

« Etude de faisabilité de l'utilisation de Bois Raméal Fragmenté au sein d'exploitations suisses »

*Innovation technique au service
de l'agriculture et du climat*



<http://www.jardineravecjeanpaul.fr>

Thèse de bachelor présentée par :
Lucas ARMINJON

Pour l'obtention du titre Bachelor of Science HES-SO en Agronomie

Août 2019

Responsable du travail de Bachelor et superviseur :
Pascal BOIVIN (Professeur)
Dr. Ophélie SAUZET

Haute École du paysage, d'ingénierie et d'architecture (HEPIA)
Filière Agronomie

Déclaration

Ce travail de Bachelor est réalisé dans le cadre de l'examen final de la Haute École du Paysage, d'Ingénierie et d'Architecture de Genève, en vue de l'obtention du titre de Bachelor HES en Agronomie.

L'étudiant assume la responsabilité du travail et accepte, le cas échéant, la clause de confidentialité. Par contre, les conclusions et les recommandations qu'il y formule, sans préjuger de leur valeur, n'engagent ni les responsabilités de l'auteur, ni celle du Prof. HES responsable TB ni celle du superviseur, des experts et de hepia.

« J'atteste avoir réalisé seul le présent travail, sans avoir utilisé des sources autres que celles citées dans la bibliographie »

Fait à Genève, le 22 août 2019

Lucas Arminjon

Remerciements

Je tiens à remercier, tout d'abord, mon responsable de travail de Bachelor, Pascal Boivin, pour m'avoir permis de travailler sur ce sujet en faisant le lien entre le projet « Terres Vivantes » et ma proposition d'étude. Je le remercie également pour le temps qu'il m'a accordé pour la supervision de ce travail et les conseils prodigués.

Je remercie également ma superviseur, Ophélie Sauzet, qui m'a suivi tout au long de ce travail avec enthousiasme et détermination. Également pour s'être rendue disponible pour répondre à mes nombreux questionnements et pour m'avoir permis de mener à bien cette étude.

Merci au conseiller agroenvironnemental, Luc Scherrer, d'avoir intégré avec sa collègue, Amélie Fietier, une thématique BRF au sein du projet « Terres vivantes » et de m'avoir permis de travailler sur ce sujet pour mon projet de fin d'études. Son approche de terrain ainsi que sa grande connaissance du système agricole jurassien, m'ont été d'une grande aide. Je le remercie également pour m'avoir mis en contact avec les deux exploitations d'étude ainsi que pour son suivi lors de la première journée de terrain.

De plus, j'aimerais remercier le personnel du laboratoire des sols qui m'ont rendu service à plusieurs reprises, notamment :

Aline Chambettaz et Sylvain Mischler pour avoir réalisé mes analyses d'échantillons sur ce nouveau type d'amendement ;

Adrien Matter pour sa disponibilité, pour m'avoir fourni le matériel nécessaire et pour m'avoir formé aux analyses de laboratoire notamment pour les densités apparentes.

Merci à Antoine Besson pour son approche théorique sur la thématique des bilans humiques et pour ses précieux conseils.

A Florian Burdet pour son grand enthousiasme et pour m'avoir aiguillé concernant l'analyse économique.

Merci à Alexandre Monod pour ses informations concernant les plantes indigènes d'écotype CH.

Pour finir, j'aimerais transmettre mes sincères remerciements aux deux exploitants qui ont accepté de m'accueillir dans leur exploitation pour réaliser l'étude :

à Joan Studer pour m'avoir hébergé les jours de venues sur le terrain, pour son implication dans cette thématique d'étude, pour son temps accordé et sa vision du monde agricole ;

à Thomas Vuillaume, pour son accueil chaleureux, son temps consacré ainsi que son implication à cette étude.

Résumé

La teneur en matière organique des sols agricoles du monde et en Suisse est dans la majorité des cas en dessous des exigences minimales (MO/A = 17 %), menaçant alors leur stabilité structurale. La séquestration de carbone dans les sols peut permettre de répondre aux plus grands défis de demain, à savoir restaurer la fertilité des parcelles, donc assurer la sécurité alimentaire, limiter l'intensité du réchauffement climatique et réduire son impact sur l'agriculture en redonnant de la résilience au système agricole. Une des pratiques les plus importantes de la séquestration de carbone dans les sols est l'apport d'amendements organiques. Ces ressources sont limitées.

Le bois raméal fragmenté (BRF) est un amendement organique sous forme de copeaux de bois. Il est constitué de rameaux et de petite branches inférieures à 7 cm de diamètre. Le BRF peut constituer un amendement complémentaire à ceux déjà employés en agriculture. Ce dernier est peu utilisé actuellement car la ressource est parfois difficile à trouver, la mise en place de cette pratique demande un effort de la part de l'exploitant et son intérêt n'a pas suffisamment été démontré par rapport à d'autres amendements comme le compost. Néanmoins, la majorité des études concluent que des effets positifs sur le sol et les cultures existent. On retrouve parmi ces bienfaits la faculté de cette matière organique à former une grande proportion de sa masse en humus stable qui se traduit par un bon potentiel de séquestration de carbone. Le pouvoir restructurant de cet amendement, l'augmentation de la réserve utile du sol et l'augmentation de l'efficacité de l'utilisation des ressources par les racines des plantes sont d'autres avantages identifiés lors des études.

Ce travail de fin d'étude participe à répondre à la demande de la « Fondation Rurale Interjurassienne » (FRI) qui est à l'origine du projet « Terres Vivantes » qui vise à améliorer la qualité structurale des sols. Les deux études de cas que nous avons effectuées, ont permis de montrer que le stock de carbone organique des parcelles pouvait évoluer de - 25 à - 250 kg/ha/an pour l'exploitation en production intégrée représentative du canton (1) et de + 100 à - 335 kg/ha pour l'exploitation pratiquant l'agriculture biologique qui est équipée pour la production de BRF (2).

(1) L'exploitation en production intégrée de Thomas Vuillaume a un potentiel de production de bois raméal de 9,6 tMS ce qui permettrait de combler 21,7 % du déficit pour arriver au stock de carbone organique recherché (MO/A = 17 %). La production et l'épandage de ces 9,6 tMS/an de BRF coûteraient environ 800 Fr./an ce qui permettrait à terme de séquestrer plus de 300 tonnes de carbone. Cette pratique lui ferait économiser environ 120 Fr./an d'engrais et lui prendrait moins de 8 heures de main d'œuvre par an. Par comparaison, il faudrait qu'il achète environ 650 Fr./an de fumier bien décomposé (sans le transport et l'épandage) pour obtenir le même résultat (contre seulement 517 Fr. pour la simple production de ces 9,6 tMS de BRF).

(2) La ressource existante de M. Studer se chiffre à 28,7 tMS/an de bois raméal sans les arbres isolés (40 tMS/an avec les sujets isolés). Un apport de 5 tMS/an sur ses terres assolées permettrait de combler le déficit afin d'arriver à la teneur en matière organique minimale (MO/A = 17%). Un apport de 16 tMS permettrait d'atteindre une teneur en matière organique optimal (MO/A = 24 %) ce qui pourrait séquestrer environ 635 t de carbone à terme. Cette pratique lui coûterait 3'800 Fr./an et lui demanderait environ 57 heures de main d'œuvre par ans.

(1) Pour combler le déficit (MO/A = 17 %) les apports de BRF sont compris entre 13 m³/ha à 20,5 m³/ha tous les trois ans. (2) Pour arriver à la teneur optimale en matière organique, les apports de BRF varient de 3 m³/ha à 27 m³/ha tous les trois ans.

L'analyse économique a permis de montrer que la production (taille de branches et broyage) de BRF coûte environ 11,60 Fr./m³ (soit 55,75 Fr./tMS) avec un broyeur de grande capacité (150 à 300 m³ de

branches/heure en capacité de pointe) contre 39,46 Fr./m³ (soit 189,71 Fr./tMS) avec un broyeur de moyenne capacité (30 à 80 m³ de branches/heure en capacité de pointe). Le BRF a une valeur fertilisante d'environ 12,50 Fr./tMS.

L'analyse de BRF indigène nous a montré que la masse volumique du BRF sec (MS) est en moyenne comprise entre 200 et 210 kg/m³. Les BRF analysés contiennent en moyenne 6,57 kg/tMS d'azote, 0,072 kg/tMS de phosphore, 2,486 kg/tMS de potassium, 0,6 kg/tMS de magnésium et 11,354 kg/tMS de calcium. Ils ont un C/N moyen de 74,4, un pH moyen de 6,7, une teneur moyenne en MO de 97,2 % et un taux moyen de matière sèche de 49,4 %.

Cette étude montre que les doses à apporter pour combler les déficits sont inférieures à celles testées dans d'autres études. Cela permet de redonner de la crédibilité à cet amendement et nous avons pu démontrer l'intérêt d'utiliser cette ressource.

Summary

The organic matter content of agricultural soils in the world and in Switzerland is in most cases below the minimum requirements (OM/Clay = 17%), threatening their structural stability. The sequestration of carbon in the soil can make it possible to answer the biggest challenges of the future, namely to restore the fertility of the plots, thus to ensure food security, to limit the intensity of the global warming and to reduce its impact on agriculture by giving back resilience to the agricultural system. One of the most important practices of soil carbon sequestration is to add organic amendments. These resources are limited.

Ramial Chipped Wood (RCW) is an organic amendment in the form of wood chips. It consists of twigs and small branches less than 7 cm in diameter. The RCW can be used as a complementary amendment in addition to those already used in agriculture. It is little used at present because the resource is sometimes difficult to find; moreover, this practice requires an effort on the part of the farmer and its interest has not been sufficiently demonstrated compared to other amendments like compost. Nevertheless, most studies conclude that positive effects on soil and crops exist. A particular benefit is the ability of this organic material to convert a large proportion of its mass into stable humus that results in a good carbon sequestration potential. The restructuring power of this amendment, the increase in the useful soil reserve and the increased efficiency of resource use by plant roots are other benefits identified in the studies.

This end-of-study project is helping to meet the demand of the « Fondation Rurale Interjurassienne » (FRI), which is behind the "Terres vivantes" project aimed at improving the structural quality of soils. The two case studies that we carried out made it possible to establish that the organic carbon stock of the plots could evolve from - 25 to - 250 kg/ha/year for the exploitation in representative integrated production of the canton (1) and of + 100 to - 335 kg/ha/year for organic farming that is equipped for the production of RCW (2).

(1) Thomas Vuillaume's integrated production farm has a potential for 9.6 tMS of ramial wood production which would make it possible to fill 21.7% of the deficit to reach the desired organic carbon stock (MO/A = 17 %). The production and spreading of these 9.6 tMS/year of RCW would cost about 800 Fr./year, which would eventually allow more than 300 tons of carbon to be sequestered. This practice would save about 120 Fr./year of fertilizer and would require less than 8 hours of manpower per year. In comparison, he would have to buy about 650 Fr./year of well decomposed manure (without transport and spreading) to obtain the same result (compared to only 517 Fr. for the simple production of these 9,6 tMS of BRF).

(2) The existing resource of Mr. Studer is 28.7 tMS/year of ramial wood without the isolated trees (40 tMS/year with isolated individuals). An input of 5 tMS/year on its crop rotation lands would make up the deficit in order to reach the minimum organic matter content (MO/A = 17%). An input of 16 tMS would achieve an optimal organic matter content (MO/A = 24%) which could eventually sequester about 635 tons of carbon. This practice would cost 3'800 Fr./year and would require about 57 hours of manpower per year.

(1) To fill the gap (MO/A = 17%) BRF inputs are between 13 m³/ha and 20.5 m³/ha every three years.
(2) To achieve the optimum organic matter content, RCW inputs range from 3 m³/ha to 27 m³/ha every three years.

The economic analysis has found that the production (cutting of branches and grinding) of BRF costs about 11.60 Fr./m³ (or 55.75 Fr./tMS) with a large-capacity grinding mill (150 to 300 m³ of branches/hour in peak capacity) compared to 39.46 Fr./m³ (189.71 Fr./tMS) with a medium-capacity

grinding mill (30 to 80 m³ of branches/hour in peak capacity). The RCW fertilizing value is about 12.50 Fr./tMS.

The analysis of native BRF has shown that the density of dry RCW (MS) is on average between 200 and 210 kg/m³. The analyzed RCW contain on average 6.57 kg/tMS of nitrogen, 0.072 kg/tMS of phosphorus, 2.486 kg/tMS of potassium, 0.6 kg/tMS of magnesium and 11.354 kg/tMS of calcium. Their average C/N is 74.4, their average pH is 6.7, their average OM content is 97.2% and their average dry matter content is 49.4%.

This study shows that input necessary to fill deficits is lower the one tested in other studies. This gives credibility to this kind of amendment and we have demonstrated the value of using this resource.

Zusammenfassung

Der Gehalt an organischen Materialien in den landwirtschaftlichen Böden liegen weltweit und in der Schweiz grösstenteils unter der Mindestanforderungen (OM/J = 17%) was deshalb ihre Strukturstabilität bedroht. Die Kohlenstoffsequestrierung in den Böden kann die Antwort auf die grössten Herausforderungen von Morgen sein, und zwar die Fruchtbarkeit der Flurstücke wiederherzustellen, also die Lebensmittelsicherheit zu gewährleisten, die Intensität des Klimawandels einzuschränken und dessen Einfluss auf die Landwirtschaft zu verringern indem man dem Landwirtschaftssystem Widerstandsfähigkeit gibt. Eine der wichtigsten Methoden der Kohlenstoffsequestrierung in den Böden ist die Zufuhr von organischen Bodenverbesserern. Diese Ressourcen sind begrenzt.

Fragmentiertes Zweigholz (FZH) ist ein organischer Bodenverbesserer in Form von Holzspänen. Es besteht aus Zweigen und kleinen Ästen, die weniger als 7cm Durchmesser haben. Das FZH kann einen zusätzlichen Bodenverbesserer zu den bisher in der Landwirtschaft verwendeten bilden. Es wird momentan wenig eingesetzt, da die Ressource manchmal nur schwierig zu finden ist, die Einführung dieser Praxis einen gewissen Aufwand seitens des Landwirts verlangt und seine Bedeutung wurde bisher nicht genügend nachgewiesen im Vergleich zu anderen Bodenverbesserern wie der Kompost. Dennoch schlussfolgern die meisten Studien, dass positive Effekte für den Boden und die Kulturen existieren. Zu den positiven Wirkungen dieses organischen Stoffes gehört die Fähigkeit, aus einem grossen Teil seiner Masse einen stabilen Humus zu bilden, die sich durch ein gutes Potential an Kohlenstoffsequestrierung äußert. Die Fähigkeit der Umstrukturierung dieses Bodenverbesserers, die Zunahme der nutzbaren Reserven des Bodens und die Effizienz Zunahme der Ressourcennutzung durch die Wurzeln der Pflanzen sind noch andere nachgewiesene Vorteile während der Studien.

Diese Studienabschlussarbeit nimmt an der Suche einer Lösung auf die Anfrage der „Fondation Rurale Interjurassienne“ (FRI), die die Initiatorin des Projekts „Terres vivantes“ ist, welche die Verbesserung der Strukturqualität der Böden anstrebt, teil. Die 2 Fallstudien, die wir gemacht haben, ermöglichen es nachzuweisen, dass sich der Vorrat von organischem Kohlenstoff in den Parzellen von - 25 auf - 250 kg/ha/Jahr entwickeln kann für die Bewirtschaftung aus repräsentativ integrierter Produktion des Kantons (1) und von + 100 auf - 335 kg/ha/Jahr für die biologische Landwirtschaftsnutzung welche für die Produktion von FZH ausgestattet ist (2).

(1) Der Betrieb mit integrierter Produktion von Thomas Vuillaume hat Produktion und die Verteilung dieser 9,6t TS/Jahr an FZH würden ungefähr 800Fr/J kosten, was letztendlich erlauben würde, mehr als 300 Tonnen Kohlenstoff zu speichern und zu binden. Durch diese Methode würde er 120Fr/Jahr an Düngemittel einsparen können und er würde weniger als 8Std Arbeitskraft pro Jahr brauchen. Zum Vergleich müsste er ca. 650 Franken/Jahr gut verrotteten Mist (ohne den Transport und das Verteilen) kaufen, um das gleiche Ergebnis zu bekommen (demgegenüber stehen nur 517 Fr für die einfache Herstellung der 9,6t TS des FZH) ein Produktionspotential von Zweigholz von 9,6 t TS was ermöglichen würde 21,7% des Defizits zu decken, um den angestrebten organischen Kohlenstoffvorrat zu erreichen (OM/J=17%). Die

(2) Die bestehenden Ressourcen von Herrn Studer beläuft sich auf 28,7t TS/Jahr an Zweigholz ohne die einzelstehenden Bäume (40t TS/Jahr mit den einzelstehenden Objekten) Eine Zufuhr von 5t TS/Jahr auf seine parzellierten Böden würde das Defizit ausgleichen, um den Minimalgehalt an organischen Materialien (OM/J = 17%) zu erreichen. Eine Zufuhr von 16t TS würde einen optimalen Gehalt an organischen Stoffen erlauben (OM/J = 24%) was letztlich ungefähr 635t an Kohlenstoff binden könnte. Diese Praxis würde ihn 3800Fr/Jahr kosten und er müsste ca. 57 Std Arbeitskraft pro Jahr investieren.

(1) Um das Defizit auszugleichen (OM/J=17%), sind die Zufuhr zwischen 13 m³/ha und 20,5 m³/ha an FZH alle drei Jahre eingeschlossen. (2) Um den optimalen Gehalt an organischen Stoffen zu erreichen, variiert die Zufuhr von FZH zwischen 3 m³/ha und 27 m³/ha alle drei Jahre.

Die wirtschaftliche Analyse hat gezeigt, dass die Produktion (Äste schneiden und häckseln) der FZH ungefähr 11,60Fr/m³ (d.h. 55,75Fr/t TS) mit einem großen Häcksler (150 bis 300 m³ Äste/Std Spitzenleistung) kostet, wohingegen es 39,46 Fr/m³ (d.h. 189,71Fr/t TS) mit einem normalen Häcksler mittlerer Leistung (30 bis 80 m³ Äste/Std Höchstleistung) kostet. Das FZH hat einen Düngemittelwert von circa 12,5 Fr/t TS.

Die Analyse von einheimischem FZH hat uns gezeigt, dass die Volumenmasse von trockenem FZH (TS) zwischen 200 und 210 kg/m³ liegt. Die analysierten FZH beinhalten durchschnittlich 6,57 kg/t TS Stickstoff, 0,072 kg/T TS Phosphor, 2,486 kg/t TS Kalium, 0,6 kg/t TS Magnesium und 11,354 kg/t TS Calcium. Sie haben einen durchschnittlichen C/N von 74,4, einen pH-Wert von 6,7, einen Durchschnittsgehalt an organischen Materialien (OM) von 97,2% und einen Durchschnittsgehalt an Trockensubstanz von 49,4%.

Diese Studie zeigt, dass die Zufuhrdosen um das Defizit auszugleichen niedriger sind, als diese in anderen Studien. Dies ermöglicht, diesem Bodenverbesserer wieder mehr Glaubwürdigkeit zu geben und wir haben zeigen können, weshalb diese Ressource von großem Interesse ist.

Table des matières

Déclaration.....	i
Remerciements.....	ii
Résumé.....	iii
Zusammenfassung.....	vii
Liste des Figures.....	xiii
Liste des Tableaux.....	xiv
Liste des Annexes :.....	xv
Liste des Formules :.....	xvii
Liste des Abréviations.....	xviii
Introduction.....	1
1 Partie I : Contexte.....	2
1.1 Climat et agriculture.....	2
1.1.1 Le réchauffement climatique.....	2
1.1.2 Impact sur l'agriculture.....	2
1.1.3 Les axes d'actions pour limiter le réchauffement global.....	4
1.1.4 Séquestration de carbone dans les sols : une pierre, deux coups.....	4
1.2 L'agriculture face à deux problématiques.....	5
1.2.1 Le taux de carbone organique des sols.....	5
1.2.2 Les ressources de matières organiques limitées.....	6
1.3 Conclusion.....	7
2 Partie II : Le bois raméal fragmenté (BRF) : une ressource complémentaire et prometteuse.....	8
2.1 Définition et caractéristique.....	8
2.1.1 Principe.....	8
2.1.2 Origine.....	9
2.2 Utilisations actuelles.....	10
2.3 Le BRF ressource complémentaire.....	11
2.3.1 Ressource prometteuse.....	11
2.3.2 La filière du bois raméal.....	11
2.3.3 Réintégrer la haie dans le système agricole.....	12
2.4 Composition du BRF.....	14
2.4.1 Éléments chimiques.....	14
2.4.2 Teneur en carbone.....	17
2.5 Devenir et évolution du BRF sur et dans le sol agricole.....	18
2.5.1 Processus de dégradation.....	19
2.5.2 Dynamique des matières organiques formées.....	19

2.6	Les freins et les opportunités de cet amendement organique	21
2.6.1	Bénéfice pour le sol et les cultures	21
2.6.2	Problèmes rencontrés	25
2.7	Conclusion	28
3	Partie III : Utilisation du BRF en grande culture et étude de cas dans le Canton du Jura	29
3.1	Transposition au système grande culture	29
3.1.1	Système qui compte d'importantes surfaces	29
3.1.2	Contraintes technique, agronomique et économique	29
3.1.3	Le système grande culture du Canton du Jura	35
3.2	Etude de cas dans le canton du Jura dans le cadre du projet « Terres vivantes » de la « Fondation Rurale Interjurassienne » (FRI)	36
3.2.1	Contexte et objectifs	36
3.2.2	Le projet « Terres vivantes » et son suivi	36
3.2.3	Questionnements soulevés lors de la recherche bibliographique	38
4	Partie IV : Matériel et méthodes	39
4.1	Choix des exploitations et critères de sélection	39
4.2	Description des exploitations d'étude	39
4.2.1	Exploitation de Thomas Villaume à Grandfontaine	39
4.2.2	Exploitation de Joan Studer à Lucelle	41
4.3	Déroulement du projet	43
4.3.1	Evaluation du potentiel d'amélioration du statut organique des sols par le BRF dans deux exploitations agricoles jurassiennes	43
4.3.2	Etude agroéconomique	44
4.3.3	Planification d'une expérimentation à long terme	44
4.3.4	Vulgarisation pour les praticiens	44
4.4	Analyse de BRF locaux	45
4.4.1	Choix des échantillons	45
4.4.2	Prélèvement	46
4.4.3	Analyses de laboratoire	47
4.4.4	Détermination du coefficient d'humification	48
4.5	Evaluation du potentiel de production de BRF	49
4.5.1	Création de la charte du potentiel de production en bois raméal en fonction des types de surfaces boisées	49
4.5.2	Quantification du potentiel de production	54
4.6	Bilan humique	55
4.6.1	Choix du modèle	55
4.6.2	Caractérisation des sols	58

4.6.3	Détermination d'une rotation type pour chacun des exploitations étudiées	62
4.7	Analyse agroéconomique.....	65
4.7.1	Calcul des coûts de production	65
4.8	Planification de l'expérimentation.....	69
4.8.1	Choix des parcelles expérimentales.....	69
4.8.2	Paramètres d'intérêts	69
4.8.3	Choix des modalités	70
4.9	Création du manuel du vulgarisation	70
4.9.1	Process.....	70
4.9.2	Buts et rôles	70
5	Partie VI : Résultats.....	72
5.1	Analyse de BRF locaux	72
5.1.1	Masses volumiques.....	72
5.1.2	Autres paramètres	72
5.2	Evaluation du potentiel de production en BRF.....	73
5.2.1	Exposition de la charte	73
5.2.2	Thomas Vuillaume	73
5.2.3	Joan Studer	74
5.3	Bilan humique.....	75
5.3.1	Thomas Villaume	75
5.3.2	Joan Studer	78
5.4	Analyse économique	81
5.4.1	Thomas Vuillaume : mode de production de grande capacité	81
5.4.2	Joan Studer : mode de production de moyenne capacité.....	82
5.4.3	Installation de nouvelles haies	83
5.4.4	Gains économiques.....	83
6	Partie VII : Discussions	85
6.1	Variabilité des BRF.....	85
6.1.1	Masse volumique.....	85
6.1.2	Autres paramètres	85
6.2	Mise en parallèle de l'évolution des stocks de carbone avec le potentiel de ressource en BRF 86	
6.2.1	Exploitation de Thomas Vuillaume	86
6.2.2	Exploitation de Joan Studer	87
6.3	Biais rencontrés	88
6.3.1	Le modèle Hénin Dupuis.....	88

6.3.2	Variation des résultats des analyses de sol	89
6.4	Subventionner l'augmentation du carbone dans le sol.....	90
6.5	Zone d'étude	90
6.6	Conseils et stratégies à adopter pour les deux exploitations d'études.....	90
6.6.1	Exploitation de Thomas Vuillaume	90
6.6.2	Exploitation de Joan Studer	91
6.7	Points à retenir	91
6.8	Conseil pour l'installation de nouvelles haies dans l'optique de créer du BRF.....	93
6.9	Recommandations pour la « Fondation Rurale Interjurassienne »	94
7	Partie VIII : Proposition d'expérimentation pour le projet « Terres Vivantes »	95
7.1	Sur l'exploitation de Thomas Vuillaume.....	95
7.1.1	Parcelle choisie.....	95
7.1.2	Modalités à mettre en place	95
7.2	Sur l'exploitation de Joan Studer	96
7.2.1	Parcelle choisie.....	96
7.2.2	Modalités à mettre en place	96
7.3	Vérification des valeurs de production de biomasse de la charte.....	96
7.4	Suivi et prise de mesures	96
	Conclusion.....	98
	Bibliographie	100
	Annexes	A

Liste des Figures

Figure 1 : Monomères précurseurs des lignines : alcools cinnamiques (Dodelin et al., 2007).....	15
Figure 2 : Schéma simplifié de l'action du BRF sur le sol (Rey et al. 2009).....	22
Figure 3 : Mécanisme antiérosif du BRF par reconquête végétale en terrain difficile.	22
Figure 4 : Broyeur sur prise de force de moyenne capacité. (https://www.public-expo.fr).	30
Figure 5 : Relation entre le taux d'argile et la quantité de matière organique de 4'433 échantillons de sol du canton du Jura. La médiane est de 12% de matière organique par rapport au taux d'argile ce qui est insuffisant pour garantir une bonne structure (minimum requis 17%) (Fietier and Scherrer, 2018).	37
Figure 6 : Répartition des échantillons de BRF dans le Canton du Jura.	45
Figure 7 : Prélèvement du BRF grâce à une tarière dans un andain (à gauche) et dans une remorque (à droite).	46
Figure 8 : Regroupements de parcelles effectués à l'issus de la caractérisation des sols et analyses de sol réalisées sur l'exploitation de Joan Studer.	60
Figure 9 : Regroupements de parcelles effectués à l'issus de la caractérisation des sols et analyses de sol réalisées sur l'exploitation de Thomas Vuillaume.	61
Figure 10 : Entrées d'humus et de carbone organique en fonction de la culture et des pratiques sur l'exploitation de Thomas Vuillaume.	75
Figure 11 : Coefficient K2 des différentes parcelles de l'exploitation de Thomas Vuillaume.....	76
Figure 12 : Stocks de carbone organique actuels et à l'équilibre mis en parallèle avec les stocks de carbone recherchés (MO = 17% de la masse en argile) des parcelles d'études de l'exploitation de M. Vuillaume.	76
Figure 13 : Evolution annuelle du stock de carbone des différentes parcelles d'étude pour l'exploitation de Thomas vuillaume.	77
Figure 14 : Déficit annuel d'entrée en humus (tMOH/ha) traduit en quantité de BRF à apporter tous les ans pour combler ce déficit (MO/A = 17 %).	77
Figure 15 : Entrées d'humus et de carbone organique en fonction de la culture et des pratiques sur l'exploitation de Joan Studer.....	78
Figure 16 : Coefficient K2 des différentes parcelles de l'exploitation Joan Studer.	79
Figure 17 : Stocks de carbone organique actuel et à l'équilibre mis en parallèle avec les stocks de carbone recherchés (MO = 17% de la masse en argile) des parcelles d'études de l'exploitation de M. Studer.	79
Figure 18 : Evolution annuelle du stock de carbone des différentes parcelles d'étude pour l'exploitation de Thomas Vuillaume.	80
Figure 19 : Déficit annuelle d'entrée en humus (tMOH/ha) traduit en quantité de BRF à apporter tous les ans pour combler ce déficit (MO/A = 17 %).	80

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Composition chimique et biochimique des BRF adapté de Larochelle Louis, 1994.	16
Tableau 2 : Teneur en éléments nutritifs de différents BRF issus de plusieurs études, en kg/t de BRF frais et kg/t de Ms.	17
Tableau 3 : Teneur moyenne en métaux lourds de 6 BRF et d'un compost mur belge (B. Noël and C. Marche, 2006)	28
Tableau 4 : Liste non exhaustive de plantes indigènes pour haie, disponibles facilement sur le marché Suisse.	34
Tableau 5 : informations et caractéristiques des BRF échantillonnés.	45
Tableau 6 : Indicateur ISMO de deux BRF, analysés par INRA Grignon.	48
Tableau 7 : Résultats des masses volumiques aux conditions du prélèvement et après le passage dans l'étuve à 105°C, de nos 5 échantillons	72
Tableau 8 : Résultats des autres paramètres pondérales et non pondérales de nos 5 échantillons. ...	72
Tableau 9 : Charte : Potentiel de production de biomasse valorisable en BRF en fonction du type de surface boisé.	73
Tableau 10 : Potentiel de production de BRF des surfaces boisées de l'exploitation de M. Vuillaume.	74
Tableau 11 : Potentiel de production de BRF des surfaces boisées de l'exploitation de M. Studer.	74
Tableau 12 : Caractéristiques utilisées pour établir le stock de carbone et le coefficient K2 des parcelles d'étude sur l'exploitation de M. Vuillaume.	75
Tableau 13 : Caractéristiques utilisées pour établir le stock de carbone et le coefficient K2 des parcelles d'étude sur l'exploitation de M. Studer.	78
Tableau 14 : Coûts opérationnels des différents chantiers de la pratique "BRF" chez M. Vuillaume. ...	81
Tableau 15 : Coûts de la pratique "BRF" au sein de l'exploitation de Thomas Vuillaume.	81
Tableau 16 : Coûts opérationnels des différents chantiers de la pratique "BRF" chez M. Studer.	82
Tableau 17 : Coûts de la pratique "BRF" au sein de l'exploitation de Joan Studer.	82
Tableau 18 : Détail des coûts de l'installation d'une nouvelle haie de qualité 2 avec des espèces indigènes d'écotype CH.	83
Tableau 19 : Valeur fertilisante des BRF jurassiens analysés.	83
Tableau 20 : Comparaison du prix de revient et du potentiel de séquestration de carbone du BRF issus de deux modes de production avec d'autre amendements organiques souvent utilisés dans le Canton du Jura.	84
Tableau 21 : Comparaisons des analyses de sol des deux exploitations d'études.	89

Liste des Annexes :

Annexe 1 : Écart de la température en comparaison à la période préindustrielle 1871-1900. Les écarts annuels sont indiqués en rouge et bleu. La ligne noire indique la moyenne sur plusieurs années. La température globale est représentée en vert et montre une augmentation d'environ 1 degré Celsius en 2017 (Office fédéral de météorologie et de climatologie, 2018).	A
Annexe 2 : Ecart de température à la moyenne 1961-1990 en Suisse pour chaque année depuis 1864. Les années en dessous de la moyenne sont en bleu, les années au-dessus de la moyenne sont en rouge. La partie inférieure du graphique montre les écarts à la moyenne sur une décennie avec les colonnes colorées en bleu ou en rouge (Office fédéral de météorologie et de climatologie, 2018b).	A
Annexe 3 : Evolution des contributions aux émissions nettes mondiales de CO ₂ de quatre scénarios (IPCC, 2018).	B
Annexe 4 : Caractéristiques pondérales de différents BRF (B. Noël and C. Marche, 2006).	B
Annexe 5 : Rôle de l'arbre dans le système agricole (Association Française d'Agroforesterie, 2018). ..	B
Annexe 6 : Synthèse de différents travaux réalisés.	B
Annexe 7: Charte vulgarisé : Potentiel de production de biomasse (bois raméal) des différents types d'espaces boisés.	B
Annexe 8 : Potentiel de production des haies et bosquets de l'exploitation de Thomas Vuillaume.	B
Annexe 9 : Potentiel de production des haies et bosquets de l'exploitation de Joan Studer.	B
Annexe 10 : Potentiel de production des forêts et des pâturages boisés de l'exploitation de Joan Studer.	B
Annexe 11 : Localisation des sondages à la tarière (points jaunes) pour la caractérisation des sols et analyses effectuées par nos soins (prélèvements composites pour analyses de sols : traits gris et prélèvements pour les analyses de densité apparente de la terre fine : points gris) chez Thomas Vuillaume.	B
Annexe 12: Localisation des sondages à la tarière (points jaunes) pour la caractérisation des sols et analyses effectuées par nos soins (prélèvements composites pour analyses de sols : traits gris et prélèvements pour les analyses de densité apparente de la terre fine : points gris) chez Joan Studer.	B
Annexe 13 : Localisation des sondages à la tarière (points jaunes) pour la caractérisation des sols et analyses effectuées par nos soins (prélèvements composites pour analyses de sols : traits gris et prélèvements pour les analyses de densité apparente de la terre fine : points gris) chez Joan Studer (suite).	B
Annexe 14 : Caractérisation des sols chez M. Vuillaume.	B
Annexe 15 : Caractérisation des sols chez M. Vuillaume suite.	B
Annexe 16 : Caractérisation des sols chez M. Vuillaume suite.	B
Annexe 17 : Caractérisation des sols chez M. Vuillaume suite.	B
Annexe 18 : Caractérisation des sols chez M. Studer.	B
Annexe 19 : Caractérisation des sols chez M. Studer suite.	B
Annexe 20 : Caractérisation des sols chez M. Studer suite.	B
Annexe 21 : Caractérisation des sols chez M. Studer suite.	B
Annexe 23: Résultats de la caractérisation des sols de l'exploitation de Joan Studer (Le code couleur	

n'a pas d'importance particulière, il est juste destiné à voir quelle parcelles sont regroupés ensemble).	B
Annexe 22 : Résultats de la caractérisation des sols de l'exploitation de Thomas Vuillaume (Le code couleur n'a pas d'importance particulière, il est juste destiné à voir quelles parcelles sont regroupées ensemble).	B
Annexe 25 : Analyses de sols composites PER réalisées dans le cadre du projet "Terre Vivantes" et de l'étude "BRF" au sein de l'exploitation de M. Studer.....	B
Annexe 24: Analyses de sols composites PER réalisées dans le cadre du projet "Terre Vivantes" et de l'étude "BRF" au sein de l'exploitation de M. Vuillaume.....	B
Annexe 26 : Résultats des densités apparentes réalisées par nos soins.....	B
Annexe 29 : Détaille des calculs du bilan humique pour une parcelle.	B
Annexe 28 : Tableau récapitulatif des calculs des bilans humiques des parcelles de l'exploitation de Thomas Vuillaume. Le stock optimal est ici considéré comme MO = 17 % de la masse en argile.....	B
Annexe 27 : Détail des entrées de carbone organique dans les sols de l'exploitation de Thomas Vuillaume.....	B
Annexe 31 : Tableau récapitulatif des calculs des bilans humiques des parcelles de l'exploitation de Joan Studer. Le stock optimal est ici considéré comme MO = 17 % de la masse en argile.....	B
Annexe 30 : Détail des entrées de carbone organique dans les sols de l'exploitation de Joan Studer..	B
Annexe 32: Tableau récapitulatif des calculs des bilans humiques des parcelles de l'exploitation de Joan Studer. Le stock optimal est ici considéré comme MO = 24 % de la masse en argile.	B
Annexe 33 : Détail des coûts des machines utilisées pour le calcul des coûts opérationnel des deux modes de production du BRF.....	B
Annexe 35 : Détail des calculs des coûts opérationnels de la pratique BRF pour l'exploitation de M. Vuillaume.....	B
Annexe 34 : Détail du calcul du coût horaire du broyeur Greenmech de M. Studer avec le tableur "TractoScope".....	B
Annexe 36 : Détail des calculs des coûts opérationnels de la pratique BRF pour l'exploitation de M. Studer.....	B
Annexe 37 : Localisation des zones délimitées pour les calculs des coûts de transport du BRF sur l'exploitation de M.Studer.....	AA
Annexe 38: Première page du manuel de vulgarisation.....	BB

Liste des Formules :

- (1) $K1(mo) = 0,7 \cdot K1(c)$49
- (2) Stock act C (tCorg/ha) = ((Profondeur*10'000) - (Profondeur*10'000*%v cailloux))* Da* (%Mo/1,724)55
- (3) $K2 = 0.03 \cdot [1 + 0.2 \cdot (T-10)] \cdot [1/(1 + 0.005 \cdot A)] \cdot [1/(1 + 0.0015 \cdot CaCO_3)]$ 56
- (4) Entrées d'humus (tMOH ou Corg/ha) = $\sum (m_i \cdot K_{1i})$56
- (5) Gain ou perte de Corg (tCorg/ha) = $\sum (m_i \cdot K_{1i}) - k2 \cdot \text{stock C}$ 56
- (6) Stock C eq. = $\sum (m_i \cdot K_{1i}) / k2$ 57
- (8) Stock opt. = ((Profondeur*10'000) - (Profondeur*10'000*%v cailloux))* Da* (17% ou 24%/1,724).....57
- (9) Déficit MOH = ((Stock C opt. *K2) - $\sum (m_i \cdot K_{1i})$).....57
- (10) Apport de BRF pour combler le déficit = Déficit MOH/K1(MOH) BRF57
- (11) Séquestration de Corg dû à l'apport annuel de BRF pour combler le déficit = Stock C opt. - Stock C eq.57
- (12) $Da (g/cm^3) = (Masse\ sèche - Masse\ grossiers) / (Volume\ apparent - Volume\ grossier)$ 62
- (13) $K2 = (1.6 - 0.012 \cdot A \%) - (0.002 \cdot (pH-7) \text{ (si } pH > 7) + 0.005 \cdot \% \text{ sarclées (0 - 40 \%)} - 0.005 \cdot \% \text{ PT (0 - 40 \%)}))$88

Liste des Abréviations

ACP : Agriculture Contractuelle de Proximité
AFOLU : Agriculture, Forestry and Other Land Use
APL : Azote Potentiellement Lessivable
BECCS : Bio-energy with Carbon Capture and Storage
BRF : Bois Raméal Fragmenté
C/N : Taux Carbone sur Azote
CIPAN : Culture Intercalaire Piège à Nitrate
CO₂ : Dioxyde de carbone
Corg : Carbone organique
Da : Densité apparente du sol
Ec : Electro-conductivité
FAO : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
FRI : Fondation Rurale Interjurassienne
GCBR : Groupe de Coordination des Bois Raméaux
GES : Gaz à Effet de Serre
GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (IPCC en anglais)
G-S : Guaiacyle-suringyle
HCl : Acide chlorhydrique
IFEN : Institut Français de l'Environnement
IFOAM : International Federation of Organic Agriculture Movements
INRA : Institut National de la Recherche Agronomique
ISMO : Indicateur de Stabilité de la Matière Organique
K1 : Coefficient d'humification ou isohumique
K1(C) : Coefficient d'humification s'exprimant par rapport au carbone organique
K1(MOH) : Coefficient d'humification s'exprimant par rapport à la matière organique
K2 : Coefficient de minéralisation
LiP : Lignine Peroxydase
MAP : Mètre cube Apparent
MF : Matière Fraîche
MICCA : Projet d'atténuation du changement climatique dans l'agriculture
MOh : Heure de main d'œuvre
MOH : Matière Organique Humifiée (humus)
MOs : Matières Organiques du Sol
MS : Matière Sèche
NCCS : National Centre for Climate Services
OFo : Ordonnance sur les Forêts
OPD : Ordonnance sur les Paiements Directs versés dans l'agriculture
OTerm : Ordonnance sur la Terminologie agricole
PER : Prestations écologiques requises
pH : potentiel Hydrogène
PPM : Partie Par Million
PT : Prairie Temporaire
RU : Réserve Utile
SAU : Surface Agricole Utile
SPB : Surface de Promotion de la Biodiversité
TA : Terre Assolée

TCR : Taillis à Courte Rotation
TCS : Techniques Culturelles Simplifiées
UMOS : Unité de Main d'Œuvre Standard
UNEP : Programme des Nations Unies pour l'Environnement

Introduction

L'agriculture est la fois un émetteur important de gaz à effet de serre, mais également un secteur qui pourrait bien contribuer à réduire l'ampleur du réchauffement climatique. La séquestration de carbone dans les sols est très prometteuse et contribue à répondre aux problèmes de qualités physiques du sol qui sont un véritable fléau avec l'agriculture industrielle que nous connaissons depuis bientôt un siècle. La matière organique pourrait bien devenir un des intrants agricoles les plus précieux. Aujourd'hui, nous constatons déjà un manque en ressources organiques. Le bois raméal est un amendement complémentaire potentiel. Toutefois, il reste peu utilisé dans l'agriculture actuel.

