorité des sites (test de Kruskal-Wallis ; $p\text{-value} = 0,8565$). Seul le site de Chaux p213 du dispositif CHRONO ne

suit pas cette tendance. Dans la suite de cette partie, les stocks sont donc présentés à profondeur constante sauf sur le dispositif PILOTE ou pour des raisons de comparaison avec le dispositif CHRONO, les stocks présentés seront à masse équivalente.

Le tableau I donne les valeurs moyennes de stocks de COS à profondeur constante pour la modalité témoin des 10 sites étudiés. En prenant en compte les horizons de la litière et les horizons minéraux jusqu'à 60 cm de profondeur, les stocks de COS s'échelonnent de 85,46 à 182,77 MgC.ha⁻¹ respectivement à Chaux (parcelle 213) et à Bord-Louviers. Ces stocks varient de 83,02 à 128,34 MgC.ha⁻¹ respectivement à Chaux (parcelle 213) et Haguenau (parcelle 35) en ne prenant en compte que les horizons minéraux jusqu'à 60 cm de profondeur. Ces stocks de COS se situent globalement dans les valeurs moyennes voire les valeurs supérieures des stocks donnés par Jonard et al (2017), évalué à 88,5 MgC. ha⁻¹ sous feuillus et à 109,5 MgC. ha⁻¹ sous résineux pour le réseau RENECOFOR. Par ailleurs, les horizons O de la litière représentent au minimum 1,51 % et au maximum 39,72 % du stock total de COS respectivement sur les sites de Chaux (parcelle 212/1026) et de Bord-Louviers. Ces mêmes horizons de litière représentent 1,53 % au minimum et 65,90 % au maximum du stock de COS calculé sur les horizons minéraux jusqu'à 60 cm de profondeur. Les stocks de COS dans les modalités témoin des dispositifs expérimentaux se répartissent donc majoritairement en surface du profil de sol, dans les horizons de litière et les horizons minéraux du sol superficiel (0-30 cm). Jonard et al (2017) ont évalué que les trois quarts du stock total de COS se trouvaient dans les horizons de litière et dans les 40 cm supérieurs du sol minéral. Cette répartition des stocks de COS est un patron classiquement décrit dans les sols forestiers.

Pour le réseau ALTER, les stocks de COS se situent globalement autour d'une centaine de tonnes de COS par hectare sur 0-60 cm. Le site d'Haguenau p35 présente le stock le plus élevé de C organique dans les horizons minéraux (128,34 MgC.ha⁻¹) et le site de Bord-Louviers dans les horizons O de litière (72,60 MgC.ha⁻¹). Ce dernier point est en cohérent avec la forte accumulation de matériel organique dans son humus de type MOR, lui-même très développé (jusqu'à 18 cm d'épaisseur). Ceci est en accord avec le type de sol présent sur ce site (PODZOSOL ocrique leptique caillouteux issu d'alluvions anciennes) et ses caractéristiques physico-chimiques (pH très acides de 3,9 en surface, faible fertilité minérale et faible teneur en argile de 3 à 5%) qui expliquent une faible activité biologique et donc une biodégradation ralentie. De plus, le peuplement forestier antérieur à l'installation du dispositif expérimental était une futaie de Pin sylvestre de 120 ans. Vesterdal et al (2013) ont justement montré que les résineux avaient des effets plus marqués sur les stocks de COS des horizons de litière et que sur ceux des horizons minéraux. Pour Wiesmeier et al (2013), cette valeur élevée des stocks de COS dans les horizons de litière sous résineux serait une compensation possible entre le stockage du COS dans les horizons de litière et dans le sol minéral. Globalement, si les sols des modalités témoin des autres sites ALTER ne présentent pas une accumulation de litière aussi importante qu'à Bord Louviers (seulement 4 à 10 % des stocks de C sur 0-60 cm), ils présentent des pH allant de 3,9 (Haguenau p35, PODZOSOL ocrique) à 5,0 (Villemartier, BRUNISOL dystrique) et des teneurs en argile allant de 3 (Haguenau p150, PODZOSOL) à 16 % (Villemartier). Ce sont donc des sols acides à très acides contraignants en termes de fertilité chimique et qui ne présentent pas une très forte capacité potentielle à stocker du C organique compte-tenu notamment de leur faible teneur en argiles (Angst et al, 2018). Le BRUNISOL de Villemartier est le plus avantageux de ce point de vue avec des teneurs variant de 13 à 16 % d'argiles.

Pour le réseau PILOTE, le site de Chaux p216/1026 présente le stock le plus élevé de C organique dans les horizons minéraux (107,07 MgC.ha⁻¹ sur 0-60 cm) et le site de Chinon dans les horizons O (38,31 MgC.ha⁻¹). Ce dernier point est en accord avec le sol de Chinon qui présente des engorgements temporaires en eau favorisant l'accumulation de MO en ralentissant la biodégradation lors des périodes d'engorgement en eau. Ces engorgements temporaires en eau sont aussi valables pour les autres sites du réseau PILOTE. Cependant, la fréquence et la durée des engorgements est variable d'un site et l'autre et l'activité biologique reste souvent importante dans ce type de sol, notamment dans les horizons superficiels, pendant les périodes où le sol n'est pas engorgé en eau d'où la variabilité des stocks d'un site engorgé à l'autre. Globalement, ces sols présentent des pH allant de 4,4 (Chinon, PLANOSOL pédomorphe rédoxique) à 4,9 (Chaux p212/1026, REDOXISOL) et des teneurs en argile allant de 11,2 (Chinon) à 24 % (Rennes, LUVISOL rédoxique) voire 32 % dans les horizons profonds du PLANOSOL. Ce sont donc des sols acides qui présentent potentiellement une plus forte capacité à stocker du C organique compte-tenu notamment de leur teneur en argiles plus importante que celles des sites ALTER. Ils sont contraignants de par leurs engorgements temporaires en eau.

A ce niveau, il est nécessaire de signaler que si les horizons de litière constituent un compartiment du sol où se réalise la biodégradation des apports aériens, ils ne sont toutefois pas un lieu de stockage à long terme du COS dans le sol, contrairement aux horizons minéraux profonds où le COS est directement en contact avec la fraction minérale. En effet, des méta-analyses récentes sur les mesures de datation au ¹⁴C (Han et al, 2015 ; Balesdent et al, 2018) ont montré que le C organique le plus ancien (pluriséculaire à millénaire) dans les profils de sol se localisent majoritairement dans les horizons minéraux profonds. Inversement, le C organique le plus récent (pluriannuel, décennal à centennal) se trouve principalement dans les horizons de surface. A cela, il faut ajouter que des articles récents (Dungait et al, 2012 ; Kleber, 2010 ; Schmidt et al, 2011 ; Lehmann & Kléber, 2015)



s'accordent aujourd'hui à dire que l'association du COS avec la fraction minérale argileuse serait le processus de séquestration du COS prédominant dans le sol notamment par rapport à la récalcitrance biochimique du COS (i.e. processus d'humification jusqu'à présent reconnu comme prépondérant en terme de stockage du COS) et surtout à la protection physique dans les agrégats. A ce niveau, il est donc légitime de s'interroger sur la manière dont les outils testés agissent non seulement sur le niveau des stocks de COS mais aussi sur leur répartition au sein des profils préparés mécaniquement dans la phase de plantation.

7.3.2. Effet du Scarificateur Réversible (SR) et du Sous-Soleur Multifonction (SSM) – Réseau ALTER

Il s'agit ici de présenter l'impact des outils montés sur mini pelle adaptés à lutter contre la végétation concurrente de type Fougère aigle sur sols peu fertiles. Ces outils ont été testés sur le réseau ALTER. Compte tenu de ses caractéristiques pédologiques qui ont conduit à adapter la stratégie d'échantillonnage le site de Bord Louviers sera présenté en premier. Les résultats obtenus dans les 5 autres sites ALTER font l'objet d'une analyse comparative globale par la suite.

7.3.2.1. Site de Bord-Louviers

7.3.2.1.1. Mesure quantitative des stocks de COS.

La figure 2 présente les stocks de COS mesurés à Bord-Louviers aux différentes échelles prospectées. A l'échelle du profil de sol de la ligne de plantation (LP), zone travaillée par les outils, les stocks de COS dans les modalités SR et SR+SSM jusqu'à 60 cm de profondeur sont respectivement de 52,5 et 60,3 MgC.ha⁻¹. Ces stocks sont significativement différents de celui du témoin qui s'élève à 110,2 MgC.ha⁻¹ sur 0-60 cm. Ces stocks sont également plus faibles que le stock du témoin si on prend en compte la contribution des horizons de litière, le stock du témoin s'élevant alors à 182,8 MgC.ha⁻¹ (figure 2a). La diminution dans les modalités travaillées s'élève à 52,4% pour SR et à 45,3% pour SR+SSM par rapport au stock du témoin sur 0-60 cm, elle atteint respectivement 71,3 % et 67,0 % du stock total du témoin si on prend en compte la litière. On observe donc une diminution significative des stocks de COS importante sur le sol minéral (0-60 cm) et sur le sol minéral avec prise en compte de la litière (litière + 0-60 cm). Dans le topsoil (0-30 cm), les stocks de COS de SR et SR+SSM s'élèvent respectivement à 39,23 et 38,18 MgC.ha⁻¹ contre 91,20 MgC.ha⁻¹ dans le témoin. Cette diminution sur le topsoil par rapport au témoin n'est pas significative (figure 2b). Dans le subsoil (30-60 cm), les stocks de COS de SR et SR+SSM s'élèvent respectivement à 13,24 et 22,11 MgC.ha⁻¹ contre 18,96 MgC.ha⁻¹ dans le témoin. Seule la baisse dans la modalité SR est ici significative.

Tableau A1.1 : Valeurs moyennes de stocks de COS (en Mg.ha⁻¹) pour la modalité témoin des 10 sites étudiés. Les stocks de C sont donnés en prenant en compte ou pas les horizons organiques de la litière (OL, OF et OH si présent) ; les deux dernières indiquent la contribution du stock de COS de la litière (en %) par rapport au stock total respectivement avec ou sans litière.

Réseau	Site	Profil	Stock de COS		Stock litière	Stock C litière
			(Mg.ha ⁻¹)	Ecart-type	/ stock "litière + 0-60 cm" (%)	/ stock "0-60 cm" (%)
ALTER	Bord-Louviers	Litière + 0-60 cm	182,77	± 41,18	39,72%	65,90%
		0-60 cm	110,17	± 49,26		
	Haguenau p32	Litière + 0-60 cm	129,81	± 31,96	5,80%	6,12%
		0-60 cm	122,32	± 32,25		
	Haguenau p35	Litière + 0-60 cm	135,82	± 27,61	5,50%	5,83%
		0-60 cm	128,34	± 31,89		
	Haguenau p150	Litière + 0-60 cm	117,66	± 16,48	3,90%	4,06%
		0-60 cm	113,07	± 16,97		
	Villectartier	Litière + 0-60 cm	101,57	± 14,16	4,20%	4,43%
		0-60 cm	97,26	± 14,45		
Escource	Litière + 0-60 cm	95,84	± 13,16	10,20%	11,36%	
	0-60 cm	86,06	± 12,08			
PILOTE	Chaux p212/1026	Litière + 0-60 cm	108,71	± 12,52	1,51%	1,53%
		0-60 cm	107,07	± 12,79		
	Chinon	Litière + 0-60 cm	118,02	± 26,48	11,36%	12,81%
		0-60 cm	104,61	± 25,59		
	Rennes	Litière + 0-30 cm	94,17	± 17,36	40,68%	68,59%
		0-30 cm	55,86	± 12,02		
CHRONO	Chaux p213	Litière + 0-60 cm	85,46	± 31,18	2,85%	2,94%
		0-60 cm	83,02	± 30,23		

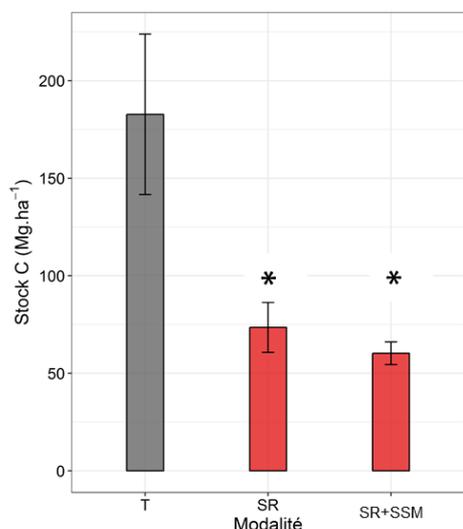
A l'échelle du transect centré sur la ligne de plantation qui prend en compte les différentes zones de prélèvement (figure 2c), les 2 modalités travaillées présentent un stock de C pour la litière et l'horizon 0-10 cm significativement plus faible sur la ligne de plantation (SR : 12,8 MgC.ha⁻¹ ; SR+SSM : 13,8 MgC.ha⁻¹) et significativement plus élevé sur l'andain (SR : 144,8 MgC.ha⁻¹ ; SR+SSM : 171,4 MgC.ha⁻¹) que dans le témoin (94,0 MgC.ha⁻¹). En revanche, on ne note pas de différence significative sur l'inter-rang, zone non travaillée par les outils dans les stocks de C superficiels « litière + 0-10 cm » (T : 94,0 MgC.ha⁻¹ ; SR : 127,9 MgC.ha⁻¹ ; SR+SSM : 80,3 MgC.ha⁻¹). Si on extrapole les résultats obtenus sur les transects à l'échelle du peuplement en tenant compte des surfaces relatives de chaque zone créée par le travail des outils (LP, IR, A), les stocks de C superficiels (« litière + 0-10 cm ») de SR et SR+SSM sont significativement plus faibles que le stock dans le témoin (figure 2d). Ce résultat est cependant à nuancer car on peut obtenir un résultat non significatif en faisant diminuer la surface relative des zones travaillées par rapport aux zones non travaillées au sein de la parcelle forestière.

Sur le site de Bord Louviers caractérisé par un PODZOSOL ocrique caillouteux sur alluvions anciennes à MOR épais, les modalités SR et SR+SSM affectent essentiellement les horizons superficiels du sol (horizons O de la litière + 0-30 cm) en diminuant leurs stocks de COS. Seul la modalité SR a un effet sur le stock de COS en profondeur (30-60 cm) mais. Ceci s'explique par le fait que, sur la ligne de plantation, l'outil SR utilisé dans les 2 modalités travaillées enlève bien la végétation herbacée concurrente mais aussi les horizons de la litière et une partie du sol rhizosphérique qui reste attaché aux systèmes racinaires des plantes herbacées éliminées. En effet, les analyses de la teneur en C organique de la terre fine des andains réalisées 4 ans après le travail du sol classent le matériel déposé en andain comme étant majoritairement organo-minéral à hémioorganique (4 à 20 % de C organique par définition) plutôt que holorganique (> 30% de C organique par définition). Cette matière extraite par SR dans la ligne de plantation en surface du sol jusqu'à 30-40 cm de profondeur est donc par la suite déposée au niveau de la zone d'andain. Ces andains présentent un stock superficiel de COS (litière + 0-10 cm) significativement plus élevé que dans le témoin. Compte-tenu de ce qui précède, la diminution des stocks de COS dans les horizons superficiels suite à la préparation mécanique du sol n'est pas uniquement attribuable à un déstockage du COS sous forme de CO₂ par la minéralisation entre la réalisation du travail mécanisé en 2011 et la mesure des stocks en 2015. En effet, l'utilisation du scarificateur conduit à la création d'inter-rangs non travaillés mais aussi de zones d'accumulation riches en matière organique, les andains. Le stock superficiel de COS éliminé dans la ligne de plants est donc, en partie, déplacé vers les andains. L'utilisation de l'outil SR dans les 2 modalités travaillées induit donc une répartition différente des stocks de COS des horizons superficiels (litière + 0-30 cm) entre zones travaillées et zones non travaillées au sein de la parcelle. La proportion surface travaillée versus non travaillée au

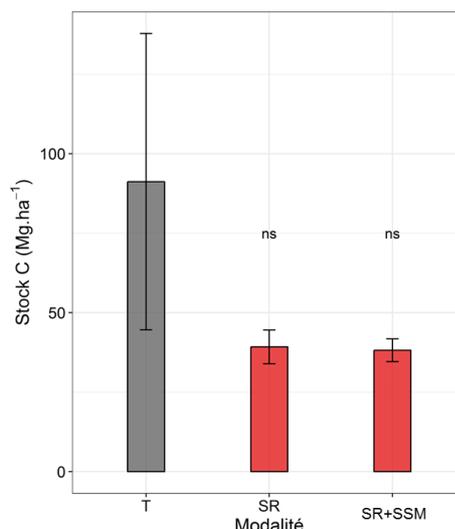


sein d'une parcelle est donc un paramètre d'ajustement à prendre en compte pour minimiser la diminution du stock de COS superficiel à l'échelle du peuplement.

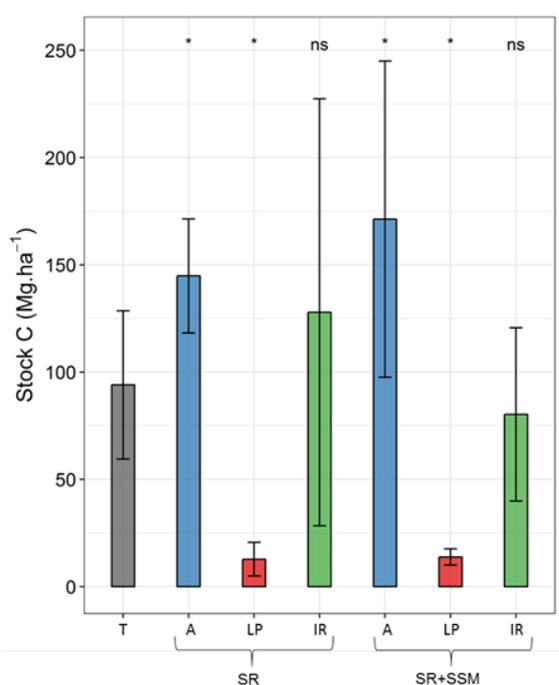
A/ Stock «Litière + 0-60 cm» à l'échelle du profil (LP, n=3)



B/ Stock 0-30 cm à l'échelle du profil (LP, n=3)



C/ Stock « Litière + 0-10 cm » sur le transect (n=6)



D/ Stock « Litière + 0-10 cm » à l'échelle du peuplement (n=6)

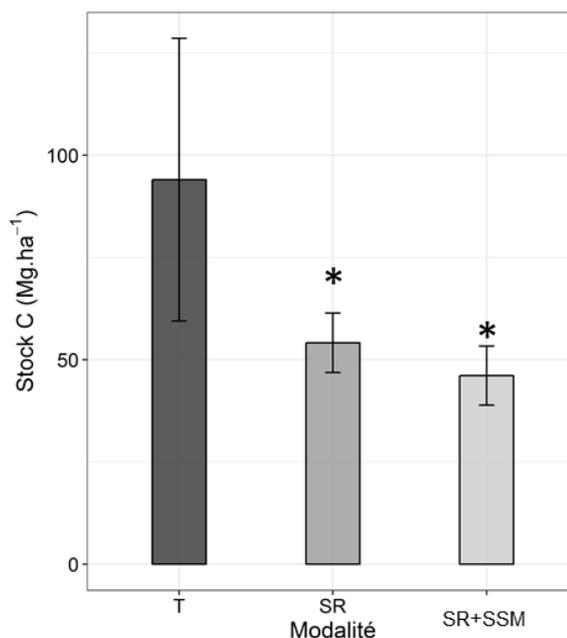
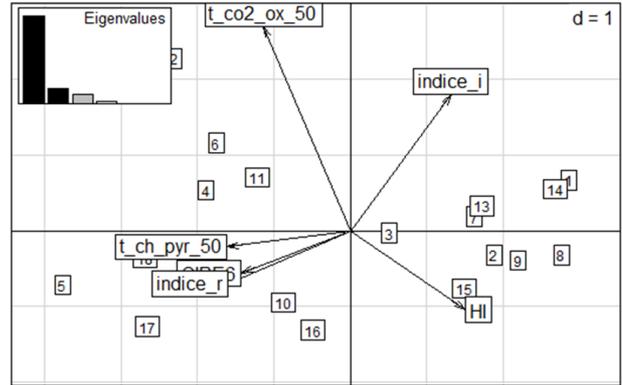
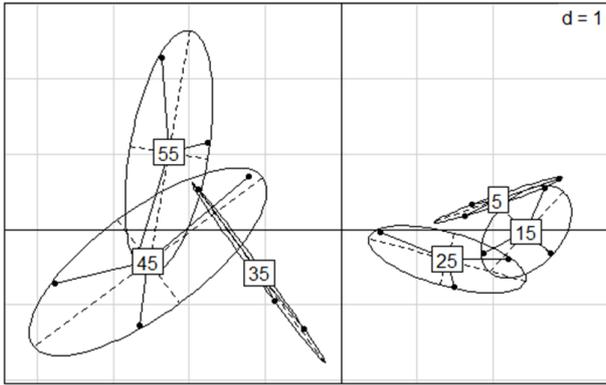


Figure A1.2 : Stocks moyens de COS sur le site de Bord Louviers pour les 3 modalités (témoin, SR et SR+SSM) estimés A/ à l'échelle du profil de la ligne de plantation sur « Litière + 0-60 cm », B/ à l'échelle du profil de la ligne de plantation sur 0-30 cm (topsoil), C/ à l'échelle du transect sur « Litière + 0-10 cm » et D/ à l'échelle du peuplement sur « Litière + 0-10 cm » (comparaison au témoin : * = significatif à $p < 0,05$; ns = non significatif ; Kruskal-Wallis).

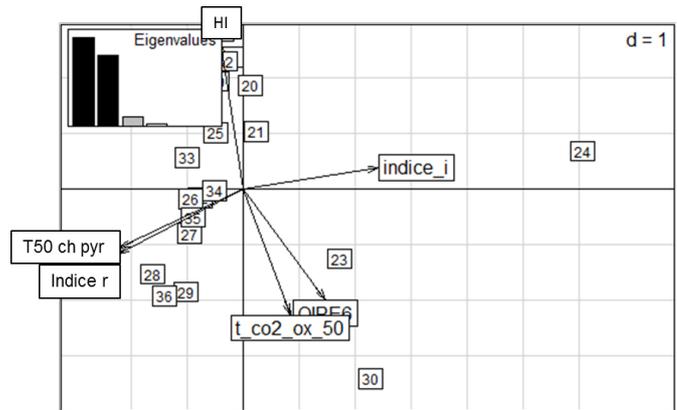
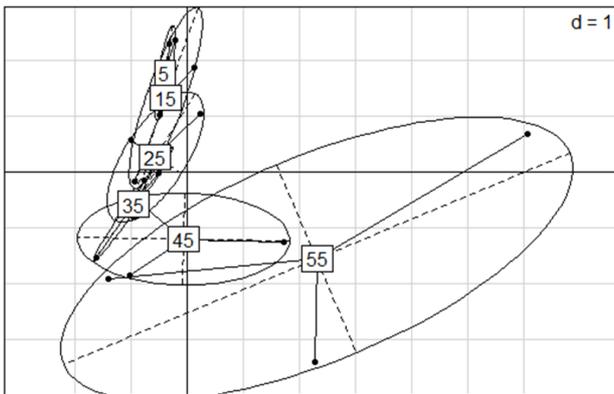
7.3.2.1.2. Mesure qualitative des stocks de COS.

La figure 3 présente trois analyses en composantes principales (ACP) réalisée pour chaque modalité sur les échantillons de sol des couches constitutives du profil de sol de la ligne de plantation sur 0-60 cm. Les échantillons de sol sont décrits à l'aide des 6 indices issus de l'analyse Rock-Eval décrit précédemment (HI, OI, I, R, T50_CH_Pyr et T50-CO2_Ox).

A/ Modalité TEMOIN



B/ Modalité SR



C/ Modalité SR+SSM

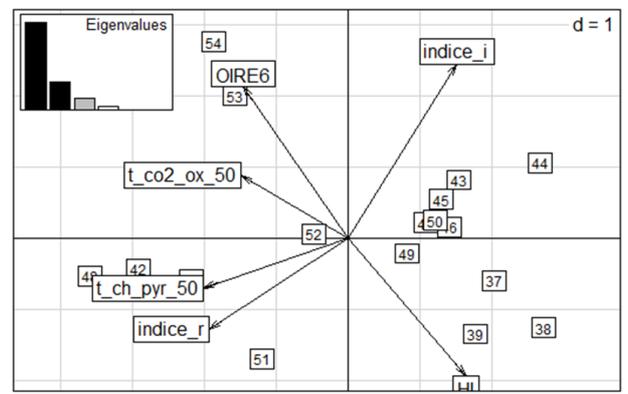
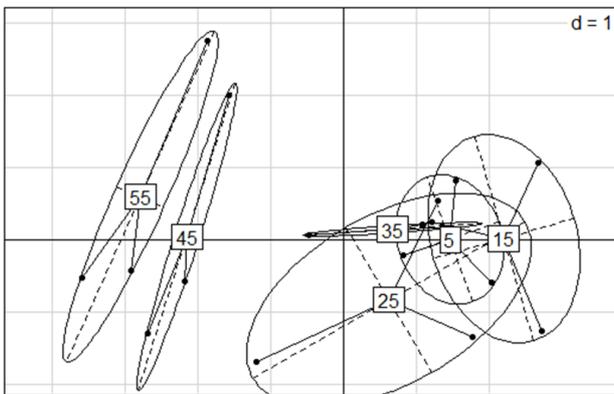


Figure A1.3 : Plans factoriels des ACP sur les échantillons de sol des couches constitutives du profil de sol de la ligne de plantation dans les 3 modalités. Les échantillons de sol sont décrits à l'aide des 6 indices issus de l'analyse Rock-Eval (HI, OI, I, R, T50_CH_Pyr et T50-CO2_Ox). Les numéros indiqués dans les étiquettes à droite correspondent aux numéros des échantillons ; les étiquettes situées au barycentre des ellipses à gauche correspondent à la profondeur moyenne d'une couche de sol.

L'ACP sur la modalité témoin explique 89,68 % de la variance totale du jeu de données. L'axe 1 (76,72 %) sépare les échantillons de sol constitués de matière organique à faible stabilité thermique dans la partie positive de l'axe (fortes valeurs des indices HI et de I) aux échantillons de sol constitués de matière organique à forte stabilité thermique dans la partie négative de l'axe (plus fortes valeurs des indices OIRE6, R et T50_CH_pyr). Le C labile est ainsi associé aux échantillons de surface (0-30 cm, topsoil) alors que le C stable se retrouve dans les horizons profonds (30-60 cm, subsoil). L'axe 2 (12,96 %) distingue au sein des horizons profonds, les échantillons qui présentent de forte valeur pour l'indice T50_CO2_Ox (relatif au C résiduel en RE6) dans la partie positive de l'axe aux échantillons avec des valeurs élevées pour les indices OIRE6, R et T50_CH_pyr (indices marquant également

une bonne stabilité thermique). Cette répartition du pool jeune labile de COS en surface et du pool stable plus ancien en profondeur est en accord avec les données de la littérature (Han et al, 2015 ; Balesdent et al, 2018).

L'ACP sur la modalité SR explique 92,62 % de la variance totale. L'axe 1 (51,31%) oppose, pour les couches profondes (40-50 cm et 50-60 cm), les fortes valeurs de indice I (MO labile) dans la partie positive de l'axe aux fortes valeurs des indices T50_CH_pyr et R (MO plus stable) dans la partie négative de l'axe. L'échantillon n° 24 situé entre 50-60 cm de profondeur tire ainsi notablement l'analyse vers l'indice I. L'axe 2 (41,31 %) oppose de nouveau la MO labile (indice HI dans la partie positive de l'axe) des horizons de surface (0-30 cm) à la MO thermiquement stable (T50_CO2_Ox et OIRE6 dans la partie négative de l'axe) des horizons profonds profondeur (30-60 cm) comme classiquement. Dans la modalité SR, du COS labile se retrouve donc dans les horizons profonds contrairement au témoin. Compte-tenu, d'une part, que le scarificateur travaille jusqu'à 30-40 cm de profondeur et, d'autre part, du laps de temps écoulé entre la préparation mécanique (2011) et le prélèvement d'échantillon dans le cadre du projet (2015), la présence de MO labile en profondeur peut s'expliquer soit par une minéralisation de la MO au sein des horizons profonds qui a libéré des composés organiques labiles, soit par une migration de composés labiles sous forme dissoute suite à une minéralisation dans les couches de surface favorisée par le passage du scarificateur. Ces deux interprétations ne s'excluent pas l'une l'autre. Par contre, la présence de MO labile en profondeur est susceptible de favoriser un « priming effect » de la matière organique stable c'est-à-dire une minéralisation plus rapide d'un pool stable du COS (Derrien et al, 2014) ce qui constitue un risque en terme de déstockage du carbone stabilisé depuis longtemps dans le sol.

L'ACP sur la modalité SR+SSM explique 87,83 % de la variance totale. L'axe 1 (66,58%) oppose les échantillons de sol constitués de matière organique à faible stabilité thermique dans la partie positive de l'axe (fortes valeurs des indices HI et de I) aux échantillons de sol constitués de matière organique à forte stabilité thermique dans la partie négative de l'axe (plus fortes valeurs des indices T50_CH_pyr et R). Par rapport au témoin, l'horizon 30-40 cm s'est rapproché des horizons superficiels situés entre 0 et 30 cm. On retrouve une distribution semblable à celle du témoin sur l'axe 1 mais avec une séparation plus nette, moins progressive selon la profondeur : les horizons de surface se rapproche sur la plan factorielle mais ne s'organise selon leur profondeur respective. Les 4 premiers horizons de surface se mélangent donc et s'oppose aux 2 horizons les plus profonds (40-60 cm) en termes de qualité de la MO. On peut donc en déduire que le passage de SSM redistribue les pools de MO en mélangeant les horizons de surface (0-40 cm) qui s'opposent plus nettement aux horizons profonds. L'axe 2 (21,25 %) reste un axe qui différencie les couches profondes (OI et T50_CO2_Ox partie positive de l'axe) versus partie négative de l'axe). L'axe 2 (21,25 %) distingue au sein des horizons profonds, les échantillons qui présentent de forte valeur pour les indices OIRE6 (relatif à la matière organique oxygénée) et T50_CO2_Ox (relatif au C résiduel en RE6) dans la partie positive de l'axe aux échantillons avec des valeurs élevées pour les indices R et T50_CH_pyr (indices marquant également une bonne stabilité thermique). Cette distribution reste similaire à celle du témoin.

L'approche qualitative du COS permet de montrer que la diminution du stock de C dans les horizons superficiels dans les zones travaillées décrite précédemment s'accompagne d'une redistribution verticale des pools de COS au sein des profils de sol travaillés par la modalité SR + SSM notamment. L'outil SR semble lui favoriser la présence de MO labile en profondeur ce qui est susceptible de provoquer un « priming effect » et donc un déstockage du carbone stabilisé depuis longtemps dans le sol. Bien que les outils SR et SSM sont considérés ne pas bouleverser fondamentalement l'organisation des horizons pédologiques, les résultats obtenus ici montrent qu'il provoque un mélange des horizons qui impact la distribution des pools de COS. Ces premiers résultats obtenus sur le site de Bord Louviers devront être confirmés sur les autres sites du réseau ALTER soumis à l'analyse RE6.

7.3.2.1.3. *Fonctionnement du sol.*

La figure 4 présente les valeurs de minéralisation potentielle du COS pour l'horizon 0-10 cm à l'échelle du transect et donc des différentes zones travaillées (ligne de plantation) et non travaillées (andain et inter-rang) pour les 3 modalités du site de Bord Louviers. La minéralisation potentielle du C dans l'horizon 0-10 cm (exprimée en gC-CO₂.100g sol) présente des valeurs significativement plus faibles sur les zones travaillées (lignes de plantation) que dans le témoin (0,01 contre 0,02 gC-CO₂.100g-1 de sol). Les inter-rangs non travaillés ne présentent pas de différences avec le témoin. Pour les andains, la minéralisation du C est significativement plus élevée dans la modalité SR que sur le témoin ; l'andain de la modalité SR + SSM suit la même tendance mais n'est pas significativement différent du témoin. La minéralisation potentielle du C semble s'ajuster aux valeurs des stocks de COS mesurés précédemment : faibles dégagements de CO₂ pour les sols à faible stock de COS comme les zones travaillées (lignes de plantation) et plus fort dégagement de CO₂ pour les sols à stocks de COS élevés comme les zones d'accumulation de débris végétaux (andains).

Par contre, le taux de minéralisation dans les 2 modalités travaillées qui rapporte la quantité total de C dégagé sous forme de CO₂ pendant la durée de l'incubation à la teneur en C organique des échantillons ne présente pas de différence significative avec le témoin. On observe juste une tendance à l'augmentation du taux de minéralisation sur les lignes de plantation.

A/ Dégagement de C-CO₂ sur les 7 jours d'incubation

B/ Taux de minéralisation potentielle du COS

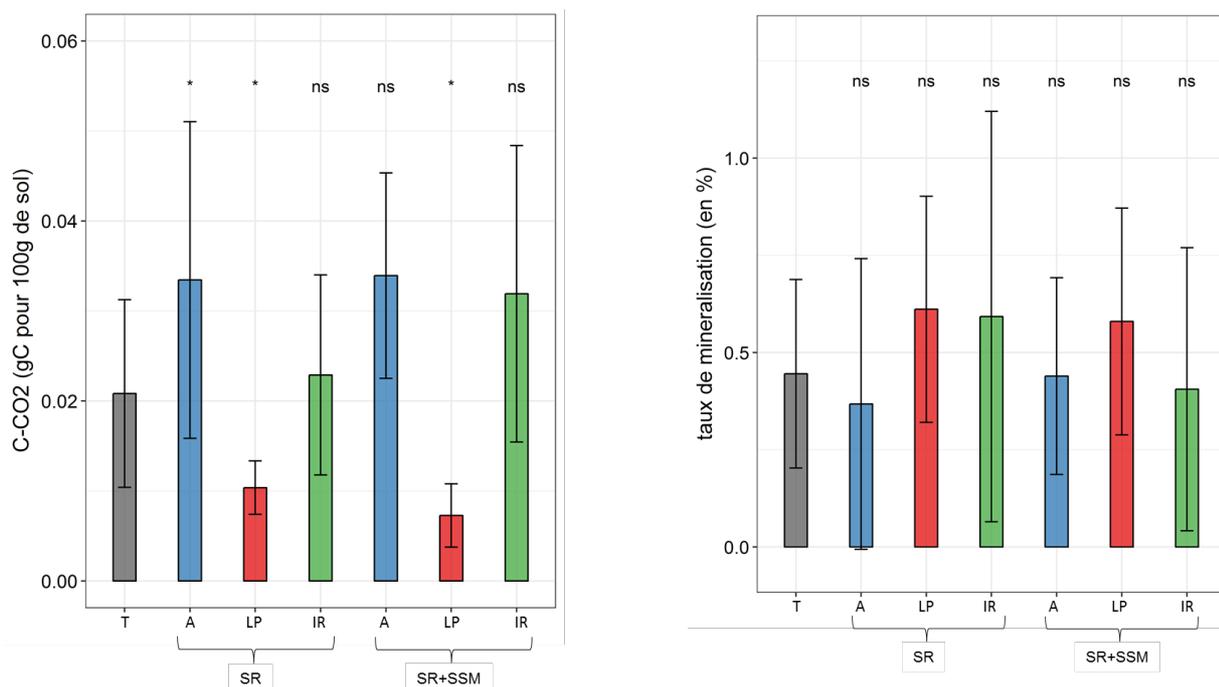


Figure A1.4 : Minéralisation potentielle du COS dans l'horizon 0-10 cm à l'échelle du transect (A = andain ; LP = ligne de plantation ; IR = inter-rang) pour les 3 modalités. A / Minéralisation potentielle du C exprimée en C dégagé sous forme de CO₂ sur les 7 jours d'incubation (gC-CO₂.100g⁻¹ de sol) ; B/ Taux de minéralisation du C (% du COT). (* = significatif à p < 0,05 ; ns = non significatif ; Kruskal-Wallis).

Le C de la biomasse microbienne (figure 5), autrement dit la biomasse microbienne, est significativement plus faible dans les lignes de plantation de SR et SR+SSM que dans le témoin (SR : 68,86 ; SR + SSM : 94,13 et T : 194,06 mgC.kg⁻¹ de sol). Les andains et les inter-rangs ne présentent pas de différence avec le témoin. Cette baisse de biomasse microbienne dans la ligne de plantation peut s'expliquer par la diminution des stocks de COS et donc des ressources carbonées suite au travail du sol qui s'accompagne d'une modification de l'habitat suite à l'élimination de la litière qui joue un tampon vis-à-vis des variations microclimatiques de température et d'humidité.

Les valeurs de C microbien rapportées au carbone total dans les 2 modalités travaillées ne présentent pas, quant à elle, de différence significative avec celle du témoin. Le pourcentage de C microbien se situe entre 0,33 et 0,75 % du COT. La valeur la plus haute est mesurée sur la ligne de plantation de la modalité SR+SSM, elle est significativement plus élevée que dans le témoin. Le remaniement du sol par les outils SR+SSM peut ici avoir activé une prolifération microbienne en réponse aux modifications de milieux induites : élimination des horizons de litière et diminution du stock de COS dans les horizons de surface de la ligne de plantation. Toutes les valeurs de C microbien rapportée au COT sont inférieures à 1% et restent faibles au regard des valeurs de la littérature, classiquement comprise entre 1 et 3% du COT (Martens, 1995). Ceci est à mettre en rapport avec les caractéristiques édaphiques du site de Bord-Louviers (sol très acide, à faible fertilité et à texture sableuse) qui constitue un habitat contraignant pour l'activité biologique. Si la biomasse microbienne reste globalement faible sur le site de Bord-Louviers, elle est donc d'autant plus affectée par le travail du sol puisque, quatre années après la réalisation du travail mécanisé du sol, le C microbien est environ 60% moins élevé sur les lignes de plantation travaillée avec les outils SR et SR+SSM que dans les zones non travaillées. Ce résultat s'accompagne d'une diminution des capacités de minéralisation potentielle du C en termes de dégagement de CO₂ mais pas du taux de minéralisation potentielle du C.

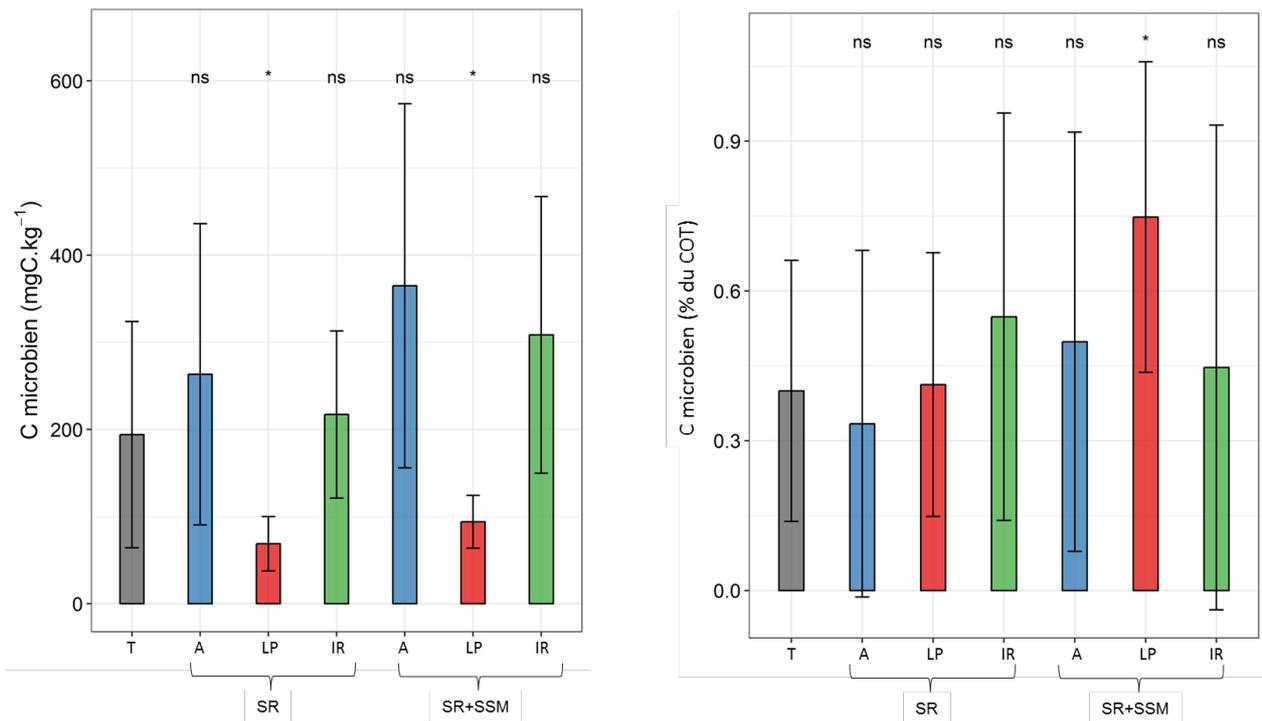


Figure A1.5 : C microbien (en mgC.kg⁻¹ de sol et en % du COT) dans l'horizon 0-10 cm à l'échelle du transect (A = andain ; LP = ligne de plantation ; IR = inter-rang) pour les 3 modalités (Kruskal-Wallis, $p < 0,05$).