Le projet « Terres Vivantes » qui vise à promouvoir les procédés agricoles favorisant la qualité structurale des sols, veut intégrer cette innovation technique parmi les pratiques agricoles jurassiennes. Ce travail a pour but de vérifier quelle place le BRF pourrait avoir au sein d'exploitation Suisse et plus particulièrement dans le système grande culture jurassien.

Cette étude fait dans un premier temps la synthèse de l'état de la recherche actuelle. Dans la première partie, nous verrons le contexte climatique et agronomique ainsi que les axes d'actions pour lutter contre le réchauffement climatique. L'importance de la séquestration de carbone dans les sols est également traitée. Dans une seconde partie, l'état des connaissances sur ce sujet sera exposé, afin de définir clairement cet amendement pour voir ses forces, ses faiblesses et analyser la place qu'il peut occuper dans le système agricole. Nous aborderons également les problématiques de ressource en bois raméal. Dans une troisième partie, nous nous attarderons sur son usage en grande culture. Le projet « Terres Vivante » et le contexte agricole jurassien sont également abordés.

Dans un second temps, ce travail comprend une analyse de faisabilité notamment grâce à deux études de cas dans le Canton du Jura. Cette dernière comprend trois volets. Le premier vise à évaluer le potentiel d'amélioration du statut organique des sols par le BRF dans les deux exploitations agricoles retenues pour l'étude. Cet axe s'articule autour de trois points : (i) l'estimation des déficits de carbone organique des sols en intégrant la dynamique des pratiques agricoles de chaque exploitant, part la réalisation de bilans humiques, (ii) l'estimation du potentiel de production des espaces boisés se trouvant sur la surface agricole, (iii) l'analyse de BRF indigène pour caractériser cet amendement.

Le deuxième volet est une étude agroéconomique qui permet notamment de juger de la viabilité de cette pratique.

Le troisième et dernier volet présente des pistes de réflexion pour la mise en place d'une expérimentation afin de pouvoir répondre à certaines questions qui résultent des lacunes de la littérature à ce sujet et de l'approche de terrain. Il pourra ainsi être vérifié si les bienfaits du BRF et l'intégration de cet amendement au sein de la rotation est transposable aux systèmes grande culture du canton.

Pour finir, ce travail propose également des outils de vulgarisation à destination des exploitants qui veulent se lancer dans cette pratique.

Partie I : Contexte

1.1 Climat et agriculture

1.1.1 Le réchauffement climatique

Depuis la révolution industrielle, les émissions de GES d'origine entropiques ont augmenté très fortement. Ils sont impliqués dans le réchauffement global et rapide que nous connaissons aujourd'hui. Les GES ont la particularité d'absorber de la chaleur émise par la terre sous forme d'infrarouge et de réémettre une partie de cette énergie. Ce phénomène est appelé « Forçage radiatif » (Pachauri and Reisinger, 2007).

L'activité de l'homme émet principalement du dioxyde de carbone, qui serait responsable pour 80% du réchauffement climatique (Hansen, 2008; Stocker et al., 2014) et dans une moindre mesure du méthane et des oxydes d'azote qui ont cependant un pouvoir de réchauffement plus important (temps de demi-vie dans l'atmosphère supérieur et un forçage radiatif plus important).

Depuis l'ère préindustrielle, on estime que nos activités ont déstocké près de 2040 GT de CO₂ et nous sommes arrivés à des concentrations de GES sans précédent depuis au moins 800'000 ans avec, par exemple, une concentration en CO₂ actuelle de 404 PPM (Blasing, 2016).

Le réchauffement global se fait ressentir depuis les années 1940. En 2018, il semblerait que nous ayons franchi la barre symbolique des + 1°C de réchauffement global, par rapport à la période préindustrielle (Office fédéral de météorologie et de climatologie, 2018). Néanmoins, ce réchauffement n'est pas homogène sur toute la surface du globe. En effet, la Suisse possède une augmentation des températures (moyenne sur plusieurs années) deux fois supérieures au réchauffement global. Cette dernière a connu son année la plus chaude en 2018 en dépassant un nouveau record depuis le début des relevés. La température moyenne annuelle nationale a atteint 6,9 °C pour 2018 ce qui représente 2°C au-dessus de la norme. (Office fédéral de météorologie et de climatologie, 2018).

Tout cela n'est pas sans conséquence. Nous savons maintenant que ce dérèglement climatique a des conséquences dramatiques sur un ensemble de paramètres, comme la biodiversité, les océans, les événements climatiques extrêmes et bien évidemment l'agriculture. L'ensemble de la biocénose terrestre, et donc l'homme sont menacés face à un tel dérèglement (IPCC, 2018).

1.1.2 Impact sur l'agriculture

L'agriculture est directement touchée par ce dérèglement.

Premièrement, nous savons que l'agriculture travaille avec la composante du vivant. Le dérèglement climatique (en plus de tous les autres impacts humains : pollution, perte de milieux de vie, etc..) impacte le monde du vivant et cela d'autant plus que les changements sont rapides et importants. Aujourd'hui, nous vivons une 6^{ème} extinction de masse qui se traduit par une érosion massive et rapide de la biodiversité (Ceballos et al., 2015). Cette extinction va à un rythme bien supérieur par rapport aux cinq dernières selon les spécialistes. Le dernier rapport du « Fonds mondial pour la nature » est alarmant. En effet, 60 % de la population de vertébrés a disparu en 40 ans (WWF, 2018). Ce qui est vrai pour les vertébrés est encore plus vrai pour les invertébrés et les végétaux. Il existe une relation importante entre agriculture et biodiversité (Le Roux et al., 2008). Rajoutons à cela les conditions climatiques impropres aux cultures et à la désertification croissante qui se profile dans un futur proche (IPCC, 2018), l'agriculture est au centre de la problématique et la sécurité alimentaire de demain est menacée d'autant plus que la croissance démographique n'est pas prête de s'arrêter selon les tendances (Ined, 2018).

Deuxièmement, avec l'avènement de l'agriculture industrielle, les systèmes agricoles ont considérablement perdu en résilience (Giraud-Héraud, 2016). La mécanisation, l'emploi d'intrants chimiques et la baisse de diversité dans le système agricole sont en partie responsables de cette perte de résilience. Cela se traduit par la dégradation des sols, la dépendance à la chimie et bien d'autres problèmes qui rendent l'agriculture encore moins apte à faire face au dérèglement climatique. Pour faire face à un dérèglement, la résilience d'un système doit être grande. Il est donc important de redonner rapidement cela à nos systèmes agricoles, sans quoi, des conséquences irréversibles mettraient en danger notre sécurité alimentaire.

Troisièmement, ce réchauffement global se traduit par des événements climatiques extrêmes qui vont s'intensifier et devenir de plus en plus réguliers dans un futur proche (Office fédéral de météorologie et de climatologie, 2014). La manifestation de ces événements varie beaucoup d'une région à l'autre et prennent des caractères locaux. C'est pourquoi la modélisation et l'estimation de ces phénomènes futurs sont complexes. Les climatologues se basent sur les faits passés et présents pour créer des modèles climatiques capables de donner différents scénarios généraux et locaux. Plusieurs indicateurs climatiques intéressent directement l'agriculture. En effet, les vagues de chaleur, de froid, les fortes précipitations, les jours de végétation et les périodes de sécheresse semblent évoluer et impactent directement le système agricole. Les vagues de chaleur sont caractérisées par leur intensité et leur durée (Météo France, 2018). Le nombre de jours tropicaux ($T_{max} \geq 30 \text{ °C}$) est en nette augmentation depuis 1980 pour atteindre en moyenne 12 jours en 2015 contre seulement 3 en 1970 (Office fédéral de météorologie et de climatologie, 2018). Cela impacte les cultures puisque de telles températures baissent l'activité photosynthétique d'une grande majorité de plantes cultivées sous nos latitudes. Dans le futur, les vagues de chaleur devraient s'intensifier et durer de plus en plus longtemps ce qui aurait des conséquences désastreuses pour l'agriculture. D'ici 2050, l'été 2003 devrait devenir la norme. D'ici 2100 il n'est pas impossible de voir apparaître des canicules deux fois supérieures en intensité de celle de 2003 et pouvant durer jusqu'à 100 jours d'affilés (Météo France, 2018). Ces vagues de chaleur s'accompagnent souvent de sécheresse ce qui est encore une fois une menace pour l'agriculture. Depuis les premiers relevés météorologiques, il n'y a pas d'évolution significative de la quantité de précipitations annuelles en Suisse Romande (Office Fédéral de Météorologie et de Climatologie, 2014). Néanmoins, ces précipitations sont moins bien réparties. En effet, les différents scénarios prévoient une baisse des précipitations estivales au cours du XXI^e siècle de l'ordre de 8 à 28%. Les périodes de sécheresse et les précipitations intenses se multiplient et devraient s'intensifier dans le futur. L'année 2018 a été marquée par deux records battus depuis que les relevés météorologiques existent (Office fédéral de météorologie et de climatologie, 2018) :

- Record national de précipitations, 41 mm en 10 min à Lausanne, Juin 2018
- Début d'automne 2018 exceptionnellement sec en Suisse Romande avec seulement 112.7 mm de pluie en trois mois (août, septembre et octobre, station de Genève).

Les périodes de sécheresse impactent le rendement et la survie des plantes. Les fortes précipitations dégradent les sols en favorisant l'érosion et la battance. Des simulations climatiques prévoient un assèchement durable du sol en toutes saisons confondues dans un futur proche (Météo France, 2018). De tels assèchements du sol impacteront durablement l'agriculture et la production de biomasse en générale. L'augmentation du nombre de jours de végétation est également une conséquence du dérèglement climatique. En Suisse, nous avons en moyenne 250 jours de végétation sur le plateau (Office Fédéral de Météorologie et de Climatologie, 2014). Dans 40 ans, les modèles climatiques prévoient une augmentation de cette période de 40 jours. La période de végétation commencera donc en février et finira en novembre. Cela a pour conséquences une modification des types de plantes cultivées, un risque accru d'augmentation de la pression de ravageurs (nombre de générations par an

plus élevé) et un assèchement toujours plus important du sol.

Le rapport révisé «CH2018 - Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report » sorti le 13 novembre 2018 (NCCS, 2018), confirme les tendances des différents scénarios du précédent rapport de 2011 qui a servi de base pour l'analyse ci-dessus.

Nous l'aurons compris, l'agriculture est profondément menacée par le réchauffement climatique, à cause d'une évolution de certains paramètres ayant un impact sur le système agricole. Pour faire face à cela, il faut réduire au maximum le réchauffement pour limiter l'intensité des phénomènes et redonner de la résilience au système agricole pour surmonter ces évolutions climatiques.

1.1.3 Les axes d'actions pour limiter le réchauffement global

Nous savons à présent qu'un réchauffement est inévitable. En effet, même si nous arrêtons toute émission de GES dans un futur proche (ce qui semble impossible), le réchauffement continuera sa course encore des siècles (Jancovici, 2018). Néanmoins, il est possible de limiter ce réchauffement pour éviter certaines conséquences les plus dramatiques. Un ensemble d'initiatives globales a vu le jour au vingtième siècle. Plusieurs sommets se sont déroulés, regroupant un grand nombre de pays pour parler du climat. En 2015, la COP21, qui s'est déroulée en France, a réuni 156 états qui se sont engagés dans les accords de Paris. Ces derniers visent à maintenir le réchauffement global en dessous de 2°C par rapport à la période préindustrielle (Christopher, 2016). En octobre 2018, le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a sorti un rapport spécial qui revoit les exigences à la hausse. En effet, selon ce groupe, il ne faudrait pas limiter ce réchauffement à 2°C mais 1,5°C par rapport au niveau préindustrielle (IPCC, 2018). Ce demi-degré de différence changerait beaucoup de choses et les conséquences seraient irréversibles d'après le rapport. Le GIEC propose trois axes d'actions pour limiter le réchauffement et ses effets (IPCC, 2018):

- Baisse de nos émissions,
- La bioénergie associée à la capture et au stockage du carbone (BECCS),
- Séquestration de carbone dans le secteur des AFOLU (agriculture, foresterie et autre utilisation des terres).

La baisse de nos émissions semble être très difficile à mettre en place et nous ne pouvons pas arrêter d'émettre du jour au lendemain. Une baisse progressive de nos émissions est cependant indispensable pour maintenir le réchauffement bien en dessous de 1,5°C (IPCC, 2019). Les technologies BECCS ne sont malheureusement pas envisageables pour le moment. Néanmoins, le secteur des AFOLU est prometteur surtout l'agriculture qui représente un énorme potentiel de stockage de carbone (Smith et al., 2014). D'après le dernier rapport du GIEC, une meilleure gestion des terres peut contribuer à faire face aux changements climatiques (IPCC, 2019). C'est à l'issue de ce constat que des initiatives comme le projet « MICCA » (Projet d'atténuation du changement climatique dans l'agriculture) voit le jour (FAO, 2018). Ce dernier travaille surtout avec les pays en voie de développement. Le projet « Quatre pour mille » proposé pendant les accords de Paris en 2015 concerne également les AFOLU. Ce dernier vise à augmenter de 0,4% le carbone organique des sols agricoles par an (Minasny et al., 2017). La seule solution actuelle viable et faisable est donc la séquestration de carbone dans le secteur des AFOLU (EASAC, 2018).

1.1.4 Séquestration de carbone dans les sols : une pierre, deux coups

Nous avons vu précédemment qu'en plus d'une baisse progressive de nos émissions, la séquestration de carbone dans le secteur des AFOLU est une option prometteuse dans la lutte contre le réchauffement global. Les sols agricoles sont au centre de cette thématique. En effet, la surface concernée est importante, il est possible d'intervenir rapidement et facilement sur ces sols. La surface

agricole utile du globe représente plus de 1,5 milliard d'ha en terre arable et plus de 450 millions d'agriculteurs s'en occupent (The World Bank, 2018). Le potentiel de séquestration est donc grand.

De plus, cette mesure possède une double action :

Premièrement, cette mesure permet la réduction de la concentration en GES de l'atmosphère notamment en CO₂ qui, nous l'avons vu, est la molécule la plus importante dans ce réchauffement. La séquestration de carbone dans les sols agricoles augmente l'importance du stock d'un réservoir du cycle biochimique, à savoir la lithosphère et plus précisément le sol. Actuellement ce réservoir contient 1'560 Gt de carbone contre 858 Gt dans l'atmosphère (Wigley, 1983).

Deuxièmement, la séquestration de carbone dans les sols a une fonction agronomique et pédologique très importante. En effet, le carbone organique contribue activement à la fertilité des sols en améliorant sa structure, en favorisant son activité biologique et en augmentant sa réserve hydrique ainsi que son stock en éléments nutritifs. De plus, la teneur en carbone organique est intimement liée aux fonctions des sols (épuration, infiltration, stabilité, rétention, etc...). Ces fonctions sont utiles à l'agriculture mais aussi à tout le territoire et le seront d'autant plus demain. La séquestration de carbone dans les sols participe donc à une augmentation de la résilience du système agricole.

Les pratiques visant à augmenter la teneur en carbone organique des sols vont donc dans le bon sens puisqu'elles participent à réduire les impacts du changement climatique sur l'agriculture en diminuant ce dernier et rendant plus robuste le système face aux phénomènes extrêmes. C'est ainsi que des projets voient le jour pour favoriser les bonnes pratiques. C'est le cas de l'expérimentation Suisse « Biodivsol » financée par l'Office fédéral de l'agriculture qui visait à tester la mise en place de contribution pour les agriculteurs qui ont de bons résultats de qualité structurale de sol et donc une bonne teneur en matière organique (Diss, 2017). Malheureusement, cette dernière n'a pas abouti.

1.2 L'agriculture face à deux problématiques

Nous avons vu l'importance du carbone organique des sols, mais qu'en est-il dans la pratique aujourd'hui ?

1.2.1 Le taux de carbone organique des sols

La baisse de résilience du système agricole s'est accompagnée d'une baisse significative des teneurs en matières organiques du sol (MOs) et donc de carbone organique puisque ce dernier compose 50 à 60 % la MOs. Les mauvaises pratiques agricoles qui sont apparues avec l'intensification de la production (Dupla, 2018) sont la principale cause. Les conséquences directes sont : (1) la baisse de la fertilité des sols ; (2) l'agriculture est le secteur qui relâche le plus GES. En majorité les sols agricoles sont en déficit de matières organiques dans le monde et en Suisse. Il existe une relation entre la teneur en argile et la teneur en MOs des sols. La formation du complexe argilo-humique qui se traduit par une complexation des matières organiques, une liaison avec les colloïdes et donc les argiles, protège les MOs contre les mécanismes oxydatifs. En pratique la teneur minimale de MOs est de 17 % de l'argile soit 10 % de carbone organique (Corg). En dessous de ce seuil, les sols ont de grande chance d'être dégradés. Dans la majorité des cas, cet objectif n'est en général pas atteint. Une étude sur le canton de Genève a permis de chiffrer l'équivalent CO₂ que pouvaient stocker les sols agricoles du canton pour combler le déficit et arriver aux objectifs minimaux de qualité structurale. Il s'agit de 550'000 à 600'000 tonnes de CO₂ qui pourraient être séquestrées et cela représente une grande part des objectifs de réduction fixés par le plan climat du canton : « *The CO₂ storing potential of the cultivated soils, as equaled to the minimum SOC the soils should reach for soil structure quality, would then amount from 32.0% to 34.9% of the reduction goal (Dupla, 2018)* ».

La forme de la matière organique qui nous intéresse est l'humus puisqu'il s'agit d'une forme stable qui contribue à la formation du complexe argilo-humique. L'humus va être au cœur des enjeux de demain et pourrait devenir une matière rare, recherchée et indispensable. Cette dernière peut répondre à de nombreuses problématiques climatiques, environnementales, écologiques ainsi qu'agronomiques comme l'érosion des sols, l'érosion de la biodiversité (principalement des sols), la désertification, la résilience des systèmes et biens d'autres. Le sol est un puit réversible (Baveye et al., 2018), il faudra veiller à que ce dernier ne continue pas sa diminution de teneur en Corg avec l'élévation de la température.

1.2.2 Les ressources de matières organiques limitées

Nous avons vu précédemment que les sols agricoles manquent de carbone organique. Mais augmenter cette teneur n'est pas évident dans les systèmes de production actuels. Cela demande aux agriculteurs de s'investir sur cette thématique, alors que leur emploi du temps est déjà bien chargé. Pour les raisons vues précédemment, il semble opportun que cet effort soit fait pour la société mais aussi pour l'exploitant et la durabilité de son exploitation.

Pas de stockage de carbone sans ressource organique

Les apports de matières organiques réguliers, en plus de pratiques agricoles adaptés, sont essentiels pour maintenir voire augmenter la MOs. La matière organique constitue une source carbonée pour les sols et est essentielle pour la fertilité ainsi que l'activité biologique. Elle est impliquée dans les processus énergétiques de l'écosystème « sol ». Elle est à l'origine de la fertilisation naturelle des plantes grâce au processus de minéralisation. L'humus produit par l'intervention des organismes (humification) garantit la qualité structurale et favorise les fonctions du sol. On reproduit alors le processus naturel que l'on retrouve dans les forêts naturelles (climax). Il faut savoir que la dynamique de la MOs en lien étroit avec le stockage de Corg, varie beaucoup en fonction du climat (la chaleur et l'humidité impactent la minéralisation) et du type de sol (la teneur en argile impacte la stabilité des Mos). Le changement climatique est un facteur à prendre en compte puisqu'il modifie également la dynamique régionale. Une étude a analysé les pratiques agricoles de stockage de Corg performantes et réalisables à l'échelle du canton de Genève. Il est donc possible d'extrapoler au plateau Suisse. Les pratiques de l'agriculture conservation, à savoir le travail limité voire nul du sol, l'utilisation régulière de couverts végétaux diversifiés et l'application de matières organiques semblent avoir de bons résultats (Dupla, 2018).

Les différentes ressources organiques

Les matières organiques peuvent avoir plusieurs origines. Elles peuvent provenir du champ lui-même comme les résidus de culture, de couvert ou d'engrais verts. Elles peuvent être issues d'animaux de la ferme ou d'une autre exploitation comme les fumiers ou les fientes. Enfin, elles peuvent provenir de recyclage interne ou externe à l'exploitation et constituer le compost, les déchets verts ou d'autres sources. Au même titre que la dynamique de stockage varie d'une région à l'autre, les matières organiques ne sont pas toutes égales dans leur composition et leur dynamique d'humification. Elles sont d'origine animale ou végétale. Une fois compostée, certaines matières ont une intensité de stockage plus importante. C'est le cas du fumier qui possède une plus grande proportion de Corg stable une fois composté (Koga and Tsuji, 2009).

La ruée vers les matières organiques : problème quantitatif

Il semble opportun de ne plus considérer le sol comme un vulgaire support de culture. Pour cela il faut lui apporter de la matière organique mais les ressources sont limitées. La ressource carbonée est essentiellement constituée de biomasse. La biomasse produite pour alimenter l'agriculture n'est aujourd'hui pas suffisante. En effet, à part les résidus de culture qui sont cependant parfois exportés

ou détruits et les fumiers ou fientes qui ne sont pas présents dans toutes les exploitations, l'agriculture doit procéder à des apports extérieurs comme le compost (le compost interne à l'exploitation est anecdotique). Cependant si tous les agriculteurs font des apports de compost réguliers et conséquents (maximum 100 tMs/ha tous les dix ans et 25 tMs/ha tous les trois ans (Confédération Suisse, 2005)) la ressource viendrait à manquer et elle est clairement insuffisante. La disponibilité du compost sur le canton de Genève a été jugée insuffisante pour permettre d'arriver aux objectifs de séquestration de carbone (Dupla, 2018). En effet, la principale plateforme de compostage est celle de Chatillon et elle produit 5'500 tonnes de compost par an (Dupla, 2018). Il y a 6'978 hectares de cultures sur le canton, cela représente donc un apport de 0,8 t/ha/an soit environ dix fois moins que la moyenne des agriculteurs qui font des progrès en teneur de MOs et qui sont dans les règles. Il y a donc un manque considérable de ressources carbonées pour amender les champs dans l'optique de répondre aux enjeux climatiques et agronomiques et ceci n'est pas uniquement valable sur le canton de Genève mais généralisable à l'agriculture mondiale. L'approvisionnement en matières organiques est donc un enjeu de taille actuel et futur.

L'agriculture, gouffre à nutriments

Les exportations des parcelles qui constituent le fourrage du bétail ou tout simplement notre nourriture, déséquilibrent le milieu. L'agrosystème, contrairement à l'écosystème naturel, est un système plus ou moins ouvert selon les pratiques qui a tendance à appauvrir le sol. Il vient avec cette thématique, les problématiques des nutriments et le transfert de fertilité. Aujourd'hui les cultures sont majoritairement fertilisées par des engrais minéraux issus de ressources minières non renouvelables pour le phosphore et le potassium et très énergivore pour la création d'azote assimilable par les plantes. Par exemple, la dépendance aux engrais azotés est importante puisqu'on estime que 40 % des protéines produites à l'échelle globale sont issues d'engrais azoté (INRA, 2015). Les ressources en roche phosphatée sont très limitées et devraient s'épuiser dans une cinquantaine d'années. Il faut également s'avoir que le phosphore détermine la production primaire et par conséquent, le stockage de carbone dans les écosystèmes. Les différents modèles d'atténuation du réchauffement climatique ne prennent pas en compte cela.

L'apport de matières organiques sous toutes ses formes est un moyen de fertiliser les cultures en plus de tous les bénéfices que l'on a pu citer ci-dessus. Mais il n'y a pas de miracle, les nutriments issus de cette biomasse sont issus du lieu où elle a été produite. S'il s'agit d'un apport extérieur, il y a transfert de fertilité. En revanche, si la biomasse est produite au sein de l'exploitation, cela contribue à fermer partiellement les flux.

1.3 Conclusion

Le changement climatique menace l'agriculture et la sécurité alimentaire. La séquestration de carbone dans les sols peut à la fois contribuer à rendre le système agricole plus robuste face aux changements et à la fois réduire l'intensité de ce dérèglement. Les pratiques favorisant un stockage de carbone commencent tout juste à être mises en évidence et la recherche continue. La matière organique reste un point central de ces pratiques. Quelle que soit son origine la ressource est limitée.

Partie II : Le bois raméal fragmenté (BRF) : une ressource complémentaire et prometteuse

2.1 Définition et caractéristique

2.1.1 Principe

Le terme BRF est utilisé dans de nombreux cas pour désigner souvent plusieurs choses différentes. Pour éviter toutes confusions et savoir précisément la signification de ce terme, une définition plus précise doit être faite. En effet, il devient alors difficile de faire la différence entre les copeaux de bois, les plaquettes de bois, les broyages de matières organiques, les composts, le bois énergie, etc...

Les BRF sont constitués de rameaux et de petites branches de moins de 7 cm de diamètre, issus d'angiospermes et plus précisément de dicotylédones ligneux (Tissaux, 1996). Il faut savoir que la concentration en nutriments des branches décroît de façon exponentielle avec l'accroissement du diamètre. La proportion de bois vital (l'aubier riche en assimilât) par rapport au bois mort (bois collinaire ou de cœur riche en lignine) décroît avec l'augmentation du diamètre des branches. Ces jeunes branches sont plus riches en protéines et donc en azote ce qui confère à la matière un taux de carbone sur azote (C/N) moins élevé que le bois de tronc. Cela a son importance dans la décomposition de la matière organique, nous reviendrons sur ce sujet plus tard dans le récit. Les gymnospermes sont à proscrire car leur bois contient des composés toxiques pour la vie du sol. Le bois de conifère est acidifiant et difficile à décomposer. Les résines (composées de dérivés de diterpène et monoterpène) et les constituants du duramen contenus dans les résineux, stoppent les processus d'humification et de minéralisation. Une litière de conifère ne possède pas les caractères aggradants de celles des feuillus. Les forêts de gymnospermes sont à l'origine de sols moins riches en biodiversité comme les PODZOSOL et donc peu stables (Dodelin et al., 2007). Ce n'est pas ce qui est recherché avec le BRF. En effet, on recherche à créer un humus de type « mull » et non « moder » ou « mor ». Cependant une proportion de 20 % de conifères est tolérée dans la confection du BRF. Il est préférable d'utiliser le bois dormant, c'est-à-dire qui est en repos végétatif. Ce dernier est plus riche en nutriments car les sucres et les sels minéraux contenus dans les feuilles, retournent dans la branche avant l'abscission. C'est le phénomène de translocation qui permet aux éléments les plus mobiles, comme le potassium, l'azote, le magnésium, le phosphore ou encore le soufre, de migrer dans le rameau. La teneur en nutriments des branches varie donc en fonction de la saison et du diamètre. Les rameaux jouent donc un rôle de réservoir où les éléments nutritifs sont stockés. Ces nutriments sont facilement mobilisables au printemps pour garantir le débourrement et être temporairement indépendants de l'alimentation racinaire. Pour la confection du BRF, les branches doivent être fragmentées grâce à un broyeur. Le volume des copeaux doit être compris entre 2 et 5 cm³ (Tissaux, 1996) pour avoir une surface suffisamment grande pour permettre la dégradation mais ne pas être réduit en poussière, ce qui favoriserait la minéralisation rapide du matériau. Cette opération permet de détruire les barrières physicochimiques, comme les cires ou l'écorce et d'accroître la superficie colonisable par les micro-organismes.

Définition des termes

Le vocabulaire utilisé pour définir les branches est très diversifié et on a souvent tendance à mélanger les termes. Alors quelle est la différence entre des rameaux, des petites branches, du bois raméal ou encore des rémanents ? En général un rameau est une branche de moins de 3 cm de diamètre et une petite branche est comprise entre 3 et 7 cm de diamètre. On croise souvent les termes « rémanents » ou « bois raméal ». Ce sont des synonymes de rameau et petite branche.

2.1.2 Origine

Historique

Tout commence en 1970 au Québec avec Edgar Guay qui est alors Ministre adjoint au Ministère des Terres et Forêts (Asselineau and Domenech, 2007). C'est un peu par hasard qu'il découvrit un sous-produit constitué de copeaux de bois issus de l'industrie de l'huile essentielle de pin. Ce dernier fut utilisé pour pailler des fraisiers. Il fut marqué par la taille des fraises produites. Il s'intéressa donc au matériau et réalisa des analyses en 1974 où il se rendit compte que le produit était riche en lignine, en acides aminés et en éléments fertilisants. Les branches de résineux ne sont pas désirées dans le BRF à cause de leur teneur élevée en composés toxiques pour la vie du sol. Néanmoins, le processus d'extraction de l'huile essentielle chauffe le matériau ce qui réduit la concentration de ces composés. C'est ainsi que cet effet néfaste n'a pas été identifié par Edgar Guay. En 1978, il réalisa une expérimentation à la suite de la demande d'un producteur de céréales qui constata que ses sols n'étaient plus assez fertiles. Cette fois-ci M. Guay utilisa des rameaux de feuillus qu'il avait à disposition et qu'il disposa en paillis de broyage sur le sol. Après un été exceptionnellement sec, il constata que l'orge traité avec le paillage poussa normalement. Il appela un collaborateur, Lionel Lachance Directeur des productions végétales au Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. Ils constatèrent que le sol fut restructuré. C'est alors que de nombreuses recherches, expérimentations et documentations ont eu lieu à l'issue de ces constatations avec l'aide d'autres acteurs comme Jacques Hébert (documentaliste du Ministère de l'Énergie et des Ressources) ou encore Alban Lapointe (ingénieur forestier) :

- La première étude a été publiée en 1981 sous le titre « Observations sur l'emploi de résidus forestier et lisiers chez trois agriculteurs » (Asselineau and Domenech, 2007). En 1982 l'Université Laval (première école forestière du Québec) rejoint le mouvement et sollicite Edgar Guay, alors fraîchement retraité, à continuer ses recherches. C'est ainsi que M. Guay fit la connaissance du Dr. Gille Lemieux alors professeur à l'Université.
- En 1983, fut créé le « Groupe de coordination des bois raméaux (GCBR) » qui regroupe douze chercheurs. Dr. Lemieux c'est alors pris de passion pour ce sujet et a consacré sa vie au broyage de branches. Il est à l'origine du terme « bois raméal fragmenté (BRF) » que l'on connaît aujourd'hui. Trois brevets ont été créés concernant le BRF : « Sylvagraire » déposés par le gouvernement Canadien qui s'applique à l'agriculture (notamment au grand culture), « Sylvasol » pour une application en sol forestier et « Sylchumus » pour l'horticulture. Ces brevets sont aujourd'hui caducs.
- En 1984, Jacques Hébert se pose déjà la question de l'approvisionnement à grande échelle de cette matière organique et propose d'affecter de la surface dans les exploitations pour la culture intensive en courte rotation de feuillus pour récolter tous les 2 ans le bois produit. Il testa avec succès le procédé et lança un plan de diffusion et de promotion des BRF. Malheureusement le mouvement n'a pas eu beaucoup de succès et s'essouffla peu à peu.
- Par la suite, l'Université Laval et Gilles Lemieux de continuer à travailler activement sur le sujet. Dr. Lemieux était au département de foresterie et de géomatique. C'est ainsi qu'il a commencé à travailler sur la régénération de forêt sur terrain devenu stérile. Les résultats ont été très concluants puisque l'apport de BRF a permis la végétalisation de terrains restés nus depuis 40 ans alors que les témoins sont restés stériles. C'est à partir de là qu'il a mis en évidence le caractère aggradant du BRF et sa capacité à relancer la pédogénèse des sols très dégradés. Le spécialiste s'est ensuite tourné vers l'agriculture en obtenant là encore des résultats prometteurs. Il a testé le BRF sur trois continents (Québec, Sénégal et Ukraine) et les constats sont les mêmes sur tous les lieux d'études. Le rendement est plus important, les récoltes sont de meilleures qualités, des économies d'eau sont faites, etc...

- Quatre colloques ont été réalisés entre 1985 et 1993 dans l'espoir de dynamiser la recherche dans ce domaine. Malheureusement, le BRF n'a pas obtenu un grand succès malgré la sollicitation de Gilles Lemieux et de son équipe pour réaliser des recherches de plus grandes envergures. Pour cela ils ont fait appel à des grandes institutions comme la FAO ou l'IFOAM mais l'ensemble de la communauté scientifique de l'époque n'a pas adhéré au BRF et les fonds n'ont jamais été débloqués.
- De 1980 à 2007 c'est plus de 200 publications qui ont été publiées sur le sujet (Asselineau and Domenech, 2007), majoritairement écrites par le Dr. Lemieux et ses collaborateurs. Entre 2007 et 2018 on retrouve également 200 publications un peu plus dispersées sur le globe, notamment avec un certain nombre affecté aux milieux tropicaux.
- Le dernier colloque sur les BRF a eu lieu à Lyon en 2007 (Dodelin et al., 2007). Ce dernier a regroupé plus de 230 participants originaires de 11 pays dont le Canada, la France et la Suisse.

Il y a très peu de littérature au sujet du BRF validée par les pairs et cela est certainement dû au faible succès qu'a eu ce sujet auprès de la communauté scientifique. Par soucis de clarté, les références issues de documents validés par les pairs, seront inscrites en **bleues**. La faible disponibilité de cette ressource est un frein à l'utilisation du BRF et cela explique également la difficulté du sujet à trouver sa place (Lecourtier, 2018). Cette littérature est majoritairement francophone.

2.2 Utilisations actuelles

Nous avons vu que les BRF n'ont pas eu grand succès malgré l'incitation de différents acteurs qui ont consacré leur vie à ce matériau. Il faut néanmoins noter que les nombreuses publications Québécoises ont traversé l'Atlantique et les BRF ont commencé à apparaître en Europe dans les années 90. Mais ce n'est réellement à partir de 2004 que les bois raméaux fragmentés ont été introduits dans les champs, avec notamment la mise en place de parcelles en BRF en France et en Belgique. C'est un ingénieur agronome belge, Benoit Noël, qui a fait une partie de son cursus à l'Université Laval et un agriculteur français, Jacky Dupéty, qui ont été les précurseurs en Europe. M. Noël a expérimenté le BRF pendant deux ans avec le soutien du Ministère de l'Agriculture de la région de Wallonne en Belgique. Il s'est intéressé à l'épandage de ce matériau in situ sur 7 ha en faisant un suivi sur différentes cultures représentatives de la région (betterave, maïs, froment d'hiver, orge, épeautre, pomme de terre, etc...) et différents types de sols, principalement limoneux à sablo-limoneux (Noël and Marche, 2006). Il a étudié la faisabilité de la mise en pratique en milieu agricole et il a travaillé sur des itinéraires techniques dans le cadre de culture simplifiée. Cet essai a pu répondre à certaines questions comme la quantification de l'immobilisation de l'azote la première année. Malgré cette expérimentation, le BRF reste aujourd'hui très peu utilisé en grandes cultures. La création d'une ressource suffisante reste malheureusement un frein à l'utilisation des BRF nonobstant des résultats très prometteurs.