La figure 6 montre les stocks de C organique extractible à l'eau sur 0-60 cm et la répartition de ce C dans le profil de sol de la ligne de plantation pour les 3 modalités. Les stocks de C extractible sont significativement plus faibles dans les 2 modalités travaillées (SR : 0,54 MgC.ha⁻¹ ; SR+SSM : 0,77 MgC.ha⁻¹) que dans le témoin (1,11 MgC.ha⁻¹). Ce résultat est à mettre directement en relation avec la diminution des stocks de COS sur le profil provoqué par les outils. Ceci se vérifie également sur la répartition verticale du C extractible au sein des profils de sol. Dans le témoin, la teneur en C extractible à l'eau diminue progressivement avec la profondeur et est significativement plus élevée en surface (0-30 cm) que dans les horizons profondeur (30-60 cm). Ce pattern de diminution progressive avec la profondeur se retrouve sur le profil de la modalité SR mais la teneur en C extractible est ici significativement plus faible en surface (0-30 cm) que dans le témoin. Si ce pattern de distribution reste visible sur le profil SR+SSM, il est moins net notamment en surface où l'on note une tendance à l'augmentation de la teneur en C extractible dans les couches 10-20 et 30-40 cm. Ceci est à mettre en relation avec le mélange dans les horizons de surface (0-40 cm) provoqué par l'outil SSM et mis en évidence par l'ACP sur la distribution des pools de COS. Le C extractible à l'eau est un bon proxy du fonctionnement actuel car il représente la fraction mobile du C au sein du profil de sol. Il est impacté par le travail des outils puisque ses stocks diminuent dans les modalités travaillées et sa répartition en profondeur est légèrement modifiée dans les horizons de surface par la modalité SR+SSM.

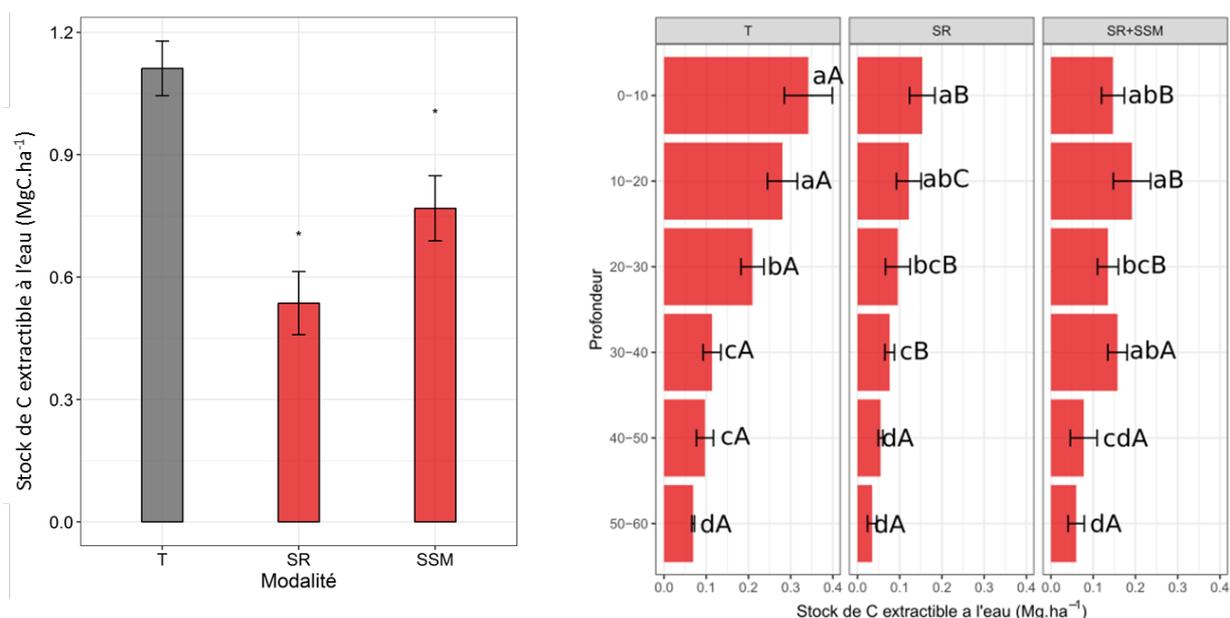


Figure A1.6 : Stocks de C organique extractible à l'eau sur 0-60 cm (en MgC.ha⁻¹) et répartition de ces stocks de C dans le profil de sol de la ligne de plantation pour les 3 modalités à Bord-Louviers. Des minuscules différentes indiquent les différences au sein du profil de sol par modalité, des majuscules différentes indiquent les différences entre modalité (Kruskal-Wallis, p<0,05).

7.3.2.2. Autres sites du réseau ALTER.

Il s'agit ici de présenter les résultats obtenus dans les 5 autres sites ALTER (Haguenau 32, Haguenau 35, Haguenau 150, Villecartier et Escource) à l'échelle du transect et à l'échelle du peuplement. Ces 5 sites font l'objet d'une analyse comparative globale (test Scheirer-Ray-Hare).

7.3.2.2.1. Mesure quantitative des stocks de COS.

A l'échelle du transect (figure 7), l'analyse comparative globale détecte un effet « site » et un effet « modalité » systématique, mais aucun effet d'interaction « site * modalité ». Seul l'effet « modalité » est analysé ici. Dans la zone travaillée (ligne de plantation), les stocks de COS sur 0-60 cm sont significativement plus faibles dans SR et SR+SSM (70,94 et 92,57 MgC.ha⁻¹) que dans le témoin (109,41 MgC.ha⁻¹). Cette diminution est de l'ordre de 16 à 35 % du stock de C du sol minéral du témoin (0-60 cm) et de 20 à 37 % de son stock total litière comprise (litière + 0-60 cm). Les stocks des horizons superficiels (topsoil, 0-30 cm) des 2 modalités travaillées sont également plus faibles (SR : 53,98 et SR+SSM : 63,48 MgC.ha⁻¹) que dans le témoin (81,03 MgC.ha⁻¹). Pour les horizons profonds (subsoil, 30-60 cm), le stock dans la modalité SR (16,96 MgC.ha⁻¹) est significativement inférieur à celui du témoin (28,38 MgC.ha⁻¹) ce qui n'est le cas dans SR+SSM (29,09 MgC.ha⁻¹). Les 2 modalités travaillées impactent donc à la fois le « topsoil » et le « subsoil » mais de manière différente : SR diminue les stocks de ces 2 compartiments alors que le passage de SSM mélange ces 2 compartiments et redistribue le COS sur l'ensemble du profil 0-60 cm. Ce mélange des horizons du sol effectué par SSM vient corroborer les résultats de l'ACP sur la distribution des pools de COS.

Le scarificateur travaillant jusqu'à 30-40 cm de profondeur, la diminution du stock de COS provoqué par cet outil dans le « topsoil » s'explique facilement par l'extraction mécanique d'une partie des matières organiques du sol (notamment celles de la zone rhizosphérique). L'abaissement dans le « subsoil » est plus complexe à expliquer. Selon nous, le travail d'extraction des systèmes racinaires réalisé par le scarificateur sur 30 à 40 cm d'épaisseur s'accompagne d'une aération du sol et peut permettre de rendre accessible de la MO par désorganisation de cette couche de sol ; ces effets sont susceptibles de favoriser la minéralisation du COS dans le « topsoil » et d'accroître dans le même temps la vitesse de transfert des composés labiles solubles issus de ce processus vers les horizons profonds et ainsi de provoquer une minéralisation du COS dans le compartiment 30-60 cm.

Dans les zones non travaillées (inter-rang et andain), il existe une augmentation du stock sur le profil 0-60 cm, sur le « subsoil » mais pas sur le « topsoil » pour les andains. L'augmentation sur le profil 0-60 cm peut s'expliquer par l'accumulation de MO déplacée depuis la ligne de plantation par le scarificateur. L'augmentation du stock dans le « subsoil » peut être liée à un artefact lors du prélèvement. L'accumulation de MO en surface de l'andain créée par l'outil SR rend difficile dans cette zone l'identification du niveau 0 du sol (par convention, toujours sous la litière

pour un sol en place) 5 ans après sa mise en place : un décalage du 0 du sol au sein de l'accumulation de MO apporté par SR implique un décalage dans les profondeurs de prélèvements. Ceci peut expliquer les forts écart-type mesurés à ce niveau mais qui dénote aussi la variabilité au sein des andains. L'inter rang n'est pas impacté par les outils lors de la mise en place. L'absence de différence au témoin sur la modalité SR+SSM apparait donc logique d'autant que les stocks de COS tant dans le « topsoil » que dans le « subsoil » des inter-rangs ne présentent pas de différence avec le témoin.

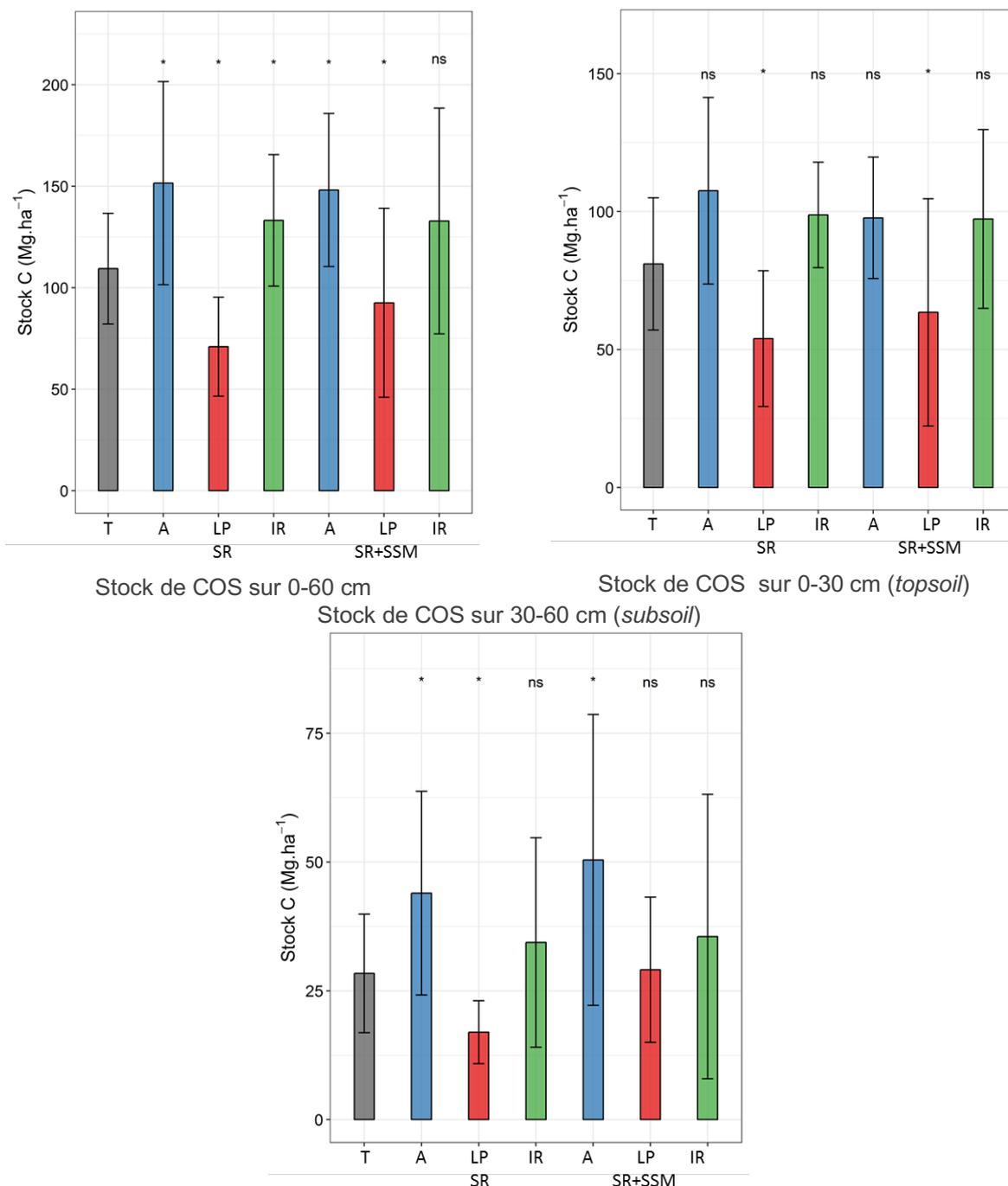


Figure A1.7: Stocks de COS (MgC.ha⁻¹) à l'échelle du transect calculés sur 0-60 cm, sur le topsoil (0-30 cm) et sur le subsoil (30-60 cm) pour les 3 modalités (A = andain ; LP = ligne de plantation ; IR = inter-rang ; Scheirer-Ray-Hare, p<0,05).

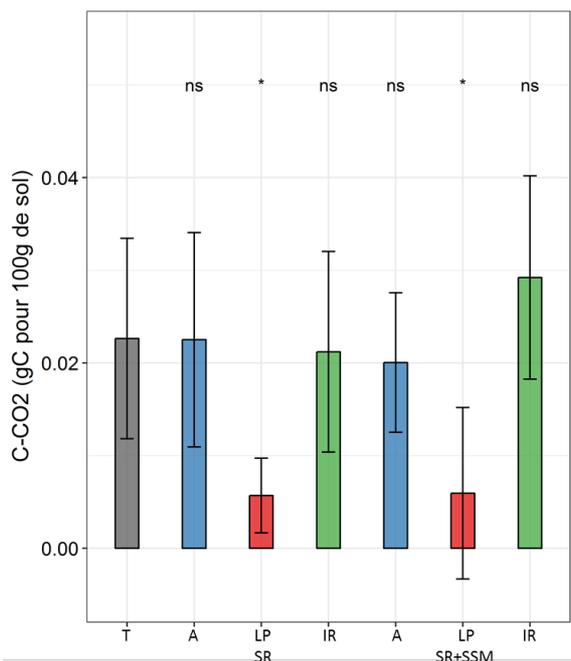
A l'échelle du peuplement forestier, l'analyse comparative globale détecte un effet « site » systématique mais pas d'effet « modalité » cette fois-ci et toujours pas d'effet de l'interaction « site * modalité ». Il n'existe donc, à cette échelle, aucun effet significatif de la préparation mécanisée réalisée par les outils SR et SR+SSM sur les stocks de

COS sur l'ensemble des profondeurs prospectées pour le calcul des stocks (0-60 cm, litière + 0-60 cm et litière+ 0-10 cm). Pour confirmer ce résultat, nous avons réalisé la comparaison entre les modalités à l'échelle du peuplement mais site par site (test Krukall-Wallis). Cette analyse ne montre pas d'effet significatif de la préparation mécanique des sols pour les 2 modalités travaillées sur les stocks de COS calculés pour les profondeurs « 0-60 cm » et « litière + 0-60 cm ». Il en va de même pour les sites d'Haguenau (p35, p150), de Villecartier et d'Escource sur les stocks de COS calculés pour la profondeur « litière + 0-10 cm ». Pour cette profondeur de calcul des stocks, seul le site d'Haguenau p32 présente une diminution significative des stocks de COS dans les 2 modalités travaillées SR et SSM (30,59 et 30,33 MgC.ha-1 respectivement) par rapport au témoin (45,50 MgC.ha-1). Hormis dans ce dernier cas, l'analyse site par site confirme bien qu'il n'existe, à l'échelle du peuplement, aucun effet significatif de la préparation mécanisée réalisée par les outils SR et SR+SSM sur les stocks de COS sur les profondeurs 0-60 cm et litière + 0-60 cm.

7.3.2.2.2. Fonctionnement du sol.

La figure 8A présente les valeurs de minéralisation potentielle du COS pour l'horizon 0-10 cm à l'échelle du transect et donc des différentes zones travaillées (ligne de plantation) et non travaillées (andain et inter-rang) pour les 3 modalités. A l'échelle du transect, la minéralisation du C dans l'horizon 0-10 cm présente des valeurs significativement plus faibles sur les zones travaillées (lignes de plantation) que dans le témoin (0,002 contre 0,023 gC-CO₂.100g⁻¹ de sol). Les inter-rangs non travaillés et les andains ont une minéralisation potentielle identique à celle du témoin. Comme pour Bord-Louviers, la minéralisation potentielle du C semble s'ajuster aux valeurs des stocks de COS mesurés précédemment : faibles dégagement de CO₂ pour les sols à faible stock de COS comme les zones travaillées (lignes de plantation) et plus fort dégagement de CO₂ pour les sols à stocks de COS plus élevés (inter-rang et andains). Le taux de minéralisation dans les 2 modalités travaillées suit exactement les mêmes tendances : diminution significative par rapport au témoin dans les lignes de plantation et des valeurs similaires au témoin au niveau de l'inter-rang et de l'andain.

A/ Minéralisation potentielle du COS



B/ C microbien

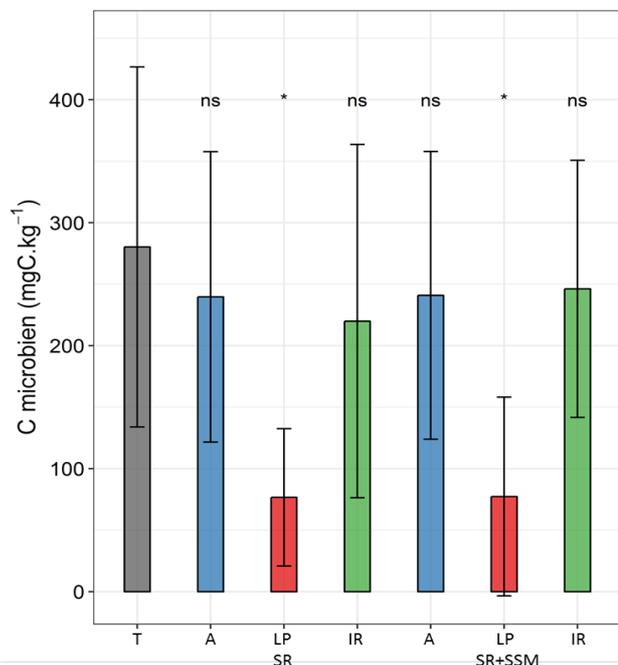


Figure A1.8 : A/ Minéralisation potentielle du COS (gC-CO₂.100g⁻¹ de sol) et C microbien (mgC.kg⁻¹) dans l'horizon 0-10 cm à l'échelle du transect (A = andain ; LP = ligne de plantation ; IR = inter-rang) pour les 3 modalités. (* = significatif à p < 0,05 ; ns = non significatif ; Scheirer-Ray-Hare).