Néanmoins, le BRF trouve de plus en plus sa place en culture spéciale comme le maraîchage. Cela s'explique par une échelle plus restreinte, une meilleure valorisation de la production par surface qui permet de mettre plus simplement en place les BRF et ainsi de justifier son coût d'installation. Jacky Dupéty, maraîcher biologique dans les Causse du Quercy (Lot, France) qui est une région peu adaptée pour la production de légumes car très sèche (moins de 700 mm par an) et ayant un sol très drainant, utilise le BRF et prône cette technique. Il a observé des résultats prometteurs et il affirme avoir une production de légumes exceptionnelle grâce à cette pratique. Son enthousiasme et son expérience avec le BRF ont sollicité de nombreuses réactions. Il organise aujourd'hui des conférences et diffuse dans de nombreux médias son expérience avec les BRF. Il s'agit principalement d'observation empirique, même si Benoit Noël a réalisé quelques analyses dans son terrain. Mais ce paysan joue un rôle important dans la vulgarisation des bois raméaux fragmentés et cela a dynamisé son utilisation. On retrouve aujourd'hui le BRF dans la collectivité, les parcs et jardins ornementaux ainsi que dans les

petites exploitations principalement de cultures spéciales. Son utilisation ne cesse de croître grâce notamment aux acteurs qui le vulgarisent et au courant prenant de plus en plus de place comme la permaculture. Son usage en grande culture n'est encore que très peu répandu et une sorte de résistance semble être installée. Les modes de cultures et la peur du changement sont des aspects qui limitent l'usage du BRF en plus des problèmes de ressources.

Les BRF sont parfois utilisés comme litière pour le bétail en substitution de la paille. Il semblerait que les fumiers ou les fientes issus de cette méthode, relâchent moins d'azote volatil et ainsi les odeurs au moment de l'épandage sont fortement diminuées (Lecourtier, 2018).

2.3 Le BRF ressource complémentaire

Nous avons pu voir que les ressources en matières organiques sont limitées et largement insuffisantes pour alimenter l'agriculture. Elles sont néanmoins indispensables pour répondre aux enjeux de demain.

2.3.1 Ressource prometteuse

Le bois raméal fragmenté est un amendement organique complémentaire aux autres formes actuelles (compost, fumier, etc...). Les rémanents (rameaux de bois) sont actuellement peu utilisés en agriculture mais ont un grand potentiel aussi bien en termes de qualité de la matière organique, qu'en quantité de biomasse produite. Il s'agit donc d'une ressource prometteuse (cf. partie 2.6.1). Il s'agit maintenant de savoir comment créer cette ressource en bois raméal fragmenté.

2.3.2 La filière du bois raméal

Pour pouvoir alimenter le système agricole de manière significative, il faut trouver la ressource en BRF. Cette ressource peut venir du milieu urbain, des bords de route et des voies ferrées avec notamment les déchets verts ligneux. Ces mêmes déchets verts ligneux peuvent être transformés en BRF mais rentrent donc en concurrence avec la production de compost et sont soumis aux mêmes problématiques comme les polluants par exemple. Tout ce qui est converti en BRF ne sera pas composté. Le procédé ne demande, a priori, pas plus d'énergie que le processus de compostage. Actuellement, les déchets compostés, sont broyés, mis en andain et brassés régulièrement. La création de BRF qui implique uniquement une coupe de branche, un broyage et un épandage, semble donc moins énergivore que le compostage. De plus, le compostage est un processus de transformation des matières organiques fraîches en matières organiques compostées avec la formation d'humus. Une partie du carbone est utilisée par les microorganismes pour cette transformation. A l'inverse, le bois raméal est directement épandu sur le champ après broyage. La totalité du carbone est donc mis à profit du sol.

Les forêts sont une ressource potentielle. Actuellement les branches du bois d'œuvre exploitées en foresterie sont soit laissées sur place soit utilisées pour l'énergie (France bois forêt and Interprofession nationale de la filière forêt-bois, 2013). Il faut savoir que les branches contiennent la majorité des nutriments d'un arbre (Dodelin et al., 2007). Il est possible de les utiliser pour amender les champs. Néanmoins si on exporte de la biomasse de ces milieux (au même titre que l'exportation de branches pour l'énergie), on crée un déséquilibre et un transfert de fertilité. L'objectif est de rééquilibrer le système agricole. Ce dernier n'est donc pas viable s'il occasionne un déséquilibre d'un autre système. De plus, le caractère très localisé de cette filière pose quelques problèmes. En effet, il existe une disparité entre les grandes régions forestières et les grandes régions agricoles. L'utilisation de rémanents en provenance des forêts n'est donc pas viable ni durable. De plus les volumes produits sont ici encore trop faibles pour subvenir aux besoins de l'agriculture.

Les haies au sein même des terres agricoles peuvent être source de bois raméal. On compte 810'000 ha de haies (ce qui représente 1,62 million de km de haies d'une épaisseur de 5 mètres) en France dont 60 % sont implantées sur les terres agricoles (Chambres d'agriculture France, 2015). Ces haies sont principalement composées de chênes, d'ormes, de frênes, de peupliers, de hêtres, de châtaigniers, d'aulnes, d'autres feuillus et de très peu de résineux (INRA, 2002). La composition de ces haies permet donc de créer une ressource en BRF. Le potentiel de production des haies peut aller jusqu'à 17 t (production de biomasse de pointe) de matière sèche (MS)/ha/an (Chambres d'agriculture France, 2015). Le BRF frais est composé à 60 % de MS et a une densité de 0,35 t Mf/m³ (Noël and Marche, 2006). Avec ces surfaces de haies, il peut être produit 13,77 millions t/Ms soit 22,95 millions de tonnes de branches fraîches ce qui représente 65,57 millions de m³ de BRF. Avec ce volume, **655'714 ha de terre arable** (assolé) peuvent être amendées à raison d'un centimètre d'épaisseur (100 m³/ha) soit **3,56 %** (ou 2,14 % si on utilise uniquement les haies du territoire agricole) de la totalité des terres arables en France. **7,12 % des terres arables** peuvent être amendées à raison de **0,5 cm d'épaisseur**. Dans le cas Suisse, les **haies et les bosquets représentent 4 à 10 % de la surface boisée totale** (Altwegg and Weibel, 2015). Pour la réalisation d'un exemple chiffrée nous allons utiliser la fourchette basse de 4 %, ce qui constitue un pourcentage plus réaliste de la part réellement exploitable pour l'agriculture. Les haies et les bosquets représentent donc une surface de **51'000 ha en Suisse**. Ces surfaces peuvent produire quatre millions de m³ de BRF ce qui permettrait de couvrir **80'000 ha** à raison de 50 m³/ha, soit **20 % des terres assolées Suisses**. Nous pouvons voir que la Suisse possède, à première vue, un réseau bocager plus dense que celui de la France.

Il s'agit donc d'un potentiel qui n'est pas négligeable en termes de ressources carbonées. Encore faut-il trouver un moyen économiquement viable d'exploiter la haie pour en faire du BRF et résister face à la tentation de convertir cette ressource en bois énergie. La ressource en BRF peut être créée avec les haies existantes mais les chiffres nous montrent que cela est insuffisant pour un objectif d'utilisation du BRF à grande échelle. Rajoutons à cela les problèmes d'homogénéité des haies sur le territoire. Il y a des régions où ces alignements d'arbres ont complètement disparu. La réintroduction des haies dans le système agricole semble être une des solutions.

La production de branches pour des usages énergétiques ou pour l'amendement organique existe. C'est notamment le cas des taillis à courte rotation (Asselineau and Domenech, 2007). Mais cette production nécessite de la surface qui n'est pas disponible sur le territoire Suisse puisque seulement un tiers de la surface du pays est disponible pour les activités (urbanisme, agriculture, etc...). Cette production est aussi sujette à la problématique de transfert de fertilité sauf si elle est utilisée dans le cadre de valorisation des boues d'épuration, auquel cas il s'agit d'une technique pour récupérer les nutriments et réduire l'ouverture des cycles.

2.3.3 Réintégrer la haie dans le système agricole

Nous l'avons vu précédemment, l'utilisation à grande échelle du BRF pose un véritable problème quantitatif et il existe certains freins à l'importation de matières organiques. Il semble donc opportun de créer la ressource carbonée au sein même du système agricole. Il faut réintégrer l'arbuste et l'arbre dans les champs. En effet, depuis la politique de remembrement, ce sont des milliers de kilomètres de haies qui ont disparu du paysage agricole. En France, entre 1975 et 1987, 45'000 km de haies (environ 20'000 ha) soit plus 70 % de la longueur totale ont été coupées pour répondre au besoin de l'agriculture intensive (IFEN, 2000). Dans le monde il s'agit de plus de deux millions de kilomètres de haies abattues.

Nous avons vu que l'agriculture a un besoin urgent d'atteindre des teneurs en Corg élevées. Retrouver un paysage bocager comme à la fin du XIX^{ème} siècle pourrait bien répondre à la demande en amendement organique nécessaire pour arriver aux objectifs. En plus de proposer une source de

carbone organique, les haies possèdent un ensemble d'avantages agronomique, écologique et climatique (Asselineau and Domenech, 2007):

- Effet brise vent : un grand allié contre la verse des cultures, le dessèchement du sol, la dérive de produits de traitement et bien d'autres problèmes.
- Préservation du sol et de l'eau : favorise l'infiltration de l'eau, évite l'érosion de surface en limite le ruissellement de surface et épure l'eau de ses polluants.
- Augmentation de la fertilité et des rendements : augmente la réserve en eau du sol, crée une structure aérée favorisant l'infiltration, augmente la teneur en MO du sol, allonge la période de végétation. En présence de haies, on peut observer des augmentations de rendements de l'ordre de plus 5 à 30 % en grande culture et de plus 50 % en arboriculture fruitière (Asselineau and Domenech, 2007).
- Ressource en matières utiles : pour la pharmacopée, bois d'énergie, BRF, fruits.
- Protège et enrichit la biodiversité : en proposant des niches écologiques pour les pollinisateurs et les auxiliaires. Un équilibre se crée et l'on observe une augmentation de la résilience.
- Pollution retenue : limite la lixiviation et les dérives, épure les eaux.
- Diversifie le paysage.
- Crée un microclimat : la haie limite les extrêmes en diminuant les fortes chaleurs par ombrage ainsi que l'évaporation de l'eau et limite les gelées tardives. Elle freine l'évaporation de surface et lutte contre l'assèchement du sol.
- Séquestration de carbone : Source de matière carbonée mais favorise également la séquestration de carbone dans son environnement proche en relâchant des exsudats racinaires et dynamisant l'activité biologique de sa rhizosphère. On retrouve jusqu'à 17 kg de carbone séquestré par m³ de sol sous une haie contre 12 Kg en sol nu (Asselineau and Domenech, 2007). Une haie de 3 kilomètres peut séquestrer jusqu'à 2 tonnes de CO₂ par an.
- Recyclage des nutriments : la haie capte des nutriments qui ne sont pas accessibles par la culture grâce à une profondeur d'enracinement plus importante. Elle limite donc la lixiviation et augmente l'utilisation de la réserve en nutriments. Ces éléments nutritifs se concentrent dans les jeunes rameaux qui sont ensuite revalorisés en BRF sur les cultures. De plus, avec une bande enherbée riche en fabacées de part et d'autre de la haie, on crée une ressource riche en azote. Ce procédé est intéressant pour limiter la dépendance des intrants et contribue à limiter l'ouverture des cycles.

Néanmoins, les agriculteurs peuvent être réticents quant à l'implantation de nouvelles haies sur l'exploitation. En effet, malgré les nombreuses forces évoquées ci-dessus, la haie possède également des faiblesses. Premièrement, la surface occupée par les alignements végétaux n'est plus cultivable. Une haie de deux kilomètres faisant 5 mètres de large représente 1 ha. Deuxièmement, ces végétaux sont un obstacle gênant dans la réalisation des travaux mécaniques en champ. Troisièmement, les haies peuvent produire un microclimat retardant la culture se trouvant dans l'ombre portée. Dernièrement, la concurrence, même si elle est souvent compensée, existe et peut être clairement visible sur la vitalité de la culture aux alentours de la haie. Tous ces aspects ont tendance à donner une mauvaise image des haies aux exploitants, surtout qu'ils sont directement visibles contrairement aux aspects bénéfiques plus discrets et plus difficiles à discerner.

Il existe plusieurs façons de réintégrer l'arbre dans les champs. L'agroforesterie est intéressante car elle produit une valeur supplémentaire à valoriser pour l'agriculteur et possède les avantages cités ci-dessus. De plus, la biomasse produite est plus importante que celle des monocultures prisent séparément. Il s'agit de plus 10 à 60 % de biomasses supplémentaires (Asselineau and Domenech, 2007). Sous nos latitudes, les rendements de la culture principale peuvent être inférieurs à cause du

manque de lumière captée par les arbres et un retard de précocité en raison de températures trop fraîches en début de culture. La haie a une moins grande concurrence et est plus simple à mettre en place. Il existe plusieurs types de haies productrices de bois.

Réintégrer l'arbre et l'arbuste sous toutes ces formes (isolé, haie, agroforesterie, etc...) dans le système agricole semble être une solution pour créer une ressource carbonée. Vient maintenant des questionnements sur la viabilité de la pratique. Réintégrer des haies pour en faire un nouvel amendement demande une implication conséquente.

2.4 Composition du BRF

Au même titre que le compost, la qualité des bois rameaux varie beaucoup dans le temps et l'espace. C'est pour cela que nous parlons en général « des bois raméaux fragmentés » et non « du bois raméal fragmenté ». En effet, l'origine des branches est très variable et les espèces utilisées sont nombreuses. Cette matière varie en fonction des espèces, mais aussi au sein des mêmes espèces utilisées. Prenons l'exemple d'un BRF composé de frêne. Entre deux frênes poussant dans les mêmes conditions pédoclimatiques, la différence de composition de leur bois est dû à la variabilité génétique. Si cette fois-ci les frênes sont issus de clone (bouturage, multiplication in-vitro, etc...) et qu'ils ne reçoivent pas les mêmes conditions (sols, climat, etc...), la variabilité de composition de leur bois est principalement causée par l'environnement dans lequel ils poussent. Ces variabilités n'ont pas toute la même importance. La variabilité génétique dû au génotype est négligeable dans le cadre de la confection du BRF (Tissaux, 1996). La variabilité environnementale peut influencer sur la qualité des BRF, notamment la teneur en éléments polluants comme les métaux lourds (pollution se déposant sur les parties végétatives par exemple). La variabilité interspécifique est la plus importante, la composition des BRF change considérablement en fonction des espèces utilisées mais il s'agit souvent d'un assemblage de plusieurs espèces (déchets verts, haie plurispécifique, etc...).

2.4.1 Eléments chimiques

Le BRF est constitué de diverses molécules organiques et au sein même de ces molécules, des nutriments essentiels à la croissance des plantes sont présents en concentration variable. Les molécules organiques vont directement nous intéresser dans les processus d'humification et les nutriments dans les mécanismes de minéralisation pour la fertilisation apportée au sol et aux plantes.

Molécules organiques

Les BRF sont principalement constitués de cellulose, d'hémicellulose, de lignine, de protéines, de sucres et d'acides aminés ainsi que de métabolites secondaires comme les polyphénols (Tissaux, 1996). Nous allons décrire succinctement chaque constituant pour mieux comprendre les mécanismes de dégradation et d'évolution de ces matières dans le sol :

- **La cellulose** : il s'agit d'un glucide constitué d'une chaîne linéaire de molécules de D-Glucose pouvant former de 15 à 15'000 liaisons. C'est donc un polymère de glucose qui représente le principal constituant de la paroi des cellules végétales et donc du bois. Ce polymère a une structure fibreuse qui suivant sa taille forme des microfibrilles, des macrofibrilles et des fibres de celluloses.
- **L'hémicellulose** : c'est le deuxième composant d'une paroi pectocellulosique chez les végétaux, après la cellulose. Elle relie entre elles les fibres de celluloses. Elle joue donc un rôle important dans le maintien d'une architecture organisée des tissus. C'est une fibre polysaccharide non amylacée. Ce polymère n'est pas uniquement constitué par un seul type de sucre. En plus du glucose, il peut contenir du xylose, du mannose, du galactose, du rhamnose ou de l'arabinose.

- La lignine** : c'est un ensemble de macromolécules polymérisées, principale constituant du bois avec les deux molécules vues précédemment. Elle apporte de la rigidité, de l'imperméabilité à l'eau et aux organismes nuisibles et une grande résistance à la décomposition. Sa forme est très variable, également au sein d'une même espèce et sa formation dépend de l'environnement dans lequel le végétal croît. Nous parlerons alors des lignines. Ce sont des polymères de monolignols et il existe trois types de monomère différents (Dodelin et al., 2007) : l'alcool coumarylique, l'alcool coniférylique et l'alcool sinapylique (figure 1) qui sont plus souvent regroupés sous le nom d'alcools cinnamiques. Le bois de conifère est composé principalement de l'alcool coniférylique, ce qui en fait la lignine plus homogène et donc plus récalcitrante. En revanche la lignine des feuillus est plus hétérogène dans sa structure et est composée d'alcool coniférylique et sinapylique. Elle est communément appelée lignine « Guaiacyl-suringyle (G-S) » et contient une proportion plus importante de sous-structures avec des liaisons éthers. Ces liaisons sont plus faciles à scinder ce qui explique le phénomène de biodégradation des lignines issues de feuillus. Ces molécules ont un poids moléculaire élevé (entre 10'000 et 20'000 daltons) qui dépend du degré de polymérisation. Elles sont des polymères tridimensionnels qui jouent un rôle protecteur vis-à-vis de la cellulose et des hémicelluloses en empêchant l'attaque des enzymes (cellulase et hémicellulase produit pas les pathogènes). La concentration en lignine des plantes vasculaires est variable et représente en moyenne 18 à 35 % de leur poids total. Cette concentration est plus élevée chez les gymnospermes que chez les angiospermes. La lignine est moins polymérisée dans les rameaux que dans les grosses branches ou le bois de tronc (collinaire) mais en concentration plus élevée. Contrairement à sa forme qui peut être très variable même au sein d'une espèce, sa concentration ne varie que très peu.

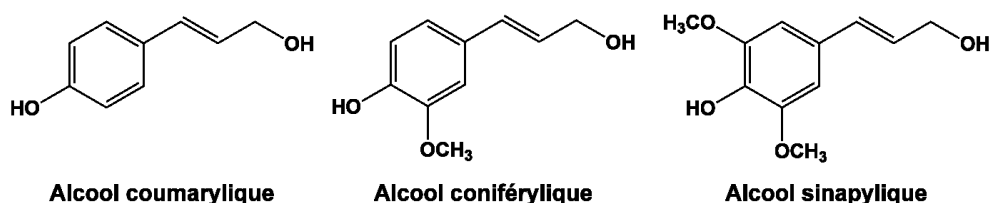


Figure 1 : Monomères précurseurs des lignines : alcools cinnamiques (Dodelin et al., 2007).

- Les polyphénols** : ce sont des métabolites secondaires qui sont caractérisés par la présence d'au moins deux groupes phénoliques généralement de haut poids moléculaire. Ils ont en commun la présence d'un ou plusieurs cycles benzéniques portant une ou plusieurs fonctions hydroxyle. Les polyphénols ainsi que les métabolites secondaires en général sont concentrés dans les canaux résinifères, dans les cellules des parenchymes de rayon, dans les lamelles moyennes et dans les parois cellulaires. Ils sont généralement solubles dans l'eau et ont un poids moléculaire compris entre 500 et 3'000 daltons. Parmi les polyphénols, on retrouve les tannins qui ont un rôle important dans le mécanisme de pédogénèse que nous allons traiter plus tard. La concentration des polyphénols varie selon la taille et l'âge de l'arbre. Elle varie également aussi en fonction de l'espèce. D'une manière générale, on retrouve plus de polyphénols dans le bois de cœur que dans les jeunes branches. Contrairement à la lignine, la teneur en composés phénoliques dans les tissus végétaux est corrélée avec la fertilité du site. La concentration en polyphénols s'accroît avec la pauvreté du site. Une plante en sous nutrition se retrouve avec un excès de carbone par rapport à la proportion d'éléments nutritifs, ce qui se traduit par une accumulation des composés phénoliques au détriment de la formation de protéines ou autres métabolites primaires (Lemieux, 1995). Les composés secondaires en général (résines, gommés, composés phénoliques) inhibent l'activité des

microorganismes s'ils sont présents en forte concentration. Ils peuvent avoir des effets antibiotiques, fongicides et toxiques. C'est encore plus vrai pour le bois de gymnospermes qui accumule de façon plus importante ces composés.

- **D'autres composés issus du métabolisme secondaire des plantes** : en plus des phénols on retrouve des graisses, des cires, des alcanes, des éthènes ainsi que leurs divers composants. Ces composés sont aussi impliqués dans les mécanismes de défenses de la plante et ont un impact dans la dégradation du bois. Comme les composés phénoliques, leurs concentrations augmentent avec l'appauvrissement du site. La teneur en métabolites secondaires connaît une variabilité importante en fonction de l'environnement et des conditions de croissances des végétaux. L'intensité lumineuse, la fertilité du terrain, la température et d'autres facteurs, influent sur ces concentrations.

Nous l'avons compris, il existe un grand nombre de molécules organiques présent dans les rameaux qui sont issu du métabolite primaire, mais également du métabolisme secondaire des plantes. Elles ont différents rôles, de la nutrition d'organe (sucres, lipides, protéines) en passant par les rigidités et le soutien (lignines) ou encore la protection contre les bio-agresseurs (les composés phénoliques). Ces molécules vont directement nous intéresser dans les processus d'humification et la dynamique des matières organiques formées. Elles ont un rôle essentiel et sont à l'origine des bienfaits de cet amendement. Pour illustrer la variation interspécifique et intraspécifique des teneurs de ces différents composés, le tableau n° 1 renseigne leur pourcentage du poids sec en fonction de différentes espèces et tailles de bois raméal. Trois espèces ont été évaluées, l'érable à sucre (*Acer saccharum*), l'aulne rugueux (*Alnus incana*) et le bouleau gris (*Betula populifolia*). Deux tailles de rameaux (3 cm et 7 cm de diamètre) ont été évaluées pour l'érable à sucre. Au sein des rameaux de 3 cm de diamètre d'érable à sucre, plusieurs modalités de dimension des copeaux de bois ont été testées (traitements 2, 4, 5, 6, 9). Cela n'a pas d'impact sur la concentration des composés. La méthode utilisée pour estimer la teneur en lignine est celle de « Van Soest 1963 » (Larochelle, 1994).

Tableau 1 : Composition chimique et biochimique des BRF adapté de Larochelle Louis, 1994.

Composantes	% du poids sec total en fonction des traitements			
	T2-T4-T5-T6-T9	T3	T7	T8
Essence d'arbres utilisés	Erable à sucre Ø 3 cm	Erable à sucre Ø 7 cm	Aulne rugueux	Bouleau gris
Composés phénoliques	2.41	2.25	5.72	3.74
Lignine	8.4	4.9	9.6	12.2
Azote	0.36	0.26	0.71	0.52
C/N	158	221	80	110

Nutriments

Nous avons vu précédemment que la teneur en nutriments baissait de façon très importante avec l'accroissement des rameaux. Cela est confirmé avec le taux carbone sur azote qui est plus élevé dans les rameaux de 7 cm que ceux de 3 cm de diamètre dans tableaux ci-dessus. Il faut également savoir que le contenu total en nutriments dans les rameaux est plus élevé chez les angiospermes que chez les gymnospermes (Lemieux et al., 1988). Cet élément est également une raison pour laquelle le bois de résineux est plus difficilement dégradé. On retrouve dans les rameaux, l'ensemble des nutriments essentiels à la croissance des plantes, à savoir neuf macroéléments et huit microéléments. La minéralisation du bois raméal fragmenté et de l'humus formé, permet de fertiliser les cultures. Les BRF constituent donc à la fois un amendement organique qui contribue à améliorer la structure et donc la qualité des sols, mais aussi un fertilisant organique non négligeable. Rappelons qu'en agriculture biologique, l'entier de la fertilisation est fait sous forme organique et qu'en agriculture conventionnelle, la tendance est d'augmenter la part fertilisée par les engrais organiques. Nous allons

nous intéresser aux trois macroéléments les plus importants dans la fertilisation végétale, à savoir l'azote, le phosphore et le potassium. Plusieurs études renseignent la teneur en éléments nutritifs du BRF. La variabilité de la matière première utilisée est grande, ce qui se traduit par des différences de teneurs importantes en fonction des études. Les nutriments et les molécules organiques ne sont pas les seuls sujets à cette variabilité. Les mesures physiques comme le taux de matière sèche et la densité des BRF varient également beaucoup. Pour illustrer cette variabilité, le tableau n° 2 fait la synthèse de trois études sur les BRF. Les teneurs en éléments fertilisants sont données en kg/tMS de BRF, pour ramener toutes les valeurs sur une unité comparable et ainsi avoir une idée précise sans que la densité variable du matériau impacte l'interprétation des résultats.

Tableau 2 : Teneur en éléments nutritifs de différents BRF issus de plusieurs études, en kg/t de BRF frais et kg/t de Ms.

Etudes	Densité	Taux de matière sèche (Ms)	Azote		Phosphore		Potassium	
	t/m3	%	kg/t	kg/tMS	kg/t	kg/tMS	kg/t	kg/tMS
Production BRF à partir de peupliers issue d'une parcelle en agroforesterie (NOUET 2011)	0,23	-	2,32	-	1,45	-	2,32	-
Utilisation de BRF dans la culture de la fraise d'été (Moussa 2013)	0,49	34,65	2,81	8,10	0,39	1,14	1,42	4,10
Mise en œuvre de la technique du Bois Raméal Fragmenté (BRF) en agriculture wallonne	0,35	60,00	5,15	8,58	1,14	1,90	2,00	3,33

La première étude a été effectuée avec du BRF de peuplier (NOUET, 2011), mais le taux de matière sèche n'est pas donné ce qui empêche le calcul des teneurs par tonne des matières sèches. La deuxième étude teste le BRF sur le rendement de fraise (Moussa, 2014), mais nous ne connaissons pas les espèces utilisées pour la confection du broyat. La dernière étude compare plusieurs modalités de BRF, d'origines et de compositions différentes. Les valeurs se basent sur la moyenne de 5 BRF issus de plusieurs matériaux végétaux, à savoir divers feuillus, robinier faux acacia, chêne et hêtre, divers feuillus compostés ainsi que conifères (Noël and Marche, 2006). Les valeurs pondérales de chaque BRF sont disponibles en annexe (Annexe 4). Nous pouvons voir que les teneurs en nutriments varient de façon importante. Les chiffres de la dernière étude sont à retenir car ils sont complets et se basent sur la moyenne de plusieurs BRF.

2.4.2 Teneur en carbone

Les BRF ont donc un pouvoir fertilisant, mais qu'en est-il de la teneur en carbone ? Nous avons vu que ce dernier est très important pour le sol et sa qualité structurale ainsi que pour le climat avec une séquestration potentielle dans le réservoir sol. Ce carbone est contenu dans les molécules organiques vues précédemment. Les BRF sont riches en polymères carbonés, ils ont donc une teneur en carbone importante.

Dans la dernière étude citée au point précédent, les cinq BRF sont comparés à d'autres matières organiques comme le compost. Le taux de carbone varie entre 26,17 % de la matière sèche pour le BRF de « hêtre/chêne » et 44,99 % de la MS pour le broyage de « branche de conifère » (Noël and Marche, 2006). Le **BRF de « divers feuillus »**, qui se rapproche le plus du bois raméal susceptible d'être utilisé en agriculture, possède une **teneur en carbone de 33,2 % de la MS**. Le compost contient moins de carbone puisqu'il possède une teneur de **23,9 % de la MS**. En moyenne, les **BRF contiennent 80% de matières organiques (% de la MS)**, contre **40 % de la MS pour les composts**. Il est important de tout ramener en pourcentage de la matière sèche pour obtenir des comparaisons correctes. Pour une tonne de matière sèche, il y a 330 kg de carbone dans le BRF et 240 kg de carbone dans le compost. Les deux

matières ont environ 60 % de matière sèche, en revanche le BRF a une masse volumique d'environ 350 kg/m³ contre 600 kg/m³ pour le compost (chiffre applicable aux matières organiques de l'étude). En pratique, une application de **BRF** en champ est de **100 m³/ha tous les trois ans** (soit 35 t matière fraîche et 21 t de Ms), ce qui représente 1 cm d'épaisseur (Noël and Marche, 2006). L'épandage de **compost** est de **25 t Ms/ha tous les trois ans** en pratique selon la réglementation Suisse en vigueur (maximum 25 t Ms/ha tous les trois ans et maximum 100 t Ms/ha tous les 10 ans). Nous pouvons donc conclure **qu'un apport de BRF apporte 7 tonnes de carbone/hectare et 17 tonnes de Mo/ha. Le compost apporte 6 tonnes de carbone/ha et 10 tonnes de Mo/ha.** L'épandage de BRF apporte légèrement plus de carbone qu'un amendement compost traditionnel et pratiquement deux fois plus de matières organiques (calculs réalisés avec les chiffres tirés de l'étude de B. Noël et C. Marche, 2006). Les bois rameaux fragmentés constituent donc une énorme source de carbone pour le sol.

Les BRF, en plus d'avoir une forte teneur en carbone, ont une très bonne aptitude à former de l'humus stable. Le coefficient isohumique (K1), qui illustre rendement de la transformation en humus stable des matières organiques (Wiki Auréa, 2016), est de 0,5. Cela signifie que 50 % de la matière organique sèche apportée au sol est transformée en humus stable. Cela représente 75 kg d'humus formé/m³ de BRF (Noël and Marche, 2006). Soit 7,5 t/ha d'humus par apport de 100 m³. Il y a donc un énorme potentiel de séquestration de carbone dans les sols avec cette ressource. Selon une étude on gagne 1 % d'humus stable en 10 ans avec le BRF (avec un apport de 23 tMs/ha), alors qu'il faut 67 ans avec un apport de fumier (21 tMs/ha), 28 ans avec un apport de compost (9 tMs/ha) et 100 ans avec l'implantation d'engrais vert intercalaire (4 tMs/ha) (Asselineau and Domenech, 2007). Après la première année d'un apport, l'augmentation de la teneur en MOs est faible (0 à 10 %) (Barthès et al., 2010). La seconde année, cette augmentation est plus importante (10 à 40 %) et à partir de la troisième année avec apports renouvelés, cette augmentation est encore plus importante (20 à 70 %). L'application de **25'000 m³ BRF** (cela correspond un amendement sur 250 ha à raison de 100 m³/ha) sur le sol **séquestre 20'000 tonnes de CO₂** (Asselineau and Domenech, 2007). Si cette même matière est brûlée, c'est plus de 62'000 tonnes de CO₂ qui sont rejetées dans l'atmosphère. Il y a environ 6'000 ha de terres ouvertes sur le canton de Genève (Faessler et al., 2009). A raison de 100 m³/ha et si on suppose avoir la ressource suffisante en BRF pour alimenter l'entier de la surface, cela équivaut à **séquestrer 480'000 tonnes de CO₂**. Ces chiffres peuvent ne pas être représentatifs puisqu'ils ont été produits lors d'études avec des conditions bien particulières (type de sol, climat, etc...). Nous ne savons pas si ces données sont généralisables à d'autres conditions et aujourd'hui il manque d'études à ce sujet. Néanmoins, cela permet de donner un ordre d'idée qui est intéressant. Dans le cadre du travail de l'estimation de la séquestration de Corg dans les sols du canton de Genève, nous avons vu que 550'000 à 600'000 tonnes de CO₂ doivent être stockées (Dupla, 2018). En plus des pratiques favorisant la séquestration de carbone, l'apport de BRF pourrait aider l'agriculture genevoise à arriver à l'objectif du plan climat cantonal, à savoir une réduction de 40 % de l'empreinte carbone pour 2030.

« Après deux années d'expérimentation, l'incorporation de BRF a fait augmenter la teneur en C total du sol (Tremblay and Beauchamp, 1998) ».

2.5 Devenir et évolution du BRF sur et dans le sol agricole

Le BRF est une matière organique riche en carbone. Le coefficient isohumique est relativement élevé. Il s'agit maintenant de savoir quels sont les processus de dégradation et de transformation des matières organiques que contiennent le BRF.

2.5.1 Processus de dégradation

L'apport de BRF en surface ou incorporé au sol est une source importante d'énergie. C'est un véritable réseau trophique qui se met en place (Asselineau and Domenech, 2007). Peu d'organismes sont capables de dégrader ces grosses molécules (lignines, etc...). Les champignons peuvent efficacement dépolymériser la lignine. Leurs hyphes sont munis d'enzymes, les ligninases comme par exemple la « lignine peroxydase (LiP) » qui permet aux champignons de métaboliser des petits fragments de la macromolécule (Dodelin et al., 2007). Cette hydrolyse enzymatique est impérative pour rendre les polysides disponibles. On retrouve trois types de pourriture (champignons). Tout d'abord les pourritures molles. Elles s'attaquent majoritairement au bois de feuillus mais en condition d'humidité élevée. Elles dégradent surtout la cellulose mais peu la lignine. Ensuite, on retrouve les pourritures brunes, qui dégradent principalement la cellulose et l'hémicellulose. La lignine est simplement altérée de façon partielle. Enfin, on retrouve les pourritures blanches. Ces dernières sont sans doute les plus importantes car elles sont les principales productrices de ligninases. Ce sont les organismes les plus efficaces pour dépolymériser la lignine et sont généralement des basidiomycètes. Les pourritures blanches sont capables de dégrader simultanément la cellulose, l'hémicellulose et les lignines. Ce sont les principaux organismes responsables de la dégradation du bois. Le BRF fournit des conditions favorables à ces champignons, ce qui favorise leur prolifération. Ces pourritures ont une préférence pour le bois d'angiosperme et c'est encore une raison pour laquelle l'utilisation du bois de feuillus est préconisée pour la création des BRF.

Les champignons de pourriture blanche métabolisent une partie de ces molécules organiques qui sont donc intégrées à leur biomasse. Il en résulte une minéralisation. Une partie du mycélium est ensuite ingérée par la pédofaune qui est aussi responsable de la fragmentation des matières organiques fraîches. Cette dernière n'est pas indispensable dans les processus de minéralisation et d'humification (qui est surtout l'œuvre des microorganismes) mais contribue fortement à accélérer le processus de biodégradation. Ces organismes participent au mécanisme de dégradation grâce à une action mécanique (fragmentation et augmentation de la surface spécifique) et grâce à une action biochimique (enzyme et microflore digestive). Parmi eux on retrouve de nombreux arthropodes et des vers de terre. Dans leurs déjections se retrouvent des matières organiques fraîches (fragments) ou partiellement transformées. Ces déjections sont ensuite décomposées par des communautés bactériennes et de protozoaires ou ingérées par les vers de terre (Asselineau and Domenech, 2007). Les bactéries métabolisent ces matières (déjection et contenu des cellules). Il s'agit de la minéralisation primaire ou les éléments se retrouvent sous forme minérale et donc à nouveau disponible par les plantes.

2.5.2 Dynamique des matières organiques formées

La minéralisation primaire ne concerne qu'une partie des matières. Une grande partie des macromolécules de lignines reste intacte de l'activité des champignons. Cette fraction sert de base de formation de substance humique (Dodelin et al., 2007). Les lignines et les polyphénols sont à la base des processus d'humification (Tissaux, 1996). L'humus formé est constitué de l'humus libre qui est facilement biodégradable et l'humus lié qui a une affinité avec les argiles. Ce dernier est constitué de trois fractions humiques dont le poids moléculaire varie entre 1'000 et 300'000 daltons. On retrouve ci-dessous ces trois types de molécule humique classés dans le sens croissant en fonction de leur poids moléculaire :

- **Les acides fulviques** : ils sont formés de composés phénoliques liés aux polysaccharides. Ils sont les précurseurs des acides humiques et riches en oxygène.
- **Les acides humiques** : ce sont des polymères chargés négativement, résultant d'un processus de condensation oxydative des composés phénoliques et liés à des acides aminés, des peptides

et des polysaccharides. Ils ont une plus grande concentration en carbone et sont moins riches en oxygène que les acides fulviques.

- **Les humines** : elles sont semblables aux acides humiques mais sont encore de plus haut poids moléculaire et sont associées aux matériaux inorganiques. Il s'agit donc de la partie non-extractible de la fraction humifiée. Elles sont donc à rechercher dans une optique de séquestration de carbone puisque c'est la forme stable.

Ces trois types de molécules ont tous la même structure, à savoir un noyau aromatique (issu des lignines) relié par des chaînes aliphatiques et des groupements fonctionnels à caractère acide. En fonction des conditions, ces molécules peuvent soit augmenter la taille de leur noyau et réduire les chaînes aliphatiques ainsi devenir de plus en plus stables, soit être minéralisées (minéralisation secondaire).

Le reste de molécules organiques qui ne sont pas minéralisées, sont humifiées via des processus de polycondensation. Les fragments de lignine restés intacts sont liés à la matrice du sol. Les polyphénols sont les précurseurs des matières humiques. Nous avons vu que le BRF en contenait, mais il existe d'autres sources de composés phénoliques dans le sol. Les exsudats racinaires et la biosynthèse microbienne (humine microbienne) sont des sources complémentaires. En plus d'apporter une grande source de polyphénols, les BRF dynamisent la vie microbienne du sol ce qui favorise la synthèse microbienne. Les substances phénoliques sont ensuite transformées par hydroxylation, déméthylation, oxydation et décarboxylation ce qui forment des hydroxyphénols et des acides benzoïques. Une partie est complètement dégradée et utilisée comme énergie pour la synthèse cellulaire. L'autre partie forme, par le biais d'activité enzymatique et de réactions auto-oxydatives, des radicaux réactifs ou des hydroxybenzoquinones qui peuvent ainsi se lier avec d'autres unités phénoliques, peptides et acides aminés (libéré par la fragmentation enzymatique des pourritures) pour créer de grosses molécules humiques (Tissaux, 1996). Ces dernières se lient avec les structures de lignine vu précédemment. Il s'agit du processus de formation des humus liés. Les structures aromatiques sont plus importantes dans les humus forestiers que dans les humus d'autres origines (Dodelin et al., 2007). En effet, les litières forestières sont composées de rameaux riches en lignine et polyphénol au même titre que les BRF. L'apport de BRF semble modifier le rapport C/N de l'humus des sols. En effet, selon une étude, on observe une augmentation du rapport significative la quatrième année après l'amendement (Lecourtier, 2018).