Le C microbien de l'horizon 0-10 cm (figure 8B) présente des valeurs significativement plus faibles sur les lignes de plantation pour les 2 modalités travaillées (SR : 76,58 et SR+SSM : 77,32 mgC.kg⁻¹) que dans le témoin (280,26 mgC.kg⁻¹). Les inter-rangs et les andains présentent des valeurs identiques à celle du témoin. Cette baisse de biomasse microbienne dans la ligne de plantation peut s'expliquer par la diminution du stock de COS dans les horizons de surface de la ligne de plantation associée à l'élimination des horizons de litière qui joue un tamponne les variations microclimatiques. Les valeurs de C microbien rapportées au carbone organique du sol dans les 2



modalités travaillées ne présentent pas de différence significative avec celle du témoin. Le pourcentage de C microbien se situe entre 0,36 et 0,50 % du COT. Si la biomasse microbienne reste globalement faible (< 1% du COT), elle est d'autant plus affectée par le travail du sol puisque, quatre années après la réalisation du travail mécanisé du sol, le C microbien a subi une baisse d'environ 70% sur les lignes de plantation travaillées avec les outils SR et SR+SSM par rapport aux zones non travaillées. Ce résultat s'accompagne d'une diminution des capacités de minéralisation potentielle du C tant en termes de dégagement de CO₂ que de taux de minéralisation.

La figure 9 montre les stocks de C organique extractible à l'eau sur 0-60 cm et la répartition de ce C dans le profil de sol de la ligne de plantation pour les 3 modalités. Les stocks de C extractible sont significativement plus faibles dans les 2 modalités travaillées (SR : 0,36 MgC.ha⁻¹ ; SR+SSM : 0,45 MgC.ha⁻¹) que dans le témoin (0,70 MgC.ha⁻¹). Ce résultat est à mettre directement en relation avec la diminution des stocks de COS sur le profil provoqué par les outils. En ce qui concerne la répartition verticale du C extractible au sein des profils de sol, on observe dans le témoin que les valeurs maximales sont atteintes dans les horizons 20-30 cm et 30-45 cm. Sur les modalités SR et SR+SSM, le C extractible augmente sur les épaisseurs 0-10 et 10-20 cm par rapport au témoin. Pour SR seulement, le C extractible diminue dans les horizons 30-45 et 45-60 cm. Par ailleurs, la répartition de ce C extractible est homogénéisée au sein des profils de sol travaillés par SR et SR+SSM. Ceci est à mettre en relation avec le mélange dans les horizons de surface (0-40 cm) provoqué par l'outil SSM et déjà mis en évidence précédemment. Le C extractible à l'eau représente la fraction mobile du C au sein du profil de sol est donc impacté par le travail des outils puisque ses stocks diminuent dans les modalités travaillées et que sa répartition en profondeur est homogénéisée tant dans SR que dans SR+SSM.

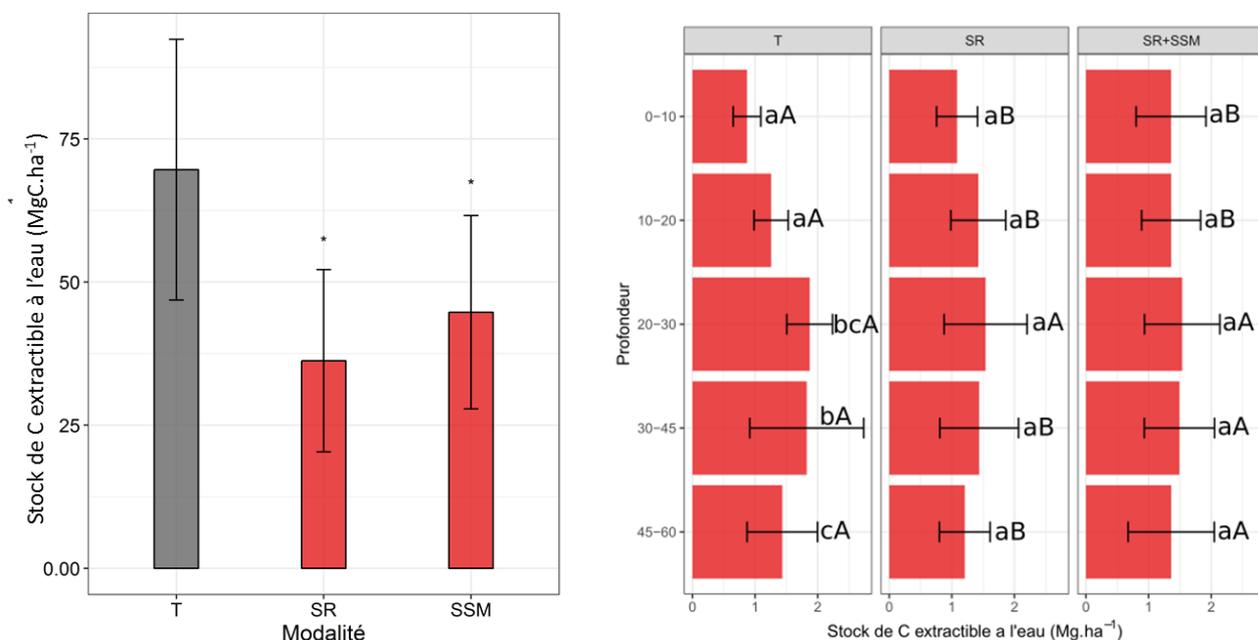


Figure A1.9 : Stocks de C organique extractible à l'eau sur 0-60 cm (en MgC.ha⁻¹) et répartition de ces stocks C dans le profil de sol de la ligne de plantation pour les 3 modalités. Des minuscules différentes indiquent les différences au sein du profil de sol par modalité, des majuscules différentes indiquent les différences entre modalité (Scheirer-Ray-Hare, p<0,05).

7.3.3.Effet du RAZherb (RAZ) combiné au Culti3B (C3B) - Réseau Pilote.

Il s'agit ici de tester une combinaison d'outils (RAZ+C3B) adaptés à lutter contre la végétation concurrente de type Molinie présente sur sols hydromorphes. Les sites PILOTE sont récents et ont été installés entre 2014 et 2016 pour des prélèvements CAPSOL en 2018.

7.3.3.1. Mesure quantitative des stocks de COS sur Pilote

La figure 10 présente les stocks de COS calculés sur le sol minéral (0-60 cm) dans les 3 sites Pilote et le dispositif Chrono. Tous les stocks sont ici calculés à masse équivalente pour permettre la comparaison avec le site Chrono. Sur le site de Chaux (p212/1026), les stocks de COS calculés sur la litière et le sol minéral (Litière +0-60 cm) pour la modalité RHAZ+C3B s'élèvent à 119,27 et 102,77 Mg.ha⁻¹ respectivement sur l'inter-rang et la ligne de plantation contre 107,07 pour le témoin. Ces valeurs ne sont significatives pas différentes. Il en va de même pour les stocks

de COS calculés sur la « litière + 0-60 cm », le topsoil et le subsoil. A Chaux, la combinaison d'outils (RAZ+C3B) n'a pas d'effet sur les stocks de COS.

Sur le site de Chinon, les stocks de COS sur 0-60 cm pour la modalité RHAZ+C3B s'élèvent à 196,66 et 112,72 Mg.ha⁻¹ respectivement sur l'inter-rang et la ligne de plantation contre 115,31 pour le témoin. Ces valeurs ne sont pas différentes entre la ligne de plantation et le témoin. En revanche, le stock de l'inter rang censé ne pas être impacté par le travail du sol est significativement plus élevé que celui du témoin. On a la même augmentation significative sur l'inter-rang pour les stocks de COS calculés sur « Litière+0-60 cm ». Cette augmentation du stock de C sur l'inter-rang peut s'expliquer par la façon dont travaille l'outil Razherb. Il s'agit d'une lame située à l'extrémité d'un godet monté sur mini pelle qui permet un désherbage par décapement superficiel ; l'outil élimine par raclage le tapis herbacé et les surplus de décapage se retrouvent de part et d'autre de la bande travaillée autrement dit dans les futurs inter-rangs. Cet outil peut donc être à l'origine d'un « andainage » ponctuel. Cette différence, absente sur le site de Chaux, peut être due à des touradons de Molinie bien plus développés sur le site de Chinon qui amène à des surplus de décapage plus important.

Les valeurs de stocks de C dans le topsoil sont identiques entre la modalité RHAZ+C3B et le témoin. Par contre, dans le subsoil, la modalité RHAZ+C3B présente des stocks significativement plus élevés dans l'inter-rang et la ligne de plantation. Ces résultats peuvent s'expliquer cette fois par la façon dont travaille l'outil C3B : il réalise un billon surélevé de 10 à 30 cm et décompacte le sol entre 40 et 60cm avec une dent de sous-solage. A Chinon, la combinaison d'outils (RAZ+C3B) a un effet sur les stocks de COS : il augmente le stock de C sur l'inter-rang et dans le subsoil.

Sur le site de Rennes, les stocks de COS calculés sur 0-60 cm pour la modalité RHAZ+C3B s'élèvent à 91,10 et 82,25 Mg.ha⁻¹ respectivement sur l'inter-rang et la ligne de plantation contre 55,86 Mg.ha⁻¹ pour le témoin. On observe donc une augmentation du stock de COS sur la ligne de plantation et une tendance à l'augmentation sur l'inter-rang, cette dernière n'apparaît pas significative car très variable. On observe la même chose sur le stock total (Litière + 0-30 cm) et sur le topsoil. L'augmentation sur la ligne de plants est probablement due à une redistribution des surplus de raclage du tapis herbacé enlevés et déposés sur l'inter-rang par l'outil Rhazherb qui seraient ensuite remobilisés quand le Culti3B passe à son tour pour faire le billon de la future ligne de plants. La tendance observée sur l'inter-rang s'explique comme précédemment pour le site de Chinon avec un « andainage » ponctuel provoqué par le passage du Rhazherb. L'effet est ici d'autant plus marqué que les accumulations de litière sont importantes sur ce site. Ceci explique aussi la très forte variabilité des stocks de COS sur l'inter-rang. A Rennes, la combinaison d'outils (RAZ+C3B) a un effet sur les stocks de COS : il augmente le stock de C sur la ligne de plantation voire sur l'inter-rang et dans le topsoil.

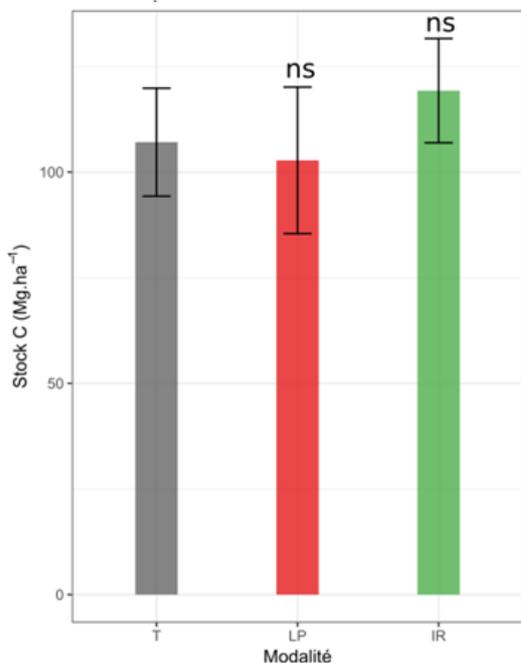
7.3.3.1. Mesure quantitative des stocks de COS sur Chrono

Le dispositif Chrono de Chaux a été installé au printemps 1994, suite à l'exploitation de Chêne sessile. Ce site est un dispositif mis en place uniquement en forêt de Chaux pour tester plus spécifiquement l'effet de différents amendements sur une plantation de chêne sessile sur station acide à caractère hydromorphe. Ce dispositif a fait l'objet d'un travail mécanisé de préparation du sol à sa mise en place et constituait donc une bonne opportunité pour voir si l'effet du travail du sol reste visible 25 ans après sa réalisation. En termes de préparation, ce site a subi un labour en plein ainsi qu'un billonnage à l'aide d'une charrue à disque. On peut considérer ce type de préparation mécanisée avant plantation comme plus intensif que le travail réalisé par la combinaison RHAZ+C3B du fait qu'un retournement du sol ait été réalisé sur la totalité de la parcelle.

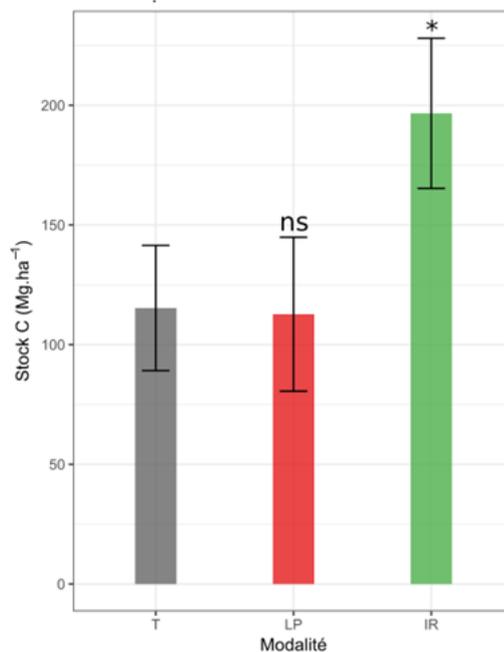
A ce niveau, il est intéressant de noter que ce site est le seul où les 2 modes de calcul des stocks de COS (à profondeur constante ou à masse équivalente) ne montrent pas les mêmes réponses. L'analyse à masse équivalente paraissant plus juste dans ce cas à cause du retournement du sol par le labour sur l'intégralité de la parcelle, les stocks de COS se basent ici sur le mode de calcul à masse équivalente. Les stocks calculés sur 0-60 cm s'élèvent ainsi à 57,56 et 108,48 Mg.ha⁻¹ respectivement sur l'inter-rang et la ligne de plantation contre 99,38 Mg.ha⁻¹ pour le témoin. On observe donc une diminution significative du stock de COS sur l'inter-rang par rapport au témoin non labouré. Par contre, le stock de la ligne de plantation est équivalent à celui du témoin. Ceci peut s'expliquer par le fait que le sol utilisé pour créer le billonnage à l'aide d'une charrue à disque est déplacé finalement depuis l'inter-rang.



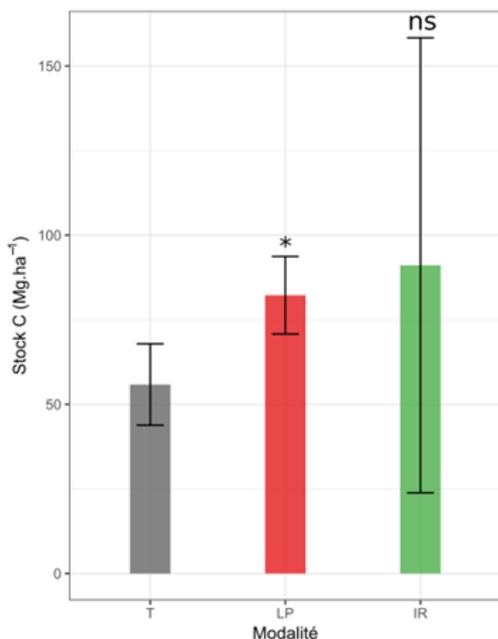
Pilote - Chaux p212/1026



Pilote - Chinon



Pilote – Rennes



Chrono – Chaux p213

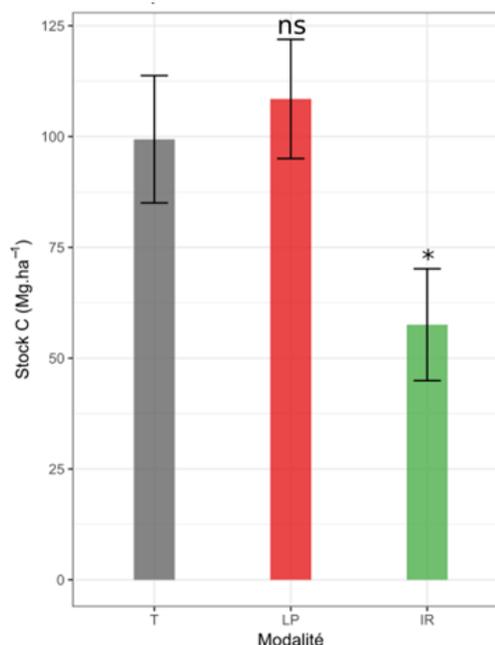


Figure A1.10 : Stocks de COS calculés sur « Litière + 0-60 cm » (en MgC.ha⁻¹) dans les 3 sites pilote et le dispositif Chrono. Les stocks sont ici calculés à masse équivalente pour la comparaison avec le site Chrono (Kruskal-Wallis, p<0,05).

Vingt-quatre ans après la mise en place du site, on décèle donc un effet encore visible sur les stocks de COS. Ce résultat est à mettre en perspective avec le site Pilote de Chaux, situé à proximité, pour lequel la combinaison d'outils (RAZ+C3B) n'a pas d'effet sur les stocks de COS. Cette différence est attribuable au fait que le travail de préparation est moins intensif dans ce cas car plus localisé notamment.

7.3.4. Synthèse des résultats et recommandations

7.3.4.1. Sites ALTER : outils SR et SSM.

Sur les sites ALTER, les modalités SR et SR+SSM affectent les stocks de carbone organique du sol (COS) en les diminuant significativement par rapport au témoin. Cet impact est localisé aux zones travaillées par les outils c'est-à-dire sur les lignes de plantation. Cette diminution atteint 16 à 35 % du stock de COS présent dans le sol minéral du témoin (0-60 cm) et 20 à 37 % de son stock total litière comprise (litière + 0-60 cm). Ces valeurs peuvent être plus élevées pour des sols présentant une forte accumulation de litière (humus MOR) : sur le site de Bord-Louviers, la diminution sur les lignes de plantation atteint 40 à 50 % du stock de COS présent dans le sol minéral du témoin et 60 à 70 % de son stock total. Les modalités SR et SR+SSM impactent à la fois le topsoil (0-30 cm) et le subsoil (30-60 cm) dans la ligne de plantation mais de manière différente : l'outil SR diminue les stocks de COS de ces deux compartiments du sol alors que le passage de l'outil SSM mélange ces deux compartiments et redistribue le COS sur l'ensemble du profil 0-60 cm.

Cette diminution des stocks de COS dans la zone travaillée suite à la préparation mécanique du sol par les modalités SR et SR+SSM n'est pas uniquement attribuable à un déstockage du COS sous forme de CO₂ par minéralisation comme nous le supposions dans les hypothèses 1 et 3 posées au début de ce travail. En effet, l'utilisation de SR conduit à la création d'inter-rangs non travaillés mais aussi de zones d'accumulation riches en matière organique, les andains. Le stock superficiel de COS éliminé dans la ligne de plantation est donc, en partie, déplacé vers les andains. L'utilisation de l'outil SR dans les 2 modalités travaillées induit donc une répartition différente des stocks de COS des horizons superficiels (litière + 0-30 cm) entre zones travaillées et zones non travaillées à l'échelle de la parcelle (i.e. du peuplement). C'est pour cette raison que l'extrapolation à l'échelle du peuplement montre que les stocks de COS calculés jusqu'à 60 cm de profondeur (avec ou sans litière) ne présentent pas de différences significatives avec le témoin. A cette échelle, seuls les stocks de COS sur l'épisolum humifère (Litière + 0-10 cm) peuvent présenter des différences significatives avec le témoin dans certaines situations (Bord-Louviers, Haguenau P32).

L'impact des deux modalités SR et SSM sur les stocks de COS dans la ligne de plantation s'accompagne d'une différence de fonctionnement en terme de dynamique du COS. Sur l'horizon 0-10 cm, la minéralisation potentielle du COS s'ajuste aux valeurs des stocks de COS mesurés précédemment : faibles dégagement de CO₂ dans les lignes de plantation et plus fort dégagement de CO₂ sur les andains. Le taux de minéralisation dans les 2 modalités travaillées suit exactement les mêmes tendances : diminution significative par rapport au témoin dans les lignes de plantation et des valeurs similaires au témoin au niveau de l'inter-rang et de l'andain. Ces résultats s'accompagnent d'une baisse du C microbien sur les lignes de plantation par rapport aux zones non travaillées. Par ailleurs, les stocks de C extractible à l'eau diminuent dans les zones travaillées et sa répartition en profondeur au sein du profil de sol est homogénéisée.