Nous pouvons donc dire que les BRF sont un très bon amendement pour la création d'humus stable et donc favoriser la séquestration de carbone ainsi que la stabilité structurale des sols. Nous venons de voir le schéma type de la dégradation des matières organiques issues de rameaux fragmentés et l'évolution des molécules humiques mais il manque des études sur l'évolution de l'humus formé en fonction du type de sol. On en revient donc à la loi de la protection par la complexation avec l'argile. Ces molécules humiques se lient à l'argile pour former le complexe argilo-humique. Plus un sol est argileux, plus sa teneur en MO peut être haut. Les vers de terre (notamment anéciques qui transitent entre la surface et les zones plus profondes) jouent un rôle important, en mélangeant les matières minérales et organiques.

« Le BRF permet d'augmenter les taux d'humus d'un sol cinq à dix fois plus rapidement qu'avec les amendements traditionnels, cité par Benoît Noël dans l'ouvrage de Dodelin et al., 2007 »

Néanmoins d'autres travaux affirment que les BRF ont tendance à favoriser les compartiments libres de l'humus au détriment de l'humus lié (Lecourtier, 2018). Tout cela reste encore à approfondir. Mais une chose est sûre, ce qui distingue le BRF des autres amendements agricoles, c'est sa teneur en lignine

(REY et al., 2009). La science des matières organiques des sols possède aujourd'hui encore de grosses lacunes et il s'agit d'un domaine encore peu connu. Cette dernière est en constante évolution, la vision de l'humification et de la récalcitrance a récemment changé. En effet, l'augmentation de la récalcitrance des matières organiques par la préservation sélective de MO moins dégradables (lignine, polyphénols, etc...) faisait partie des mécanismes de stabilisation de la MOs les plus invoqués (Campbell and Paustian, 2015). Aujourd'hui, l'association avec des surfaces minérales, la protection à l'intérieur des agrégats et des pores du sol ainsi que la limitation spatiale de la disponibilité de la matière organique sont les principaux mécanismes de stabilisation de la MOs. Le concept de polycondensation oxydative des matières organiques laisse peu à peu place à un nouveau modèle, qui voit la MOs comme un continuum de fragments qui sont continuellement dégradés par les organismes du sol. Plus les fragments sont oxydés et plus leur réactivité envers les surfaces minérales est forte et donc plus leur protection face à la dégradation est importante. Contrairement à la théorie de la récalcitrance des composés organiques issus de polymère moins dégradables (lignine, etc...), il semblerait que les composés facilement dégradables (sucre, protéines, etc...) ont un rôle plus important dans la stabilisation de la MOs (Cotrufo et al., 2013). La nouvelle classification des MO est faite en fonction de leur taux de décomposition et est séparée en trois pool : le pool actif, le pool passif et le pool intermédiaire (Kögel-Knabner and Amelung, 2014). On retrouve une description plus détaillée dans le travail de Julien Kupfer, de ces nouveaux concepts ainsi que les mécanismes impliqués : « Impact des pratiques biodynamiques sur la qualité des sols » (KUPFER, 2018).

Nous avons vu que les BRF contenaient également une grande quantité de sucre et d'autres composés facilement attaquables à l'issue de la translocation des feuilles vers les jeunes rameaux. Ce matériau contient donc aussi bien des gros polymères comme la lignine, que des sucres et autre métabolisme primaire plus facilement dégradable. Nous venons de voir que ces derniers, semble avoir un rôle important dans les processus de stabilisation de la MOs. Les BRF semblent être un amendement efficace pour augmenter le taux de matière organique du sol, mais les mécanismes responsables mis en évidence ne semblent pas être les bons. Des études complémentaires doivent être faites à ce sujet.

2.6 Les freins et les opportunités de cet amendement organique

Nous venons de voir que les BRF apportent de la matière organique. Indépendamment du fait qu'il y a une forte augmentation de Corg dans le sol, les BRF ont des particularités qui leur sont propres et qui ne sont pas généralisables pour les autres amendements organiques. Ces particularités favorisent une amélioration durable de la fertilité du sol, la vigueur des cultures, l'augmentation du rendement, mais peuvent également causer des contraintes agronomiques. Le BRF possède les avantages d'un paillage lorsqu'il est utilisé de façon superficielle. A savoir, la limitation de l'évaporation de l'eau, l'augmentation des échanges gazeux, la limitation de la pression des adventices, la diminution de l'impact des gouttes de pluie et des UV sur le sol. Mais ici encore le BRF n'est pas un simple paillage. Les bénéfices sont importants et cela est dû à une synergie de mécanismes liée à l'apport de cet amendement.

2.6.1 Bénéfice pour le sol et les cultures

Il existe une multitude de bienfaits à l'apport de BRF sur les sols. Ces derniers sont souvent liés et ils résultent d'une interaction de mécanismes physique, biologique et biochimique.

Pédogénèse et aggradation des sols

Le BRF permet une restructuration humique des sols (Lemieux, Lachance, et Lapointe 1988). Ces fragments de bois sont capables de régénérer des sols qui ont perdus leur fertilité et cela en quelques années (Lemieux and Lapointe, 1990). L'action croisée du mycélium, des acides humiques formés et de la pédofaune favorisent l'aggradation du sol (REY et al., 2009), même profondément perturbé (tassement, déstructuration, anoxie, etc...). La figure n° 2 résume ces mécanismes reproduisant la pédogénèse après l'apport de bois raméal.

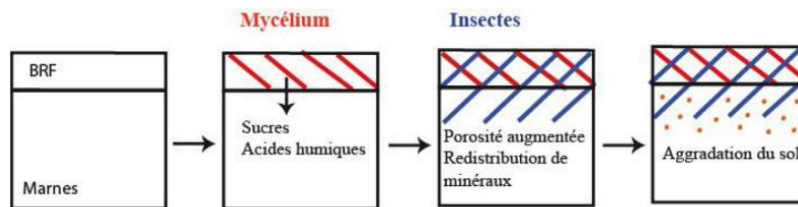


Figure 2 : Schéma simplifié de l'action du BRF sur le sol (Rey et al. 2009).

Lutte contre l'érosion

L'apport de BRF limite l'érosion par plusieurs mécanismes. Tout d'abord, s'il est disposé en paillage, il protège le sol de l'action mécanique des gouttes d'eau (effet splash) sur les agrégats (REY et al., 2009). Ce paillis est très vite colonisé par le mycélium des champignons, ce qui stabilise la couche et ainsi protège les agrégats de la destruction. Ensuite, les BRF améliorent les propriétés physiques et hydriques du sol (Barthès et al., 2010). En effet, l'augmentation de la stabilité structurale permet de mieux résister à l'agression physique de l'eau. De plus, il y a également une augmentation de la porosité ce qui favorise l'infiltration de l'eau et évite les phénomènes de ruissellement de surface. L'apport de BRF a permis d'augmenter l'infiltration de l'eau de plus 250 % à 467 % par rapport au témoin non traité (Dodelin et al., 2007). La macroporosité est favorisée par la pédofaune qui est elle-même favorisée par l'apport de BRF. Enfin, le bois raméal fragmenté permet une meilleure implantation des plantes dans les terrains en pente, ce qui limite également le ruissellement de surface (REY et al., 2009). La figure n° 3 illustre ce mécanisme.

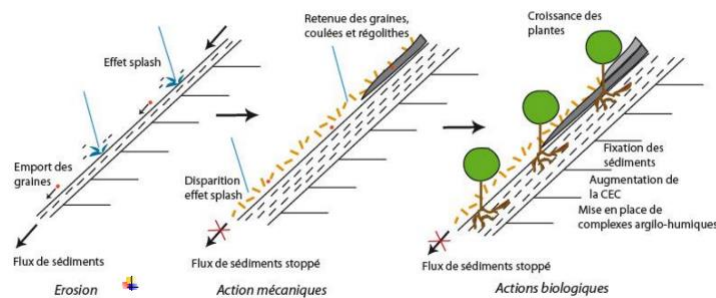


Figure 3 : Mécanisme antiérosif du BRF par reconquête végétale en terrain difficile.

Activation de l'activité biologique

L'amendement BRF augmente considérablement le taux d'organisme dans un sol (Larochelle Louis 1994). Il a été démontré que l'amendement a une action stimulatrice sur la vie du sol et que cet effet persiste plus de deux ans après l'épandage (Dodelin et al., 2007). Les bactéries, les champignons, en passant par la faune du sol, toutes les catégories du vivant du sol sont présentes en plus grand nombre. Néanmoins, il semble que l'épandage de BRF favorise des organismes plus que d'autres et c'est notamment le cas des champignons qui ont une prolifération plus spectaculaire que les communautés

bactériennes (Lecourtier, 2018). Lors de l'expérimentation réalisée en Belgique il a été observé une biostimulation de l'ensemble de la flore du sol, à savoir, une augmentation de 538 % pour les champignons, de 219 % pour les actinomycètes et de 173 % pour la flore bactérienne totale (Dodelin et al., 2007). Après deux ans qui suit l'épandage, les populations de champignons peuvent même être multipliées par dix. La forte teneur en lignine des bois raméaux est une hypothèse qui justifie ce déséquilibre flagrant entre les champignons et les bactéries. Le BRF favorise en premier les organismes fongiques capables de dégrader ces polymères, puis les bactéries profitent de cette ressource sous une autre forme comme les déjections de la pédofaune issues du broutage mycélien. L'énergie qui a profité au champignon n'est plus disponible pour les bactéries et un déséquilibre se crée. Vient alors la question de l'impact sur le sol et les matières organiques formées qui est un sujet très peu documenté actuellement.

La pédofaune est elle aussi favorisée par les BRF. En effet, elle fait partie du réseau trophique du sol dont la source primaire est les copeaux de bois. La mésofaune est particulièrement impactée (Larochelle, 1994). En effet, cette dernière est principalement fongivore. L'augmentation des champignons favorise donc la mésofaune. Cette augmentation a été observée lors d'une expérimentation où la population d'arthropode (principalement collemboles et acariens) s'est retrouvée pratiquement 500 fois plus nombreux dans une parcelle traitée avec du BRF d'érable à sucre par rapport au témoin (Larochelle, 1994). D'autres sortes de BRF, notamment issues d'aulne ou de bouleau, ont également favorisé la mésofaune du sol.

Il semblerait qu'il y ai plus de mycorhizes dans les cultures ayant reçu du BRF (Dodelin et al., 2007), mais là encore le sujet reste très peu documenté et cela n'a pas été prouvé scientifiquement.

Augmentation de la disponibilité en eau

La matière organique augmente la réserve utile d'un sol grâce à un effet sur la structure du sol et une rétention importante en eau (Boivin et al., 2009). En plus de ces aspects, les fragments de bois raméal ont la faculté d'augmenter la résistance à la sécheresse des cultures et cela grâce à un certain nombre de mécanismes qui se complètent. On retrouve cet avantage dans la majorité des études menées et c'est le premier aspect qui a attiré l'attention des scientifiques. Nous avons vu précédemment dans le contexte climatique et agricole, que les sécheresses sont au cœur des problématiques de demain. Cet avantage des BRF est donc un aspect non négligeable. Les mécanismes impliqués dans ce phénomène sont divers :

- La matière organique fraîche que compose les BRF et l'humus formé, sont capables de retenir une grande quantité d'eau, dont une partie est disponible pour les plantes. Les copeaux de bois raméal peuvent stocker jusqu'à 350 litres d'eau par mètre cube et l'humus peut contenir jusqu'à 20 fois son poids en eau (Asselineau and Domenech, 2007).
- Le sol est mieux structuré, ainsi la porosité (toutes gammes de pores confondus) occupe une plus grande place. Ces vides sont occupés soit par l'eau, soit par l'air. Une augmentation de la porosité du sol se traduit par une diminution de la densité apparente et une augmentation de la réserve utile (RU). Une étude a montré que la teneur en eau du sol était significative plus élevée dans les parcelles traitées avec le BRF (Tremblay and Beauchamp, 1998).
- Cette porosité, en particulier la macroporosité, favorise l'infiltration de l'eau dans le sol ce qui permet de remplir la RU au lieu que cette eau parte par ruissellement. « *La Biostimulation de la faune et de la flore du sol combiné à une augmentation des teneurs en humus, sont à l'origine directe et indirecte de la multiplication par trois de la vitesse d'infiltration de l'eau dans le profil (Dodelin et al., 2007) »*. Le sol est moins sujet à l'érosion et la rétention en eau est augmentée.

Les grosses pluies estivales sont captées par le sol, une plus grande proportion des pluies automnales et hivernales sont retenues, ce qui profite aux plantes.

- Nous avons vu précédemment que la mycorhization des cultures était certainement plus importante (observation empirique). Les plantes mycorhizées ont une plus grande surface de prélèvement, ce qui augmente la disponibilité de l'eau du sol pour les cultures.
- La dégradation des hydrates de carbone libère de l'eau (Dodelin et al., 2007). La vie biologique du sol génère et échange de grande quantité d'eau. Cette activité biologique, en particulier les champignons, sont capables de réguler la teneur en eau du sol et de la faire circuler par des voies uniquement biologiques (Asselineau and Domenech, 2007).

Augmente la résistance des plantes au stress

En plus de tous les aspects bénéfiques sur le sol, l'apport de BRF semble augmenter la résistance des plantes au stress biotique et abiotique. En effet, les cultures traitées sont généralement moins sujettes aux carences, à la sécheresse, aux maladies et ravageurs. Une des hypothèses soulevée lors des expérimentations est que la rhizosphère semble être biologiquement plus active et que l'écosystème sol semble être plus stable (Dodelin et al., 2007).

Concernant les carences, le prélèvement des plantes est facilité par l'augmentation probable des mycorhizes. De plus, nous savons qu'une rhizosphère biologiquement active favorise la biodisponibilité des nutriments. En effet, les microorganismes libèrent des acides et autres substances, qui permettent de rendre biodisponible les nutriments auparavant piégés. C'est le cas du phosphore, qui sous certaines conditions, peut-être fortement lié avec d'autres éléments du sol comme le calcium. Il a été mesuré dans des parcelles traitées avec du BRF en France et en Ukraine, une plus grande disponibilité du phosphore, du magnésium ou encore du manganèse (Asselineau and Domenech, 2007). Ces hypothèses restent à vérifier et peu d'études documentent ces dernières. La vie biologique étant plus importante, la minéralisation est favorisée, ce qui implique une libération des nutriments disponibles pour les plantes.

En ce qui concerne la résistance à la sécheresse, nous avons vu précédemment les mécanismes impliqués.

Pour finir, plusieurs études relatent une résistance plus importante face aux pathogènes et aux ravageurs après l'apport de fragments de bois raméal. Au niveau des maladies et ravageurs du sol, les hypothèses qui ressortent sont l'action antagoniste des microorganismes de la rhizosphère sur les organismes nuisibles, l'activation de gènes de résistance des plantes et l'action des mycorhizes protégeant leurs hôtes (Asselineau and Domenech, 2007). Encore une fois, il existe très peu de littérature sur le sujet et il serait intéressant de quantifier cela autrement que par des observations empiriques et des hypothèses. Pour les problèmes phytosanitaires de la partie végétative, on retrouve très peu d'information. Les plantes observées lors d'expérimentation semblent être plus vigoureuses et donc moins sensibles aux attaques. Néanmoins, nous savons qu'une plante moins stressée (eau et nutriment non limitant) a tendance à produire moins de métabolite secondaire et à être plus attirante pour les ravageurs. C'est le cas des plantes exposées à une forte concentration en azote. Les tissus sont plus tendres et la sève plus protéique, ce qui favorise l'attaque de champignons ou de ravageurs comme les pucerons. On ne retrouve pas dans la littérature cet aspect après l'apport de BRF. Pour le cas de l'azote nous verrons qu'il est justement limité la première année de l'apport. Des exemples de bénéfice phytosanitaire sont exposés dans le point suivant.

Lutte contre maladie et ravageur

Nous venons de voir qu'il y avait peu d'étude sur ce sujet. Néanmoins, quelques expérimentateurs ont observé un bénéfice phytosanitaire quant à l'apport de BRF. C'est le cas d'une étude sur la culture de

tomate en pleine terre au Sénégal. Les nématodes sont un véritable problème sur les plants de tomates dans ce pays. La diminution des populations de nématodes voire la disparition totale est significative dans les parcelles traitées et les cultures ne présentent plus aucun symptôme (Seck, 1994). De plus, la disparition ou la réduction de certaines maladies ou parasites a été observée à plusieurs reprises dans les parcelles ayant reçu du BRF, notamment la réduction de maladies sur le blé (Gillard, 2006). L'amendement semble limiter l'attaque de ravageurs comme les pucerons ou les doryphores (Asselineau and Domenech, 2007) sans réellement savoir comment. La disponibilité de l'azote est une hypothèse.

Augmentation du pH

L'apport de bois raméal sur des sols acides semble augmenter le pH et se rapprocher de la neutralité (Asselineau and Domenech, 2007). Lors d'une expérimentation réalisée au Canada, le pH augmente rapidement après un apport de BRF, puis redescend doucement (Dodelin et al., 2007).

Gestion des adventices

Le bois raméal fragmenté utilisé en paillis, permet un contrôle des adventices (Asselineau and Domenech, 2007). Néanmoins, dans certains cas, aucun contrôle n'a été observé. L'efficacité est très bonne sur les plantes adventices annuelles, un peu moins bonne sur bisannuelles et mauvaise sur vivaces déjà implantées. Cela expliquerait ces observations contradictoires. Il a été observé un contrôle total des adventices sur parcelle de luzerne, alors que le témoin était complètement infesté (Dodelin et al., 2007). Lors d'une étude, le BRF a été laissé en paillis ou incorporé avec un apport de 100 m³ à 400 m³/ha. Dans les deux cas, l'application de BRF a considérablement réduit le développement des adventices et ce grâce un effet physique ou à allélopathie (Robert et al., 2011). Les parcelles amendées ont un sol plus meuble grâce à la restructuration, ce qui permet un meilleur désherbage manuel et mécanique (Asselineau and Domenech, 2007).

Augmentation de rendement

Tous les bénéfices énumérés précédemment permettent une augmentation de rendement. Ces effets sont variables en fonction des conditions pédoclimatiques et de la qualité des BRF apportés. Il manque des comparatifs avec d'autres amendements. Il a été observé jusqu'à 1'000 % de rendement en plus pour la tomate, 300 % sur les fraises et jusqu'à 400 % sur le maïs (Asselineau and Domenech, 2007). Ces augmentations impressionnantes sont généralement conjuguées à la suppression d'un problème phytosanitaire comme les nématodes sur les tomates et ne cela ne permet pas d'évaluer les effets bénéfiques du BRF en tant que tels. D'autres augmentations de rendement ont été observées sans l'effet d'une variable phytosanitaire. L'augmentation est de 45 % pour le seigle (Ukraine), 72 % pour la luzerne (Belgique) et 18 % pour le maïs (République Dominicaine) (Asselineau and Domenech, 2007). Le rendement est souvent inférieur lors de la première culture après l'amendement, mais devient supérieur par rapport au témoin, lors des cultures suivantes (Barthès et al., 2010). Des observations de l'augmentation qualitative de la production ont même été faites sur froment d'hiver, avec une teneur en protéines plus élevée sur le bloc traité en BRF (Dodelin et al., 2007).

2.6.2 Problèmes rencontrés

Nous venons de voir que le BRF possède de multiples avantages agronomiques et pédologiques. L'amendement possède quelques contraintes, qui peuvent être limitées voir évitées avec quelques précautions.

Faim d'azote

D'une manière générale, les amendements avec un rapport C/N élevé, produise une faim d'azote. En effet, les organismes (champignons et bactérie) puisent dans le sol pour pouvoir dégrader cette matière riche en carbone. Le BRF à un C/N qui n'est pas forcément très élevée (entre 50 et 175) puisque

issue de jeunes banches et rameaux (à titre de comparaison les pailles de blé ont un C/N allant jusqu'à 150 et le bois de cœur jusqu'à 500). Néanmoins, si l'apport est conséquent, une faim d'azote peut être observée sur les cultures la première année de l'épandage. Cette faim d'azote peut être limitée par des pratiques agricoles simples. D'une manière générale, apporter le BRF sous forme de paillis et non l'incorporer au sol, limite la faim d'azote, car les fragments sont moins en contact avec les organismes du sol. Un apport minéral ou organique extérieur peut compenser cette faim d'azote, à raison de 1 kg de N par mètre cube de BRF (Asselineau and Domenech, 2007). Il est également conseillé d'intégrer l'amendement dans la rotation plutôt en automne sur un couvert composé de légumineuses, ce qui limite les effets de la faim azoté. Les organismes responsables de la faim d'azote commencent à dégrader le matériau en automne, quand les conditions sont encore propices (humidité et chaleur) et se servent de l'azote du couvert. Ainsi la répercussion de cette faim d'azote est moindre sur la culture suivante.

Ce déficit en azote, provoqué par l'amendement, concerne uniquement la première année de l'apport. En effet, si l'apport est régulier, un stock d'humus se constitue et sa minéralisation engendrée par une activité biologique intense, compense la faim d'azote. De plus, cet azote n'est pas réellement perdu. Il est à nouveau disponible quand la biomasse des organismes est décomposée. Un équilibre est donc créé. Une étude quantifie l'augmentation du stock en azote du sol qui permet d'arriver à un équilibre :

« L'augmentation de la teneur en azote totale du sol est imperceptible l'année de l'apport, faible la deuxième année (0 à 10 % en général), parfois significative au-delà (10 à 40 % avec apports renouvelés) (Barthès et al., 2010) ».

Au même titre que la faim d'azote, une immobilisation de phosphore est également observée lors d'apport de BRF (Tremblay and Beauchamp, 1998).

Les teneurs en phosphore et le bilan de fumure

L'apport de matière organique peut poser quelques problèmes au niveau du bilan de fumure. Le bilan de fumure nommé « Suisse-Bilanz » est une réglementation « PER » que l'agriculteur doit respecter pour toucher des paiements directs (subventions agricoles). Les amendements organiques contiennent des éléments minéraux avec des concentrations variables en fonction de la nature des matériaux le constituant. Prenons le cas du compost. Cet amendement a pour but d'apporter de la matière organique dans les sols, mais il constitue également une part de la fertilisation pour les cultures suivantes. Contrairement aux engrais minéraux de synthèse, la proportion des éléments n'est pas maîtrisée. Le compost contient beaucoup de phosphore. Ce dernier, contrairement à l'azote qui n'est pas entièrement disponible pour les plantes l'année de l'apport, est compté totalement dans le bilan de fumure. La quantité de phosphore amenée par l'amendement est déséquilibrée par rapport à l'azote. De plus, cette quantité de phosphore est très importante par unité de surface, même pour un amendement standard. Cela contraint l'agriculteur à faire des choix dans sa rotation et ne lui permet généralement pas d'amender ces parcelles de façon optimale pour arriver à des taux de MOs corrects. Le problème peut également être rencontré avec un apport de BRF. Ce point constitue une faiblesse du système qui est néanmoins rempli de bon sens. Le « Suisse-Bilanz » a pour objectif d'éviter les excès dans un contexte où les éléments nutritifs sont une ressource non renouvelable et où la pollution (eutrophisation) est une réelle problématique. Cependant, les éléments nutritifs d'origine organique sont à favoriser. De plus, le phosphore, contrairement à l'azote qui est sujet à la lixiviation, est retenu dans les couches superficielles du sol et se répand dans l'environnement principalement à cause de l'érosion. D'une manière générale, l'apport de matière organique, réduit les risques d'érosion.

Voici un exemple chiffré pour un apport standard de compost (25 t Ms/ha) et de BRF (100 m³/ha, qui correspond à 21 t Ms/ha). Contrairement au compost, le BRF ne possède pas de chiffres officiels

concernant les teneurs en élément nutritif. L'utilisation de chiffres trouvés dans la littérature servent de base pour les calculs. Un apport de 100 m³/ha de BRF apportent 180 unités d'azote et 40 unités de phosphore (calculs réalisés avec les chiffres tirés de l'étude de B. Noël et C. Marche, 2006). Un apport de 25 t Ms/ha de compost apportent 290 unités d'azote et 55 unités de phosphore (calculs réalisés avec les chiffres tirés du mémento agricole 2018). Ces éléments nutritifs ne sont pas entièrement disponibles pour la culture puisque sous forme organique. On sait pour le compost qu'il y a 12,5 kg de Ns (NO³⁻ et NH⁴⁺) contenus dans ses 25 t Ms/ha au moment de l'épandage et que 5 à 10 % de l'azote total est disponible pour les plantes la première année de l'épandage (Agridea, 2018). On ne connaît pas ces chiffres pour le BRF et des études supplémentaires doivent être menées pour apporter la réponse à ces questions.

Humification vs minéralisation

Nous venons de voir que les apports d'amendements organiques avaient deux objectifs, à savoir fertilisant et apport de matières organiques dans les sols. La proportion des deux objectifs varie en fonction de l'amendement apporté et de ses caractéristiques liées à la dynamique des matières organiques dans le sol. Une forte minéralisation favorise un retour des éléments sous forme minéral biodisponible pour les plantes au détriment de la formation d'humus. Au contraire, une forte humification favorise la formation d'humus au détriment de la libération d'élément fertilisant. Rappelons que l'objectif visé dans le contexte actuel, est une séquestration de carbone dans le sol pour répondre à des problématiques climatique, pédologique et agronomique. Nous avons vu que le BRF possède un coefficient isohumique (K1) relativement élevé, de l'ordre de 50 % (Noël and Marche, 2006). Cette matière organique, dans les conditions climatiques tempérées, possède donc une plus grande capacité à former de l'humus que le compost ou le fumier. Une étude confirme également que l'amendement de BRF permet de stabiliser les taux de matières organiques des sols tropicaux (Félix et al., 2018). Il semblerait que le taux d'humus augmente avec un apport régulier de BRF, sous nos conditions tempérées et dans un sol limoneux (Dodelin et al., 2007), malgré une augmentation de l'activité biologique.

Problème phytosanitaire

Les amendements organiques ne sont pas sans risque pour les cultures si leur innocuité n'est pas garantie. L'état sanitaire des végétaux utilisés comme biomasse et les contaminations durant la transformation ou le transport des matières jusqu'au champ peuvent remettre en cause la qualité des amendements. Prenons le cas du compost, si le processus de compostage n'est pas correctement effectué et que la température n'atteint pas le seuil de désinfection, des maladies et des ravageurs peuvent-être transmis aux cultures. Concernant le BRF, il n'y a théoriquement pas de montée en température mais les végétaux utilisés sont principalement des feuillus caduc qui possèdent peu de pathogènes transmissibles aux cultures. Cet aspect est très peu documenté dans la littérature, ce qui laisse à croire que les problèmes sont marginaux voire inexistant. Il est donc conseillé de surveiller au cas par cas en fonction des cultures et des matières à disposition. Il est important de rajouter, que dans une optique d'auto-alimentation, les haies sont sur la parcelle. Le problème de pathogène doit donc être pris beaucoup plus en amont. Néanmoins, d'une manière générale la matière organique fraîche favorise les mollusques et notamment les limaces. L'apport de BRF semble effectivement favoriser la présence de ces nuisibles (Asselineau and Domenech, 2007). Une intégration intelligente dans la rotation, notamment avant une culture peu sensible à ces gastropodes, est un des meilleurs moyens de limiter cet aspect néfaste.

Métaux lourds

Au même titre que les problèmes biotiques, les amendements peuvent contenir des polluants comme les métaux lourds. Ces derniers, ne se dégradent pas dans le sol et se concentrent dans les couches superficielles. Ils constituent donc un réel problème en agriculture. Le compost est relativement sujet aux problèmes de métaux lourds. En effet, les matières qui sont à l'origine de l'amendement, viennent souvent du milieu urbain. La pollution aux métaux lourds contamine les matières soit par l'air (dépôt de polluant sur les parties aériennes) soit par le sol (prélèvement racinaire des plantes). Les BRF sont moins sujets à ce problème pour deux raisons. Premièrement, contrairement au compostage, les matières ne subissent pas un processus biologique aérobie où une partie des hydrates de carbone est minéralisée. Dans le cas du compost, les polluants métalliques se retrouvent concentrés dans la biomasse ce qui implique des teneurs en métaux lourds plus élevées à la fin du processus de compostage. Ce n'est pas le cas des BRF puisque la totalité du carbone est amenée au champ. Deuxièmement, si les branches proviennent du système agricole, cette biomasse est moins sujette à la pollution métallique. Le tableau n° 3 illustre des teneurs moyennes inférieures pour le BRF par rapport au compost. Ces chiffres ont été obtenus en faisant la moyenne de six BRF d'origines et de compositions différentes, dans le cadre d'une étude belge (Noël and Marche, 2006). Ces teneurs moyennes sont comparées à celle d'un compost mur.

Tableau 3 : Teneur moyenne en métaux lourds de 6 BRF et d'un compost mur belge (B. Noël and C. Marche, 2006)

Elément	Moyenne BRF	Compost de D.V.
As ppm /MS	2,0	5,22
Cd ppm/MS	0,7	1,5
Cu ppm/MS	14,0	47
Ni ppm/MS	9,9	13
Pb ppm/MS	22,6	94
Zn ppm/MS	97,6	39
Hg ppm/MS	0,1	2,58
Cr ppm/MS	13,7	38
Co ppm/MS	1,6	3,6

Nous pouvons voir que les teneurs moyennes sont inférieures pour les BRF sauf pour le zinc. Si l'on compare ces valeurs aux valeurs moyennes de 34 composts Suisse à destination de l'agriculture (Kupper and Fuchs, 2007), les BRF ont une teneur moyenne inférieure pour la totalité des métaux lourds sauf pour le cadmium.

2.7 Conclusion

Les bois rameaux fragmentés constituent un excellent amendement pour répondre aux problématiques énoncées dans la première partie. L'impact agronomique et pédologique qu'ils génèrent, participe à augmenter la résilience du système agricole. Cet amendement permet de rendre plus efficient l'utilisation des ressources, à savoir l'eau et les nutriments. Néanmoins, la proportion de littératures validées par les pairs reste très faible concernant ce sujet. Il faut donc rester prudent quant à l'objectivité des informations présentées. Des thématiques sont encore à approfondir, notamment sur le sujet de la dynamique des matières organiques formées et leur stabilité. La mise en place de haies, nécessaire pour assurer l'approvisionnement de BRF, est également responsable d'une multitude de bienfaits pour l'agriculture. Cet amendement, en parallèle de pratiques agricoles adaptées, permet de séquestrer une grande quantité de carbone dans les sols. Les BRF sont donc un outil en faveur de la résilience du système agricole mais également un moyen d'atténuer le changement climatique. Néanmoins, le sujet possède encore des interrogations, notamment sur l'effet de l'apport de BRF sur différents types de sol. En effet, dans les régions tempérées, l'amendement a principalement été testé sur sol limoneux et sableux (Barthès et al., 2010). On peut retrouver en annexe, un tableau de synthèse des principales études réalisées en fonction du type de sol (Annexe 6). De plus, il existe une grande variabilité concernant les données que l'on peut trouver dans la littérature, comme par exemple la production de biomasse des haies, la densité des BRF, la teneur en matière sèche, la teneur en éléments nutritifs et en carbone des bois raméaux. Cette variabilité est en partie dû aux différentes matières premières utilisées comme source de bois raméal. L'intérêt des BRF n'a pas suffisamment été démontré par rapport à d'autres amendements (Céline Gilli, 2012), ce qui explique en partie pourquoi il est encore peu présent en agriculture.

Partie III : Utilisation du BRF en grande culture et étude de cas dans le Canton du Jura

3.1 Transposition au système grande culture

Nous avons vu précédemment, que le système grandes cultures utilisait de façon très marginale, l'amendement BRF. Néanmoins, le bois raméal est très prometteur et pourrait répondre aux problématiques agronomique, pédologique et climatique.

3.1.1 Système qui compte d'importantes surfaces

Potentiel de séquestration carbone important

Les grandes cultures occupent une part importante de la surface agricole dans le monde. En Suisse, ce sont les herbages qui se retrouvent en première place avec plus de 70 % de la SAU. Les céréales arrivent juste derrière avec environ 14 % (Meyre, 2018), ce qui représente 143'300 ha. Cette surface est conséquente et le potentiel de séquestration de carbone est important comme nous l'avons vu avec l'estimation sur le canton de Genève (Dupla, 2018). Le Canton du Jura est également concerné car une grande proportion des sols n'atteint pas les objectifs de teneur en MO.

Une réelle opportunité pour des sols souffrants

Les taux d'humus sont en général inférieurs dans les sols des fermes céréalières (COUETTE, 2011). Les grandes régions céréalières comme par exemple la Beauce, ont vu leur taux d'humus chuter (Le Villio et al., 2001). L'agriculture industrielle intensive et la baisse d'apport de matières organiques sont les principales causes. Les grandes cultures sont en plus très importantes pour assurer la sécurité alimentaire puisque la majorité des calories apportées viennent de ce système. Le BRF a donc toute sa place dans les grandes cultures, en plus de pratiques plus respectueuses, pour restaurer l'état humifère de ces sols souffrants. L'utilisation du bois raméal à grande échelle est sujette à quelques problématiques comme la ressource de cette matière. L'analyse suivante illustre, d'un point de vue pratique, son utilisation dans le système grande culture et ce qu'il implique.

3.1.2 Contraintes technique, agronomique et économique

Le parc matériel

Rappelons que le BRF s'accorde avec les pratiques de l'agriculture de conservation et particulièrement avec les techniques culturales simplifiées (TCS) qui visent à limiter le travail du sol ou le no-till (Asselineau and Domenech, 2007).

Dans le cadre des Techniques Culturales Simplifiées et du non-labour, l'incorporation de BRF présente une complémentarité intéressante. Elle nécessite un machinisme et des pratiques similaires. (Noël and Marche, 2006).

Le labour profond ne convient pas pour l'utilisation de BRF puisque la matière organique enfouie ne se décompose pas en condition anaérobie. En d'autres termes, les BRF possèdent moins d'avantages quand ils sont utilisés dans un système de travail intensif du sol. Il est donc conseillé de se convertir en travail simplifié du sol avant d'envisager d'utiliser du BRF. Si l'agriculteur a l'habitude de faire du travail simplifié dans son exploitation, il ne devra pas investir dans du matériel puisque le BRF ne modifie pas l'itinéraire technique. Il est tout à fait possible d'utiliser cet amendement en agriculture conventionnelle, mais les problématiques de viabilités sont encore plus présentes. Les épaisseurs de BRF épandues en grande culture sont relativement faibles. Qu'il soit utilisé en paillis ou incorporé au sol, l'utilisation de BRF ne modifie pas le parc machine de l'agriculteur et un semoir traditionnel peut être utilisé, qu'il soit adapté au non-labour ou non. Pour l'incorporation dans le premier centimètre du

sol, il est conseillé d'utiliser une fraise à couteaux droits (Dodelin et al., 2007). Ce n'est qu'un exemple et d'autres outils sont adaptés, comme les herses, la bineuse, les outils à disques, etc... Ce parc matériel est plutôt commun dans les exploitations de grandes cultures. Aucun investissement n'est donc à prévoir concernant le travail du sol. Néanmoins, il faut analyser au cas par cas les exploitations qui souhaitent utiliser le BRF.

En ce qui concerne le matériel nécessaire à la confection du BRF, la majorité des exploitations ne sont pas équipées pour ce poste. On a tout d'abord une étape de coupe des branches et rameaux, puis le broyage et enfin l'épandage au champ. Plusieurs possibilités s'offrent aux exploitants en fonction des objectifs et de la taille de la ferme. Pour la taille des haies, cela peut aller de la simple tronçonneuse à l'épareuse munie d'une barre de coupe taille haie. Pour le broyage, on retrouve des broyeurs (figure 4) de petite capacité (moins de 5 m³/h), jusqu'au gros broyeur muni de tapis convoyeur (plus de 300 m³/h) (Asselineau and Domenech, 2007). Pour l'épandage, un épandeur à compost traditionnel est tout à fait adapté. D'une manière générale, pour des questions de viabilité, étant donné le prix de la

main d'œuvre en Suisse, il est préférable de choisir du matériel de grande capacité, le plus mécanisé possible. Le système idéal pour la grande culture est une épareuse taille haie qui fait directement tomber les branches dans le broyeur muni d'un tapis convoyeur qui lui-même crache le BRF dans l'épandeur. En fonction du matériel et de sa performance, la production de BRF varie de 10 m³/h à 120 m³/h (Chambres d'agriculture France, 2015). Néanmoins, un tel broyeur à un prix relativement élevé et l'investissement peut être difficile, d'autant plus que cette machine ne peut servir qu'au broyage. L'association entre plusieurs agriculteurs devient alors intéressante.



Figure 4 : Broyeur sur prise de force de moyenne capacité. (<https://www.public-expo.fr>).

L'intégration dans les rotations et itinéraire technique

Hormis le problème de ressource, nous avons vu que les BRF avaient une faiblesse majeure, à savoir la faim d'azote. Cette dernière est encore plus délicate dans un système grande culture puisque les surfaces amendées sont importantes. Il est donc important d'intégrer correctement cette matière organique dans la rotation, pour limiter au mieux cet effet indésirable. L'étude sur grandes cultures en Belgique (région de Wallonne) a permis de chiffrer la compensation azotée nécessaire après un apport de BRF. Elle a également permis de connaître le meilleur moment pour l'intégrer dans un itinéraire technique et de déterminer les cultures ayant le meilleur comportement après l'apport (Noël and Marche, 2006), ce qui permet de l'intégrer au mieux dans une rotation. Il y a deux façons principales de travailler avec le BRF. Cet amendement peut soit être laissé en paillis, soit être incorporé selon la méthode canadienne, dans les 12 premiers centimètres de sol maximum (Dodelin et al., 2007). Il est également possible de laisser les copeaux de bois en paillis quelque mois, puis de l'incorporer, tout en sachant que juste après cette incorporation il y a un pic de faim s'azote.