Par ailleurs, l'approche qualitative du COS menée par l'analyse Rock-Eval permet de montrer que la diminution du stock de COS dans les zones travaillées s'accompagne d'une redistribution verticale des pools de COS au sein des profils de sol travaillés par la modalité SR + SSM notamment. L'outil SR semble lui favoriser la présence de MO labile en profondeur ce qui est susceptible de provoquer un « priming effect » et donc un déstockage du carbone stabilisé depuis longtemps dans le sol. Bien que les outils SR et SSM sont considérés ne pas bouleverser fondamentalement l'organisation des horizons pédologiques, les résultats obtenus ici montrent qu'il provoque un mélange des horizons qui impact la distribution des pools de COS. Ces premiers résultats obtenus sur le site de Bord Louviers devront être confirmés sur les autres sites du réseau ALTER soumis à l'analyse RE6 ce qui permettra aussi de valider ou d'invalider l'hypothèse 2 posée au début de travail.

Les effets de ces changements de fonctionnement localisés dans la ligne de plants restent difficiles à appréhender sur le moyen et le long terme, notamment en termes de dynamique de reconstitution des stocks de COS dans les lignes de plantation avec le développement des arbres. A court terme, on peut aussi penser que le flush de minéralisation de la MO qui suit sans doute le travail des outils lors de la mise en place des plantations peut avoir un effet positif sur la croissance des jeunes plants, ceux-ci bénéficiant des éléments minéraux libérés par ce processus et ce, d'autant plus dans des sols contraignants d'un point de fertilité minérale comme ceux du réseau ALTER.

Par rapport à l'impact des outils SR et SSM sur les stocks de COS, les résultats obtenus nous permettent de formuler les recommandations suivantes :

- Si les conditions stationnelles le permet (sol peu tassé), privilégier l'utilisation du scarificateur réversible (SR) seul pour lutter contre la végétation concurrente car il a moins d'impact sur la redistribution du COS au sein du profil de sol travaillé ;
- Quand les conditions stationnelles le nécessite (sol tassé), l'utilisation du scarificateur réversible associé au sous-soleur multifonction (SR+SSM) pour lutter contre la végétation concurrente est possible mais dans ce cas, il est nécessaire d'associer à la réflexion sur la bonne densité d'arbres nécessaire à la réussite de la plantation, une réflexion sur la proportion surface travaillée versus non travaillée qui doit être réalisée au



sein de la parcelle pour minimiser l'effet de la préparation mécanique sur le sol. Ce point est d'autant plus important pour les plantations sur sol à forte accumulation de litière (MOR).

7.3.4.2. Sites PILOTE et CHRONO : modalité RAZ+C3B.

Sur le réseau PILOTE, l'effet de la modalité RAZ+C3B sur les stocks de carbone organique du sol (COS) varie selon les sites :

- A Chaux (p212/1026), la modalité RAZ+C3B n'a pas d'effet sur les stocks de COS.
- A Chinon, la modalité RAZ+C3B augmente le stock de COS sur l'inter-rang et dans le sous-sol (30-60 cm).
- A Rennes, la modalité RAZ+C3B augmente le stock de COS sur la ligne de plantation (voire sur l'inter-rang) et dans le topsoil.

Ces différences de réponses s'expliquent par la manière dont les outils Rhazherb et Culti-3B agissent sur le profil de sol. L'augmentation du stock de COS sur l'inter-rang s'explique parce que le Rhazherb permet un désherbage par décapement superficiel. L'outil élimine par raclage le tapis herbacé et les surplus de décapage se retrouvent ponctuellement de part et d'autre de la bande travaillée autrement dit dans les futurs inter-rangs. Cet outil peut donc être à l'origine d'un « andainage » ponctuel sur l'inter-rang et donc une augmentation du stock de COS observée à Chinon. L'augmentation sur la ligne de plants, observée à Rennes, est probablement due à une redistribution de ces surplus de raclage du tapis herbacé déposés sur l'inter-rang par l'outil Rhazherb qui seraient ensuite remobilisés quand le Culti3B passe à son tour pour faire le billon de la future ligne de plants.

La comparaison entre le site Chrono qui a subi un labour en plein ainsi qu'un billonnage à l'aide d'une charrue à disque en 1994 et le site Pilote de Chaux installé en 2014 à proximité est intéressante. En effet, si la modalité RAZ+C3B n'a pas d'effet sur les stocks de COS sur le site Pilote de Chaux, le travail de préparation du sol sur le site Chrono a conduit à une diminution significative du stock de COS sur l'inter-rang par rapport au témoin non labouré. Vingt-quatre ans après la mise en place du site, on décèle donc un effet encore visible sur les stocks de COS de l'inter-rang sur Chrono. Cette différence entre les 2 sites est sans doute à mettre en rapport avec l'intensité de la préparation mécanique des sols : labour en plein sur Chrono contre travail localisé aux seules lignes de plantation sur le site Pilote de Chaux. Ceci conduit à proposer la même recommandation que précédemment à savoir : les travaux de préparation mécanique du sol avant plantation doivent intégrer une réflexion sur la proportion surface travaillée versus non travaillée qui doit être réalisée au sein de la parcelle pour minimiser l'effet de la préparation mécanique sur le sol.

7.4. Références bibliographiques

Angst, G., Messinger, J., Greinera, M., Häusler, W., Hertel, D., Kirfel, K., Kögel-Knabner, I., Leuschner, C., Rethemeyer, J., Muellera, C.W., 2018. Soil organic carbon stocks in topsoil and subsoil controlled by parent material, carbon input in the rhizosphere, and microbial-derived compounds. *Soil Biol. and Biochem.* Vol. 122, 19–30.

Balesdent, J., 1996. Fractionnement granulométrique de la matière organique du sol. Note Technique n°2.0. Jérôme Balesdent. INRA Unité Science du Sol, Versailles.

Barré, P., Plante, A.F., Cécillon, L., Lutfalla, S., Baudin, F., Bernard, S., Christensen, B.T., Eglin, T., Fernandez, J. M., Houot, S., Kätterer, T., Le Guillou, C., Macdonald, A., van Oort, F., Chenu, C., 2016. The energetic and chemical signatures of persistent soil organic matter. *Biogeochemistry*. Vol (130), 1–12.

Balesdent, J., Basile-Doelsch, I., Chadoeuf, J., Cornu, S., Derrien, D., Fekiacova, Z., Hatté, C., 2018. Atmosphere–soil carbon transfer as a function of soil depth. *Nature*. Vol. (559), 599–602.

Beleites, C., Sergio, V., 2014. HyperSpec: a package to handle hyperspectral data sets in R, R package version 0.98-20140523, 2014.

Borchers, H. W., 2015. Pracma: Practical Numerical Math Functions, R package version 1.8.8.

Carrie, J., Sanei, H., Stern, G., 2012. Standardisation of Rock–Eval pyrolysis for the analysis of recent sediments and soils. *Organic Geochemistry*. Vol. 46, 38–53.

Cécillon, L., Baudin, F., Chenu, C., Houot, S., Jolivet, R., Kätterer, T., Lutfalla, S., Macdonald, A., van Oort, F., Plante, A.F., Savignac, F., Soucémariadin, L. N., Barré, P., 2018. A model based on Rock-Eval thermal analysis to quantify the size of the centennially persistent organic carbon pool in temperate soils. *Biogeosciences*. Vol. (15), 2835–2849.

Chenu, C., Rumpel, C., and Johannes Lehmann, J., 2015. Methods for Studying Soil Organic Matter: Nature, Dynamics, Spatial Accessibility and Interactions with Minerals. Chap. 13 in “Soil Microbiology, Ecology, and Biochemistry”. Editor: E.A. Paul, Elsevier, pp. 383-419.

- Christensen, B.T., 2001. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *Eur. J. Soil Sci.* Vol. 52, 345–353.
- Corvasce, M., Zsolnay, A., D’Orazio, V., Lopez, R., Miano, T. M., 2006. Characterization of water extractable organic matter in a deep soil profile. *Chemosphere*. Vol. 62, 1583–1590.
- Culman, S.W., Snapp, S.S., Freeman, M.A., Schipanski, M.E., Beniston, J., Lal, R., Drinkwater, L.E., Franzluebbers, A.J., Glover, J.D., Grandy, S.A., Six, J., Maul, J.E., Mirksy, S.E., Spargo, J.T., Wander, M.M., 2012. Permanganate oxidizable carbon reflects a processed soil fraction that is sensitive to management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76:494–504.
- Derrien D., Plain C., Courty P.-E., Gelhaye L., Moerdijk-Poortvliet T.C.W., Thomas F., Versini A., Zeller B., Koutika L.S., Boschker H.T.S. et Epron D., 2014 - Does the addition of labile substrate destabilise old soil organic matter? *Soil Biology & Biochemistry*, 76, pp. 149-160.
- Derrien, D., Dignac, M-F., Basile-Doelsch, I., Barot, S., Cécillon, L., Chenu, C., Chevallier, T., Freschet, G. T., Garnier, P., Guenet, B., Hedde, M., Klumpp, K., Lashermes, G., Maron, P.A., Nunan, N., Roumet, C., Barré, P., 2016. Stocker du C dans les sols : Quels mécanismes, quelles pratiques agricoles, quels indicateurs ? *Etude et Gestion des Sols*. Vol. (23), 193-224.
- Disnar, J.R., Guillet, B., Keravis, D., Di-Giovanni, C., Sebag, D., 2003. Soil organic matter (SOM) characterization by Rock-Eval pyrolysis: scope and limitations. *Org. Geochem.* Vol. 34, 327–343.
- Dungait, J.A.J., Hopkins, D.W., Gregory, A.S., Whitmore, A.P., 2012. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance. *Global Change Biology*. Vol. (18), 1781–1796.
- Falloon, P., Smith, P., Coleman, K., Marshall, S., 1998. Estimating the size of the inert organic matter pool from total soil organic carbon content for use in the Rothamsted carbon model. *Soil Biol. Biochem.* Vol.30, 1207–1211.
- Feller, C., 1979. Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédologie*. Vol.17, 339–346.
- Felipe de Mendiburu. (2019). *Agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research*.
- Gregorich, E.G., Gillespie, A.W., Beare, M.H., Curtin, D., Sanei, H., Yanni, S.F., 2015. Evaluating biodegradability of soil organic matter by its thermal stability and chemical composition. *Soil Biology and Biochemistry*. Vol. (91), 182–191.
- Han, L., Sun, K., Jin, J., Xing, B., 2015. Some concepts of soil organic carbon characteristics and mineral interaction from a review of literature. *Soil Biol. Biochem.* Vol. (94), 107-121.
- Haynes, R.J., 2005. Labile organic Matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: an overview. In Sparks, D.L. (Ed.), *Advances in Agronomy*, vol. 85. Academic Press, San Diego, CA, p. 221.
- Hopkins, D.W., 2008. Carbon Mineralization. In *Soil Sampling and Methods of analysis*, edited by Carter, M.R., and Gregorich, E.G., Canadian Society of soil Science, CRC Press, 1224 p.
- Jonard, M., Nicolas, M., Coomes, D. A., Caignet, I., Saenger, A., Ponette, Q., 2017. Forest soils in France are sequestering substantial amounts of carbon. *Science of the Total Environment*. Vol. 574, 616–628.
- Kalbitz, K., Solinger, S., Park, J.H., Michalzik, B., Matzner, E., 2000. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review. *Soil Sci.* Vol. (165), 277–304.
- Kleber, M., 2010. What is recalcitrant soil organic matter? *Environ. Chem.* 7, 320–332.
- Lafargue, E., Marquis, F., Pillot, D., 1998. Rock-Eval 6 applications in hydrocarbon exploration, production, and soil contamination studies. *Institut Français du Pétrole*. Vol. 53, 421–437.
- Lehmann, J., Kleber, M., 2015. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*. Vol. (528), 60-68.
- NF X31-516, 2007. Fractionnement granulo-densimétrique des matières organiques particulières du sol dans l'eau. AFNOR.
- Peters, K.E., Walters, C.C., Moldovan, J.M., 2005. *The Biomarker Guide. Biomarkers and Isotopes in the Environment and Human History*, vol. 1. Cambridge University Press, New York, 490p.
- R Core Team, 2019. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundations for Statistical Computing, Vienna, Austria (URL <http://www.R-project.org/>).
- Saenger, A., Cécillon, L., Poulencard, J., Bureau, F., De Daniéli, S., Gonzalez, J.M., Brun, J.-J., 2015. Surveying the carbon pools of mountain soils: A comparison of physical fractionation and Rock-Eval pyrolysis. *Geoderma*. Vol. 241–242, 279–288.



- Sebag, D., Verrecchia, E.P., Cécillon, L., Aadatte, T., Albrecht R., Aubert M., Bureau F., Cailleau, G., Copard, Y., Decaens, T., Disnar, J.-R., Hetenyi, M., Nyilas, T., Trombino, L., 2016. Dynamics of soil organic matter based on new Rock-Eval indices. *Geoderma*, vol. 284, 185-203.
- Schmidt, M.W.I., Torn, M.S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I.A., Kleber M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D.A.C., Nannipieri, P., Rasse, D.P., Weiner, S., Trumbore, S. E., 2011. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*. Vol. (478), 49–56.
- Sokal, R.R., Rohlf, F.J., 1995. *Biometry: the Principles of Statistics in Biological Research*. W. H. Freeman, 887 p.
- Soucémarianadin, L., Cécillon, L., Chenu, C., Baudin, F., Nicolas, M., Girardin, C., Pierre Barré, P., 2018. Is Rock-Eval 6 thermal analysis a good indicator of soil organic carbon lability? – A method-comparison study in forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*. Vol. (117), 108–116.
- Stockmann, U., Adams, M.A., Crawford, J.W., Fiel, D.J., Henekaarchchi, N., Jenkins, M., Minasny, B., McBratney, A.B., de Remy de Courcelles, V., Singh, K., Wheeler, I., Abbott, L., Angers, D.A., Baldock, J., Bird, M., Brookes, P.C., Chenu, C., Jastrow, J.D., Lal, R., Lehmann, J., O'Donnell, A.G., Parton, W.J., Whitehead, D., Zimmermann, M., 2013. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Vol. (164), 80– 99.
- Thioulouse J., Dufour A.B., Chessel D., 2004. Ade4: Analysis of Environmental Data: Exploratory and Euclidean methods in Environmental sciences, R package version 1.3–3.
- Toriyama, J., Kato, T., Siregar, C. A., Siringoringo, H. H., Ohta, S., & Kiyono, Y., 2011. Comparison of depth- and mass-based approaches for estimating changes in forest soil carbon stocks: A case study in young plantations and secondary forests in West Java, Indonesia. *Forest Ecology and Management*. Vol. 262(9), 1659–1667.
- Vance, E.D., Brookes, P.C., Jenkinson, D.S., 1987. An extraction method for measuring microbial biomass C. *Soil Biol. Biochem.* Vol (19), 703-707.
- Vesterdal, L., Clarke, N., Sigurdsson, B.D., Gundersen, P., 2013. Do tree species influence soil carbon stocks in temperate and boreal forests? *For. Ecol. Manag.* 309, 4–18.
- Von Lütow m., Kögel-Knabner I., Ekschmitt K., Flessa H., Guggenberger G., Matzner E., Marschner B., 2007. SOM fractionation methods: relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biology and Biochemistry*. Vol. 39, 2183-2207.
- Wendt, J. W., & Hauser, S., 2013. An equivalent soil mass procedure for monitoring soil organic carbon in multiple soil layers. *European Journal of Soil Science*. Vol. 64(1), 58–65.
- Weil, R.R., Islam, K.R., Stine, M.A., Gruver, J.B., and Samson-Liebig, S. E., 2003. Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. *American Journal of Alternative Agriculture*. Vol. (18), 3-17.
- Wehrlen, L., 2012. Quels outils pour mieux maîtriser la végétation forestière concurrente ? *Forêt Entreprise*, n° 206, 24-31.
- Wickham, H., 2015. *Stringr: Simple, Consistent Wrappers for Common String Operations*, R package version 1.0.0, available at: <http://CRAN.R-project.org/package=stringr>.
- Wiesmeier, M., Prietzel, J., Barthold, F., Spörlein, P., Geuß, U., Hangen, E., Reischl, A., Schilling, B., von Lütow, M., Kögel-Knabner, I., 2013. Storage and drivers of organic carbon in forest soils of South-East Germany (Bavaria) - implications for carbon sequestration. *For. Ecol. Manag.* 295, 162–172.
- Wollum, A.G., Gomez, J.E., 1970. A conductivity method for measuring microbially evolved carbon dioxide. *Ecology*. Vol. (51), 155-156.
- Zsolnay, A., 2003. Dissolved organic matter: artefacts, definitions, and functions. *Geoderma*. Vol. (113), 187–209.

8. Annexe 2 : Analyse multivariée des impacts à court terme de la PMS

Les acteurs forestiers expriment de fortes attentes pour une évolution des pratiques de plantation, mais un faible niveau de connaissance et d'utilisation des outils innovants sont observés. L'objectif de cette partie était de faire un premier point multifactoriel pour qualifier ces méthodes, grâce à l'ensemble des expérimentations menées dans les réseaux ALTER et PILOTE. Les variables disponibles permettent d'avoir des premiers niveaux de réussite technique, de bilan économique, de suivi de la flore et de bilan carbone.

8.1. Compilation des données techniques et économiques des différents itinéraires

L'année 2018 et le travail d'apprentissage ingénieur d'AgroParisTech de Charles Trouvé ont permis de compiler l'ensemble des données techniques et économiques accumulées dans les suivis des expérimentations des réseaux Alter et Pilote. Avec l'appui de Noé Dumas, Charles Trouvé a rassemblé ces données sous un format commun et extrait de manière générique différents indicateurs (Trouvé, 2018). Les premiers résultats montrent que les outils montés sur mini-pelle comme le Scarificateur Réversible sont efficaces pour contrôler la végétation et aider à la survie des plants mais avec un coût important. Le contexte de Molinie se distingue en nécessitant absolument un billonnage ensuite pour sortir les plants de l'hydromorphie, ce qui n'est pas utile en contexte de fougère aigle. Les dispositifs du réseau Pilote, plus proches des conditions de gestion, le Culti3B se révèle intéressant comme compromis entre réussite technique et coût raisonnable. Une comparaison des méthodes de préparation du site qui se base uniquement sur les performances techniques (survie et croissance des plants) et économiques (coûts totaux à 4 ans) et qui n'intègre pas les performances environnementales et sociales, classe les méthodes utilisant herbicides comme les plus efficaces.

De ce premier travail, Jonathan Pitaud a retenu pour l'analyse multifactorielle les indicateurs suivants :

- Indicateurs économiques : coût cumulé sur 5 ans et part de la première année dans ce coût ;
- Indicateurs techniques : survie des plants à 1, 3 et 5 ans, hauteur à 3 et 5 ans, âge auquel les plants atteignent 3m de haut (seuil auquel les plants sortent de la concurrence de la végétation).

Il est apparu intéressant d'ajouter d'autres indicateurs reflétant l'intensité des interventions réalisées :

- Nombre d'application d'herbicides ou nombre de passages d'engins de PMS et poids des engins, pendant les 5 premières années ;
- Surface travaillée par les engins de PMS et surface perturbée, exprimées en proportion de la surface de la parcelle.

8.2. Valorisation des données de flore

Une première analyse floristique sur les dispositifs Alter, Pilote et Icf réalisée pendant le master de Marine Duperat, encadré par Vincent Boulanger (Duperat, 2017) a permis de montrer la difficulté due à la diversité des contextes, qui est le driver principal des différences de flores observées : à la fois les contextes biogéographiques, mais aussi les types de végétations concurrentes bloquantes (molinie, graminées, fougère) et enfin les essences testées en plantation. Il a été décidé de réaliser une seconde étude en 2018 sur des questions plus ciblées et en organisant les relevés par types de plantes (approches fonctionnelle et végétation ligneuse associée : master de Chloé Lebrun, Lebrun 2018).

Ces deux masters ont permis de compiler les données de flore et d'en tirer quelques indicateurs complémentaires sur la biodiversité.