Tout d'abord, le BRF trouve amplement sa place en agriculture biologique. En effet, l'association BRF avec des légumineuses évite en grande partie la faim d'azote. De plus, l'importation coûteuse de fertilisants organiques (guano, algues ...) semble diminuer, estimé à 500 €/ha en Belgique contre 50 €/ha pour le BRF (Noël and Marche, 2006). Cela permettrait d'accroître le potentiel de la fertilisation de l'agriculture biologique tout en diminuant la dépendance à l'élevage. Le bois raméal permet de faciliter le désherbage manuel et mécanique, ce qui est très apprécié en agriculture biologique.

Puis d'une manière générale, nous avons vu que le BRF et les techniques de travail simplifiées étaient complémentaires. Le bois raméal peut aider à réduire les azotes potentiellement lessivables (APL) (Noël and Marche, 2006). L'application de BRF avant déchaumage semble être le meilleur moment. Il faut savoir qu'en région Wallonne, plusieurs déchaumages sont effectués pour diminuer le stock semencier du sol. En revanche cela accroît le risque de minéralisation de l'humus en fin de saison et retarde l'implantation d'une culture intercalaire piège à nitrate (CIPAN). L'application de BRF avant le premier déchaumage permet son incorporation sans faire de passage supplémentaire. Cette pratique permet de stocker l'azote excédentaire dans l'humus formé, sans qu'il soit lixivié. L'apport de BRF limite donc les APL en complétant l'action des CIPAN. L'épandage de 1 m³ de BRF permet de stocker 1,2 kg d'APL (Noël and Marche, 2006), qui sera disponible pour les cultures suivantes. Le BRF trouve donc parfaitement sa place avant le déchaumage et l'implantation d'un couvert intercalaire composé de légumineuse pour éviter les effets de la faim d'azote au printemps. Il n'y a pas d'inhibition de la germination, ni d'impact phytosanitaire qui ont été constatés aussi bien en paillis pour le no-till qu'avec la méthode canadienne d'incorporation directe.

Enfin, le BRF est apprécié dans la pratique du non-labour. En effet, le bois raméal pourrait lutter à long terme, contre la compaction du sol (Noël and Marche, 2006) et est un puissant allié contre les mauvaises herbes. Néanmoins, l'apport doit être plus conséquent et régulier (Asselineau and Domenech, 2007) pour conserver une couche d'environ un centimètre, qui garantit un contrôle optimal de la flore adventive.

A l'issus de l'étude sur 7 ha de grande culture en région Wallonne, un itinéraire d'incorporation direct (méthode Canadienne) a été proposé (Noël and Marche, 2006) :

- Stockage 1 semaine à plusieurs mois (hygiénisation et ensemencement en micro-organisme décomposeur),
- Epandage sous bonne condition (sol sec ou gelée) après récolte, sur chaume, avant un couvert intercalaire,
- Mélanger le BRF en passage grâce à une fraise à couteaux droits (12 cm de profondeur max),
- Semer un couvert à base de légumineuse et/ou fertilisation N si besoin (N-min au printemps).

A l'issu de cette même étude qui a testé 11 grandes cultures en Belgique, les cultures qui ont obtenu les meilleurs comportements après l'épandage ont été déterminées (Noël and Marche, 2006) :

- Après le premier épandage, une culture de légumineuse pure,
- Puis une culture de maïs qui a eu un très bon comportement ainsi qu'une bonne capacité à mobiliser l'azote de l'humus et à en tirer profit (protéine),
- Ensuite une culture de céréale, qui tire des avantages qualitatifs (teneur en protéine) et une meilleure résistance aux maladies fongiques.

En paillis ou incorporé

Nous avons vu que le BRF pouvait être soit laissé en paillis ou incorporé au sol. Les deux ont chacune leurs avantages et inconvénients (Asselineau and Domenech, 2007) :

- **Paillis** : Permet de limiter la faim d'azote puisque les copeaux sont moins en contact avec les organismes décomposeurs, protège le sol des agressions (battance, érosion, UV, etc...), limite l'évaporation, favorise des auxiliaires (oiseau, carabe, staphylins), adapté pour le semis direct, reproduit au mieux le système forestier. En contrepartie, retarde le réchauffement du sol au printemps, dégradation et processus biologique plus long, attire les oiseaux qui peuvent devenir nuisibles.
- **Incorporation** : processus biologique plus rapide, si le mélange copeaux/terre est homogène, il est plus facile de prévoir et de compenser la faim d'azote. En contrepartie, augmente la sévérité de la faim d'azote, demande plus de travail du sol, si le travail est trop rapide (vitesse des fraises, rotavator, motoculteur), la vie du sol et notamment la pédofaune est perturbée.

Les quantités et l'approvisionnement

Chaque exploitation doit évaluer ses besoins en BRF et déterminer d'où vient la ressource. La filière extérieure existe dans certain cas ou peut être créée en association avec des collectivités ou entreprises travaillant avec de la matière organique. Cet aspect doit être évalué au cas par cas et faire l'objet d'une analyse personnalisée pour chaque exploitation voulant faire intervenir un amendement BRF dans sa rotation.

Nous avons vu que la fourniture en BRF pose un réel problème quantitatif, ce qui est un frein à son utilisation. La création d'une ressource au sein de l'exploitation est une solution. Il s'agit de savoir quelle est la part des surfaces affectées aux haies pour pouvoir amender les sols cultivés avec du bois raméal.

Dans la pratique et la littérature les quantités épandues sont d'environ 100 m³/ha. Cette dose demande une forte proportion de haies sur la surface agricole pour assurer la ressource et cela ne semble à première vue pas être viable. Un épandage moins conséquent semble être plus approprié aux grandes cultures. Néanmoins, il n'existe pas dans la littérature des volumes inférieurs testés et nous ne savons pas si les avantages agronomiques que possède le BRF, sont conservés avec des doses moins conséquentes.

La surface amendée peut être soit les terres ouvertes (TO), soit les terres assolées (TA). Cela va dépendre de la part des prairies temporaires dans l'assolement et du nombre d'années qu'elles restent en place. Il convient d'analyser au cas par cas, puisque chaque exploitation est différente. Les terres ouvertes sont inférieures ou égales aux terres assolées. La part des surfaces affectées aux haies dépend donc de la surface à amender retenue. Les TA et donc TO sont en général inférieures à la surface agricole utile (SAU).

La disposition de ces haies et leur agencement optimal restent à déterminer. Le centre de la haie doit être accessible pour la taille. La forme des parcelles et la disposition des alignements végétaux sont des enjeux de taille.

Nous pouvons imaginer un système de petites parcelles entouré de haies pour pouvoir suffisamment approvisionner en bois raméal. Ce système n'est pas viable car il impose une contrainte agronomique au niveau de la rationalisation du travail avec les machines agricoles.

Un système de longues parcelles, entourées de part et d'autre de haies, semble une meilleure solution. De cette manière les contraintes liées à l'utilisation de machines agricoles sont moindres puisque les manœuvres sont limitées. Des ouvertures dans les haies sont envisageables pour connecter les

parcelles entre elles. Cette implantation représente un modèle optimal, il faut encore une fois analyser au cas par cas et proposer une implantation personnalisée pour chaque exploitation.

Il est évident qu'en pratique, un épandage de BRF peut se faire selon toutes les plages d'épaisseurs possibles et ce, en fonction de la disponibilité de la ressource. Ne perdons pas de vue que l'implantation de nouvelles haies n'est pas une opération facile pour les agriculteurs. De ce fait, la ressource est donc limitée aux haies existantes et au potentiel filières extérieures. Les synergies et les avantages ainsi que les objectifs de ce paillage vu précédemment, changent en fonction de l'épaisseur apportée sur la parcelle. En effet, le contrôle des adventices est moins bon avec 1 mm d'épaisseur qu'avec 1 cm d'épaisseur par exemple. Au même titre, la promotion de l'activité biologique, l'amélioration de la structure et la séquestration de carbone sont moins importantes dans un sol paillé avec 10 m³/ha qu'avec 100 m³/ha de BRF. Nous pouvons dire qu'un faible apport est mieux que pas d'apport du tout. Nous l'avons vu, les sols sont déficitaires en Mos, chaque amendement organique est le bienvenu, quelque soit sa quantité. Il reste à mettre en évidence la synergie des bienfaits de l'amendement BRF ainsi que l'importance de la séquestration de carbone en fonction de différentes quantités d'amendement apporté.

Les haies et leur composition

Les haies déjà en place sont bien évidemment à valoriser en priorité. Il est possible de réimplanter de nouvelles haies. Il faut prendre en compte plusieurs paramètres importants avant d'implanter une haie, à savoir le choix des espèces, l'orientation et la répartition sur les parcelles.

Un certain nombre de critères sont importants dans le choix des espèces qui composent les haies :

- Adapté pour la création de BRF (espèces caduques et bonne production de bois)
- Intérêt écologique
- Ne doit pas être lié à des problèmes phytosanitaires ou être invasive
- Doit être disponible sur le marché Suisse
- Être de préférence indigène

Le tableau suivant propose une liste d'espèces qui rentrent dans les critères précédemment énoncés (tableau 4). Cette liste a été élaborée avec l'aide d'un pépiniériste professionnel vaudois (Monod SA). Une haie est composée de plusieurs espèces. Chaque espèce ne possède pas forcément toutes les qualités requises mais une haie est composée d'un ensemble d'espèces qui se complète pour former une composition harmonieuse, qui respecte à la fois exigence PER, écologique, agronomique et environnemental. Les écotypes peuvent parfois être demandés pour la conception de haies naturelles. L'installation de plantes capables de fixer l'azote atmosphérique, est intéressante pour le cycle de l'azote dans l'exploitation.

Tableau 4 : Liste non exhaustive de plantes indigènes pour haie, disponibles facilement sur le marché Suisse.

Qualificatif	Genre	espèce	Famille	Nom vernaculaire	Particularités
Arbustes indigènes caduc	Amelanchier	<i>ovalis</i>	Rosacées	Amélanancier commun	
	Berberis	<i>vulgaris</i>	Berbéridacées	Epine vinette	
	Cornus	<i>mas</i>	Cornacées	Cornouiller mâle	
	Cornus	<i>sanguinea</i>	Cornacées	Cornouiller sanguin	
	Crataegus	<i>monogyna</i>	Rosacées	Aubépine monogyne	Feu bactérien, à plus de 800 m de tout vergers
	Crataegus	<i>laevigata</i>	Rosacées	Aubépine à fleurs	Feu bactérien, à plus de 800 m de tout vergers
	Euonymus	<i>europaeus</i>	Celastracées	Fusain d'Europe	Hôte du puceron noir de la fève, favorise les population de syrphes tôt en saison
	Fraxinus	<i>alnus</i>	Rhamnacees	Bourdaie	Plante hôte de papillons
	Hippophae	<i>rhamnoides</i>	Elaeagnacées	Argousier	Zone sèche
	Ligustrum	<i>vulgare</i>	Oléacées	Troène commun	Semis persistant
	Ligustrum	<i>ovalifolium</i>	Oléacées	Troène de Californie	Semis persistant
	Lonicera	<i>xyleostemum</i>	Caprifoliacées	Chèvre feuille des haies	Hôte de la mineuse du chèvre feuille
	Rhamnus	<i>cathartica</i>	Rhamnacees	Nerprun officinal	
	Viburnum	<i>opulus</i>	Adoxacées	Viorne obier	
Viburnum	<i>lantana</i>	Adoxacées	Viorne lantane		
Rosa	<i>glauca</i>	Rosacées	Rosier à feuilles rouges	Favorise la biodiversité, utilisation des fruits	
Rosa	<i>canina</i>	Rosacées	Rosier des haies	Favorise la biodiversité, galle chevelue (cynips)	
Arbres indigènes caduc	Acer	<i>campestre</i>	Acéracées	Erable champêtre	
	Carpinus	<i>betulus</i>	Bétulacées	Charme commun	
	Corylus	<i>avellana</i>	Bétulacées	Noistier	Hôte de lépidoptères, bonne production de bois
	Fraxinus	<i>excelsior</i>	Oléacées	Frêne commun	Très bon producteur de bois, sensible à la chalarose
	Prunus	<i>avium</i>	Rosacées	Merisier	Recépage difficile, supporte mal les grosses coupes
	Prunus	<i>padus</i>	Rosacées	cerisier à grappes	Hôte primaire d'un puceron, ressource pour les auxiliaires
	Salix	<i>caprea</i>	Salicacées	Saule marsault	Melifère, biodiversité, bonne production de bois
	Salix	<i>elaeagnos</i>	Salicacées	Saule à feuille d'argousier	Bonne production de bois
	Sambucus	<i>nigra</i>	Adoxacées	Sureau noir	Bonne production de bois
Sorbus	<i>aucuparia</i>	Rosacées	Sorbier des oiseaux		
Arbres et arbustes fixateurs symbiotiques indigènes caduc	Alnus	<i>glutinosa</i>	Bétulacées	Aulne glutineux	Zone humide, sensible au dépérissement de l'aulne
	Alnus	<i>viridis</i>	Bétulacées	Aulne vert	Bonne production de bois
	Colutea	<i>arborescens</i>	Fabacées	Baguenaudier	
	Hippocrepis	<i>emerus</i>	Fabacées	Cornille des jardins	

L'orientation des haies prend en compte à la fois l'exposition et les courbes de niveau. Il est préférable d'implanter l'alignement de végétaux dans le sens nord/sud pour limiter le plus possible l'ombre portée sous nos latitudes (Benz et al., 2015) et ainsi ne pas péjorer les cultures qui se trouvent de part et d'autre. Il est également préférable de suivre les courbes de niveau ce qui permet de limiter l'érosion en favorisant l'infiltration de l'eau et ainsi limiter le ruissèlement de surface. Le choix de l'orientation de la haie est donc un compromis entre ces deux paramètres. D'autres informations pratiques sont disponibles dans le document « Comment planter et entretenir les haies » produit par Agridea (Benz et al., 2015).

Réglementation PER et paiement direct

L'implantation de haie occasionne des coûts d'installation, d'entretien et occupe une surface importante dans l'optique d'être autonome en ressource de bois raméal. Il y a donc un impact économique non négligeable. Néanmoins, en Suisse, des subventions sont proposées aux agriculteurs respectant les réglementations PER (prestations écologiques requises). Les exploitations suisses sont subventionnées pour la surface de promotion de la biodiversité (SPB) qui rentre dans la réglementation PER. Concernant la grande culture, 7 % au moins de la surface agricole utile (SAU) doivent être affectés au SPB pour respecter la réglementation PER (Callet-Bois et al., 2018).

Les haies, bosquets champêtres et berges boisées, y compris les bandes herbeuses associées, sont compris dans les SPB. Les contributions versées à l'agriculteur pour les haies peuvent varier de 2'160.- à 2'840.-/ha suivant le niveau de qualité (un ou deux) quelle que soit la zone (zone de plaine, colline ou montagne). Il existe également une contribution pour la mise en réseau qui est de 1'000.-/ha (Callet-Bois et al., 2018). Un hectare de haie peut donc rapporter pratiquement 3'000 CHF par an. Cette

contribution est intéressante dans l'optique d'implantation de haie pour la création de ressource en bois raméal. Néanmoins, des conditions parfois assez contraignantes sont à respecter pour toucher ces paiements directs. Nous allons citer les conditions qui nous intéressent directement dans une optique de création de ressource en BRF. Toutes les autres conditions à respecter sont disponibles dans le document « Comment planter et entretenir les haies » (Benz et al., 2015) :

- Une zone tampon sans fertilisation ni produit phytosanitaire d'au moins trois mètres de part et d'autre du cordon boisé doit être respectée. Cette bande enherbée correspond à une zone tampon entre la haie et le champ, qui est également un endroit de vie pour des organismes. Ces bandes peuvent poser quelques problèmes concernant la flore adventice. Pour revenir à la partie précédente sur les quantités et l'approvisionnement, une haie de 5 m de large a donc en plus 6 mètres de bande herbeuse, ce qui peut poser des problèmes au niveau de la viabilité au niveau de la demande importante en surface. Néanmoins, nous savons que le canton du Jura reste majoritairement occupé par des surfaces herbagères. On peut très bien imaginer, dans le cas d'installation de nouvelles haies, implanter ces alignements sur les surfaces de prairie permanente. Les 6 mètres de bande herbeuse obligatoire pour toucher les contributions ne sont alors plus un handicap. Attention tout de même à entretenir ces surfaces de manière extensive comme demandé dans la réglementation en vigueur.
- La taille s'effectue de deux manières. Soit une taille de recepage, soit une taille de rabattement. Il ne faut jamais receper la totalité des haies en même temps. Ainsi, un tiers des haies peut être coupé chaque année, ce qui permet de conserver une partie de l'habitat pour la biodiversité. Cela permet également de faire une rotation sur trois ans et ainsi alléger le travail de taille et de production de BRF de l'agriculteur.

3.1.3 Le système grande culture du Canton du Jura

Le Canton du Jura est une région comportant majoritairement des polycultures et élevages. La SAU total compte 40'257 ha en 2015 dont 10'438 ha de terres ouvertes (FRI, 2015). Les grandes cultures occupent plus de 26 % de la SAU total. Dans les plaines, le secteur céréalier est important. Le reste étant occupé par des prairies temporaires (18 %) et des prairies permanentes (55 %) (Winkelmann, 2016). La proportion de terre ouverte a tendance à diminuer. Le Canton du Jura a donc comme vocation naturelle la production herbagère de par son climat et sa topographie. L'élevage est essentiellement constitué de bovins (70 %, soit 59'000 bêtes environ), et de porcs (16 %) (FRI, 2015). On retrouve ensuite des moutons, des équidés et des chèvres. La présence d'engrais de ferme (fumier, lisier, etc...) a donc une place importante dans la part des amendements organiques et la fertilisation. L'intégration d'un amendement en bois raméal fragmenté dans la rotation doit tenir compte de cette particularité et fera office d'analyse détaillée pour chaque exploitation retenue. Il est possible de concilier les deux amendements dans une rotation.

Il s'agit majoritairement d'une zone de plaine et colline. Le système grandes cultures du canton possède une part importante de la rotation en maïs puis en blés. Il y a également 2 à 3 ans de prairie temporaire (PT) dans les rotations. L'entier du fumier à disposition est généralement appliqué sur les PT ou avant le maïs. Des couverts intercalaires sont implantés et sont soit dérobés, soit gélifs et détruits. Ces informations sont tirées d'un entretien avec le Dr. Scherrer, Conseiller Agro-environnemental, Coordinateur de l'accompagnement scientifique du projet « Terres Vivantes ». Rappelons également, que d'une manière générale, les grandes cultures, en Suisse, ne peuvent être irriguées.

La ressource potentielle en BRF

Le Canton du Jura possède un important système bocager. En effet, il y a plus de **444 ha de haie** sur le canton, ce qui représente plus de 900 km de périmètre. Les **terres assolées (TA) représentent 17'586 ha**, soit environ 40% de la SAU totale. Nous savons grâce au référence bibliographique, que 1 ha de haies fournit environ 80 m³ de BRF par an. Nous avons donc un potentiel de production de **35'520 m³ de BRF**. A raison de 100 m³/ha, nous pouvons donc **couvrir 355 ha de terres assolées**, soit **2% de l'ensemble des TA**. A cela peut être rajouté d'autres sources de BRF, comme les communes ou les compostières (à condition d'utiliser les branches pour le BRF et non le compost), mais cela fait l'objet d'une analyse localisée. Il faut rajouter, que les haies agricoles du Canton de Jura sont disposées de façon hétérogène. En effet, il y a des régions aux paysages bocagers et d'autres régions plus ouvertes au sein même du canton. Nous pouvons donc voir, que le problème de ressource est également présent dans le Canton du Jura et l'implantation de haie peut devenir une nécessité quant à l'utilisation de cette innovation technique comme levier d'amélioration. La viabilité agroéconomique de l'utilisation de BRF en autonomie au sein d'exploitation jurassienne doit être vérifiée et c'est en partie l'objet de l'étude. Nous pourrions donc répondre, à la fois aux questions concernant **l'utilisation du BRF dans diverses conditions pédoclimatiques jurassiennes sur la qualité des sols ainsi que le taux de matière organique** (qui intéresse directement le projet « Terres vivantes ») et à la fois, **la faisabilité agroéconomique au niveau Suisse, de l'utilisation de BRF en autonomie sur une exploitation**.

3.2 Etude de cas dans le canton du Jura dans le cadre du projet « Terres vivantes » de la « Fondation Rurale Interjurassienne » (FRI)

3.2.1 Contexte et objectifs

A l'issue de cette analyse détaillée concernant l'amendement BRF, nous allons réaliser deux études de cas pour i) évaluer la variabilité du potentiel du BRF en termes d'amélioration de la qualité des sols et de taux de matières organiques dans deux exploitations du Jura, ii) vérifier la faisabilité agroéconomique de cette innovation technique. Ce travail de fin d'étude réalisé à « HEPIA » rentre dans un projet plus vaste nommé « Terres Vivantes » orchestré par la Fondation Rurale Interjurassienne (FRI). Cette thèse de bachelor a pour objectif principal d'identifier la place que pourrait avoir le BRF en tant qu'amendement au sein d'exploitations pratiquant des grandes cultures en Suisse et plus précisément dans le Canton du Jura. Pour cela nous avons effectué deux études de cas dans deux exploitations jurassiennes. Nous nous sommes intéressés à leurs pratiques agricoles, à la qualité des sols exploités, notamment en quantifiant les déficits de matières organiques. Nous avons également quantifié le potentiel de production de BRF des surfaces boisées existantes afin de le mettre en parallèle avec l'état organique des sols. Nous avons également fait une étude économique de cette pratique agricole. Le projet vise également à fournir des outils pour que l'agriculteur prenne en main cette innovation technique, notamment par la création d'une charte pour estimer la production de biomasse et d'un manuel de vulgarisation pour l'usage du BRF en grande culture. Dernièrement, nous avons émis des pistes de réflexion afin de planifier une expérimentation qui rentre dans le cadre du projet « Terres vivantes » pour répondre aux questions soulevées dans la première partie et celles soulevées lors de l'approche de terrain.

3.2.2 Le projet « Terres vivantes » et son suivi

Le projet « Terres vivantes » vise à répondre à deux défis pour l'avenir de l'agriculture Suisse, à savoir conserver les terres agricoles dans leur qualité et développer une agriculture efficiente adaptée au lieu de production (Fietier and Scherrer, 2018). L'agriculteur occupe une place centrale dans le projet puisque l'objectif est qu'il redevienne pleinement acteur de la protection de ses sols. Le projet va développer la capacité des agriculteurs à améliorer la qualité structurale de leurs sols en associant

autodiagnostic, partage d'expérience et soutien de la recherche. Une centaine d'exploitations agricoles du Canton du Jura ainsi qu'une partie francophone du Canton de Berne (Jura bernois), est concernée, ce qui représente 3'000 ha de terres assolées. Le projet débute en 2019 et va durer 6 ans avec 2 ans supplémentaires de suivi scientifique. Toutes les exploitations participantes au projet ont été soumises à un questionnaire d'audit initial, ce qui permet de décortiquer l'ensemble des pratiques agricoles des exploitants. Deux parcelles par exploitation sont retenues pour une analyse un peu plus poussée notamment concernant leur historique des 10 dernières années (rotation, pratiques, etc...) et vont faire office d'un suivi rigoureux durant les 8 années du projet.

Comme dans le reste de la Suisse, les sols agricoles du canton du Jura sont dégradés physiquement et manque de MO (constat fait par les agriculteurs, confirmé par les données disponibles). La restauration et la protection du facteur de production (sol) doivent être une priorité pour les producteurs. Pour cela, un certain nombre d'innovations techniques doivent être adoptées. Sur 4'400 échantillons de sols jurassiens (figure 5), 40% des grandes cultures ont une teneur MO/argile inférieure à 12% (indice de vulnérabilité) et 83% à moins de 17% (Fietier and Scherrer, 2018). Le seuil 12 % représente la borne inférieure critique que ne devrait jamais dépasser les sols agricoles et le seuil 17 % représente la limite entre les sols dégradés et non dégradés. Malgré des résultats légèrement supérieurs au Canton de Genève, nous voyons que le potentiel de séquestration reste important et les teneurs en matière organique sont inférieures aux objectifs de qualités.

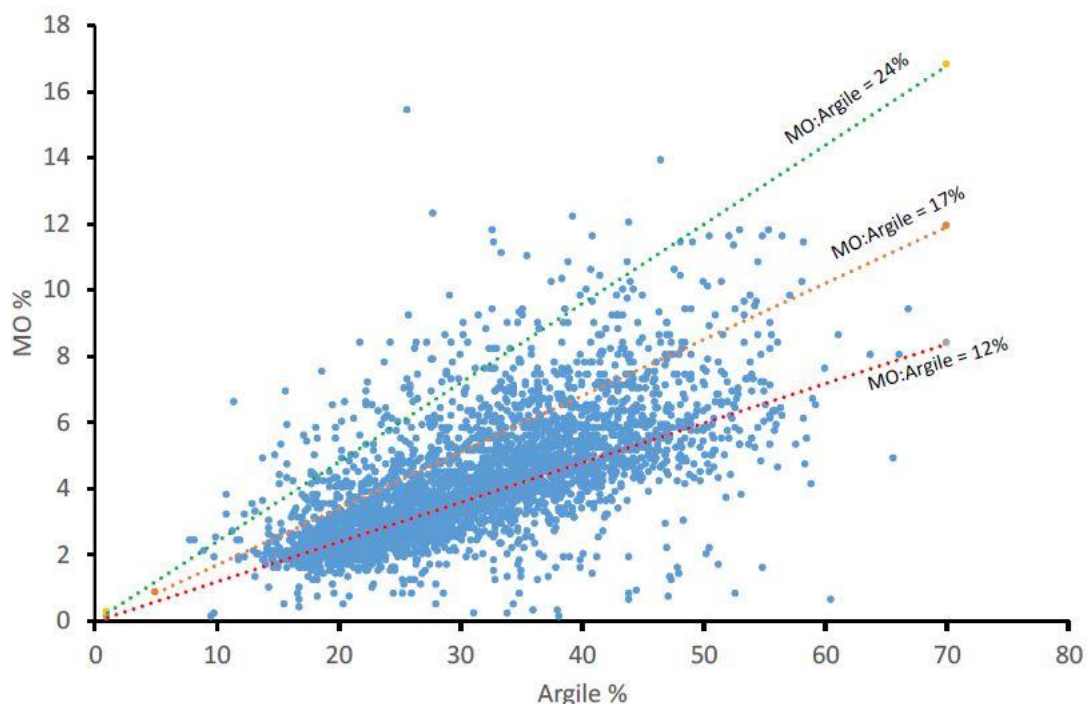


Figure 5 : Relation entre le taux d'argile et la quantité de matière organique de 4'433 échantillons de sol du canton du Jura. La médiane est de 12% de matière organique par rapport au taux d'argile ce qui est insuffisant pour garantir une bonne structure (minimum requis 17%) (Fietier and Scherrer, 2018).

Nous avons vu que la ressource organique était limitée sur le Canton de Genève, mais cette problématique n'est pas uniquement propre à ce canton. Le BRF pourrait faire partie de ces innovations techniques et ainsi rentrer dans le projet. En effet, nous avons vu que le bois raméal était tout à fait adapté pour lutter contre les menaces pesant sur le sol. De plus, il rentre également dans une optique climatique de séquestration de carbone. Le Canton du Jura n'a pas de plan climat mais il n'est pas impossible que cela arrive un jour. Le BRF apporterait donc, deux avantages aussi bien

agronomique que climatique et rentre parfaitement dans le cadre du projet « Terres vivantes ». Il convient maintenant de vérifier les capacités de l'innovation technique, à répondre aux objectifs dans les conditions pédoclimatiques jurassiennes.

3.2.3 Questionnements soulevés lors de la recherche bibliographique

Lors de la monographie nous avons soulevé un certain nombre de questionnements. Voici ceux qui nous intéressent directement pour répondre aux deux problématiques énoncées précédemment :

- L'apport de BRF sur un sol d'un autre type de sol que sableux ou limoneux, permet-il des augmentations de Corg aussi importantes qu'observé dans la littérature,
- Un épandage inférieur à 100 m³/ha tous les trois ans, est-il suffisant, dans l'optique d'être autonome au niveau de la ressource en bois raméal, pour observer les bienfaits du BRF,
- La hausse de rendement, si elle existe, ainsi que tous les autres avantages ou gains économiques, sont-ils suffisants pour compenser les investissements liés à la production de BRF, les coûts de productions de bois raméal fragmenté et l'occupation des sols par les haies, cela dans différents systèmes de production Suisse,
- La production de biomasse des haies et les autres caractéristiques pondérales du BRF sont-ils les même que les chiffres utilisés pour les calculs, sous diverses conditions pédoclimatiques rencontrées.

De façon plus marginale, d'autres aspects peu documentés, seraient intéressants d'observer par la même occasion :

- Définir précisément la dynamique de la MO formée ainsi que l'impact de l'augmentation du rapport C/N de cette dernière,
- Caractériser si l'apport de BRF favorise la mycorhization des cultures,
- Définir la part de l'azote disponible des BRF épandus,

Il faudra également observer de près au cas par cas, l'impact sur les cultures et vérifier les points importants soulevés dans la littérature comme par exemple l'état sanitaire des cultures ou au contraire la diminution de la pression de certains problèmes phytosanitaires. L'évaluation, si elle existe, de l'augmentation de la RU et de l'accroissement de la résistance des cultures à la sécheresse, peut être intéressante, surtout dans le cas de grandes cultures qui ne sont pas irriguées. La faim d'azote devra également être prise en compte, en proposant une intégration dans la rotation optimale, spécifique à chaque exploitant, limitant le plus possible son intensité et ainsi sa compensation. La vérification de la baisse de son intensité durant les apports suivants le premier amendement, doivent être aussi évalués avec les doses de BRF apportées.

Partie IV : Matériel et méthodes

4.1 Choix des exploitations et critères de sélection

Le choix des deux exploitations d'étude est une étape importante. Nous voulions que ces deux dernières appartiennent au projet « Terres Vivantes » pour pouvoir avoir un suivi à l'issue de ce travail. Parmi le référencement des exploitations participantes, deux ont indiqué utiliser du BRF. Nous nous sommes dirigés vers ces deux exploitants afin de voir si leur ferme convenait aux critères de sélection. Nous voulions qu'une des deux exploitations soit représentative du Canton du Jura par notamment sa surface et ses pratiques. Concernant le cahier des charges pour le choix de l'autre exploitation, nous souhaitons qu'elle soit adaptée à l'usage de BRF (disponibilité de la ressource, etc...). Les deux agriculteurs que nous avons rencontrés rentrent dans ces deux catégories. Le premier se trouve sur la commune de Grandfontaine. Il s'agit de l'exploitation de Thomas Vuillaume qui utilise du BRF originaire d'une ressource externe. Il symbolise la ferme représentative du Canton. Il exploite en production intégrée une quarantaine d'hectares. Joan Studer est le deuxième exploitant et il se trouve à Lucelle. Il est déjà équipé pour faire du BRF et il possède de nombreuses haies. Il exploite une ferme en polyculture et élevage de plus de 70 ha de SAU en agriculture biologique. Le fait que ces exploitants utilisent déjà du BRF est une bonne chose pour l'étude. Nous pourrions ainsi voir la place de l'amendement BRF au sein des pratiques agricoles dans des cas concrets. Ces précurseurs dans le domaine des grandes cultures jurassiennes peuvent être des leviers importants pour démocratiser cette pratique.

4.2 Description des exploitations d'étude

4.2.1 Exploitation de Thomas Villaume à Grandfontaine

M. Vuillaume exploite des polycultures. Il n'a pas d'élevage pour le moment car il vient de reprendre la ferme de son oncle en 2018. Il compte avoir un élevage de bovins très prochainement et son oncle pratiquait déjà cette activité. Nous pouvons donc qualifier cette exploitation de polycultures/élevage et ainsi être en accord avec la notion de représentativité. Thomas Vuillaume possède une autre activité à côté de la ferme. Il réalise des travaux pour tiers comme par exemple du déneigement. Il exploite environ 150 stères de bois par an pour la revente.

Situation pédoclimatique

Cette exploitation se trouve sur la commune de Grandfontaine en Ajoie (ou Porrentruy). Il s'agit d'une zone plutôt ouverte avec peu de haies mais quelques forêts. L'ensemble des terres sont situées sur une roche mère du Jurassique supérieur (malm) (Office Fédéral de Topographie Swisstopo, 2019). Cette roche est donc calcaire. Toute sa SAU se trouve sur la commune de Grandfontaine à environ 600 mètres d'altitude. La station climatologique la plus proche se trouve sur la commune de Fahy à moins de 4 km. Selon la norme climatologique de la période de référence 1981-2010 (Météo Suisse, 2016), il fait en moyenne (annuelle) 8,9 °C à Fahy. Les précipitations moyennes annuelles sont de 1090 mm. La température moyenne des 10 dernières années (2009-2018) est de 9,7 °C (Previsionmeteo.ch, 2019).

Assolement et surface agricole

L'exploitation à une SAU de 43,62 ha. En 2019, le TA représente 36,12 ha soit plus de 80 % de la SAU totale. Les terres ouvertes représentent environ 35 ha. L'assolement 2019 est le suivant : 164 ares de PT (2 parcelles) 4,5 %, 849 ares de colza d'automne (2 parcelles) 23,5 %, 832 ares de betterave sucrière (1 parcelles) 23 %, 221 ares de tournesol à huile (1 parcelle) 6,1 %, 1546 ares de blé d'automne (2 parcelles) 42,8 %. Il a donc 8 parcelles de terre assolée que l'on a codifié pour cette étude de T1 à T8. Les haies et bosquets représentent 2,63 ha soit 6 % de la SAU totale. Le reste de la SAU est

composée de pâturage et prairies extensifs. Cette ferme compte environ un UMOS. Pour le projet « Terres Vivantes » la parcelle T1 et la parcelle T7 ont été retenues pour un suivi plus poussé (parcelle du monitoring). La parcelle T1 représente selon lui le champ le plus fertile et T7 représente la parcelle la moins fertile.

Description des pratiques et de la rotation

Il pratique le labour conventionnel. Il aimerait bien réduire le travail du sol. Selon lui cela augmenterait le pôle phytosanitaire (désherbage chimique), les outils de désherbage mécanique ne sont pas abordables pour un agriculteur de cette taille et exploitant seul.

- **Rotation**

Etant donné qu'il reprend seulement l'exploitation, il n'a pas de rotation précisément définie. Par rapport à l'assolement de 2019, il a la volonté d'augmenter sa proportion de prairie temporaire afin de faire suffisamment de foin pour alimenter le futur bétail. Des couverts végétaux sont parfois mis en tant que cultures intercalaires, notamment après le blé/colza et avant les tournesols/betteraves/blés. M. Vuillaume pratique systématiquement le labour après les tournesols ou la betterave.

- **Amendement organique**

Il produit actuellement aucun engrais de ferme. Il achète du fumier frais à une autre exploitation voisine à raison de 200 m³ par an qu'il fait composter pendant maximum 5 mois. Ce fumier est mélangé au BRF issu de déchets verts urbains qu'une commune voisine lui fournit. Actuellement, il paye seulement le transport pour aller le chercher. Ce BRF représente environ 90 m³ par an. En 2019, il a appris qu'il n'aurait plus systématiquement cette ressource car d'autres agriculteurs sont prêts à payer pour obtenir ce BRF.

- **Fertilisation**

La fertilisation est en partie couverte par les amendements organiques épandus. Le reste est assuré par des engrais de synthèse du commerce (type nitrate d'ammoniac, etc...). Dans le SuisseBilanz 2018, les engrais de ferme couvrait 23 % des besoins en azote et 57 % des besoins en phosphore.

Utilisation actuelle du BRF et ressenti

Comme nous l'avons vu Thomas Vuillaume obtient du BRF de déchets verts d'une commune voisine qu'il mélange avec du fumier (environ 50%v de chaque). Il nous a confié que ce BRF pouvait contenir des branches supérieures à 7 cm de diamètre et quelques branches de résineux. Le mélange composté est épandu à raison de 20 à 30 m³/ha dans les zones qui lui posent des problèmes (sol dégradé, mauvais rendement, etc...). Selon M. Vuillaume, après un ou deux épandages, les premiers résultats sont visibles et il observe déjà une amélioration. Il semblerait que la fertilité des zones ayant été amendée soit meilleure. Malgré ce constat, Thomas Vuillaume n'est pas prêt à payer cet amendement qui était gratuit jusqu'à aujourd'hui. En revanche, il n'est pas près de se séparer du fumier acheté à environ 5 Fr. le m³, qu'il pourrait bientôt produire lui-même. Pour l'instant, produire son propre BRF est impensable. Il est chef d'exploitation depuis seulement deux ans et son activité externe lui prend beaucoup de temps. La production de BRF rajouterait un travail qui ne peut être fait pour le moment. En revanche, dans quelques années et une fois bien installé, il n'est pas contre l'idée. Il concède néanmoins que les investissements liés à cette pratique lui semblent inabordables.

4.2.2 Exploitation de Joan Studer à Lucelle

Il s'agit d'une exploitation polyculture et élevage labellisée bio (bio bourgeon) depuis deux ans. La femme de Joan travaille à 80 % sur la ferme. Il a un employé à plein temps. L'exploitation fait partie d'une **communauté de machines** : Société simple. Ce n'est pas une CUMA car les tracteurs sont aussi concernés. Ils sont trois à partager des tracteurs et des machines. Joan s'associe avec un des deux agriculteurs de l'association précédente pour former une **communauté d'élevage** (Bâtiments et troupeaux mis en communs). Ils mettent en commun leurs troupeaux depuis 2019 et partagent les engrais de ferme en fonction de leurs besoins.