8.3. Données sur le carbone des sols

A ces deux groupes de données, Edouard Quibel a apporté les données sur le carbone du sol :

- Stocks de carbone de différents horizons : nous avons retenu les stocks 0-60, 0-60 plus la litière ;
- Répartition verticale des stocks, avec la part de stock dans 0-30 ou 0-10 ;
- Hétérogénéité spatiale du carbone dans la parcelle, notamment entre la ligne de plants et l'inter-rang (LP ou IRvsTot).

8.4. Analyse multifactorielle des critères retenus

Nous avons enfin combiné toutes ces données pour en obtenir une première représentation globale.

Le tableau suivant récapitule les grandes catégories de préparation du site pour chaque dispositif expérimental avec le code de l'essence utilisée (CHS : chêne sessile ; PS : pin sylvestre ; PM : pin maritime ; PL : pin laricio ; DOU : douglas). En rouge sont indiqués les cas échantillonnés pour le carbone. Les catégories de préparation du



sol ne sont pas toujours exactement identiques et parfois des nuances sont testées sur un même site. En couleurs sont indiqués les différents contextes :

Fougère aigle Molinie Divers ligneux

La structuration du tableau en fonction des réseaux montre l'évolution des questions entre les deux : le réseau Alter voulait tester les alternatives aux herbicides avec systématiquement des placeaux avec herbicide en référence, tandis que le réseau Pilote voulait élargir les méthodes de préparation mécanique du sol, avec des méthodes tractées moins coûteuses. Les méthodes de lutte contre la fougère ont bien progressé et de nouvelles questions ont été posées dans les contextes à forte concurrence d'autres ligneux.

Réseau	Site	TEM	HERBI	broy	Raz	SR	C3B	BiD	DB10	SSS	SSMF	Labour	Commentaire
Alter	Bord-Louviers	CHS, PL	2 CHS, 2 PL			CHS, PL					CHS, PL		Local : Asulame + broyage sur la ligne
	Escource	CHS, PS	CHS, PS	CHS, PS		CHS, PS					CHS, PS	CHS, PS	
	Haguenau_150	CHS, PS	CHS, PS	CHS, PS		CHS, PS					CHS, PS	CHS, PS	
	Haguenau_32	CHS, PS	CHS, PS			CHS, PS					CHS, PS	CHS, PS	
	Haguenau_35	CHS, PS	CHS, PS			CHS, PS					CHS, PS	CHS, PS	
	Rennes	CHS, PS	CHS, PS	CHS, PS		CHS, PS					CHS, PS	CHS, PS	
	Solferino	CHS, PS	CHS, PS	CHS, PS		CHS, PS					CHS, PS	CHS, PS	
	Villecarter	CHS, PS	CHS, PS	CHS, PS		CHS, PS					CHS, PS	CHS, PS	
Pilote	Bord-Louviers	CHS				2 CHS	2 CHS			CHS		CHS	SR : 150 ou 2000 / C3B : avec ou sans herbicide
	Chaux_1026				PS		PS				PS		
	Chaux_212	CHS			CHS		2 CHS				CHS		C3B : Meri crusher ou razherb avant C3B
	Chinon	PM	PM		PM		PM				PM		
	Compiègne_5251	CHS			CHS					CHS	CHS	CHS	
	Compiègne_9072	CHS			CHS					CHS	CHS	CHS	
	Fontainebleau	CHS			CHS	CHS				CHS		CHS	
	Fretigney	DOU						DOU	DOU		DOU	DOU	
	Hémilly	CHS							CHS		3 CHS		SSMF : en bande ou en placeaux (9*55) et (20*36)
	La_Celle_d'Auvergne	DOU						DOU	DOU		DOU	DOU	
	Rennes	PM					2 PM				2 PM		C3B : Fleco ou razherb avant C3B / SSMF : avec ou sans Razherb
	Toul	PS							PS	PS	PS	PS	
Villiers-Nonain	DOU							DOU		2 DOU	DOU	SSS : sous solage simple ou déporté	

Tableau A2.1 : bilan des sites disponibles pour l'analyse multifactorielle, répartis par modalité de PMS, par essence et en rouge avec mesures de carbone du sol. Sont surlignés les doublons qui sont expliqués par de petites variations locales de modalité, explicitées dans les commentaires.

Les sites les plus récents de Pilote ne disposaient pas d'assez de données pour entrer dans les différentes analyses: La Celle d'Auvergne, Toul, Villiers-Nonains et Hémilly.

Différentes approches ont ensuite été réalisées pour représenter ces données avec différents facteurs, qui ne sont pas des analyses statistiques mais seulement des représentations graphiques de l'organisation des données dans l'espace des variables. Aucune conclusion ne peut être tirée directement de ces graphes à cause du déséquilibre marqué de l'échantillonnage initial : les variables ne sont pas disponibles sur tous les sites, les essences et les contextes sont déséquilibrés, les méthodes de préparation évoluent... l'objectif des approches graphiques qui suivent est donc de voir comment les données s'organisent tout en veillant à bien représenter la distribution de ces informations qui structurent nos réseaux. Seuls quelques exemples sont présentés dans le rapport. Les variables sont toutes centrées et normées.

8.4.1. Première analyse quantitative sur le maximum d'individus

La première représentation par analyse en composante principale a été réalisée sur les variables quantitatives disponibles : survie à 1 an, hauteur à 3 ans, coût sur 5 ans avec part du coût la première année, surface travaillée et surface perturbée. Sur 146 placeaux initiaux (sites * méthode de préparation), il ne reste que 84 cas où ces 6 variables sont disponibles. Chaque donnée manquante élimine la ligne, mais nous avons vérifié que plusieurs modalités différentes étaient disponibles par site avec systématiquement le témoin.

Sur les variables analysées, certaines sont fortement corrélées : surface travaillée et surface perturbée, coût à 5 ans et part du coût la première année. Il est intéressant de noter que la survie est liée à ces variables indicatrices de l'effort d'intervention, tandis que la hauteur à 3 ans est perpendiculaire.

Par rapport à l'échantillon représenté, on observe d'abord une structuration des deux réseaux : les méthodes testées ont évolué et vont vers moins de surface perturbée et un coût plus faible. Il n'apparaît pas de structuration forte entre les trois contextes végétaux, en tout cas entre fougère et molinie.

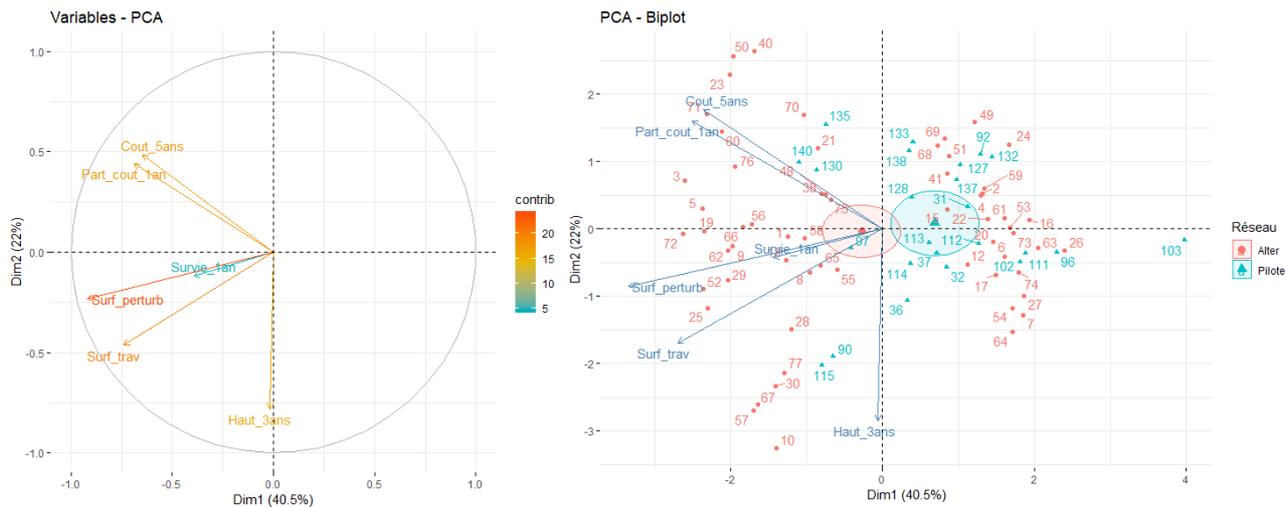


Figure A2.1 : à gauche représentation des variables sur les deux premiers axes de l'ACP sur le maximum d'individus et 6 variables ; à droite, représentation des différents placeaux colorés par réseau, avec les valeurs moyennes et ellipses de confiance à 95% de ces valeurs.

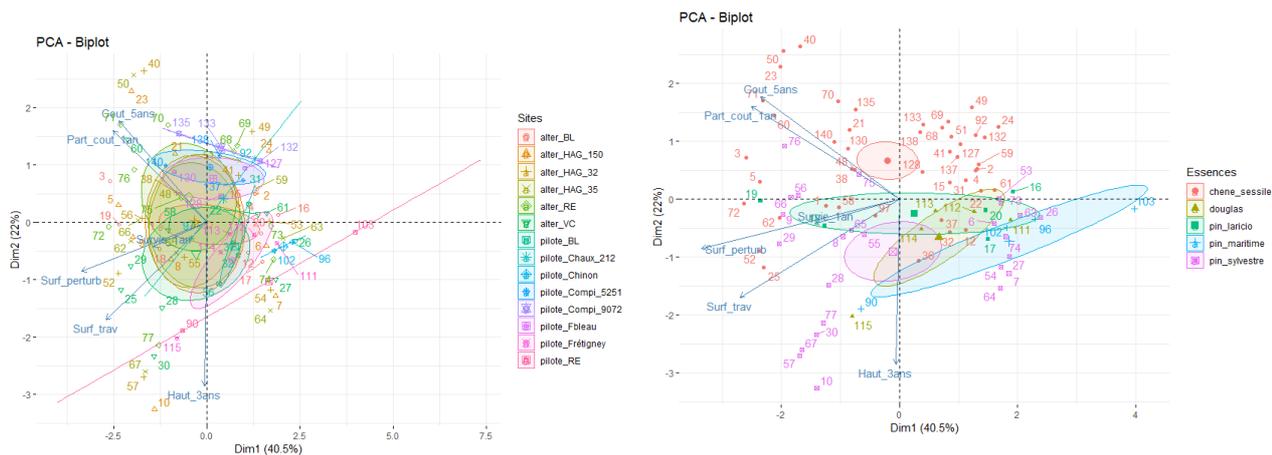


Figure A2.2 : représentation des placeaux sur les deux premiers axes de l'ACP sur le maximum d'individus et 6 variables, colorés à gauche par site et à droite par essence.

Etonnamment il n'y a pas de fortes différences entre les sites, avec juste un certain décalage de quelques sites le long de l'axe lié à la hauteur, indiquant un éventuel effet de fertilité (Pilote-Rennes et Frétigney vers les plus fortes hauteurs, Compiègne pour les moins fortes). Sur ce même axe, un effet essence est plus net, avec des hauteurs plus faibles pour chêne et pin laricio.



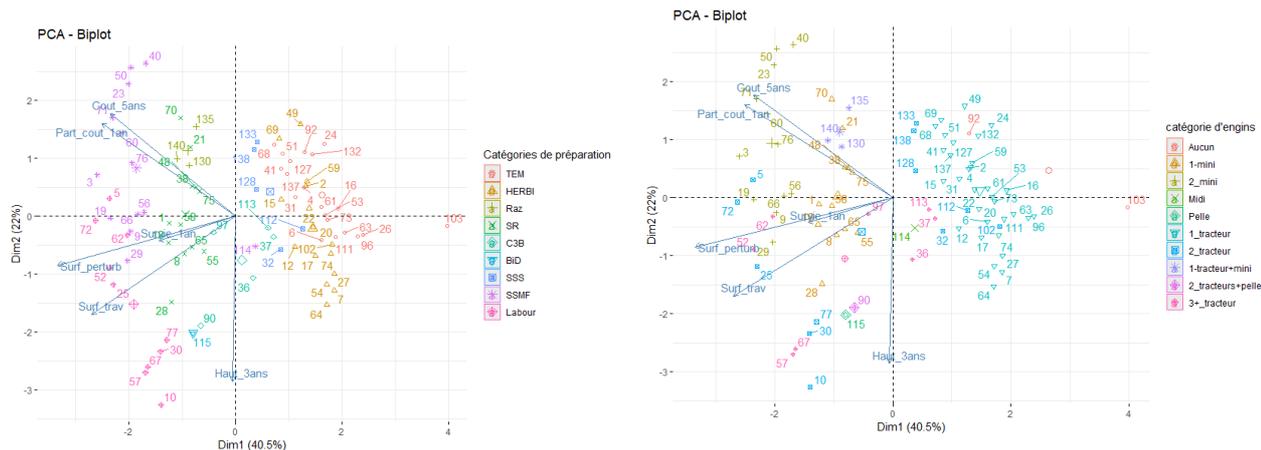


Figure A2.3 : représentation des placeaux sur les deux premiers axes de l'ACP sur le maximum d'individus et 6 variables, colorés à gauche par modalité de PMS et à droite par catégorie d'engins.

Les deux variables sur la préparation et sur les catégories d'engins et nombre de passage sont toutes deux classées par ordre d'intensité. Les témoins et Herbicides sont très à droite avec globalement une moins bonne survie. Labour et SSMF sont vers des coûts plus forts et des surfaces travaillées plus importantes, ainsi qu'une meilleure survie.

Il est intéressant de noter la position très à gauche des outils sur mini pelles.

8.4.2. Seconde analyse quantitative sur le maximum de variables

A l'inverse, on s'intéresse à l'information nouvelle apportée par la tâche 1 sur les bilans de carbone du sol. En privilégiant cette variable tout en gardant les précédentes, on se retrouve avec uniquement 18 placeaux, ce qui est extrêmement réduit mais pour 13 variables. Cette première analyse montre que les différentes variables de stock de carbone sont corrélées entre elles tandis que les deux variables d'hétérogénéité spatiale sont complémentaires. Nous présentons une analyse intermédiaire en ne gardant les stocks de carbone que sur Litière et 0-10 et l'hétérogénéité entre inter-rang et ligne de plants, pour avoir les données carbone sur les 3 sites Pilote complets, et de revenir à 24 placeaux.

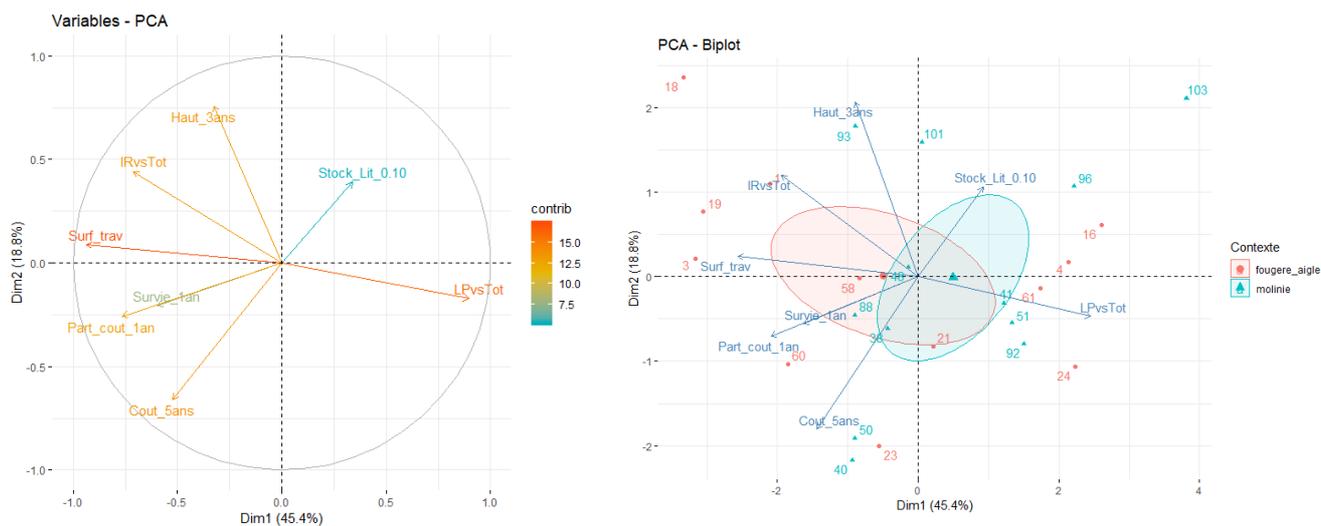


Figure A2.4 : à gauche représentation des variables sur les deux premiers axes de l'ACP sur le maximum de variables et 24 placeaux ; à droite, représentation des différents placeaux colorés par contexte de blocage, avec les valeurs moyennes et ellipses de confiance à 95% de ces valeurs.

Cette fois les contextes se séparent un peu, avec pour la molinie, une survie faible et des stocks plus forts. Il est intéressant d'observer que les deux variables qui donnent une indication de répartition spatiale hétérogène du carbone (LPvsTot et IRvsTot) sont perpendiculaires au stock de carbone : la part de carbone sur la ligne de plants

est opposée à la surface travaillée et à la survie, mais peu liée au stock total. C'est intéressant car cela pourrait évoquer une marge de manœuvre à améliorer les performances techniques sans dégrader le stockage de carbone

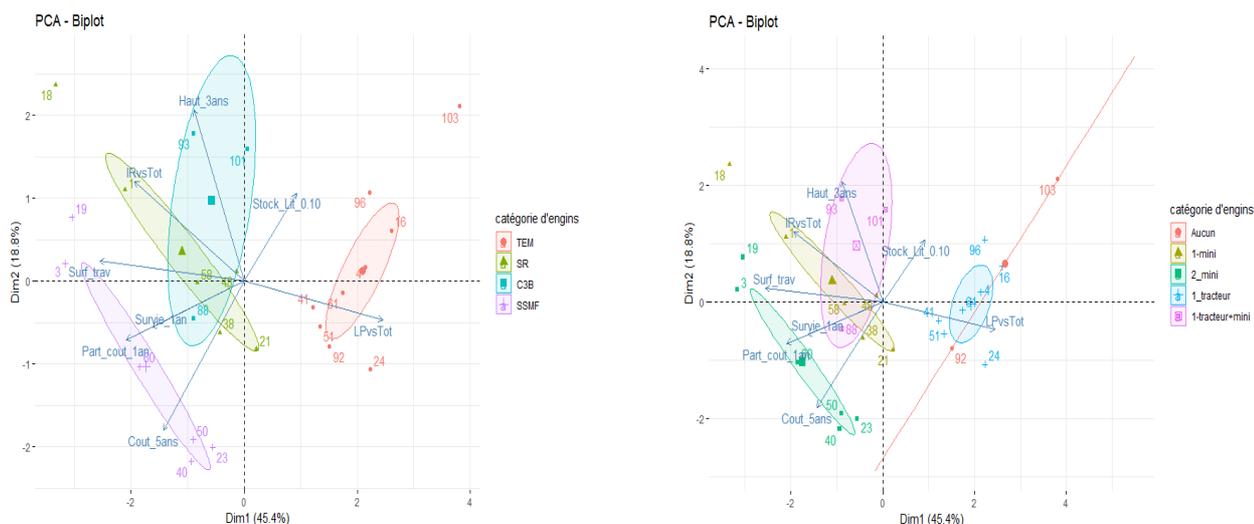


Figure A2.5 : représentation des placeaux sur les deux premiers axes de l'ACP sur le maximum de variables et 24 placeaux, colorés à gauche par modalité de PMS d'engins et à droite par catégorie d'engins.

Cette fois avec peu de modalités testées, les deux graphes de préparation et catégories de passage d'engins se confondent un peu. Sur 24 placeaux, 18 sont du réseau Alter qui montre une structuration assez forte de témoin, puis Scarificateur réversible et ensuite Sous-Soleur Multifonction : vers un coût plus important, une meilleure survie et une baisse de stock de carbone. Le Culti3B est intéressant en étant intermédiaire, à moindre coût et plus faible perte de carbone peut être.

Cependant il manque beaucoup de données pour discuter plus avant.

8.4.3. Troisième analyse avec une approche en groupe des variables : analyse en composantes multiples

Cette fois les variables quantitatives sont regroupées en groupes et cela permet de regarder des relations éventuelles avec les variables catégorielles observées graphiquement précédemment : contexte, catégorie de préparation et catégorie d'engins.

Comme pour l'analyse en composante multiple, on regarde le cas avec le maximum d'individus pour peu de variables puis en ajoutant les variables carbone, un maximum de variables sur moins d'individus.

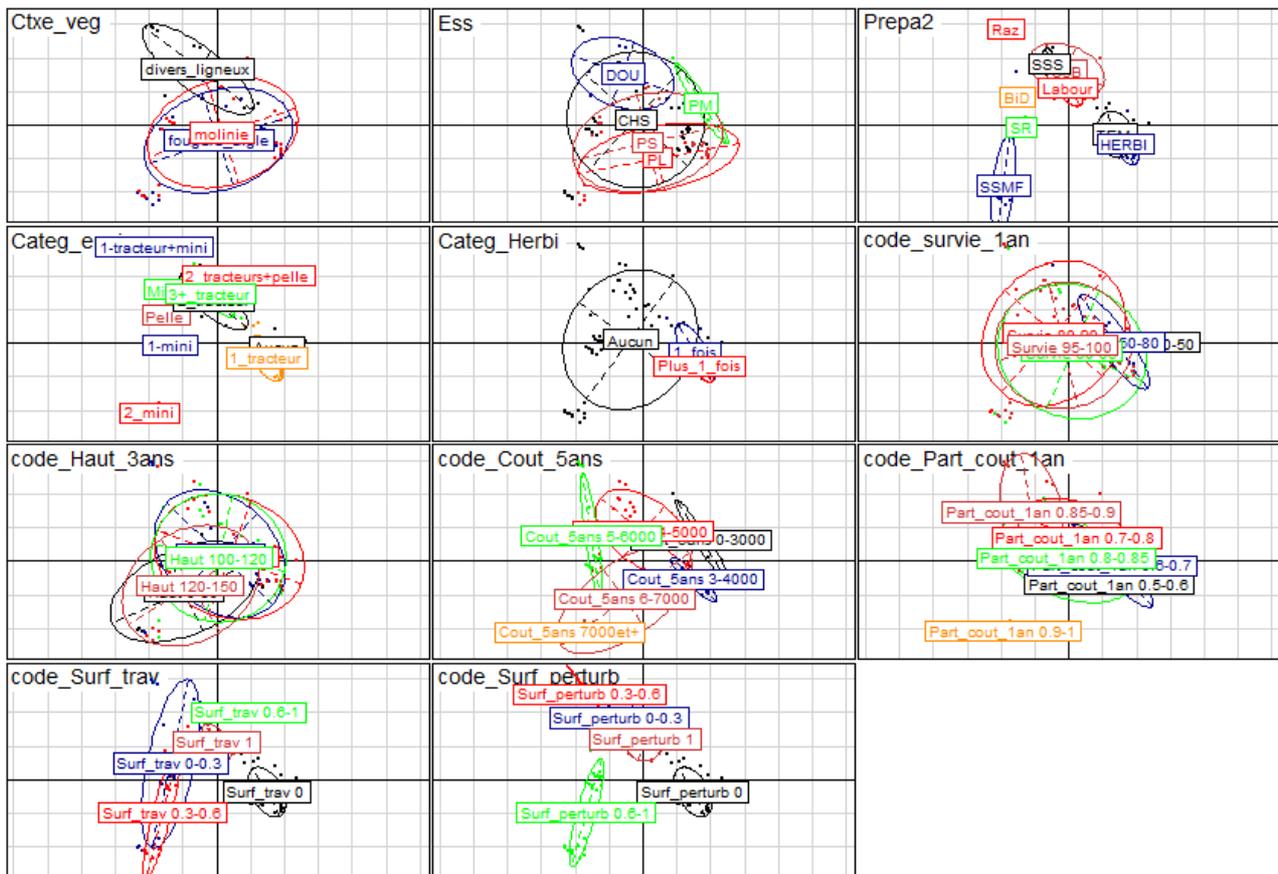


Figure A2.6 : Représentation des catégories de chaque variable sur les deux premiers axes de l'ACM sur le maximum de placeaux et 11 variables.

Les résultats sont concordants avec la première ACP : les témoins sont toujours confondus avec les essais herbicides, pour les passages d'engins les plus faibles, avec des surfaces travaillées et perturbées nulles, et des coûts faibles. La survie a légèrement tendance à être moins bonne mais pas de manière drastique, et les hauteurs ne se différencient presque pas. Ce premier graphe a plus tendance à faire ressortir la structuration de la base de données en terme de modalités testées et d'évolution des méthodes choisies que les variables de réussite technique. Le coût en revanche ressort fortement avec une différence entre les mini-pelles qui ont un coût plus fort mais une surface travaillée plus limitée (indépendamment des témoins et herbicide avec une surface travaillée nulle).

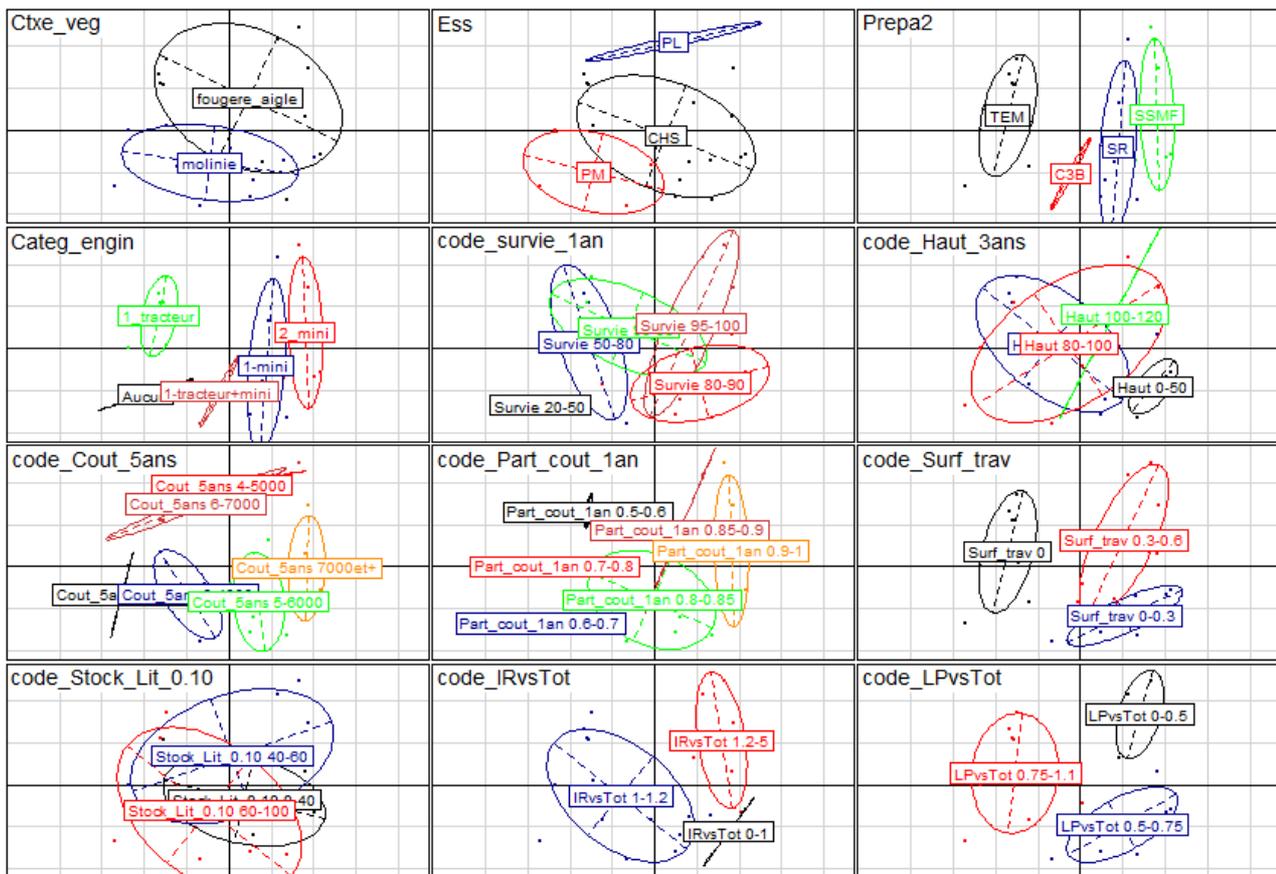


Figure A2.7 : Représentation des catégories de chaque variable sur les deux premiers axes de l'ACM sur le maximum de variables et 24 placeaux.

En ajoutant des variables, on perd autant de placeaux étudiés que pour l'ACP, avec des résultats proches.

Avec moins de sites, les différents groupes se structurent plus fortement avec un gradient encore plus net que pour l'ACP, de témoin vers Culti3B, Scarificateur puis Sous-Soleur Multifonction. Étonnamment les hauteurs sont les plus mauvaises vers SR et SSMF comme l'avait déjà noté Charles Trouvé. La survie en revanche est plus logiquement liée à l'effort de préparation. Cet axe 1 horizontal organise aussi l'hétérogénéité spatiale du carbone (plus homogène à gauche) tandis qu'il n'apparaît pas de fortes différences de stock.



9. Annexe 3 : Evaluation à long terme de l'impact du travail du sol sur le C dans la biomasse et le sol. Approche par modélisation.

Nous présentons ici successivement les approches de modélisation qui ont été conduites afin de simuler l'impact du travail du sol (i) sur l'évolution du stock de C dans la biomasse aérienne d'un peuplement à l'échelle d'une révolution complète et (ii) dans le sol lors des stades juvéniles. Nous reportons également (iii) l'étude qui a été conduite afin d'établir l'approche la plus pertinente pour conduire la modélisation du stock de C dans le sol à l'échelle d'une révolution forestière.

9.1. Modélisation de l'évolution des stocks de C dans la biomasse d'un peuplement de chêne sessile sur une révolution complète

9.1.1. Simulations des itinéraires sylvicoles

L'hypothèse étant faite que le travail du sol favorise la croissance des plants au stade juvénile, un travail prospectif de séquestration de carbone dans la biomasse aérienne a été mené sur une révolution forestière complète. Ce travail a fait l'objet d'un stage de M2 (stage de Sonia Carmon), dont le but était d'évaluer l'effet de différents itinéraires de préparation du sol sur la dynamique de la biomasse aérienne à partir de modèle de croissance Fagacées (Le Moguedec et Dhôte, 2012) repris dans le module Sydy (Philippe Dreyfus) de la plateforme CAPSIS (Dufour-Kowalski et al. 2011). Les simulations ont été initialisées à partir d'un peuplement de chêne sessile dans des conditions stationnelles proches de celles de nos dispositifs de Chaux et pour lequel nous disposons d'inventaires complets en circonférence et des données de fertilité (couple âge/hauteur dominante) (peuplement en FD de Citeaux, 21).

Plusieurs itinéraires ont été simulés :

- Un itinéraire en régénération naturelle, de référence
- Un itinéraire en plantation à 1500t/ha, dont la densité initiale est ajustée en fonction du taux de mortalité observé dans les différentes modalités de travail du sol du dispositif PILOTE de Chaux (RACB, MECB, TEM)
- Un itinéraire en plantation à 1500t/ha sans travail du sol, avec une mortalité moyenne de 22%, observée sur les essais des réseaux ALTER et PILOTE, inférieure à celle du témoin de Chaux

Les itinéraires sylvicoles sont simulés en se basant sur la sylviculture classique du chêne en futaie régulière en zone continentale, pour la classe de fertilité 2 (Guide de la chênaie continentales, Sardin et al, 2008), avec un diamètre d'exploitabilité à 75 cm et une récolte finale en 3 interventions échelonnées sur 10 ans (2 secondaires + finale). Pour le témoin du dispositif de Chaux, la mortalité s'élève à 80%, l'itinéraire complet a donc été ajusté pour une densité initiale de 350 t/ha, cas irréaliste en gestion, et le diamètre d'exploitabilité fixé à 65cm (cas des mauvaises qualités). Ce dernier cas conduit à une révolution plus courte et à une perte de production. Figure 1

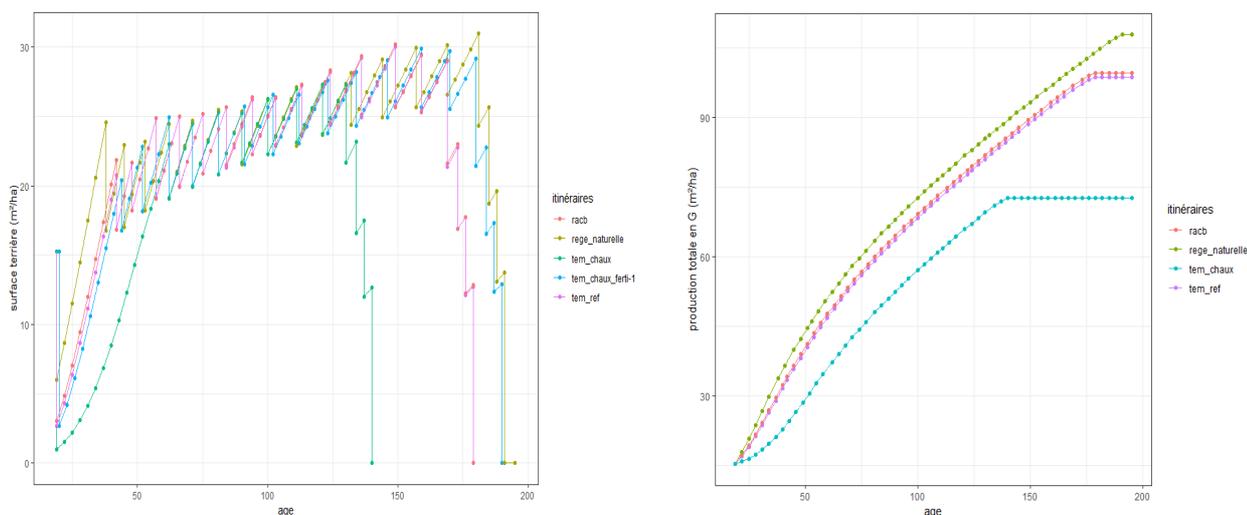


Figure A3.1 itinéraires complets en surface terrière (gauche) et production totale en surface terrière (droite)

Enfin, l'analyse des données de croissance juvénile du dispositif PILOTE de Chaux met en évidence un décalage de 1 à 2 ans entre le témoin et les modalités les plus efficaces en termes de croissance (RACB et MECB). On a donc fait l'hypothèse d'une fertilité moindre d'1 an pour les témoins dans le cadre des simulations, ce qui entraîne un allongement de presque 10 ans de la révolution. De même on a fait l'hypothèse d'un gain de 2 ans pour les meilleures modalités de préparation du sol.

9.1.2. Calcul de biomasse et de la séquestration moyenne de carbone

La biomasse et le carbone sont issus de la chaîne de calcul mise au point dans le cadre des projets RESPIRE et GERBOISE (Lauvin, 2018, Respire, 2019, Gerboise, 2018) : calcul du volume par les fonctions issues du projet Emerge, selon les découpes 0, 4, 7 et 22 cm à partir des variables dendrométriques (D130, Htot, Hdec) (Deleuze et al., 2014, RDVT 44, p22-32) puis conversion en biomasse (en t/ha) par multiplication du volume de chaque compartiment par l'infradensité moyenne du chêne de 0.55, établie par Jean-Luc Dupouey dans Carbofor, mis à jour par F. Longuetaud (projet Emerge). La quantité de carbone par compartiment est déterminée à partir des équations établies par Jean-Pierre Renaud (Lauvin 2018) pour le projet Gerboise sur la base des modèles pour le hêtre de Wernsdörfer et al. 2014. Une séquestration moyenne de carbone a été ensuite calculée sur la révolution entière. La séquestration de carbone moyenne est de 62 t/ha pour la plupart des itinéraires, avec une valeur légèrement supérieure pour l'itinéraire « régénération naturelle », plus long. La valeur la plus faible est celle du cas du témoin du dispositif de Chaux avec une forte mortalité et une révolution beaucoup plus courte, qui conduit à une séquestration moyenne de 50t/ha (Figure 2) L'hypothèse de gain de fertilité sur l'itinéraire en plantation conduit à une augmentation de la production de biomasse et à une très légère augmentation de la séquestration moyenne de C car la rotation est raccourcie (diamètre d'exploitabilité atteint plus tôt).

On peut soulever certaines limites à l'utilisation de Fagacées pour ces simulations :

- Pas de prise en compte du recru ligneux (taillis, sous-étage), notamment dans les phases d'ouverture du peuplement
- Pas de possibilité d'initialiser un peuplement en plantation « réaliste » au stade juvénile et manque de référence/calibration pour les plantations : Fagacées sous-estime la surface terrière initiale après la mise à densité de 1500 t/ha. Cela conduit au décalage entre les itinéraires en plantation et l'itinéraire en régénération naturelle.

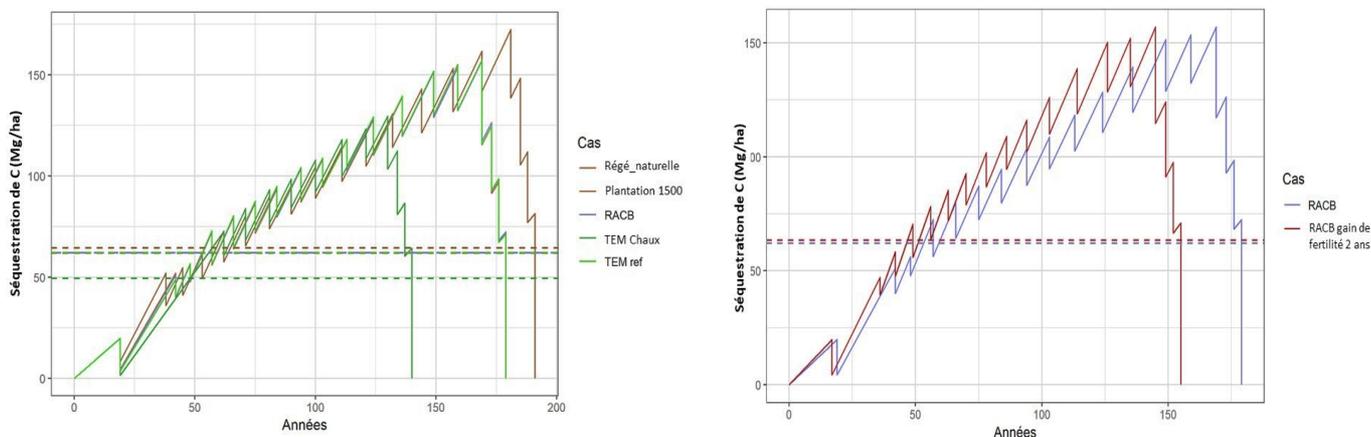


Figure A3.2 séquestration de C (t/ha) sur une révolution complète pour les itinéraires testés (gauche) et séquestration de carbone avec hypothèse d'un gain de fertilité (2 ans sur la H0) dû au travail du sol (droite)

9.2. Modélisation de l'impact du travail du sol sur l'évolution des stocks de C dans la biomasse et sols lors des stades juvéniles

Nous avons ici mis au point une première version de modèle de dynamique du C dans les sols forestiers soumis au travail du sol à la plantation. Le modèle a été calibré en utilisant les données expérimentales du site de PILOTE Chaux uniquement sur les stades juvéniles. Il simule les apports de matière végétale différenciés en fonction du travail du sol, et considèrera prochainement la redistribution du C sur le profil.

9.2.1. Structure du modèle de dynamique du carbone du sol intégrant le travail du sol

Les hypothèses de fonctionnement du modèle sont les suivantes :

- Le modèle distingue trois horizons: la couche 0-10 cm combinée avec l'horizon organique, la couche 10-30cm et la couche 30-60cm.