Situation pédoclimatique

La ferme se trouve sur la commune de Lucelle à environ 700 mètres d'altitude. Ce village est Franco-Suisse et se trouve à cheval sur le district de l'Ajoie et de Delémont. L'exploitation se trouve dans la zone de la Baroche. Il s'agit d'une zone de collines et de montagnes ponctuée de forêt et champs agricoles avec de nombreuses haies (type bocage). La plaine à proximité est une zone où l'on retrouve de la production fruitière haute tige. La station météo la plus proche est encore une fois celle de Fahy. Malheureusement, cette station est relativement éloignée (un peu moins de 30 Km) et elle ne reflète pas les conditions climatiques de Lucelle qui est 100 mètres plus haut. Nous savons que la température baisse d'environ 0,6 °C/100 mètre d'altitude. De ce fait nous allons définir empiriquement la température moyenne annuelle de la norme climatologique de la période de référence 1981-2010 pour Lucelle à 8,3°C (ce paramètre est important l'estimation du K2). Il semblerait que cette zone d'étude soit légèrement plus arrosé que la zone de Fahy (Office Fédéral de Météorologie et de Climatologie, 2014).

On retrouve trois entités géologiques différentes sous les TA de l'exploitation (Office Fédéral de Topographie Swisstopo, 2019):

- Le kimméridgien (Jurassique) qui a l'aspect d'une roche calcaire et qui concerne les parcelles J1, J2, J6.
- Des argiles d'altérations anciennes (pliocène, quaternaire) qui concernent les parcelles J2, J4 et J5.
- Gravier vosgien (Miocène) qui concerne la parcelle J7.

Ces informations tirées d'une carte géologique ne correspondent pas tout à fait à nos observations de terrain. En effet, il semblerait que J5 et une partie de J4 soient positionnées sur la dalle calcaire.

Il n'est plus soumis aux analyses de sol tous les dix ans ainsi qu'au « SuisseBilanz » car il n'a plus d'intrant extérieure (N et P), il possède une charge en UGB inférieure à une limite et il exploite en agriculture biologique. Les analyses de sol devront néanmoins être renouvelées durant le projet « Terres Vivantes ».

Assolement, surface agricole et élevage

En 2019, l'exploitation possède une SAU de 73, 13 ha. Les TA représentent 11,71 ha soit 16 % de la SAU totale et les TO représentent 6,54 ha soit 55 % des TA et un peu moins de 9 % de la SAU. Les prairies temporaires couvrent 45 % des TA ce qui représente plus du double requis en agriculture biologique. Les fermages représentent 1 ha des TA et environ 20 ha des prairies permanentes. L'assolement 2019 est le suivant : 526 ares de PT (3 parcelles) 45 %, 478 ares de méteil (céréale + féverole) (3 parcelles) 41 %, 167 ares d'épeautre (1 parcelles) 14 %. Il y a donc 7 parcelles de terres assolées que l'on a codifié pour ce projet de J1 à J7. Joan et sa femme élèvent des vaches (Salers) et des porcs (porc basque) et de manière anecdotique quelques chevaux et chèvres. Les porcs comptent environ 50 bêtes/an qui sont entièrement commercialisés en vente directe. Le bovin représente

environs 250 vaches /an et seulement 12 % sont valorisées en vente directe.

D'une manière générale, Joan trouve que ses sols sont en bon état et bien pourvus en matières organiques. Il possède une parcelle « à problème » dont le sol semble acide, faiblement pourvu de MO, avec une forte proportion de grossier. Il s'agit de la parcelle J7 choisie comme parcelle du monitoring du projet « Terres Vivantes ». L'autre parcelle du monitoring est la parcelle J2 qui est, selon l'exploitant, la plus fertile. Cette parcelle se trouve dans le bassin proche de l'exploitation. Ce dernier forme une cuvette avec certainement deux formations identiques de calcaire de part et d'autre (J1 et J3), aux altitudes similaires, avec un remplissage de loessique au milieu, plutôt limoneux et assez profond.

Joan possède environ 7 ha de haies et bosquets soit 10 % de SAU. Il possède également des forêts et pratiquement 1 ha de pâturage boisé. Il souhaite installer de nouvelles haies. Il aimerait les disposer entre les parcelles pour les délimiter. L'objectif de ces haies est avant tout de favoriser la biodiversité à proximité de ses parcelles. Il souhaite également qu'elles aient une bonne production de biomasse pour la création de BRF ainsi qu'elles produisent des petits fruits. Les SPB représentent 54 ha soit plus de 73 % de la SAU (14 fois plus que les 7 % requis en grandes cultures et prairies).

Description des pratiques et de la rotation

Il pratique un labour conventionnel avant le maïs mais il veille à limiter de plus en plus la profondeur du travail du sol. Il pense peut-être passer au semis direct un jour à condition de trouver la bonne rotation et d'être formé car cette pratique n'est pas évidente en agriculture biologique.

- **Rotation**

La rotation selon le plan de culture de 2018, est la suivante : trois ans de PT suivi de méteil fourragé, puis de maïs. Joan précise que la rotation type et idéale pour son exploitation n'est pas encore clairement défini. Voici une autre variante qu'il fait : PT détruite au printemps après une fauche-Maïs-Méteil (pois, orge, blés, parfois épeautre).

L'ensemble de la production végétale est destiné à nourrir les animaux. L'exploitation cherche l'autonomie en fourrage pour tourner en cycle fermé. L'exploitation est autonome en fourrage depuis 2019.

A terme, il veut consacrer 1/3 des TA à l'alimentation humaine. Certaines de ses parcelles ne peuvent pas accueillir toutes les cultures. Par exemple, la parcelle J5 qui est positionnée sur une dalle calcaire est très drainante et le maïs ne peut y pousser en raison des sécheresses estivales.

- **Amendement organique**

M. Studer possède un séparateur de phases pour le lisier. Cela lui permet de séparer la phase solide et liquide. Il fait son propre compost de fumier grâce aux phases solides. Le processus de compostage dure environ 8 mois pour obtenir un compost de fumier mûr.

L'association des deux exploitations (CE) produit environ 1'200 m³ de lisier. Joan Studer épand 500 m³ de lisier et 120 m³ de fumier sur TA.

- **Fertilisation**

L'ensemble de la fertilisation est assuré grâce aux engrais de ferme, il n'y a donc pas d'intrant pour la fertilisation. L'objectif est de fonctionner en cycle fermé.

Utilisation actuelle du BRF et ressenti

Le modèle de production ne convient plus à Joan Studer. Il observe beaucoup d'incohérences dans le

modèle agricole actuel. C'est pourquoi qu'il s'est orienté vers des méthodes alternatives. C'est en s'intéressant et en se prenant de passion pour une autre forme d'agriculture qu'il tombe sur l'amendement BRF. Grâce à l'association avec deux autres exploitations, il n'a pas hésité à investir dans un broyeur.

Selon lui le principal avantage du BRF est de stimuler la vie du sol. En ce qui concerne les inconvénients du BRF, il cite :

- Acidifier son sol (il s'est rendu compte qu'il s'agit en réalité du contraire),
- Difficulté de trouver la matière première
- Chronophage et énergivore
- Faim d'azote

L'agriculteur a donc conscience de plusieurs aspects importants concernant cet amendement. Son plus gros défi en tant qu'agriculteur est de se remettre en question sans cesse, d'accepter le regard des autres quand on choisit de cultiver avec une idéologie différente et des pratiques alternatives. Selon lui, le monde agricole que l'on connaît, ne facilite pas les agriculteurs qui veulent partir dans une autre direction. Les méthodes alternatives sont difficilement acceptées.

Cette exploitation est donc adaptée à la pratique « BRF » ce qui est intéressant dans le cadre de cette étude. De plus, cette ferme peut servir de levier et d'exemple pour démocratiser l'usage du BRF en grandes cultures.

4.3 Déroutement du projet

4.3.1 Evaluation du potentiel d'amélioration du statut organique des sols par le BRF dans deux exploitations agricoles jurassiennes

Analyse de BRF indigène

Nous avons mis en évidence la variabilité des bois raméaux dans la partie II. Dans le cadre de cette étude, il semble donc opportun d'analyser quelques BRF originaires de la zone d'intérêt, à savoir le Canton du Jura. Ces analyses nous permettront de mieux caractériser cet amendement, de mettre des valeurs plus adaptées au contexte jurassien sur certains paramètres utiles dans le cadre de l'étude de viabilité et du bilan humique, comme la masse volumique, la teneur en matière sèche ainsi que d'autres variables.

Recensement des haies et estimation du potentiel de production de BRF

Précédemment, nous avons mis en évidence la difficulté de trouver suffisamment de ressources en bois raméal pour alimenter le système grande culture. Nous avons également évoqué que cette ressource doit idéalement être produite au sein même des exploitations agricoles. Le recensement des haies est donc une étape incontournable dans cette étude de viabilité. En fonction du type de haie ou de la surface boisée, la production de biomasse valorisable en BRF n'est pas la même. Un des objectifs est donc de créer une charte permettant de quantifier la production de biomasse en fonction des différents types de surfaces boisées.

Bilan humique

Les sols des exploitations jurassiennes, bien qu'ils soient en moyenne mieux pourvus en matières organiques que les sols des exploitations genevoises, sont souvent en dessous des exigences de qualité minimales ($MO_{\%p} > 17\%$ de la masse en argile). Le bilan humique est un bon outil pour avoir une vision d'ensemble de l'évolution de la teneur en matières organiques des parcelles. Il met en parallèle la rotation, les pratiques de l'agriculteur et les particularités des parcelles que ce dernier exploite. De ce fait, il est possible d'avoir un ordre de grandeur des flux de carbone à l'échelle de l'exploitation.

Nous avons donc décidé de réaliser un bilan humique pour chaque parcelle des deux exploitations afin de quantifier les déficits ou les surplus de carbone organique. De cette manière, il est donc possible de mettre en lien les potentiels déficits avec la ressource disponible mis en évidence par le recensement des surfaces boisées exploitables. Nous pourrions ainsi savoir si le BRF peut couvrir une partie voir totalement les manques de matières organiques dans les sols des deux exploitations de l'étude. Cette démarche nous permettra de mieux appréhender la place du BRF en tant qu'amendement complémentaire et comme innovation technique permettant d'assurer la qualité des sols durablement.

4.3.2 Etude agroéconomique

Le coût d'une pratique agricole est un élément très important. En effet, la dimension économique est la première chose que regarde les praticiens. Elle illustre la viabilité d'une pratique. Il est donc impératif de la traiter dans cette étude afin de mettre quelques chiffres sur cette innovation technique. Nous avons, dans un premier temps, calculé les coûts de production du BRF en fonction de l'exploitation et du matériel à disposition. Les coûts de transport en fonction de la localisation des haies et des terres assolées ont été calculés. Les coûts d'épandage ont également été estimés. Ces coûts ont été mis en parallèle avec les gains chiffrables et non chiffrables pour l'agriculteur et l'exploitation.

4.3.3 Planification d'une expérimentation à long terme

Durant cette étude, une expérimentation n'a pu être envisagée en raison de délais trop courts. Néanmoins, ce travail s'inscrit dans un projet plus vaste orchestré par la FRI. Comme nous le savons les deux exploitations de l'étude participent au projet « Terre Vivantes ». La durée et le suivi de ce projet permettent de mettre en place une expérimentation qui rend possible de vérifier certains aspects mis en évidence par la recherche bibliographique et par l'approche de terrain. Nous pourrions notamment vérifier si ces aspects sont transposables au contexte jurassien et notamment aux deux exploitations d'étude.

Mise en place et suivi

Nous avons essayé de réfléchir à la mise en place d'une expérimentation au sein des deux exploitations d'étude. Cette expérimentation pourra commencer dès l'automne 2019. Le suivi sera effectué par des équipes de la FRI et de « HEPIA ». L'enjeu de cette expérimentation est à la fois de conserver suffisamment de rigueur scientifique et en même temps ne pas devenir trop contraignant pour les exploitants. Il s'agit ici de pistes de réflexion et un certain nombre d'éléments resteront à affiner car le délai de l'étude ne nous a pas permis d'approfondir davantage.

4.3.4 Vulgarisation pour les praticiens

Création d'un manuel de vulgarisation

La création d'un manuel de vulgarisation rentre dans les objectifs de ce travail et s'accorde bien avec ceux du projet « Terre Vivantes » qui a pour ambition d'impliquer les agriculteurs. En effet, ce dernier doit redevenir pleinement acteur de la protection de ses sols. Le projet vise à développer la capacité des agriculteurs à améliorer la qualité structurale de leurs sols en associant autodiagnostic, partage d'expérience et soutien de la recherche. De ce fait, la vulgarisation de la pratique en grande culture sous forme d'un guide d'utilisation, rentre bien dans les objectifs visés.

Création d'une charte vulgarisée

Cette charte permettra aux conseillers et aux agriculteurs d'estimer facilement le potentiel de production en bois raméal des espaces boisés se trouvant sur la surface agricole.

4.4 Analyse de BRF locaux

4.4.1 Choix des échantillons

Provenance

Comme énoncé dans la partie des objectifs de l'étude, ce sont avant tout des BRF issus de bois raméal jurassien qui nous intéressent. Les deux exploitants retenus pour l'étude utilisent déjà cet amendement. Nous avons donc réalisé nos échantillonnages au sein même de ces exploitations ce qui permet d'avoir une idée précise de l'amendement utilisé et d'être relativement précis sur les paramètres utilisés pour l'étude de viabilité. Nous avons échantillonné deux BRF dans l'exploitation de Joan Studer (Commune de Lucelle, BRF n°1 et n°2) et 2 autres au sein de l'exploitation de Thomas Vuillaume (commune de Grandfontaine, BRF n°3 et n°4). Il s'agit des BRF que les agriculteurs avaient à disposition. Lors des interventions sur le terrain, nous avons croisé le chemin d'un autre BRF. Ce dernier a été produit chez un maraîcher « La clef des champs » qui pratique l'Agriculture Contractuelle de Proximité (ACP) à Courgenay (BRF 5). Il y a donc 5 échantillons de bois raméal fragmenté en provenances du Canton du Jura (figure 6).

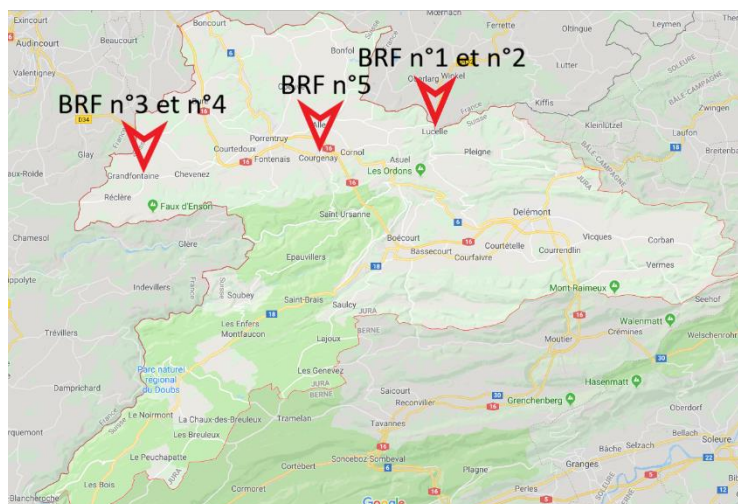


Figure 6 : Répartition des échantillons de BRF dans le Canton du Jura.

Particularités des BRF échantillonnés

La variabilité de cet amendement vient avant tout du matériel végétal de base utilisé pour sa confection. C'est ainsi que nous avons recueilli des informations sur chaque BRF échantillonné pour pouvoir caractériser ces amendements au mieux (tableau 5).

Tableau 5 : informations et caractéristiques des BRF échantillonnés.

Lieux d'échantillonnages	Echantillons	Matériel végétal de base	Epoque de taille des branches	Remarque	Date du prélèvement
Commune de Lucelle (JU), exploitation de Joan Studer	BRF n°1	Taille de haie majoritairement constitué de noisetier, de peuplier tremble et d'aune	Mars 2019, avant l'apparition des feuilles	Haie sur la SAU de Mr. Studer, rarement entretenue (> 10 ans)	24-mai-19
	BRF n°2	Uniquement constitué de cerisier	Mars 2019, avant l'apparition des feuilles	BRF issus d'élagage de fruitier	
Commune de Grandfontaine (JU), exploitation de Thomas Vuillaume	BRF n°3	Amendement constitué de 50 %v de BRF issus de déchet vert urbain en mélange avec 50%v de fumier le tout composté	Hiver 2018/2019	Mélange effectué au mois de mars, 2 mois de compostage, BRF issu de taille de bord de forêt communale (branche > 7 cm)	
	BRF n°4	Déchet vert urbain, principalement des bord de forêt communale	Hiver 2018/2020	Proportion de branches ranches > 7 cm)	
Commune de Courgenay (JU), "La clef des champs"	BRF n°5	Taille de haie plurispécifique de qualité 2 (PER), liste des espèces : <i>Bétula pendula</i> , <i>Alnus glutinosa</i> , <i>Crataegus monogyna</i> , <i>Cornus sanguinea</i> , <i>Prunus padus</i> , <i>Viburnum opulus / lantana</i> , <i>Corylus avellana</i> , <i>Carpinus betulus</i> , <i>Ligustrum vulgare</i> , <i>Salix caprea</i> , <i>Rosa canina</i>	Mars 2019, avant l'apparition des feuilles	Haie régulièrement entretenue (tous les trois ans)	

Nous pouvons voir qu'un des échantillons est constitué d'un mélange avec du fumier bovin (BRF n°3). Ce mélange a vocation d'être composté pendant 5 mois au maximum. L'échantillonnage intervient deux mois après le mélange des deux matériaux bruts. L'analyse de cet amendement est intéressante pour voir l'influence du fumier et du compostage par rapport aux caractéristiques du BRF n°4 brut qui a servi de base au mélange sachant que l'agriculture jurassienne est majoritairement composée

d'exploitations en polycultures élevage. L'engrais de ferme est donc présent dans la plupart des cas. Le BRF vient d'une commune voisine. Cette dernière sous-traite le broyage des déchets verts à une entreprise extérieure « Berom Sa ». Les déchets verts sont majoritairement constitués de branches issues de la taille de bord de forêts. Une proportion de branches sont de gros diamètre (> 7 cm) et/ou sont issues de conifères.

L'échantillon n°5 est un BRF issu d'une haie plurispécifique remplissant les critères de la « qualité 2 » dans les Prestations Ecologiques Requises (PER). L'analyse de cet échantillon nous intéresse également dans le cadre de cette étude puisque qu'il représente ce que l'on retrouve généralement dans les exploitations jurassiennes. Ce BRF est réalisé au sein même de la ferme.

Les échantillon n°1 et n°2 représentent des cas plus spécifiques, constitués de BRF issu de taille de haie moins diversifiée et de fruitier. Ces BRF sont réalisés par l'exploitant grâce au broyeur qu'il a acheté avec les autres membres de l'association.

4.4.2 Prélèvement

Prélèvement normé : procédure compost

Il n'existe actuellement aucune procédure normée de prélèvement pour cet amendement. Nous nous sommes alors basés sur la procédure d'échantillonnage du compost (Station Fédérale de Recherches en Chimie Agricole et sur l'Hygiène de l'Environnement (FAC), 1995). Cette méthode a été étudiée pour que le prélèvement soit le plus uniforme possible. Les échantillons n°1, n°2, n°3, n°4 ont été prélevés dans des andains au sol. L'échantillon n°5 a été échantillonné dans une remorque. Une tarière de diamètre environ 2,5 fois plus grand que les plus gros agrégats a été utilisée, soit environ un diamètre intérieur de 10 cm. L'échantillon est composé de plusieurs prises élémentaires.

- Le prélèvement dans les tas et andains (figure 7) : pour les andains inférieurs à 15 m³ il est conseillé de faire trois prises élémentaires. Dans notre cas tous les andains sont inférieurs à 15 m³. Ces trois prises sont uniformément réparties sur l'entier de l'andain. La tarière doit être positionnée à mi-hauteur du flanc de l'andain, avec une inclinaison de 45° par rapport à la base. Le prélèvement doit se faire jusqu'à la base de l'andain.
- Prélèvement directement dans le chargement (figure 7) : pour les chargements inférieurs à 15 m³ il est conseillé de faire trois prises élémentaires. Ces trois prises sont uniformément réparties sur l'entier du chargement.

Les prises élémentaires (environs 3 litres) sont ensuite mélangées pour former l'échantillon global (environs 9 litres).

Figure 7 : Prélèvement du BRF grâce à une tarière dans un andain (à gauche) et dans une remorque (à droite).



4.4.3 Analyses de laboratoire

Paramètres d'intérêt

Pour décrire la valeur agronomique de ces 5 échantillons, il convient de définir ce que l'on veut analyser. Les paramètres suivants permettent de caractériser un amendement organique :

- Caractéristiques pondérales :
 - Masse volumique,
 - Teneur en matière sèche, en matière organique et en carbone,
 - Teneur en éléments nutritifs : azote, phosphore, potassium, magnésium et calcium.

- Caractéristiques non pondérales :
 - pH,
 - Conductivité,
 - C/N.

Méthodes, procédures et protocoles

Comme pour le prélèvement d'échantillons, il n'existe pas de procédure adaptée pour l'analyse de cet amendement. Nous avons donc choisi d'analyser ces échantillons selon les procédures existantes pour le compost.

- Masses volumiques

La masse volumique est un paramètre de première importance car elle permet de convertir un volume d'amendement en masse. De ce fait, cette dernière est donc très utile dans la pratique pour les épandages mais également pour notre étude de faisabilité, notamment pour le bilan humique. On distingue la masse volumique aux conditions du prélèvement (effectué sur matière fraîche avec la teneur en humidité au moment du prélèvement) et la masse volumique sèche (effectué sur la MS).

Pour le compost, la masse volumique au condition du prélèvement est estimée de la manière suivante (Station Fédérale de Recherches en Chimie Agricole et sur l'Hygiène de l'Environnement (FAC), 1995) : Il s'agit de faire une marque au niveau des 10 litres dans un seau de 15 litres posé sur une balance (faire la tare du seau). Il faut ensuite remplir d'amendement légèrement au-dessus de la marque avant d'effectuer un tassement en frappant le seau sur une surface plane et solide et permettre de reconstituer la densité de l'andain initial. Il faut ensuite enlever ou rajouter du matériel jusqu'à la marque. Le résultat en kilogramme est ensuite multiplié par 100 pour obtenir des kg/m^3 . Nous avons réalisé cette méthode avec 5 litres car nous manquions de volume d'échantillon.

Pour évaluer la masse volumique sèche, nous avons réalisé le même principe mais avec un volume de 1 litre (volume d'échantillon disponible plus faible). Cette mesure a été faite après avoir passé les échantillons dans l'étuve à 105°C pendant 48 heures (évaluation de la teneur en matière sèche selon la procédure compost). Des biais peuvent plus facilement s'introduire en prenant un volume plus petit. En effet, une erreur de quelques grammes a une plus grosse répercussion quand on extrapole la valeur en kg/m^3 . Nous avons donc fait des calculs de vérifications grâce aux mesures des teneurs en matière sèche obtenues après le passage des échantillons à l'étuve et grâce à celles obtenues par le laboratoire de Lullier (cf. partie suivante).

Au déballage, une appréciation visuelle de l'humidité ainsi que de la granulométrie (finesse du déchiquetage au moment du broyage) des échantillons a été faite. Ces paramètres ont un impact sur la masse volumique.

- Autres paramètres

Tous les autres paramètres ont été analysés par le laboratoire d'analyse des sols de « HEPIA » à Lullier. La procédure d'analyse de compost a été appliquée sur ces échantillons et les méthodes suivantes ont été réalisées :

- Extrait à l'eau : extraction H₂O 1:5 p/v 120' : pour déterminer le pH, l'Ec (Electro-conductivité), les nitrates (test bandelette NO₃⁻), l'ammonium (test bandelette NH₄⁺),
- Extrait après la calcination avec l'acide chlorhydrique (HCl 37 %) : Extraction HCl 1:80 p/v (MS) : pour déterminer la concentration en phosphore, en potassium, en magnésium et en calcium,
- Dosage de l'azote organique par la méthode de Kjeldhal (N_{kj} %),
- Détermination de la teneur en matière sèche après passage dans une étuve à 105°C
- La perte au feu pour exprimer la teneur de matière organique (MO%)
- Le taux de carbone organique (Corg %) est obtenu en divisant la valeur de perte au feu par deux.

4.4.4 Détermination du coefficient d'humification

Le coefficient d'humification ou isohumique (K1) est un des paramètres clef pour effectuer un bilan humique. Puisque l'étude de viabilité repose sur l'estimation de la dose de BRF à apporter pour compenser le déficit de matière organique dans le sol. La littérature est riche de valeur de K1 pour un certain nombre d'amendement organique et de résidus de cultures, à tel point qu'il est parfois dur de s'y retrouver. Concernant le bois raméal fragmenté, les références sont rares.

Données existantes

La seule valeur de K1 que l'on peut trouver dans la littérature est celle qui résulte de l'étude belge en région de Wallonie (Noël and Marche, 2006). Dans cette dernière, ils ont déterminé ce K1 grâce à un essai en champ longue durée lors de leur vaste étude sur cet amendement. Cette étude nous renseigne que le K1 du BRF est d'environ 50 %. Contrairement à d'autres amendements comme le fumier, nous ne pouvons pas croiser les valeurs pour en vérifier leur pertinence. Un essai en champ est relativement long et ne peut rentrer dans le cadre de ce travail puisque le temps imparti ne le permet pas. Il existe d'autres façons d'estimer le K1 comme par exemple le paramètre « ISMO ».

L'ISMO

L'indicateur « ISMO (Indicateur de Stabilité de la Matière Organique) » est déterminé par une analyse de fractionnement biochimique de la matière organique (Evaluation Van Soest). Cette méthode est normée (XP U44-162). Il semblerait que ce paramètre soit une bonne estimation du K1 (Levavasseur et al., 2018). La détermination de l'ISMO est rapide et abordable. Ce paramètre est utilisé pour caractériser les amendements organiques des agriculteurs afin de quantifier les flux de carbone, dans le cadre d'un nouveau modèle de bilan humique : le modèle « SIMEOS AGM » développé en France. L'ISMO permet donc de caractériser rapidement un matériau et de répondre au problème que pose la variabilité des matières organiques au sein même d'une même catégorie d'amendement organique. Il permet également d'obtenir des valeurs de K1 peu référencées.

Dans ce contexte, nous avons pensé envoyer nos échantillons à analyser. Néanmoins, après quelques échanges avec une collaboratrice d'INRA, nous avons obtenu l'indicateur ISMO de deux BRF (communication personnelle avec Sabine Houot, tableau 6) :

Tableau 6 : Indicateur ISMO de deux BRF, analysés par INRA Grignon.

	ISMO (% MO)
BRF56	44,76
BRF35	34,52

Ambiguïté du K1 exprimé par rapport au carbone et K1 exprimé par rapport à la matière organique

Il existe deux types de coefficient isohumique : Le K1(C) qui est exprimé par rapport au carbone organique ou le K1(MOH) exprimé par rapport à matière organique (Boiffin et al., 1986). Les travaux pionniers s'exprimaient toujours en K1(C), mais on a vu peu à peu arriver des K1(MOH). Aujourd'hui, la plupart des bilans humiques et des références s'expriment par rapport à la matière organique. Malheureusement, une ambiguïté persiste puisque la distinction entre les deux n'est pas toujours clairement indiquée. Il s'agit de vérifier dans les publications afin d'utiliser correctement ces K1. Cet aspect est important pour la suite de l'étude car de nombreuses valeurs de K1 vont être utilisées pour réaliser les bilans humiques des deux exploitations d'études.

Lors de la réalisation d'un bilan humique, il est conseillé de travailler avec les mêmes unités. Il est alors possible de convertir une valeur de K1(MOH) en K1(C). Voici la formule (Boiffin et al., 1986):

$$(1) K1(mo) = 0,7 * K1(c)$$

Nous pouvons voir que les valeurs d'ISMO à disposition sont exprimées en « % MO » et la valeur du K1 issu de l'essai en champ longue durée semble également s'exprimer dans en K1(MOH). Nous pouvons faire les conversions suivantes pour obtenir les K1(C) à titre indicatif : $50/0,7 = 71,43$; $44,76/0,7 = 63,94$ et $34,52/0,7 = 49,31$.

Les trois coefficients à disposition sont assez variables mais restent élevés dans l'ensemble. Malheureusement, nous n'avons pas d'information sur la provenance ni la composition des deux BRF analysés par l'INRA Grignon, ce qui peut poser quelques problèmes d'interprétation des valeurs. Comme mis en avant dans les premières parties, les BRF semblent conserver une grande proportion de leur masse initiale en humus plus ou moins stable dans le sol. Pour l'étude de viabilité et les bilans humiques, nous avons choisi de prendre la valeur de K1 « 0,5 » issu d'un essai en champ. Le paramètre ISMO est adapté pour le modèle « SIMEOS AMG » et il ne semble pas prudent d'utiliser ce dernier pour le modèle que nous avons choisi, à savoir « Hénin Dupuis ».

4.5 Evaluation du potentiel de production de BRF

4.5.1 Création de la charte du potentiel de production en bois raméal en fonction des types de surfaces boisées

Nous avons précédemment évoqué la variabilité de production de biomasse entre les différents types d'espaces boisés. En effet, l'entretien d'une haie uniquement constituée d'arbres de haut jet ne donnera pas le même poids de branches que l'entretien d'une haie de strate basse type taillis. Dans la partie bibliographique, nous avons évoqué le potentiel de production de biomasse de pointe des haies à 17 tMS/ha/an. Cette valeur est théorique et atteignable en condition non limitante (facteurs édaphique et climatique). Ce chiffre ne tient pas compte de ce qui est réellement valorisable en bois raméal. Prenons l'exemple de l'accroissement des troncs des arbres qui constitue la haie, cette biomasse n'est donc pas valorisable en bois raméal. La création d'une charte est donc intéressante pour quantifier la production de biomasse valorisable et avoir un ordre de grandeur de la ressource disponible. Il s'agit d'un outil simple d'utilisation, que l'on peut prendre sur le terrain. Il doit être à la fois adapté pour les agriculteurs et les conseillers agricoles. La création de cette charte rentre dans le projet « Terres Vivantes » qui a pour souhait de proposer des outils aux agriculteurs pour qu'ils puissent utiliser au mieux les innovations techniques mis à leur disposition. Cette charte doit être à la fois concise et suffisamment détaillée pour estimer au mieux le potentiel de production.

Détermination des grands types de surface boisée exploitable

La première étape consiste à savoir quels types d'espaces boisés peuvent être entretenus dans l'optique de créer une ressource en bois raméal. Dans la plupart des cas, ces espaces rentrent dans des catégories des surfaces de la promotion de la biodiversité dans le cadre des prestations écologiques requises (SPB, PER). Les catégories suivantes sont des espaces pouvant être source de bois raméal :

- **Haies, berges boisées et bosquets** : Ils constituent généralement la principale source de bois raméal dans la SAU. Nous pouvons donner les définitions suivantes (d'après OTerm, OFo et KIP/PIOH). En ce qui concerne les haies et les berges boisées, il s'agit d'une bande boisée touffue, large de quelques mètres, composée principalement d'arbustes, de buissons et d'arbres autochtones et adaptés aux conditions locales, d'au moins 10 mètres de long (Callet-Bois et al., 2018). Les bosquets sont des groupes de buissons de forme compacte avec ou sans arbre, d'une surface minimale de 30 m². Ces surfaces ne doivent pas être classées comme forêt par l'autorité cantonale forestière ou ne doit pas dépasser les limites suivantes :
 - Surface (avec la lisière) > 800 m²,
 - Largeur (avec la lisière) > 12 m,
 - Age du peuplement > 20 ans.

Les haies et les bosquets sont des surfaces de promotion de la biodiversité et sont sujets aux contributions (paiements directs) à condition de respecter certains points. On retrouve deux niveaux de qualité. Ces surfaces (qualité 1) doivent avoir une zone tampon, généralement sous forme de bandes herbeuses, de part et d'autre de la haie (sauf en limite de SAU ou d'un obstacle comme les routes et les cours d'eau) de 3 à 6 m de large. La durée d'utilisation minimum est de 8 ans. Pour obtenir le niveau de qualité 2, des règles supplémentaires doivent être respectées : la largeur minimum du cordon boisé est de 2 mètres, ce dernier doit être composé uniquement d'espèces indigènes avec en moyenne 5 espèces différentes tous les 10 m de long, la strate arbustive doit être constituée d'au moins 20 % de buissons épineux, on doit retrouver au moins 1 arbre caractéristique du paysage tous les 30 m de long d'une circonférence du tronc de 1,5 m minimum (à 1,7 m du collet).

Les bandes herbeuses sont également soumises à diverses réglementations que nous n'allons pas détailler ici. Il est possible de produire une ressource en bois raméal car les réglementations PER n'empêchent pas l'entretien de ces surfaces. En revanche il ne faut pas tailler plus d'un tiers de la surface par an. Il est conseillé d'entretenir ces haies pendant la période de repos végétatif ce qui s'accorde bien avec la création de BRF.

On peut ranger les haies et bosquets dans trois catégories selon leur origine :

- Haies structurales : elles suivent un élément paysagé, sur une zone généralement non cultivable, concernent la majorité des haies,
- Remaniement parcellaire : plantation forcée entre parcelle,
- Haies plantées de façon volontaire.

Les deux derniers types sont plus adaptés à la création de ressource en BRF car généralement plus jeune et encore sous forme de strate arbustive.

- **Bords de forêt** : Ils ne sont pas classés dans les surfaces de promotion de la biodiversité. Ils peuvent être source de bois raméal. C'est pourquoi nous allons les considérer comme des haies et ils seront soumis à la même classification. Pour des raisons pratiques et pour être cohérent avec la réflexion que nous avons eu dans les premières parties, nous avons défini que la largeur qui peut être exploitée est de 3 m de large depuis les premières branches de la lisière.

- **Pâturages boisés** : on retrouve ce type de surface principalement dans le Jura et au sud des Alpes. Nous avons rencontré ce type de surface lors de notre étude. Ces surfaces de promotion de la biodiversité peuvent aussi être classées en deux niveaux de qualité. On distingue différents taux de boisement que l'on peut classer en 4 catégories (communication personnelle avec Dr. Luc Scherer, conseiller agroenvironnementale, FRI) :
 - Catégorie 1000 : moins de 1% de boisement (très peu boisé, < 1 arbre/ha),
 - Catégorie 2000 : 1-20% de boisement (peu boisé),
 - Catégorie 3000 : 20-70% (boisé),
 - Catégorie 4000 : 70-100% (très boisé).
- **Arbre isolé** : on peut distinguer les arbres fruitiers haute-tige, arbres indigènes adaptés au site. Ils sont aussi source de bois raméal et classés selon deux niveaux de qualité pour les PER.

Détermination des grands types de haies et surfaces boisées

Nous pouvons distinguer au sein même de chaque catégorie détaillée ci-dessus, deux particularités qui permettent de classer ces espaces. A savoir les strates de végétation et le niveau d'entretien effectué.

- **Strates** : les différents étages de végétation influent directement le potentiel de production valorisable en bois raméal. On distingue couramment la strate buissonnante (de 0 à 2 m de haut), la strate basse ou arbustive (de 1 à 5 m), la strate moyenne (de 1,5 à 10 m) et la strate haute (arbre de haut jet supérieur à 7 m) (Simon et al., 2018). Par souci de simplification, nous allons simplement différencier la strate arbustive basse (de 0 à 5 m), la strate arbustive moyenne (de 5 à 10 mètres), et la strate arborée (> 7 m).
- **Niveau d'entretien** : cet aspect a également son importance concernant le potentiel de production valorisable en bois raméal. En effet, dans un premier temps, une haie entretenue régulièrement est plus facile à entretenir de nouveau. De plus, ses branches et rameaux sont plus accessibles. En plus de ce côté pratique, il y a un aspect physiologique. Les arbres et les arbustes taillés poussent généralement plus vite. Cette réaction est bien connue des arboriculteurs fruitiers qui veulent éviter cette dernière au risque de voir leur production de fruits diminuer. La taille favorise donc la production de biomasse sous forme de rameaux et de branches au détriment d'autres organes. Nous pouvons donc distinguer les zones boisées peu entretenues type « forme naturelle » et les zones boisées entretenues type « taillis ». Il existe plusieurs types de taillis comme par exemple le « taillis normal » qui est une forme cépée au niveau du sol et le « taillis perché » qui est une forme cépée en hauteur au même titre que les arbres têtards (Simon et al., 2018).

Production de biomasse

Maintenant que nous avons bien identifié toutes les zones qui pourraient être source de bois raméal ainsi que les grands types de surfaces boisées, il s'agit de déterminer le potentiel de production de biomasse valorisable. Pour cela, nous avons utilisé des références du domaine du bois énergie relativement bien développé en France. Même s'il ne s'agit pas de la même utilisation, les références dans ce domaine sont nombreuses contrairement au sujet du bois raméal fragmenté. De plus, cette filière utilise également les branches et les rameaux et une distinction avec le bois « plein » est faite, ce qui nous permet d'utiliser comme base ces travaux. Les chiffres que l'on rencontre en pratique illustrent bien la biomasse valorisable (branches récoltables) et s'accordent bien avec la pratique. En effet, ce sont généralement des agriculteurs qui produisent du bois énergie en entretenant leur haie. L'unité qui est souvent rencontré dans ce domaine est « MAP » (mètre cube apparent) puisque cette

filière travaille avec le bois déchiqueté (plaquette). Dans le cadre de notre étude, nous parlons de masse de matière sèche et de m³. D'une manière générale 1 tonne de bois représente entre 3 et 4 MAP (Valbiom and Wallonie, 2016).

- **Production de biomasse en fonction du type de haies :** Les haies coupées à 1 strate produisent plus de biomasse valorisable en bois raméal que les haies coupées à 2 strates qui elles même produisent plus que les haies de haut jet à deux ou trois strates qui elles même fournissent plus de branches que les haies de haut jet à une strate. Nous avons à notre disposition les valeurs suivantes (Simon et al., 2018) :
 - Haies de coupées à 1 strate : 20 MAP sec/km de haie/an,
 - Haies de coupées à 2 strates : 17,5 MAP sec/km de haie/an,
 - Haies de hauts jets à 2 ou 3 strates : 15 MAP sec/km de haie/an,
 - Haies de hauts jets à 1 strate : 10 MAP sec/km de haie/an.

Les MAP sec/km de haie/an peuvent être converties en tMS/ha de haie/an. Considérons la largeur moyenne de haie à 10 m et, 20 MAP sec/km/an font donc environ 6 tMS/ha/an valorisable en bois raméal. La valeur de largeur moyenne des haies semble élevée mais nous voulons être conservateur pour deux aspects. Premièrement, il est plus facile de couper moins de branches que ce qui est possible (l'inverse est impossible). Deuxièmement, une incertitude persiste dans les termes de « MAP sec ». En effet, il semblerait qu'en pratique le terme « MAP sec » signifie que le bois est sec mais contient encore une certaine teneur en eau (entre 15 et 35 %) ce qui a pour conséquence que la conversion « 3,5 MAP = 1 tMS » soit sous-estimée. De ce fait, nous évitons de surestimer le potentiel de biomasse valorisable en bois raméal.

En plus des 4 catégories de haies énoncées ci-dessus, nous pouvons encore en rajouter 3 qui sont souvent rencontrées sur les surfaces agricoles. Il s'agit des haies peu entretenues (pas ou peu d'intervention de taille). Il n'existe pas de valeur de production de biomasse valorisable pour ces types de haies. Néanmoins, nous savons néanmoins que ces dernières produisent moins de biomasse et leurs branches sont plus difficilement accessibles. De plus, avec une approche pratique, de terrain et en discutant avec des professionnels ayant l'habitude d'entretenir des haies, nous pouvons faire les hypothèses suivantes :

- Haies buissonnantes à 1 strate basse peu entretenue : environ 4,2 tMS/ha/an (= production de la haie coupée à une strate * 70%, soit environ un tiers de moins),
- Haies buissonnantes à 1 strate moyenne peu entretenue : environ 3,6 tMS/ha/an (= production de la haie coupée à une strate * 60 %),
- Haies buissonnantes à 2 strates peu entretenue : 3,9 tMS/ha/an (moyenne entre les deux types de haies précédents).

Nous pouvons voir que contrairement aux haies type taillis où aucune distinction n'est faite, les haies peu entretenues à une strate ont une production différente suivant l'étage de végétation considéré. De ce fait, la haie peu entretenue de strate basse a un meilleur potentiel de production de bois raméal que celle à la strate moyenne. Cela vient du fait que dans une haie peu entretenue les branches hautes (> 5 m) sont encore plus difficilement atteignables, ce qui n'est pas le cas dans les haies type taillis de strate moyenne qui sont généralement constituées de grande coupée au sol ou de têtard accessible.

- **Production de biomasse des arbres isolés :** On peut distinguer les arbres isolés peu ou pas entretenus et les arbres isolés entretenus (type têtard ou coupée). Un arbre têtard produit environ 1,5 MAP tous les 15 ans (Valbiom and Wallonie, 2016). Nous pouvons donc dire qu'un arbre isolé entretenu produit environ 28,6 kgMS valorisable en bois raméal par an. Le

problème d'accessibilité des branches se pose encore plus sur les arbres isolés peu entretenus. En effet, il s'agit souvent d'arbre de haut jet (> 7 m). Ainsi, nous estimons le potentiel de production à 14,3 kgMS par arbre et par an (=production arbre têtard*50%).

- **Production de biomasse des pâturages boisé** : Les arbres s'y trouvant sont souvent peu entretenus car il s'agit d'une zone très extensive. Nous pouvons donc évaluer le potentiel de production de bois raméal en utilisant la valeur des arbres isolés peu entretenus en la multipliant par le taux de boisement :
 - Catégorie 2000 : 1-20% de boisement (peu boisé) : 0,14 tMS/ha/an,
 - Catégorie 3000 : 20-70% (boisé) : 0,64 tMS/ha/an,
 - Catégorie 4000 : 70-100% (très boisé) : 1,22 tMS/ha/an.

La catégorie 1000 n'est pas prise en compte car le potentiel de production est quasi-inexistant sur cette surface.

- **Production de biomasse des taillis à courte rotation** : On peut distinguer le taillis à courte rotation (TCR) qui a un cycle de récolte de 7 à 10 ans et le taillis à très courte rotation (TTCR) qui a un cycle de récolte de 2 à 3 ans. Ces deux modes de culture sont les plus efficaces en termes de production de biomasse sous forme de branches et de rameaux. En effet, le TTCR peut produire jusqu'à 36 tMS/ha tous les 3 ans (Ori and Béral, 2011), ce qui fait 12 tMS/ha/an. Le TCR peut produire jusqu'à 180 tMS/ha en 10 ans, ce qui correspond à 18tMS/ha/an. Nous pouvons voir que la production de ces surfaces atteint la production de biomasse de pointes précédemment évoquées. Ces surfaces sont généralement fertilisées, contrairement aux autres espaces précédemment énoncées. Il semblerait que le TTCR soit mieux adapté à la production de BRF car les branches produites ont une section inférieure à 7 cm de diamètres. Ces modes de production de branches sont peu présentes dans l'agriculture jurassienne. Il est possible d'installer ce genre de surface au sein de son exploitation. Néanmoins, cela demande un investissement conséquent (machines de récolte/plantation des arbres) et ces surfaces ne peuvent pas rentrer dans la catégorie des SPB.

Autres paramètres qui influencent la production de biomasse

En plus des strates et du niveau d'entretien, il existe d'autres aspects pouvant faire varier le potentiel de production de bois raméal :

- **Composition spécifique et vigueur des essences** : En fonction de la vigueur des arbres et arbustes qui constituent la haie, le potentiel de production de bois raméal peut sensiblement changer. En effet, prenons comme exemple le peuplier ; ce dernier produit plus de biomasse qu'un frêne qui lui-même en produit plus qu'un chêne (Ori and Béral, 2011). C'est ainsi que nous avons voulu rajouter des coefficients correcteurs à notre charte en fonction de la composition des surfaces boisées :
 - Haie majoritairement constituée (>50%) d'essences à développements très forts : facteur de correction : 1,2,
 - Haie majoritairement constituée (>50%) d'essences à développements forts : facteur de correction : 1,1,
 - Haie majoritairement constituée (>50%) d'essences à développements moyens : facteur de correction : 1,
 - Haie majoritairement constituée (>50%) d'essences à développements faibles : facteur de correction : 0,8.

- **Densité de végétation** : Ce critère reste subjectif et compliqué à évaluer. De cette manière et par soucis de simplicité, nous ne proposons pas de facteur correction.

Création de la charte

Pour compiler et synthétiser l'ensemble des éléments que nous venons de voir, nous avons créé une charte. Cette dernière permet d'évaluer le potentiel de production des espaces boisés sur le territoire agricole. Il existe deux versions de la charte :

- Une version avec des coefficients dont la valeur de référence est 6 tMS/ha/an (coefficient = 1) plutôt destiné à l'utilisation du conseiller agricole avec le tableur informatique attendant (cf. partie résultat),
- Une autre version avec des valeurs directement exprimées en tMS/ha/an et une représentation graphique des différents types de surface boisée plutôt réservée aux exploitants. Elle est au format A3 recto-verso plastifié (Annexe 7) et elle représente un outil de vulgarisation pratique et simple d'utilisation pour estimer la ressource disponible en bois raméal de son exploitation.

4.5.2 Quantification du potentiel de production

Pour évaluer le potentiel de production en bois raméal de nos deux exploitations, nous avons utilisé la méthodologie suivante :

Recensement des haies

La première étape a été de recenser les haies et les différentes surfaces boisées des exploitations de l'étude. Dans un premier temps, ce recensement s'est effectué sur un logiciel de cartographie « ArcGIS » :

- **Recensement informatique (orthophotos)** : La totalité des exploitations qui participent au projet « Terres Vivantes » sont géoréférencées. L'ensemble de la SAU est inventoriée. Cette étape nous a permis de localiser, d'apprécier qualitativement et quantitativement les espaces boisés des deux agriculteurs. M. Vuillaume possède exclusivement des haies/bosquets. M. Studer possède des haies/bosquets, des pâturages boisés, des forêts et des arbres isolés. Les sujets isolés n'ont pas été recensés. Nous avons codifié chaque espace boisé des exploitants dans l'optique d'aller faire une observation de terrain. La codification des espaces fonctionne de la manière suivante : Première lettre du prénom de l'exploitant (T pour « Thomas » et J pour « Joan »), suivi de la première lettre pour le type d'espace boisé (H pour « haie/bosquet », F pour « forêt », P pour « pâturage boisé ») et terminé par le numéro de l'espace boisé avec parfois un numéro de sous ensemble quand pour la même haie répertoriée est séparée dans l'espace ou possède plusieurs types (catégories de la charte) distincts. Par exemple, une haie se trouvant sur la SAU de M. Vuillaume portant le numéro 3, sous ensemble 2, se note de la manière suivante : TH3.2. Les orthophotos ne permettent pas de distinguer les grands types de haies. Nous sommes donc allés sur le terrain pour compléter le recensement informatique.
- **Sur le terrain** : Nous avons systématiquement pris les informations suivantes pour chaque espace boisé :
 - Type de haies/bosquet ou autres surfaces boisées (catégorie de la charte),
 - Principales essences composant la haie,
 - Densité de végétation (faible, moyenne, forte, à titre d'information uniquement),
 - Autres remarques comme l'accessibilité, la pente, etc...,
 - Une photographie ce qui permet de créer une base de données pour associer des cas concrets avec les catégories de la charte.

Les arbres isolés n'ont pas été recensés sur le terrain. Une estimation conservatrice sera faite en faisant l'hypothèse qu'il s'agit uniquement d'arbres peu entretenus.

Utilisation de la charte et traduction des surfaces de haie en production de biomasse annuelle

Toutes ces informations ont été ensuite rentrées dans le tableur associé à la charte pour procéder aux calculs et estimer le potentiel de production de bois raméal. Pour obtenir ce dernier, il suffit de multiplier la surface effective de l'espace boisé par le coefficient lui correspondant, que l'on multiplie par la valeur de référence (60 kgMS/are/an) et par le coefficients correcteur (de vigueur). Nous pouvons par la suite convertir la quantité de matière sèche en volume de BRF en utilisant la valeur moyenne de masse volumique obtenue grâce à nos analyses, à savoir 208 kgMS/m³.

Surface effective de production de biomasse :

Certains types d'espaces boisés sont composés d'une proportion de surface non productive :

- **Haies et bosquet** : rappelons que ces surfaces sont composées de bandes herbeuses de part et d'autre du cordon boisé, avec les exceptions de limite de SAU, de bord de route, de rivière ainsi que d'autres obstacles. Pour retirer ces surfaces non productives, nous avons calculé le périmètre concerné par les bandes herbeuses que l'on a multiplié par 3 m, ce qui nous a donné la « surface non productive » que l'on a retirée aux haies et bosquets concernés.
- **Forêt** : la surface effective (surface réellement exploitable) des forêts, correspond au périmètre de la surface concernée attenante à la SAU de l'exploitant multipliée par un cordon exploitable de 3 m.

4.6 Bilan humique

4.6.1 Choix du modèle

Plusieurs modèles de bilan de carbone organique des sols existent. Nous retrouvons parmi eux le modèle « Hénin Dupuis » que nous avons choisi d'utiliser pour cette étude. Ce dernier est un des modèles les plus simples d'utilisation car il demande peu de paramètres. Le temps imparti de notre étude étant relativement court, ce modèle convient à nos attentes. De plus, les résultats simulés de ce modèle semblent correspondre aux évolutions mesurées au champ lors d'un essai français (QualiAgro, 2013).

Modèle « Hénin Dupuis »

- **Approche du modèle** : ce modèle prend en compte un seul compartiment de matière organique dans le sol, contrairement à d'autres modèles comme celui de « Roth C » qui s'intéresse à plusieurs compartiments dynamiques de la matière organique des sols (QualiAgro, 2013). Nous avons mis en évidence cette hétérogénéité de la matière organique des sols lors de la partie monographique. Néanmoins, le modèle « Hénin Dupuis », malgré cette simplification, semble être un bon outil de modélisation de la dynamique de la matière organique car, comme énoncé précédemment, il s'accorde bien avec les observations faites en champs. Ce modèle calcule l'équilibre entre les entrées de matière organique ($m_i \cdot K_{1i}$) et les sorties ($Stock\ Corg \cdot k_2$).
- **Formules** : la première étape consiste à calculer le stock d'humus du sol que l'on peut par la suite convertir en Corg grâce la constante 1,724 ($Corg \cdot 1,724 = MO$) (Les Mots de l'agronomie, 2017) :

$$(2) \text{ Stock act C (tCorg/ha)} = ((\text{Profondeur} \cdot 10'000) - (\text{Profondeur} \cdot 10'000 \cdot \%v \text{ cailloux})) \cdot Da \cdot (\%Mo / 1,724)$$

La profondeur est exprimée en mètre, la densité apparente du sol (Da) en g/cm³, les cailloux

en pourcentage volumique et la matière organique en pourcentage pondéral de la masse de la terre fine.

La seconde étape consiste à d'estimer le coefficient de minéralisation du sol (K2). Plusieurs formules existent. Nous avons choisi la suivante car nous sommes en mesure de fournir les paramètres demandés dans le cadre de cette étude (Girard et al., 2005) :

$$(3) K2 = 0.03 \cdot [1 + 0.2 \cdot (T-10)] \cdot [1/(1 + 0.005 \cdot A)] \cdot [1/(1 + 0.0015 \cdot CaCO_3)]$$

T représente la température moyenne annuelle de la zone d'étude (en °C), A correspond à la teneur en argile du sol (en g/kg) et CaCO₃ illustre la teneur en carbonate de calcium du sol (en g/kg). Il semblerait que cette formule surestime légèrement le coefficient de minéralisation. Le pH du sol, la part des cultures sarclées, des prairies temporaires et le travail du sol influencent également le K2 (Neyroud, 1997). Le K2 peut être divisé par deux si la parcelle est conduite en semis direct depuis plus de 4 ans et ce même K2 peut être multiplié par 1,25 si la parcelle est irriguée.

Les entrées d'humus sont matérialisées par la formule suivante :

$$(4) \text{ Entrées d'humus (tMOH ou Corg/ha)} = \sum (m_i \cdot K_{1i})$$

« mi » représente les quantités de matières sèches apportés au sol, s'il s'agit du K1(MOH) ou les quantités de carbone organique s'il s'agit du K1(C). Les apports de matière organique au sol peuvent être des amendements organiques, des résidus de culture, de couvert intercalaire ou d'engrais vert. Avant de savoir ce que représente « K1i » il s'agit de bien comprendre ce que signifie le K1. Le coefficient K1 est le coefficient d'humification ou isohumique. Ce dernier est l'expression de la quantité d'humus formée (ou la part du carbone humifiée si on parle du K1(C)) en fonction de la quantité de matière sèche du produit (ou de la quantité de Corg) apportée au sol (LABOUBEE, 2007). Ainsi « K1i » représente l'ensemble des K1 associés aux entrées de matières organiques. S'il s'agit de K1(MOH), le résultat est exprimé en MOH (humus). Il est alors possible de convertir en Corg avec la constante 1,724. Nous pouvons voir que le K1(MOH) s'exprime sur la quantité de matière sèche et non sur la quantité en matière organique des intrants (Boiffin et al., 1986 ; LABOUBEE, 2007), ce qui peut paraître illogique par rapport au K1(C) que l'on applique à la quantité de carbone organique des intrants. Ces valeurs de K1(MOH) ont été estimées ainsi sur la base d'essais en champs.

En connaissant tous les éléments précédents, il est alors possible de calculer le gain ou la perte de Corg d'une parcelle. Il s'agit de l'équation différentielle décrivant le stock de carbone (Girard et al., 2005) :

$$(5) \text{ Gain ou perte de Corg (tCorg/ha)} = \sum (m_i \cdot K_{1i}) - k_2 \cdot \text{stock C}$$

Il s'agit de la représentation à un moment donné de l'évolution du stock de carbone d'une parcelle. Autrement dit, c'est le pas de temps annuel du stock de carbone. Dans notre étude, nous avons exclusivement utilisé des K1(MOH). Nous devons donc faire l'opération suivante : $\sum (m_i \cdot K_{1i}) / 1,724$.

La formule pour décrire la quantité de Corg en régime stationnaire nous intéresse particulièrement. Nous voulons savoir si la teneur en carbone organique du sol à la situation d'équilibre, pour une rotation et des pratiques agricoles données, est en-dessous ou au-dessus de la teneur minimum requise (MO>17% de la masse de l'argile, environ 10% de Corg) ou de

la teneur optimal (MO>24% de la masse en argile, environ 14 % de Corg). La formule du stock de carbone à l'équilibre est la suivante :

$$(6) \text{ Stock C eq.} = \sum (m_i * K_{1i}) / k_2$$

Le stock optimal (soit Corg = 10 % de la masse de l'argile ou Corg = 14 % de la masse en argile) de Corg est estimé de la manière suivante :

$$(7) \text{ Stock opt.} = ((\text{Profondeur} * 10'000) - (\text{Profondeur} * 10'000 * \%v \text{ cailloux})) * Da * (A\% * 17\% \text{ ou } 24\% / 1,724)$$

Il est alors possible de comparer le stock optimal de Corg et le stock à l'équilibre. Ce qui nous intéresse avant tout, c'est de traduire les déficits des parcelles (si déficits il y a) en quantité de BRF à apporter pour arriver au stock optimal en situation d'équilibre. La formule suivante illustre cela :

$$(8) \text{ Déficit MOH} = [((\text{Stock C opt.} * K_2) - \sum ((m_i * K_{1i})) * 1,724$$

$$(9) \text{ Apport de BRF pour combler le déficit} = \text{Déficit MOH} / K_1(\text{MOH}) \text{ BRF}$$

Nous avons vu que le K1(MOH) est de 0,5 %. Nous pouvons donc écrire : apport de BRF pour combler le déficit = Déficit MOH/0,5.

La quantité de carbone que pourrait séquestrer un tel apport annuel est tout simplement la différence entre le stock opt. et le stock C eq. sans l'apport de BRF :

$$(10) \text{ Séquestration de Corg dû à l'apport annuel de BRF pour combler le déficit} = \text{Stock C opt.} - \text{Stock C eq.}$$

Paramètre nécessaire

Pour mener à bien les bilans humiques, nous avons besoin d'un certain nombre de paramètres :

- **Matérialisation du stock de carbone** : Pour calculer le stock de carbone d'une parcelle, nous avons besoin de déterminer une **profondeur**. Il s'agit généralement de l'horizon « Ap » (horizon de labour) qui se situe entre 20 et 30 cm. Le **volume des cailloux** nous est utile pour prendre en compte uniquement la terre fine. La **densité apparente « Da »** du sol est également nécessaire pour traduire le volume de terre fine en masse de terre fine. Pour finir, nous avons besoin de la **teneur en matière organique** du sol, pour établir le stock de carbone.
- **Détermination du coefficient de minéralisations** : La formule du K2 retenue exige de connaître la **température moyenne annuelle** de la zone d'étude, la **teneur en argile** et la **teneur en CaCO₃** du sol. Le **type de travail de sol** (semis direct ou non) et l'**irrigation** (oui ou non) sont également des informations utiles pour corriger le coefficient K2. D'autres formules exigent le **pH** du sol, la **part des cultures sarclées** et **prairies temporaires** dans la rotation.
- **Détermination des entrées d'humus** : Pour connaître les entrées d'humus, il convient de déterminer une rotation type de l'exploitant. Il est important de mettre en évidence les amendements organiques apportés, les cultures ainsi que la gestion des résidus sur l'exploitation, les couverts et les engrais verts semés. Il faut ensuite attribuer un K1 pour chaque intrant organique.

4.6.2 Caractérisation des sols

Toutes les informations concernant le sol qui nous sont nécessaires pour mener à bien notre bilan humique ne sont pas toujours faciles à obtenir, surtout sur l'ensemble des parcelles. Néanmoins, dans le contexte de cette étude, nous avons pu compter sur un nombre d'informations déjà existantes.

Donnée existante

- Analyse de sols PER

Les exploitants doivent faire des analyses de sols tous les dix ans de l'entier de leurs parcelles pour prétendre au contributions (paiements directs) (OFAG, 2018). Dans ces analyses « composite PER » se trouvent certains éléments qui nous intéressent comme la teneur en argile, en MO, en CaCO_3 du sol. Malheureusement, on ne peut pas toujours se fier à ces analyses pour deux aspects. Premièrement, ce sont les agriculteurs eux-mêmes qui échantillonnent leurs parcelles. Il n'existe pas de procédure normée, mais de simples recommandations. Ainsi, nous ne savons pas comment ont procédé ces derniers pour réaliser l'échantillonnage. Cela peut donc emmener certains biais. Deuxièmement, les laboratoires utilisent plusieurs protocoles pour procéder aux analyses. Malheureusement, certains protocoles se basent sur une appréciation visuelle et tactile des paramètres d'intérêts (MO et argile). Ces méthodes ne sont pas précises et ici encore, des biais apparaissent. Dans notre situation, la plupart des analyses de sols ne pouvaient être utilisées en raison de valeurs que nous pouvions remettre en doute avec de simples observations et connaissances des zones d'études.

- Analyse de sol « Terres Vivantes »

Dans le cadre du projet « Terres Vivantes » des analyses de sol sont effectuées durant l'année 2019 sur les deux parcelles du monitoring pour chaque exploitation. En effet, ces deux parcelles vont avoir un suivi scientifique strict pendant 6 années. Nous pouvons utiliser ces analyses car le prélèvement a été effectué par un conseiller de façon normée et les analyses ont été effectuées par un laboratoire « Sol Conseil » qui n'utilise pas de procédure d'appréciation visuelle (cf. partie suivante « prélèvement composite »). Sur ces deux parcelles du monitoring sont également effectuées des densités apparentes que nous avons également utilisé pour notre bilan humique (cf. partie densité apparente). Toutes les parcelles des exploitations participant à ce projet, devront être soumises à une analyse composite de sol durant les 6 prochaines années. Pour notre étude nous aurions pu analyser l'ensemble des parcelles pour la réalisation de notre bilan humique. Néanmoins, nous ne l'avons pas fait car les délais ne le permettaient pas et un tel niveau de précision n'aurait pas été justifié faces aux différentes incertitudes du modèle utilisé ainsi et toutes ses composantes comme les K1. De plus, ces analyses sont aux frais des exploitants. Ces derniers préfèrent réaliser ces analyses plus tardivement, notamment quand elles viennent d'être effectuées. Nous avons donc procédé à une caractérisation des sols pour pouvoir regrouper des parcelles similaires et ainsi limiter les analyses de sol supplémentaires.

- Dialogue avec l'exploitant

Avant de procéder aux observations de terrain pour la caractérisation, nous avons dialogué avec nos deux exploitants pour obtenir les informations des praticiens. Ces dernières sont précieuses car le regard attentif des praticiens qui exploitent ces terres depuis plusieurs années, voire des décennies offre une connaissance complète et pertinente des sols. Ces informations seront validées ou non avec les observations de terrain.

Observations de terrain

Ces observations nous permettent de classer les parcelles entre elles, de les regrouper et de procéder à des analyses nécessaires pour notre bilan humique.

- **Méthode**

Pour caractériser les parcelles d'étude nous avons réalisé pour chaque parcelle 5 trous à l'aide d'une tarière. Les carottes sont déposées dans une gouttière pour une appréciation visuelle globale (couleurs, texture, structure, etc...). La profondeur des trous se fait jusqu'à atteindre la roche mère ou entre 35 et 100 cm suivant ce qu'on cherche à observer.

- **Paramètres analysés**

Sur ces carottes de terre plusieurs paramètres sont analysés pour obtenir des informations nécessaires pour la réalisation du bilan humique :

- **La profondeur** : nous considérons la profondeur pour établir le stock de carbone à 30 cm. Néanmoins, parfois la roche mère est atteinte avant ce seuil. La profondeur moyenne d'une parcelle est donc la moyenne des 5 sondages effectués. La valeur maximum pour calculer la moyenne est de 30 cm, c'est à dire que si un ou plusieurs des sondages est plus profond que 30 cm, la valeur maximale retenue est de 30 cm. Par exemple le résultat de mon sondage est : trou 1 : 40 cm, trou 2 : 25 cm, trou 3 : 50 cm, trou 4 : 30 cm et trou 5 : 25 cm : la profondeur moyenne de la parcelle sera $(30+25+30+30+25)/5$ soit de 28 cm.
- **Le volume de cailloux** : ce dernier est estimé grâce à une charte d'abondance proposée par ORSTOM en 1969 (DELAUNOIS et al., 2008). Cette charte d'abondance possède les catégories suivantes : 1 %v de grossier (> 2mm), 2 %v, 3 %v, 5 %v, 7 %v, 10 %v, 15 %v, 20 %v, 25 %v, 30 %v, 40 %v, 50 %v. La moyenne des 5 échantillons est faite pour obtenir un résultat à la parcelle. Ce paramètre est analysé dans les 30 premiers centimètres. La précision de cette méthode suffit en vue des objectifs fixés.
- **La teneur en CaCO₃** : elle est estimée à l'aide d'un test de terrain à l'acide chlorhydrique (HCl) (DELAUNOIS et al., 2008). Ce test sépare plusieurs catégories en fonction de l'intensité de la réaction : Nulle : 0 % de CaCO₃, très faible : entre 0 et 2 %, faible : entre 2 et 10 %, moyen : entre 10 et 25 %, forte : entre 25 et 55 %, très forte : supérieure à 55 %. La valeur retenue est la moyenne de la classe qui définit le mieux l'échantillon. La moyenne des 5 échantillons est faite pour obtenir un résultat à la parcelle. Ce paramètre est analysé dans les 30 premiers centimètres. Encore une fois, la précision de cette mesure nous convient en vue des objectifs visés. Les valeurs issues de cette analyse de terrain ont été utilisées pour la réalisation du bilan humique. Nous pouvons confronter ces valeurs avec les analyses composites sur certaines parcelles en guise de vérification.

- **Regroupements de parcelles**

Une fois la caractérisation des sols effectuée, nous pouvons associer certaines parcelles similaires entre elles pour créer des regroupements, afin de limiter le nombre d'analyse de sol (densité apparente et analyse composite). Parmi ces regroupements, les analyses d'une seule parcelle suffisent pour la réalisation du bilan humique, puisque nous faisons l'hypothèse que les parcelles sont identiques sur les paramètres suivants : teneur en matière organique, teneur en argile et la densité apparente. La profondeur considérée, la teneur en cailloux et en CaCO₃ sont quant à elles estimés pour chaque parcelle comme vu précédemment.

Chez M. Studer, nous avons dû analyser 2 parcelles supplémentaires en plus des deux parcelles du monitoring. Les parcelles retenues pour les analyses complémentaires parmi le lot sont les plus

facile à échantillonner et/ou celles choisies par l'exploitant. Les 7 parcelles de terre assolées ont été regroupées en 4 groupes (figure 8) :

- J2 : seul (parcelle du **monitoring**, analyse composite et densité apparente),
- J1 (composite + Da), J3, J4, J6 : regroupé,
- J5 (composite et Da) : seul,
- J7 : Seul (parcelle du **monitoring**, analyse composite et densité apparente).

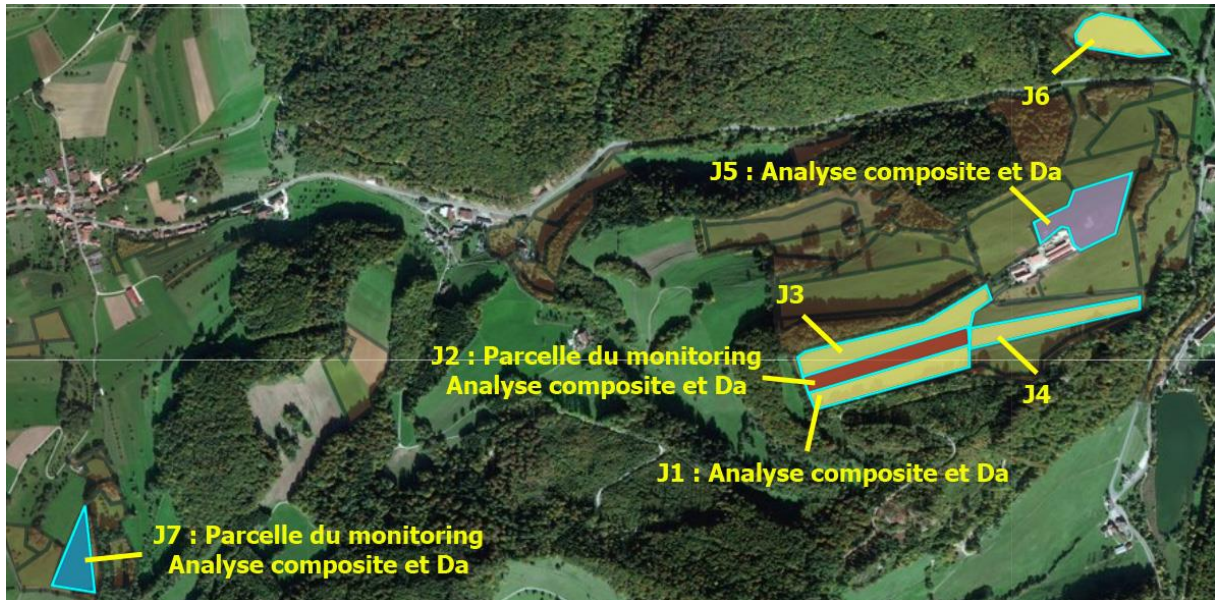


Figure 8 : Regroupements de parcelles effectués à l'issu de la caractérisation des sols et analyses de sol réalisées sur l'exploitation de Joan Studer.

Chez M. Vuillaume nous avons dû analyser 1 parcelle supplémentaire en plus des deux parcelles du monitoring. Les 8 parcelles de terre assolées ont été regroupées en 3 groupes (figure 9) :

- T1 -> seul (parcelle du **monitoring**, analyse composite et densité apparente),
- T2 (composite + Da), T3, T4, T5 et T6 : regroupé,
- T7 (parcelle du **monitoring**, analyse composite et densité apparente), T8 : regroupé.

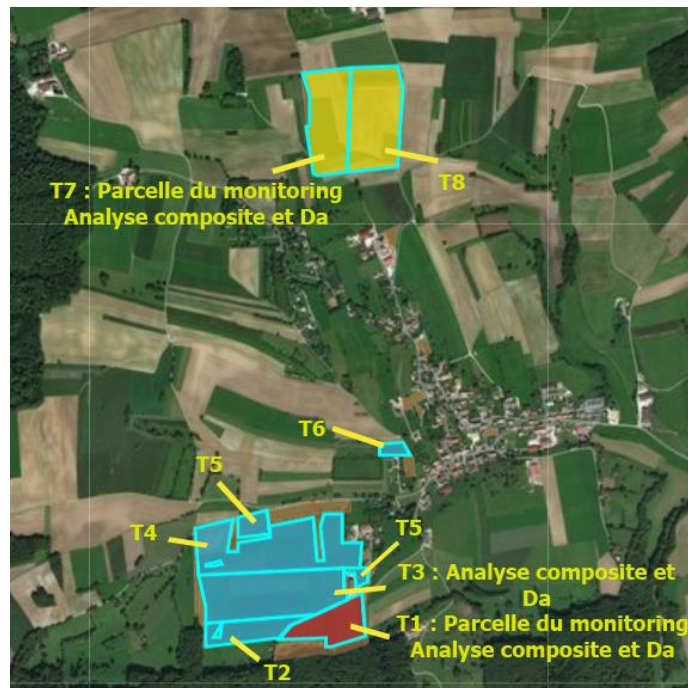


Figure 9 : Regroupements de parcelles effectués à l'issus de la caractérisation des sols et analyses de sol réalisées sur l'exploitation de Thomas Vuillaume.

Prélèvements et analyses de sol

Que ce soit pour le projet « Terres Vivantes » ou pour l'étude de faisabilité, nous avons utilisé les mêmes méthodes pour l'analyse de densité apparente et les analyses composites.

- **Prélèvement composite PER** : Ces analyses nous renseignent sur la texture du sol (argile, limon et sable), sur le pH, sur la teneur en CaO_3 et en MO ainsi que sur la teneur en élément chimique du sol (P, K, Mg). Les échantillons ont été envoyés au laboratoire « Sol Conseil » accrédité selon la norme « ilac-MRA » et « ISO/CEI 17025 » (SOL-CONSEIL, 2019). La méthode de prélèvement est très importante. Comme nous l'avons énoncé précédemment, il n'existe pas de procédure normée bien que cette analyse soit obligatoire pour toucher les paiements directs. Une méthode est proposée pour limiter la variabilité et assurer la représentativité de l'échantillon (Deluz, 2017). Elle consiste à échantillonner 20 carottes à l'aide d'une gouge, d'une profondeur de 2-20 cm sur toute la longueur du champ, soit sous forme de deux parallèles ou sous forme de deux diagonales. Nous avons réalisé deux diagonales pour les analyses complémentaires à celles déjà effectuées pour le projet « Terres Vivantes ».
- **Densité apparente de la terre fine** : Il existe plusieurs façons de prélever une motte pour obtenir sa Da. Nous avons utilisé un préleveur cylindrique. Les échantillons ont été prélevés aux mêmes endroits que les sondages pour la caractérisation du sol. Les 5 mottes obtenues ont été analysées par nos soins. Le sol gonfle ou se rétracte en fonction de son état d'humidité. Pour calculer un stock de carbone, nous avons choisi de réaliser ces densités aux conditions d'humidité du champ au moment de l'échantillonnage (analyse des mottes directement après le déballage). Pour déterminer le volume, nous avons utilisé la méthode de la poche plastique (Boivin et al., 1990). La mesure est répétée pour trouver deux valeurs proches de moins de $0,5 \text{ cm}^3$. Le volume du plastique est soustrait à raison de $0,13 \text{ cm}^3/\text{cm}$. Les échantillons sont ensuite placés dans une étuve à 105°C pendant 48 heures. Les échantillons secs sont pesés, puis la terre fine est séparée des grossiers à l'aide d'un tamis (maille $< 2 \text{ mm}$). Les grossiers sont correctement lavés puis mis au four à 105°C pendant 24 heures. Ces derniers sont ensuite pesés et leur densité réelle est prise sur le même principe que la poche plastique mais avec un

sachet poreux et perméable. La formule de la densité apparente est la suivante :

$$(11) Da (g/cm^3) = (Masse sèche - Masse grossiers) / (Volume apparent - Volume grossiers)$$

Les parcelles du monitoring ont également été échantillonné à raison de 5 prises. Néanmoins, nous avons à notre disposition seulement 3 de ces 5 échantillons. Malheureusement, le laboratoire n'a pas pu nous fournir ces résultats à temps. Pour l'ensemble des parcelles du monitoring, la densité apparente a donc été estimée visuellement.

4.6.3 Détermination d'une rotation type pour chacun des exploitations étudiées

Pour pouvoir déterminer les entrées moyennes annuelles d'humus, nous devons d'abord déterminer la rotation type ainsi que les pratiques opérées pour chacun des deux exploitants.

Méthodes

Pour établir cette rotation type nous nous sommes servis des informations récoltées dans le questionnaire d'audit initial dont les agriculteurs participants au projet « Terres Vivantes » doivent remplir. Dans ce dernier, on retrouve les rotations effectuées sur les deux parcelles du monitoring depuis dix ans. Chaque pratique est détaillée en renseignant les amendements organiques apportés, la gestion des résidus, la présence de couvert ou non, les rendements des cultures, le travail du sol, etc... Le questionnaire contient également d'autres informations utiles comme la quantité d'engrais de ferme mis sur les terres assolées, la durée moyenne des prairies temporaires, les cultures principales cultivées, les cultures suivies ou précédées d'un couvert, etc... Nous avons également dialogué avec l'agriculteur pour affiner toutes ces informations et pour savoir dans quelle direction il voudrait aller dans le futur. Pour finir nous avons tenu compte de l'assolement de cette année 2019. Grâce à cet ensemble de données, nous avons pu déterminer une rotation type pour chacune des deux exploitations d'études en identifiant correctement les intrants organiques et leur K1. Nous avons retracé 10 ans de rotation. Chaque année représente une quantité d'humus apportée au sol. Nous avons fait la moyenne de ces 10 années que l'on a traduit en carbone organique avant d'appliquer cette dernière à chaque parcelle pour réaliser le bilan humique.

Exploitation de Thomas Vuillaume

Rotation type sur 10 ans :

3 ans de PT – Tournesol – Blés automne – Colza automne / Couvert intercalaire court, gélif, non dérobé – Blés automne – Colza automne / Couvert intercalaire court, gélif, non dérobé – Blés automne / Couvert intercalaire long, espèce hivernante et non dérobée – Betterave.

Seulement deux amendements (fumier composté + BRF) sur 10 ans.

Informations nécessaires :

- PT : travail du sol avant implantation en automne, destruction au 3^{ème} printemps
- Tournesol : labour + travail du sol avant semis, résidus restitués broyés et enfouis, suivi de l'installation du blé d'automne.
- Blés : travail du sol avant semis, exportation des pailles, suivi du semis du colza d'automne,
- Colza : 24 m3/ha de fumier composté + 12 m3 de BRF (1 fois sur deux), résidus laissés sur place, broyés et enfouis, travail du sol avant semis, suivi du couvert
- Betterave : labour au printemps, résidus laissés sur place, broyés et enfouis, 24 m3/ha de fumier composté + 12 m3 de BRF, suivi de l'implantation d'une nouvelle PT

Intrants organiques et K1(MOH) :

Prairie temporaire :

- Rendement : prairie intensive = $159 \text{ dt/ha} - 0,058 * \text{altitude}$ (Agridea, 2018), condition de Grandfontaine = $159 - (0,058 * 500) = 130 \text{ dt/ha}$. Chez M. Vuillaume : exploitation intensive et rendement effectif d'environ 100 dt/ha/an
- Humus formé (kg/ha) : résidus : 5 % du rendements (Collaud, 2014), soit $100 * 0,05 = 5 \text{ dt/ha/an}$ de résidus (soit 500 kg/ha/an).
- K1 : 0,12 (Collaud, 2014).