- Pour chaque horizon, on définit deux compartiments de carbone organique : un compartiment qui se décompose rapidement et un compartiment plus stable. Un paramètre régit l'allocation des entrées vers les compartiments labile et stable.
- Le travail du sol est intégré dans la structure du modèle comme il suit :
 - ✓ le travail du sol n'affecte pas les vitesses de minéralisation.
 - ✓ le travail du sol redistribue les matières organiques au sein du profil de sol. Les données permettant de calibrer les paramètres de redistribution sont en cours de traitement à l'heure où nous rédigeons ce rapport. Les simulations présentées ne tiennent donc pas compte de cette redistribution
 - ✓ Le travail du sol a un effet sur les entrées de carbone au sol, en impactant la croissance des jeunes plants et de la végétation concurrente.
- On considère que le système est à l'état stationnaire avant la coupe.

9.2.2. Données d'entrée du modèle de dynamique du carbone du sol intégrant le travail du sol

Il est nécessaire de renseigner les apports aériens et souterrains des plants et de la végétation concurrente en fonction de l'âge de la plantation. La distribution des apports racinaires sur le profil de sol est identique à la distribution de la biomasse racinaire donnée par Jobbagy et Jackson (2000)

Il est également nécessaire d'initialiser le modèle avec le contenu en C organique des différents horizons avant la coupe.

9.2.3. Essai de calibration du modèle sur le site PILOTE de Chaux

Nous avons réalisé un premier essai de calibration du modèle sur le site PILOTE de Chaux pour lequel nous disposons de données de C organique du sol à 5 ans après le travail du sol, ainsi que de données sur un peuplement mature, considéré comme l'état initial et stationnaire du sol forestier avant coupe. Sur ce dispositif PILOTE, nous disposons également du suivi annuel de la croissance en hauteur des plants de chêne et de la dynamique de la végétation concurrente (de 2013 à 2018). Les apports de rémanents et de résidus racinaires liés à la coupe ont été négligés. Les données concernant ces apports seront disponibles prochainement.

Les simulations ont été réalisées pour les 2 modalités pour lesquelles les sols ont été échantillonnés : modalité « témoin » sans travail du sol et modalité « RACB » (= razherb + culti 3B).

9.2.3.1. Estimation des apports de litière de chêne (Figure 3 a)

La biomasse des jeunes plants a été estimée à partir de la hauteur des plants de chaque placeau échantillon (1 placeau = 9 plants sur 24 m²), 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 a₁ et b₁ 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 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).

Nous avons ensuite considéré que pour les peuplements juvéniles, la litière aérienne alimentant le sol de surface correspondait à 80% de la biomasse aérienne totale.

La litière aérienne du stade mature a été estimée à partir de la surface terrière du peuplement avant la coupe finale par une relation logarithmique (équation GERBOISE)

Enfin, d'après Mao et al. 2019, nous avons fait l'hypothèse que les apports racinaires du jeune Chêne sont équivalents à ceux de la litière aérienne.

9.2.3.2. Estimation des apports de litière de la végétation concurrente (Figure 3 b et c)

La biomasse aérienne de la végétation concurrente a été estimée à partir des relevés de recouvrement et hauteur de la végétation, effectués annuellement sur des placeaux d'1 m² sur la ligne de plantation pour le modalités témoin et travail du sol. 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 littérature¹ sont ensuite utilisées pour chaque groupe d'espèces : de la forme $biomasse = a * phytovolume^b$ pour la molinie et la fougère (Gonzalez et al. 2013) ; de la forme $a * phytovolume + b * phytovolume^2$ 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). Nous avons fait l'hypothèse que seul un quart de la biomasse racinaire de la végétation concurrente alimente le sol chaque année comme proposé par Van Vuuren et al (1993). Pour la modalité « peuplement initial mature », nous avons considéré une biomasse de végétation concurrente réduite de moitié par rapport aux observations moyennées sur le peuplement témoin.

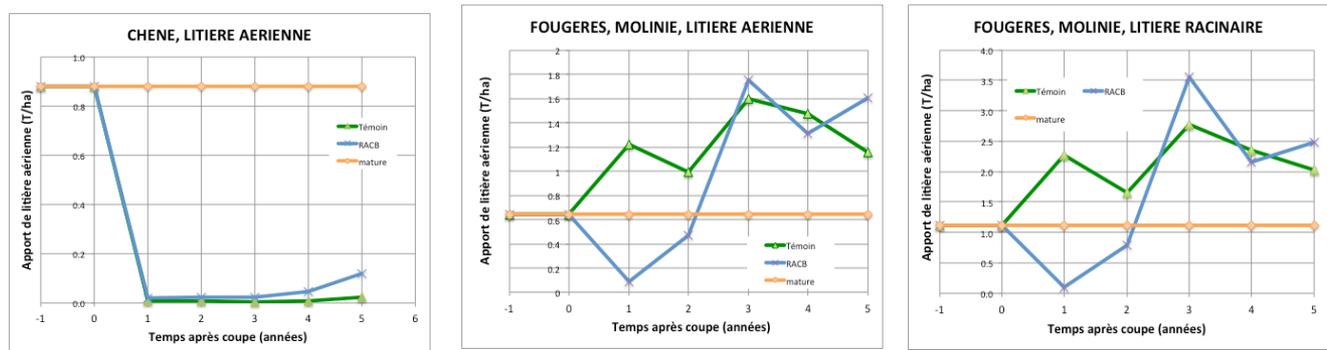


Figure A3.3 (a) Apports de litière aérienne des chênes – la quantité d'apports racinaires est identique ; (b) apports aériens de la végétation concurrente ; (c) apports souterrains de la végétation concurrente

9.2.3.3. Premiers résultats de la calibration de l'évolution du C du sol sur le site PILOTE de Chaux sur cinq années après coupe, perspective d'évolution du modèle

La calibration du modèle a été réalisée en ajustant le paramètre d'allocation des entrées racinaires de façon à obtenir l'état stationnaire pour les données obtenues sur le peuplement mature présent avant la coupe. La taille relative des compartiments labiles et stables et leurs constantes de décomposition sont celles publiées dans les travaux de méta-analyse de Balesdent et al (2018), parfois très légèrement modifiées. Les paramètres utilisés sont présentés en table 1 et les résultats sur la figure 4.

	caractérisation des compartiments					entrées racinaires			
	constante de décomposition (an ⁻¹) [§]		temps moyen de résidence (années) [§]		part relative des compartiments à l'équilibre [¶]	distribution des entrées racinaires [¶]		allocation des entrées racinaire vers le compartiment labile	
	labile	stable	labile	stable		Chêne	végétation concurrente		
horizon 0-10 cm	0.167	0.007	6	152	43%	57%	30%	26%	95%
horizon 10-30 cm	0.200	0.005	5	212	8%	92%	42%	41%	77%
horizon 30-60 cm	0.200	0.002	5	404	11%	89%	28%	33%	90%

* cet horizon comprend également la couche organique de surface

§ valeurs d'après Balesdent et al., 2018

¶ valeurs légèrement modifiées à partir de Balesdent 2018 afin d'être à l'état stationnaire sur le peuplement mature (valeurs Balesdent 2018 : 47-53 / 17-83 / 8-92)

¶ valeurs d'après Jobbàgy et Jackson 2000

Table A3.1 : valeurs des paramètres du modèle

Les valeurs des paramètres permettent bien de simuler un peuplement mature à l'état stationnaire : les stocks ne varient pas pour une simulation sur un siècle (Figure 4a).

Les simulations de la dynamique du stock de C sur le sol sous peuplement juvénile ont été effectuées sur sept ans, la coupe ayant été effectuée juste après le temps zéro. Elles permettent de visualiser un petit effet de la coupe deux et trois ans après. Il est lié ici à la diminution des apports après la coupe, plus marquée initialement pour la modalité travail du sol. (Figure 4b et c).

Les observations de terrain réalisées cinq ans après la coupe sont très hétérogènes et ne montrent pas de tendance significative. Il semble toutefois que les simulations du traitement travail du sol RACB ne permettent pas de reproduire la tendance d'une légère diminution du stock de surface et d'une légère augmentation du stock de profondeur.

Sur la base de ces premières simulations très exploratoires, nous allons dans l'année qui vient pouvoir bénéficier de données expérimentales complémentaires afin de valider la structure du modèle, affiner la calibration et procéder à sa validation. Les données expérimentales de partition du C entre compartiments labile et stable nous permettront notamment de mieux ajuster les simulations avec les observations et de pouvoir définir des paramètres



de transfert entre horizons. Les données de biomasse microbiennes nous permettront de valider l'hypothèse de maintien des constantes de décomposition malgré le travail du sol.

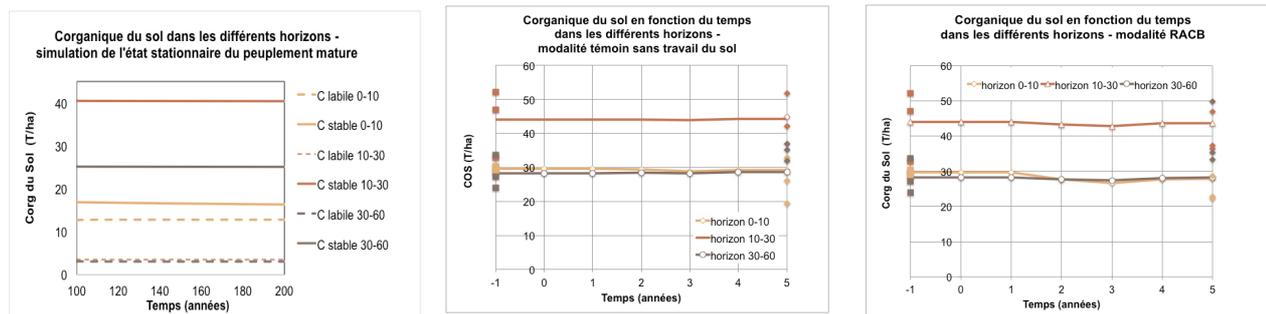


Figure A3. 4: simulations réalisées par le modèle. a- état stationnaire du peuplement mature réalisé sur un siècle. b- peuplement témoin, c peuplement avec travail du sol par RACB. La coupe à lieu juste après le temps 0. On considère qu'il n'y a pas d'apports de rémanents de coupe, on néglige également les apports des souches et du système racinaire. Les points correspondent aux données observées, les courbes aux données simulées.

Enfin, le modèle sera testé également sur le site de Bord Louviers, en adoptant une procédure d'ajustement systématique des paramètres (par minimisation du critère RMSE...).

9.3. Extension du modèle de l'impact du travail du sol sur la dynamique du C du sol à l'échelle d'une révolution forestière

Pour étendre le modèle jusqu'au stade mature, deux options se présentent : (i) considérer que le stock de C du sol forestier tend au terme d'une révolution forestière vers une quantité maximale, liée aux caractéristiques pédologiques du sol (Hassink, 1997; Angers, 1998; Stewart et al., 2007), quel que soit le mode de travail du sol adopté (hypothèse saturation en C du sol) ; (ii) considérer qu'à l'échelle d'une révolution forestière le travail du sol impacte durablement les entrées de C au sol et la redistribution des stocks sur le profil et conduit donc à des stocks distincts en fonction des modalités (hypothèse impact durable).

Nous avons mené un travail d'analyse bibliographique au début du projet sur l'hypothèse première de saturation en C organique des sols. L'action stabilisante des minéraux du sol sur le C organique est établie depuis plus de deux siècles (Thaer, 1809) et est prise en compte dans les modèles de dynamique du carbone organique du sol depuis des décennies (Hélin & Dupuis, 1945). Ce concept permet d'expliquer pourquoi, malgré l'augmentation des apports de C dans le sol, la quantité de C organique associée aux fractions fines (qui contiennent les minéraux) n'augmente pas systématiquement. La synthèse bibliographique que nous avons menée nous a conduit à rejeter le concept de saturation en carbone des particules fines du sol comme indicateur du potentiel de stockage du C dans le sol. Nous avons publié cette opinion dans *Biogéoscience Discussions* (Barré et al. 2017). Un des arguments est que les fractions plus grossières du sol peuvent aussi stocker du carbone, souvent sous forme de débris végétaux dont la quantité n'est pas *a priori* limitée. Le carbone y est moins protégé mais il peut représenter plus de 20% du C total du sol. C'est souvent ce C associé aux fractions grossières dont le stock varie après un changement d'usage ou de pratiques.

Nous choisissons donc la seconde option (impact durable) pour étendre le futur modèle simulant l'impact du travail du sol sur la dynamique du C du sol aux échelles de temps de la révolution forestière dans le cadre des travaux de thèse d'Edouard Quibel qui se termineront un an après la fin du projet CAPSOL.

9.4. Bilan de l'approche d'intégration dans le temps

Cette seconde partie de la tâche 3 permet de proposer une première approche dynamique du carbone sur une révolution complète.

Concernant le carbone aérien, des calculs sur base de modélisation avaient déjà été conduits, mais le travail de Sonia Carmon montre ici les différences que l'on peut attendre en fonction de différentes hypothèses de survie des plants et de croissance initiale. Sans modification de fertilité, le bilan carbone n'est pas différent. En pratique avec moins de plants, la croissance se répartit sur moins de tiges finales mais le bilan total n'est pas affecté. Le cas étudié ici en forêt de Chaux avec une très faible reprise des plants du témoin est sans doute en limite du modèle de croissance utilisé, mais en même temps la mortalité observée sur ce site était vraiment extrême et non reproduite

sur d'autres sites. L'hypothèse en baissant à plus long terme la fertilité, montre une diminution du stock moyen final de 1,2%, ce qui reste très faible.

Concernant le carbone du sol, cette tâche a permis d'élaborer un premier modèle de dynamique du carbone, relié aux apports de carbone de la biomasse aérienne. Le maximum de perte observée est à 3 ans d'après le modèle, alors que les mesures ont été faites à 5 ans. Il n'est pas possible à ce stade de réaliser des simulations complètes sur la révolution du peuplement, la différence de carbone du sol entre témoin et Culti3B est de l'ordre de 0,7 %.

Dans les deux cas ces différences sont très faibles et très en deçà des intervalles de confiance des mesures (voir tâche 1).

Ces différences sont principalement le reflet des résultats de la tâche 1, c'est-à-dire assez faibles et d'autant plus ramenées à l'échelle d'une révolution complète.

A titre de comparaison, la mesure du site expérimental installé il y a 20 ans en forêt de Chaux qui n'a pas été considéré dans les travaux de la tâche 3.2 car il a subi un autre type de travail du sol (labour en plein avec billonnage) montre un stock très en deçà de tous les autres sites. Un autre site expérimental ONF en forêt des Ardennes (site ICIF en forêt de Franc-Bryas) a été aussi l'objet de mesures de carbone du sol après un travail intensif du sol (arrachage de souches, broyage, labour) montrant un niveau 4 ans après revenu au niveau d'un sol agricole (analyse carbone microbien d'Isabelle Bertrand, INRA, non publié).

Ces deux exemples montrent bien l'importance du choix de préparation du sol pour l'installation d'un nouveau peuplement : une variabilité très forte apparaît. Les premières analyses montrent ici un lien important entre l'hétérogénéité du carbone et les surfaces travaillées faibles. Cette hétérogénéité peut permettre de maintenir le stock total tout en assurant une bonne efficacité technique. Ces premiers résultats et la construction du modèle pour les expliquer demandent maintenant à être approfondis.

9.5. Références bibliographiques

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>.

Balesdent, Jérôme, Isabelle Basile-Doelsch, Joël Chadoeuf, Sophie Cornu, Delphine Derrien, Zuzana Fekiacova, et Christine Hatté. 2018. « Atmosphere–Soil Carbon Transfer as a Function of Soil Depth ». *Nature* 559 (7715): 599-602. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0328-3>.

Barré, Pierre, Denis A. Angers, Isabelle Basile-Doelsch, Antonio Bispo, Lauric Cécillon, Claire Chenu, Tiphaine Chevallier, Delphine Derrien, Thomas K. Eglin, et Sylvain Pellerin. 2017. « Ideas and Perspectives: Can We Use the Soil Carbon Saturation Deficit to Quantitatively Assess the Soil Carbon Storage Potential, or Should We Explore Other Strategies? » *Biogeosciences Discussions*, septembre, 1-12. <https://doi.org/10.5194/bg-2017-395>.

Dufour-Kowalski, Samuel, Benoît Courbaud, Philippe Dreyfus, Céline Meredieu, et François Coligny. 2011. « Copsis: an open software framework and community for forest growth modelling ». *Annals of Forest Science*, novembre. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0140-9>.

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>.

Jobbagy, Esteban G, et Robert B Jackson. 2000. « The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation ». *Ecological Applications* 10 (2): 14.

Mao, Zhun, Delphine Derrien, Markus Didion, Jari Liski, Thomas Eglin, Manuel Nicolas, Mathieu Jonard, et Laurent Saint-André. 2019. « Modeling Soil Organic Carbon Dynamics in Temperate Forests with Yasso07 ». *Biogeosciences* 16 (9): 1955-73. <https://doi.org/10.5194/bg-16-1955-2019>.

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>.

Wernsdörfer, Holger, Mathieu Jonard, Astrid Genet, Arnaud Legout, Claude Nys, Laurent Saint-André, et Quentin Ponette. 2014. « Modelling of nutrient concentrations in roundwood based on diameter and tissue proportion: Evidence for an additional site-age effect in the case of *Fagus sylvatica* ». *Forest Ecology and Management* 330 (octobre): 192-204. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.07.006>.



L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition Ecologique et Solidaire et du ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

<https://www.ademe.fr/>

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous un regard.



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

Projet CAPSOL: Dynamique du Carbone et de la croissance après Préparation du SOL dans les plantations forestières

La plantation forestière suppose des opérations sylvicoles spécifiques, notamment une préparation mécanisée du site (PMS) qui favorise le développement des plants. Des méthodes innovantes, utilisant des engins mécaniques légers, ont été développées mais leurs performances restent encore mal caractérisées.

Le projet Capsol avait pour objectifs:

- D'étudier les effets de la PMS avant plantation sur deux composantes du bilan de carbone : le carbone organique du sol (COS) et la croissance des arbres.
- D'utiliser les résultats obtenus pour alimenter une évaluation plus complète des méthodes de PMS et des itinéraires techniques de conduite des plantations.
- D'élaborer un programme de transfert vers la filière forestière intégrant les nouvelles connaissances scientifiques et techniques.

L'étude a montré que la PMS a un effet négatif sur le stock de COS, limité à la zone travaillée. La réalisation d'un travail localisé dans la parcelle permet de réduire considérablement le déstockage de COS total à l'échelle de la parcelle en comparaison à des méthodes appliquées en plein. Les outils de PMS induisent une redistribution horizontale des COS à l'échelle de la parcelle et, dans la zone travaillée, une redistribution verticale dans le profil de sol. Un modèle de dynamique du carbone dans la biomasse et dans le sol a été calibré, qui permet de retrouver les observations effectuées dans les expérimentations et de simuler la dynamique à plus long terme.

L'analyse des performances multiples (croissance et survie des plants, coût des itinéraires, intensité des perturbations induites, impacts sur le bilan carbone et la biodiversité floristique) a permis d'identifier les méthodes prometteuses et, pour chacune d'elles, les performances qui doivent être améliorées.

Une démarche d'évaluation multicritère a été initiée, qui a abouti à une description des attentes des principaux acteurs concernés par la plantation, permettant de dégager des pistes de travail prioritaires, en particulier une meilleure prise en compte des performances sociétales des méthodes de plantation.

Les acteurs forestiers expriment de fortes attentes pour une évolution des pratiques de plantation, mais un faible niveau de connaissance et plus encore d'utilisation des outils innovants par les praticiens sont clairement observés. Poursuivre les actions et élargir l'effort de formation actuel pour essayer de toucher de nouvelles personnes, semble indispensable.

L'absence de mise en réseau des acteurs est apparue comme un frein fort à l'adoption des outils. Néanmoins, différents leviers ont été proposés aux praticiens pour y remédier, et aucun n'a convaincu. Ceci suggère qu'au-delà des innovations techniques sur les outils, des innovations sont également nécessaires dans l'organisation des interactions entre acteurs, passant par l'invention de nouvelles formes de collaboration et par l'acceptation de ces nouveautés par les acteurs concernés.



www.ademe.fr