Tournesol :

- Rendement : norme : 30 dt/ha de grain (Agridea, 2018), chez M. Vuillaume : 25 dt/ha (soit rendement moyen),
- Résidus : 6 t/ha (Agridea, 2018), pas d'autres données ! Estimation : environ égale au maïs : 2/3 part aériennes, 1/3 racines (Rémy and Marin-Lafèche, 1976), soit 4 tMS de parties aériennes et 2 tMS de racines,
- K1 : pas de données ! Estimation : environ égale au maïs -> racines 0.15, parties aériennes : 0.10 (Rémy and Marin-Lafèche, 1976).

Blés d'automne :

- Rendement : norme blés pains et biscuits = 60 dt/ha de grain (Agridea, 2018), chez M. Vuillaume -> 65 dt/ha (très bon rendement),
- Résidus racinaires, très bon rendement : Blés : 3 tMS/ha (Rémy and Marin-Lafèche, 1976; Soltner, 1996),
- K1 : résidus racines blés et orge = 0,15 (Rémy and Marin-Lafèche, 1976; Soltner, 1996).

Engrais vert/couvert court non dérobé :

- Résidus et k1 : racinaires : rendement bon : 1 tMS/ha , K1 : 0,15, partie aérienne : 4 tMS/ha , K1 : 0,05 (Rémy and Marin-Lafèche, 1976).

Colza d'automne grain :

- Rendement : norme : 35 dt/ha de grain (Agridea, 2018), chez M. Vuillaume : 30 dt/ha (Rendement moyen),
- Résidus : rendement moyen : racines : 2 tMS/ha , parties aériennes : 5 tMS/ha (Rémy and Marin-Lafèche, 1976),
- K1 : racines : 0.15, parties aériennes 0,15 (Rémy and Marin-Lafèche, 1976),
- Fumier composté : 25 % de MF en moins que le produit de départ, + 5 kg/t de MS que le matériel de base, matériel de base = Fumier au tas (190 kgMS/t) (Agridea, 2018),
- Fumier bien décomposé : K1 = 0,5 (Rémy and Marin-Lafèche, 1976)
- Masse volumique du fumier (bovin viande) : $0,650 \text{ t/m}^3$ (Rousselet et al., 2005), donc $24 \text{ m}^3 * 0,650 = 15,6 \text{ tMF}$ (fumier frais)/ha, $15,6 * 0,75 = 11,7 \text{ tMF/ha}$ (fumier composté), $11,7 * 195 = 2'281,5 \text{ kg MS/ha}$ soit $2,2815 \text{ tMS/ha}$ de fumier composté.
- BRF : 6 m^3 , masse volumique : $0,235 \text{ tMS/m}^3$ (masse volumique obtenue avec les échantillons de terrain) : soit $1,41 \text{ tMS/ha}$,
- K1 BRF : 0,5.

Engrais vert/couvert long, espèce hivernante et non dérobée :

- Résidus : rendement bon : Racines : $1,5 \text{ tMS/ha}$, parties aériennes : 5 tMS/ha , K1 : racine : 0.15, parties aériennes : 0.08 (Rémy and Marin-Lafèche, 1976).

- **Betterave sucrière :**
- Rendement : norme : 90 tonnes de racines (Agridea, 2018), chez M. Vuillaume : 70 t/ha (rendement moyen),
- Résidus : Rendement moyen : racines 0,8 tMS/ha, parties aériennes : 4 tMS/ha (Rémy and Marin-Lafèche, 1976),
- K1 : racines : 0.15, parties aériennes : 0.08 (Rémy and Marin-Lafèche, 1976).
- Fumier composté : 25 % de MF en moins que le produit de départ, + 5 kg/t de MS que le matériel de base, Matériel de base = Fumier au tas (190 kgMS/t) (Agridea, 2018),
- Fumier bien décomposé : K1 = 0,5 (Rémy and Marin-Lafèche, 1976),
- Masse volumique du fumier (bovin viande) : 0,650 t/m³ (Rousselet et al., 2005), donc 24 m³*0,650 = 15,6 tMF (fumier frais)/ha, 15,6 * 0,75 = 11,7 tMF/ha (fumier composté), 11,7*195 = 2'281,5 kg MS/ha soit 2,2815 tMS/ha de fumier composté.
- BRV : 6 m³, masse volumique : 0,235 tMS/m³ (masse volumique obtenue avec les échantillons de terrain) : soit 1,41 tMS/ha, K1 : 0,5.

Exploitation de Joan Studer

Rotation type sur 10 ans : 4 ans de PT – Maïs d'ensilage – Méteil – Céréale (épeautre) – Méteil – Méteil – PT.

Information nécessaire :

- PT : 100 dt/ha/an, 100 m³/ha de lisier/an, travail du sol avant de la semer, labour en août
- Maïs grain : 160 dtMS/ha ensilage (plante entière), 20 m³/ha de fumier composté ; 2 interventions sur le sol, labour + travail du sol à 15 cm au mois de mai, résidus laissés sur place
- Méteil : rendement entre 40 et 50 dt/ha, composé d'orge, pois, un peu triticales et d'avoine pas d'amendement, travail du sol avant semis, exportation des pailles
- Céréales : environs 40 dt/ha, 30 m³/ha de lisier, pailles exportées, travail du sol avant semis, pas de déchaumage

Intrants organiques et K1(MOH) :

Prairie temporaire :

- Rendement : prairie intensive = 159 dt/ha – 0,058*altitude (Agridea, 2018), condition de Lucelle = 159-(0,058*700) = 118,4 dt/ha, Chez M. Studer : 100 dt/ha/an,
- Résidus : 5 % du rendements (Collaud, 2014), soit 100*0,05 = 5 dt/ha/an de résidus (soit 500 kg/ha/an),
- K1 des résidus : 0,12 (Collaud, 2014),
- 100 m³/ha de lisier par an : le lisier de bovin contient 90 kgMS/m³ de MS (Agridea, 2018) soit un apport de 9 tMS/ha/an,
- K1 : lisier de bovin : 0,15 (Maillard, 2014).

Maïs :

- Rendement : normes : maïs d'ensilage (plante entière) : 185 dtMS/ha (Agridea, 2018), chez M. Studer 160 dt/ha (maïs d'ensilage),
- Résidus : maïs grain : rendement moyen : racine : 2 tMS/ha (Soltner, 1996),
- K1 : racines = 0.15 (Boiffin et al., 1986; Soltner, 1996),
- Compost de Fumier (stocké > 6 mois et brassé plusieurs fois) : matériel de base : fumier bovin au tas : 190 kg/t de matière sèche (le compostage réduit de 9kg/t de MS) (Agridea, 2018), soit 181 kgMS/t,

- K1 fumier composté : Fumier bien décomposé : K1 = 0,5 (Rémy and Marin-Lafèche, 1976),
- Masse volumique du fumier composté : 0,720 t/m³ (Rousselet et al., 2005), donc 20 m³ = 14,4 t/ha = 2,06 tMS.

Méteil :

- Rendement : entre 40 et 50 dt/ha, pas de valeur de rendement de référence pour le méteil,
- Orge, pois, un peu triticales et d'avoine : rendement : Orge et Triticale d'automne = 60 dt/ha grain, Orge et Triticale de printemps = 55 dt/ha de grain, Avoine = 55 dt/ha de grain, Pois protéagineux et Féverole = 40 dt/ha de grain (Agridea, 2018),
- Résidus : Résidus racinaires, bon rendement : Orge : 1,5 tMS/ha, Pois conserve : 2 tMS/ha (Rémy and Marin-Lafèche, 1976; Soltner, 1996), soit environ 1,74 tMS/ha.
- K1 : résidus de racines de pois conserve et blés et orge = 0,15 (Rémy and Marin-Lafèche, 1976; Soltner, 1996), pas de données de K1 et des résidus de la féveroles ou du pois protéagineux.

Céréale :

- Rendement : norme : épeautre = 45 dt/ha de grain (Agridea, 2018), rendement Joan : 40 dt/ha (épeautre),
- Résidus : résidus racinaires, bon rendement : Blés : 2,5 tMS/ha, Orge 1,5 tMS/ha, soit en moyenne : 2 tMS/ha (Rémy and Marin-Lafèche, 1976; Soltner, 1996), pas de référence pour l'épeautre,
- K1 : résidus racines blés et orge = 0,15 (Rémy and Marin-Lafèche, 1976; Soltner, 1996),
- 30 m³/ha de lisier : le lisier de bovin contient 90 kg/m³ de MS, soit un apport de 2,7 tMS/ha/an,
- Lisier de Bovin K1 : 0,15 ((Maillard, 2014).

4.7 Analyse agroéconomique

4.7.1 Calcul des coûts de production

Choix du matériel utilisé : deux modèles de production

Le coût de production du BRF varie en fonction du matériel utilisé. Nous avons donc voulu calculer les prix de revient pour deux modes de production. Pour le premier, nous nous sommes basés sur l'exploitation de Joan Studer qui est déjà équipée pour la création de BRF. Nous avons donc pris le matériel et les moyens humains que possède M. Studer. Ce dernier a un broyeur de moyenne capacité. Ce type de production est adapté pour amender des petites surfaces à l'image d'une exploitation de culture maraîchère ou des petites exploitations possédant peu de terre assolée. Un mode de production un peu plus intensif et de plus grande échelle nous intéresse tout particulièrement pour la création de BRF dans l'optique d'amender des plus grandes surfaces à l'image du système grandes cultures. Thomas Vuillaume qui possède la deuxième exploitation étudiée, n'est actuellement pas équipé pour la création de BRF (broyage et taille de branche). Pour le deuxième mode de production nous nous sommes servis du cas concret de l'exploitation de M. Vuillaume en faisant l'hypothèse que ce dernier investisse dans du matériel de broyage et de taille de grande capacité. Pour le choix du reste du matériel (tracteur, épandeur, etc..), nous avons tenu compte de ce que l'agriculteur à l'habitude d'utiliser pour d'autres pratiques agricoles.

Ainsi, il est donc possible de comparer les prix de revient des deux échelles de production du BRF ainsi que les coûts liés au transport et à l'épandage. La différence de l'investissement de base est aussi à prendre en considération.

- Machines utilisées sur l'exploitation de Thomas Vuillaume : tracteur 143-169 ch, tracteur 74-

87 ch, épareuse à bras, attelage 3 points, 800 kg, épandeur universelle 21 m³ et broyeur forestier.

- Machines utilisées sur l'exploitation de Joan Studer tracteur 41-49 ch, tracteur 74-87 ch, tronçonneuse (50 cm, moteur à essence, 4 kW, 5 ch), broyeur Greenmech Ltd EC 150 TMP, remorque basculement hydraulique (bh, 7 t), épareuse à bras attelage 3 points (800 kg), chargeur frontal moyen (49-66 kW, 66-90 ch), épandeur à fumier latéral 8 m³.

Coûts des machines et de la main d'œuvre :

La première chose à connaître quand on veut calculer des coûts opérationnels est le coût des machines et de la main d'œuvre que l'on prend comme base. En ce qui concerne les machines, nous nous sommes servis du document « Coûts-machines 2018 » d'Agroscope (Christian Gazzarin, 2018). Le coût opérationnel d'une heure de fonctionnement d'une machine est composé des coûts fixes (amortissement + intérêts + assurance et taxe + frais de bâtiment) et des coûts variables (carburant et autres consommables de type aditif + réparation et entretien). Le tout multiplié par un coefficient de frais d'administration/risque de 1,1. Pour le carburant, Agroscope fait l'hypothèse que l'essence vaut 1,56 CHF/litre et le diesel 1,64 CHF/litre. Nous avons choisi de travailler avec les prix moyens du carburant 2019 en Suisse : essence = 1,63 CHF/litre et diesel = 1,76 CHF/litre. Les coûts des machines que nous avons utilisé qui utilisent du carburant sont donc légèrement supérieures à ce que l'on peut trouver dans la brochure. L'ensemble des machines utilisées pour le calcul des coûts opérationnel est référencé dans le document « Coûts-machine 2018 » à l'exception du broyeur de M. Studer qui ne possède ni de référence, ni de machine équivalente dans la brochure. Nous avons donc fait un calcul grâce au tableur « TractoScope » qui est outil proposé par Agroscope pour réaliser des coûts opérationnels. Nous avons fait les hypothèses suivantes pour estimer le coût horaire : prix d'achat = 9'000 CHF, utilisation 50 heures par an, durée d'amortissement de 12 ans, durée d'utilisation technique de 3'000 heures, facteur de réparation de 2,5 (375 CHF/an), un coût d'assurance et taxe de 11 CHF/an : ce qui nous donne un coût horaire de l'utilisation de la machine de 24,70 CHF.

Nous avons utilisé un tarif horaire de la main d'œuvre de 28 CHF/MOh (Christian Gazzarin, 2018).

Calcul des coûts

Le calcul des coûts peut être divisé en plusieurs chantiers distincts. Pour commencer il y a la **taille des branches** qui est nécessaire pour obtenir la ressource en bois raméal, puis il y a le chantier de **broyage** pour obtenir du BRF. Ces deux étapes sont généralement réalisées à proximité de la haie taillée. Un **transport** est alors requis pour acheminer le BRF jusqu'au lieu d'**épandage** qui correspond au quatrième et dernier chantier. Le temps de broyage et de taille de branches est généralement fonction de la capacité du broyeur ou de l'outil de taille. Le temps de transport dépend directement de la distance entre les haies taillées et la vitesse de circulation du matériel de transport. Nous avons donc créé des zones avec un nombre de km moyen entre les haies et les terres assolées. Chez M. Vuillaume il y a seulement 1 zone contre 3 chez M. Studer. Le temps d'épandage est déterminé par le débit d'épandage et le temps de chargement de l'épandeur. Les coûts des différents chantiers correspondent aux coûts des machines et de la main d'œuvre ramenés par unité de production.

La littérature nous indique qu'il est possible de créer 2,6 m³ de BRF avec 1 heure de main d'œuvre (pour mettre les branches en tas, les broyer, acheminer le BRF au point de stockage) avec un broyeur de moyenne capacité (NOUET, 2011). Le nombre de personne idéal pour le chantier de broyage est de deux pour un broyeur de moyenne capacité (20 à 50 m³ de branches/heure), au-delà, il peut y avoir gêne.

Nous avons également calculé le coût d'installation d'une nouvelle haie.

- **Détail des pratiques chez M. Vuillaume (système de production grande capacité) :**
 - **Taille de branches :** barre de coupe (montée sur une épareuse), avec un tracteur 74-87 ch, les branches tombent directement sur le tapis roulant acheminant les branches dans le broyeur de grande capacité, 1 personne.
 - **Broyage :** broyeur de grande capacité de type forestier, capacité de pointe entre 150 à 300 m³ de branches broyées/heure, production de 20 m³ de BRF/heure (type XYLOCHIP 200 T, capacité de production 15 à 20 MAP/heure, ("Broyeur de branches sur Tracteur : XYLOCHIP 200T," 2019)), associé à un tracteur de 143-169 ch, 1 personne, le broyeur avance en même temps que l'épareuse, le broyage est directement déversé dans l'épandeur de 21 m³.
 - **Transport :** toutes les haies de cette exploitation se trouvent à moins d'un km des terres assolées, il est possible de transporter le BRF avec l'épandeur directement, environs 4 min/km, 1 personne.
 - **Epandage :** 0,8 chargement/heure soit 16,8 m³/heure, associé à un tracteur 74-87 ch, 1 personne.

- **Détail des pratiques chez M. Studer (système de production de moyenne capacité) :**
 - **Informations utiles :** actuellement, M. Studer produit environ 10 m³ de BRF avec 6 h de main d'œuvre, mais selon lui, il est possible d'aller plus vite avec une meilleure organisation. Il faut compter le même volume horaire pour la taille des branches : donc selon Joan Studer, **12 heures de main d'œuvre pour créer 10 m³ de BRF sont nécessaire.** Avec ses tracteurs. Mr Studer met en moyenne 4 min/km pour le temps de transport.
 - **Taille des branches :** au moyen du tracteur 75 ch et de la barre de coupe (1 mètre de large, type épareuse) et de la tronçonneuse pour couper à l'intérieur de la haie. Avec un tel équipement, 1 seule personne en continu est capable de fournir assez de branches pour l'étape du broyage en parallèle. L'opérateur responsable de la taille, range également les branches dans le même sens pour optimiser le travail de broyage.
 - **Broyage :** broyeur : Greenmech Ltd EC 150 TMP : le fournisseur indique que ce broyeur peut broyer 4,5 t MF/heure ce qui fait, en prenant la masse volumique de la masse fraîche BRF sortant du broyeur : 0,334 t/m³ : soit 13,5 m³/h de BRF frais = capacité de pointe. Cette capacité n'est jamais atteinte en pratique (surtout que cette dernière est calculée en mettant des branches de 150 mm de diamètre, ce qui n'est pas l'objectif recherché dans notre cas). Pour le calcul des coûts, on peut diviser par trois cette capacité de pointe pour les raisons énoncées et par rapport à l'échange avec Joan Studer. Donc capacité de broyage 4,5 m³ de BRF/heure. Soit 18 m³ de BRF produit pour 12 heures de main d'œuvre (3 personnes pour la taille et le broyage) : cohérent avec la capacité de broyage actuel et la littérature. Il faut 2 personnes en continu pour le broyage.
 - **Transport :** remorque 10 m³ -> sur tracteur de 75 ch. Temps : en moyenne 4 min/km. Zones des haies : Zones 1 : distance moyenne des haies par rapport aux terres assolées : 1,5 km, Zone 2 : 1 km, Zone 3 : 15 km. Besoin en main d'œuvre : une personne.
 - **Epandage :** épandeur à fumier 8 m³ avec tracteur 75 ch, chargeur frontale pour remplir l'épandeur. Débit : 1,6 chargement/heure (12,8 m³/heure), avec le chargement compris (20 % du temps dédié au chargement).

▪ **Détail des pratiques pour l'installation d'une nouvelle haie :**

- **Prix des plantes :** haie de trois mètres de large, respectant les critères de la qualité 2, adaptée à la production de BRF, 2 rangées de sujets en quiconque espacés d'un mètre l'un de l'autre, soit environ 10 sujets tous les 10 m courants (1 sujet/ml), minimum 5 espèces différentes tous les dix mètres courants, objectif : haie à deux strates type taillis, 20 % de grands sujets (type arbre indigène) 200/225 en motte à 119 CHF/unité, 40 % d'arbustes indigènes 60/70 en racine nu à 2,75 CHF/unité, 40 % d'arbustes indigènes 60/70 en racine nue à 3,75, plantes produites en Suisse et écotype CH (discussion avec M. Monod, pépiniériste Vaudois, entreprise Monod SA).
- **Plantation :** Création d'une tranchée de plantation avec une pelle mécanique associée à un tracteur 74-87 ch (1 personne), mise en place des plantes et rebouchage, tracteur 41-49 ch avec remorque (acheminement des plantes), 2 personnes, en moyenne 40 plantes/heure, soit 40 mètres de haie en 1 heure (1,2 are/heure).

Unités retenues

Les unités de production retenues sont le mètre cube et la tonne de matière sèche. Le m³ est une unité importante pour le praticien car cela permet de se rendre compte des quantités que l'on épand. La tMS est une unité importante pour la science. En effet on l'utilise pour la comparaison avec d'autres amendements.

Pour la plantation, nous avons choisi d'exprimer son coût par mètre linéaire de haie de 3 mètres de large (sans les bandes herbeuses) et par are de plantation (1 are de haie = 33,33 ml de 3 mètres de large).

Mise en évidence des gains économiques dus à l'usage du BRF

Précédemment, nous avons vu que l'amendement BRF a certains avantages. Certains sont chiffrables, d'autres non. Il était pour nous important de mettre en avant ces avantages qui peuvent apporter un gain économique pour l'exploitant, afin de nuancer le prix de revient de cet amendement.

- **Gains quantifiables :** Parmi les gains quantifiables, on retrouve la valeur fertilisante des BRF. Nous avons calculé les économies d'engrais que l'on pourrait faire avec l'amendement. Pour cela nous nous sommes basés sur les prix de certains engrais (Agridea, 2019) :
 - **Azote :** Nitrate d'ammoniaque à 27,5 % azote (33,90 Fr./dt) soit 1,23 Fr./kg de N,
 - **Phosphore :** Super triple à 46 % de P₂O₅ soit 21% de P (70 Fr./dt) soit 3,48 Fr./kg de P,
 - **Potassium :** Sel de potassium à 60 % de K₂O soit 50 % de K (53,6 Fr./dt) soit 1,08 Fr./kg de K,
 - **Magnésium :** Granumag à 29 % de Mg (72,30 Fr./dt) soit 2,49 Fr./kg de Mg.

La deuxième chose que l'on peut quantifier est la valeur de l'amendement en fonction du potentiel de séquestration de carbone. Nous connaissons tous les bienfaits sur le sol et pour lutter contre le dérèglement climatique. Même s'il n'existe pas encore de subvention pour cela, nous pouvons attribuer une valeur au carbone en se basant sur le prix du CO₂. Le GIEC a estimé que le CO₂ devrait coûter 52,64 €/t avec une augmentation de 4 %/an pour atteindre 100 €/t en 2030. Afin d'éviter une augmentation de la température globale supérieure à 2°C (Compteco2, 2018). Nous avons comparé les prix de revient du BRF issus des deux modes de production étudié ainsi que du fumier bien décomposé et de fumier frais. Leur potentiel de séquestration de carbone a également été comparé.

- **Fumier de bovin frais :** exemple de terrain : prix d'achat par Thomas Vuillaume : 5 Fr./m³, 0,650t/m³ (Rousselet et al., 2005), 190 kgMS/tMF (Agridea, 2019), soit 8,1 m³/tMS, K1 fumier frais : 0,25 (Rémy and Marin-Lafliche, 1976),
- **Fumier de bovin en stabulation libre bien décomposé :** en moyenne 12,88 Fr./m³ (Agridea,

2019), 900 kgMF/m³ et 21 % de MS (Agridea, 2019), soit 68 Fr./tMS, K1 : 0,5 (Rémy and Marin-Lafèche, 1976).

- **Gains non quantifiables** : d'autres avantages ne sont pas directement quantifiables. On retrouve par exemple les augmentations de rendement. Ces dernières ne sont pas les mêmes d'une année à l'autre ou d'une parcelle à l'autre. Seule une expérimentation peut quantifier ce paramètre. D'autres paramètres ne sont pas quantifiables mais sont directement liés à l'augmentation de rendement, à savoir l'augmentation de la réserve utile et de l'efficacité de l'utilisation de l'eau et des nutriments (grâce au mycorhize entre autres). Il y a alors des économies d'irrigation, qui sont inexistantes en Suisse sur grande culture. En plus d'avoir une valeur fertilisante, le BRF permet aux plantes de capter plus facilement les éléments nutritifs. Une meilleure efficacité de l'absorption des nutriments se traduit donc par des économies d'engrais. Suivant la quantité épandue, nous avons vu que le BRF réduisait la pression des adventices et facilite le désherbage manuel ainsi que mécanique. Ce paramètre, est uniquement quantifiable à l'issue d'un essai in-situ qui permet de chiffrer cela.

4.8 Planification de l'expérimentation

4.8.1 Choix des parcelles expérimentales

Nous savons que deux parcelles par exploitation sont retenues pour un suivi plus important durant le projet « Terres Vivantes ». Nous allons donc privilégier ces parcelles. Dans la mesure du possible, il est conseillé d'utiliser des parcelles homogènes pour éviter les biais de cause à effet. Nous avons vu que le type de sol a également son importance. En climat tempéré, ce sont essentiellement des sols de types « sableux », « limono-argileux » et « sablo-limoneux » qui ont été testés (Annexe 6). Malheureusement, au sein des parcelles du monitoring et des exploitations d'études en général, les sols rencontrés ressemblent au niveau textural, aux sols déjà testés.

4.8.2 Paramètres d'intérêts

Nous avons vu que le BRF était un amendement avec un fort potentiel de formation d'humus stable et donc de séquestration de carbone dans les sols. Il s'agit de le vérifier notamment sur d'autres types de sol que ceux déjà testés dans la littérature. Ce paramètre nous intéresse pour ces vertus climatiques, son impact positif sur la fertilité des sols et sa faculté à augmenter la résilience face au dérèglement climatique. Le coefficient K1 permet d'estimer la part de la matière organique qui sera effectivement humifiée. Nous avons vu qu'il existait uniquement une valeur pour le BRF. La détermination de ce paramètre nécessite un essai longue durée en champs. Nous ne pensons pas que le déterminer dans cette expérimentation soit pertinent. Nous savons que la composition du BRF varie beaucoup en fonction du bois raméal utilisé pour sa création. De ce fait, le K1 varie lui aussi. Le nouveau modèle de bilan humique « SIMEOS AMG » utilise l'ISMO qui est obtenu en laboratoire assez rapidement et de façon peu onéreuse. De ce fait, pour les prochains bilans, nous préconisons de travailler avec ce modèle en caractérisant chaque amendement organique pour gagner en précision. Dans le cadre de cette expérimentation, nous nous contenterons de suivre l'évolution de la teneur en matière organique. L'impact sur la structure du sol est également intéressant. Nous savons que la matière organique a un impact structurant sur le sol. Des densités apparentes devront donc être prises. Nous voulons chercher à savoir si le BRF structure le sol uniquement grâce à la formation d'humus qu'il génère ou si son pouvoir structurant vient également d'autres processus comme laisser entendre dans certaines publications. Le troisième et dernier paramètre d'analyse sur le sol est la réserve utile. Au même titre que la densité apparente, l'augmentation de la réserve utile est généralement corrélée à une augmentation de teneur en matière organique (LABOUBEE, 2007). Il semblerait que l'apport de

BRF augmente significativement la réserve utile d'un sol. Nous voulons ici encore voir si cela vient uniquement d'augmentation de la teneur en matière organique ou s'il existe d'autres mécanismes comme le type de matière organique formé ou de l'activité biologique mis en place.

En plus de ces trois paramètres étudiés sur le sol, nous aimerions observer deux autres paramètres. Le premier est le rendement. L'augmentation de rendement est la première motivation des agriculteurs. De plus, nous pourrions rajouter cet aspect aux gains économiques dans l'étude. Le deuxième est la production de biomasse des haies. Nous voulons vérifier si les valeurs que nous proposons dans la charte sont correctes.

D'autres observations plus marginales mais tout de même importantes devront être faites comme l'appréciation visuelle de la qualité des cultures et l'impact des adventices. L'intensité de la fixation d'azote doit être évaluée pour voir si l'apport de ces quantités permet ou non de voir apparaître cette problématique.

4.8.3 Choix des modalités

Quantité par apport

La dose d'épandage est aussi un critère qui a attiré notre attention lors des recherches bibliographiques. En effet, nous avons vu que les quantités testées sont autour de 100 m³/ha ce qui ne correspond pas à la ressource disponible. Dans cette expérimentation, il serait intéressant de tester des doses inférieures pour observer si les bienfaits de cet amendement sont conservés. Pour cela, nous allons utiliser les valeurs obtenues grâce au bilan humique et ainsi appliquer les doses qu'il faut pour combler les déficits des parcelles concernées. Les quantités qui vont être testées seront alors comprises autour des 20 à 40 m³/ha.

Comparaison avec d'autres amendements organiques

Pour évaluer le potentiel de cet amendement, il est intéressant de le comparer avec d'autres amendements et notamment avec les amendements déjà utilisés par les deux exploitants de l'étude. Nous pourrions ainsi confronter les différentes valeurs agronomiques de chacun d'entre eux. Il sera alors possible d'évaluer si les efforts à fournir pour mener à bien la pratique BRF sont justifiés.

4.9 Création du manuel de vulgarisation

4.9.1 Process

Ce manuel de vulgarisation a été rédigé en respectant les règles de base de la vulgarisation scientifique (CRSNG, 2004). Ainsi, nous avons essayé de rendre le récit attrayant pour le lecteur. Pour cela, des informations essentielles, des cas concrets, des exemples chiffrés et des résultats de l'étude ont été intégrés à ce dernier. L'illustration du document a également un rôle important. Les images libres de droit étant peu représentées, nous avons parfois utilisé des illustrations appartenant à des banques d'images qu'il faudra acheter si l'on souhaite diffuser ce manuel.

4.9.2 Buts et rôles

Mieux connaître cet amendement

Ce manuel permet avant tout de mieux faire connaître cet amendement, ses bienfaits mais également ses risques. Il s'agit également de présenter l'intérêt d'épandre cet amendement sur les sols et de présenter les enjeux liés à cette pratique à savoir la qualité des sols et la séquestration de carbone.

Bon usage de cet amendement

Nous avons vu précédemment que l'utilisation de cet amendement pouvait occasionner quelques désagréments et que de bonnes pratiques pouvaient éviter cela. Un des enjeux de ce guide d'utilisation

est également de préconiser aux exploitants ces bonnes pratiques pour limiter les risques et éviter les découragements liés à cette pratique.

Création de la ressource

Ce manuel doit également renseigner l'agriculteur sur l'origine de la ressource en bois raméal. Il s'agit du point de départ de cette pratique. Le guide doit donc donner des éléments pour aider l'agriculteur à se procurer ou à créer lui-même cet amendement.

Coût de la pratique

Le coût d'une pratique agricole est un critère incontournable pour le praticien. Ce guide contient donc les chiffres clefs des coûts opérationnels concernant la création de cet amendement et son utilisation. Les gains et les avantages liées à l'utilisation du BRF sont également exposés.

Partie VI : Résultats

5.1 Analyse de BRF locaux

5.1.1 Masses volumiques

Tableau 7 : Résultats des masses volumiques aux conditions du prélèvement et après le passage dans l'étuve à 105°C, de nos 5 échantillons

Echantillon	Etat d'humidité au moment du prélèvement	Granulométrie (mm)	Test sur 5 L	Test sur 1 L	% MS	% MS labo. Sol hepia	
			Masse volumique aux conditions du prélèvement (t/m ³)	Masse volumique sèche (t/m ³)	Masse volumique sèche (en extrapolant avec le test de 5 L) (t/m ³)	Masse volumique sèche (en extrapolant avec le test de 5 L) (t/m ³)	Masse volumique sèche (valeurs retenues) (t/m ³)
BRF n°1	Humide	0/50	0,478	0,1976	0,2135	0,2128	0,213
BRF n°2	Humide	0/50	0,420	0,2058	0,2015	0,2048	0,205
BRF n°3	Très humide	0/70	0,548	0,2158	0,2385	0,2322	0,235
BRF n°4	Humide	0/70	0,465	0,2023	0,2030	0,1864	0,203
BRF n°5	Peu humide	0/30	0,334	0,1818	0,1797	0,1836	0,182
		Moyenne	0,449				0,208
		Ecart-type	0,079				0,019

Nous pouvons voir que le taux d'humidité des BRF échantillonnés varie de très humide à peu humide (tableau 7). Cette appréciation visuelle est en accord avec la masse volumique de la masse fraîche. Plus le BRF est humide, plus son poids frais au m³ est élevé. La granulométrie des échantillons varie de 0/30 mm à 0/70 mm. Le BRF n°3 (donc également le n°4) est le plus grossièrement broyé. La masse volumique sur la matière fraîche varie de 0,334 t/m³ pour le BRF issu de la haie plurispécifique de qualité 2, à 0,548 t/m³ pour le BRF de déchet vert urbain. La moyenne des 5 échantillons est de 0,449 t/m³ avec un écart type de 0,079 t/m³.

Concernant la matière sèche, nous avons obtenu trois valeurs grâce au calcul de vérification et au test effectué dans un bécher d'un litre. De cette manière, nous avons pu écarter les erreurs en conservant les deux valeurs les plus proches. La valeur retenue est donc la moyenne des deux valeurs les plus proches. La masse volumique de la matière sèche de nos 5 échantillons est comprise entre 0,182 t/m³ et 0,235 t/m³. La moyenne est de 0,208 t/m³ avec un écart-type de plus ou moins 0,019 t/m³.

5.1.2 Autres paramètres

Tableau 8 : Résultats des autres paramètres pondérales et non pondérales de nos 5 échantillons.

Echantillon	Extraction H2O 1:5 p/v 120°				Extraction HCl 1:80 p/v (MS)				% MS TA/105°C	Perte au feu (MO %)	Corg %	N _d %	C/N
	pH	Ec mS/cm	NO ₃ ⁻ TEST mg/l	NH ₄ ⁺ TEST mg/l	P mg/kg	K mg/kg	Mg mg/kg	Ca mg/kg					
BRF n°1	6,7	0,38	10	< 10	66,1	2156,5	534,3	10908	44,5	97,3	48,67	0,706	68,9
BRF n°2	6,7	0,34	10	10	67,7	2610,9	591,8	12079	48,8	97,1	48,54	0,682	71,2
BRF n°3	6,7	0,21	10	< 10	57,4	895,5	476,7	23438	42,4	92,2	46,11	0,331	139,3
BRF n°4	8,4	1,16	10	25	182,2	10258,9	3302,6	37769	40,1	73,1	36,56	1,820	20,1
BRF n°5	6,6	0,45	10	10	82,6	2691,4	675,1	11074	55,0	97,2	48,59	0,584	83,2
Moyenne (tous les échantillons)	7,022	0,509	10,0	15,0	91,21	3722,63	1116,10	19053,62	46,16	91,39	45,69	0,825	76,54
Ecart-type (tous les échantillons)	0,77	0,37	0,00	8,66	51,68	3723,82	1224,46	11706,54	5,89	10,44	5,22	0,58	42,59
Moyenne (BRF n°1, 2 et 5)	6,7	0,4	10,0	10,0	72,1	2486,3	600,4	11353,6	49,4	97,2	48,60	0,6573	74,4
Ecart-type (BRF n°1, 2 et 5)	0,0503	0,0560	0,0000	0,0000	9,0954	288,4166	70,7702	633,3589	5,2786	0,1246	0,0623	0,0646	7,6755

On peut distinguer deux valeurs moyennes : la moyenne des 5 échantillons et la moyenne des échantillons n°1, 2 et 5 qui respecte à proprement dit la définition du BRF (branches < 7 cm de diamètre et bois raméal pur). Il est important de faire la distinction pour les analyses chimiques.

Le pH moyen des BRF est de 6,7 (tableau 8). L'électro-conductivité moyenne des BRF est de 0,4 mS/cm. L'échantillon avec le fumier possède la valeur d'Ec la plus élevée avec 1,16 mS/cm et un pH alcalin (8,4). Au contraire, le BRF n°3 a la plus faible valeur d'Ec avec 0,21 mS/cm. Tous les échantillons ont

environ 10 mg/l de nitrate et d'ammonium, sauf pour le mélange fumier/BRF qui possède environ 25 mg/l d'ammonium.

Les BRF échantillonnés ont en moyenne 6,57 kg/tMS d'azote, 0,072 kg/tMS de phosphore, 2,486 kg/tMS de potassium, 0,6 kg/tMS de magnésium et 11,354 kg/tMS de calcium.

La teneur en matière sèche des BRF échantillonnés est d'environ 50 %. Ces derniers sont en moyenne composé de 97,2 % de matière organique et de 48,6 % de carbone organique. Le C/N moyen est de 74,4.

5.2 Evaluation du potentiel de production en BRF

5.2.1 Exposition de la charte

Cette charte a été dans un premier temps créée avec des coefficients (tableau 9). Nous l'avons utilisé pour estimer le potentiel de production de bois raméal des deux exploitations d'étude. Cette dernière nous a servi de base pour la création de la deuxième version vulgarisée pour l'usage des praticiens (Annexe 7).

Tableau 9 : Charte : Potentiel de production de biomasse valorisable en BRF en fonction du type de surface boisée.

Type de haies	Haies, bosquets et bords de forêts						
	Haie haut jet à 1 strate	Haie haut jet à 2 ou 3 strates	Haie cépée à 2 strates type taillis	Haie cépée à 1 strate type taillis	Haie buissonnante à 1 strate basse peu entretenue	Haie buissonnante à 1 strate moyenne peu entretenue	Haie buissonnante à 2 strates peu entretenue
Coefficient	0,5	0,75	0,9	1	0,7	0,6	0,65
Informations	Strate haute : Couronne 7 mètres et plus	Strate basse : arbustive de 0 à 5 mètres et/ou strate moyenne : arbustive de 5 à 10 mètres + strate haute : 7 mètres et plus	Strate basse : arbustive de 0 à 5 mètres + strate moyenne : arbustive de 5 à 10 mètres, constituée de cépées (taillis normal et taillis perché)	Strate basse : arbustive de 0 à 5 mètres ou strate moyenne : arbustive de 5 à 10 mètres, constituée de cépées (taillis normal et taillis perché)	Strate basse : arbustive de 0 à 5 mètres, constituée d'arbres/arbustes formes naturelles, peu ou pas entretenus	Strate moyenne : arbustive de 5 à 10 mètres, constituée d'arbres/arbustes formes naturelles, peu ou pas entretenus	Strate basse : arbustive de 0 à 5 mètres + strate moyenne : arbustive de 5 à 10 mètres, constituée d'arbres/arbustes formes naturelles, peu ou pas entretenus

Type de surfaces boisées	Pâturages boisés				Arbres isolés		Production de Biomasse	
	Pâturages boisés hautes densités	Pâturages boisés moyennes densités	Pâturages boisés basses densités	Pâturages boisés très basses densités	Arbre isolé peu ou pas entretenu	Arbre isolé entretenu	Taillis à très courte rotation (TTCR)	Taillis à courte rotation (TCR)
Coefficient	0,203	0,107	0,024	0	0,238	0,477	2	3
Informations	Entre 70 e et 100 arbres/ha (70-100 % de boisement), catégorie "4000"	Entre 20 e et 70 arbres/ha (20-70 % de boisement), catégorie "3000"	Entre 1 e et 20 arbres/ha (1-20 % de boisement), catégorie "2000"	Moins d'un arbre/ha (< 1% de boisement), catégorie "1000"	Arbre fruitier haute tige, arbre de haut jet	Arbre têtard, cépée type taillis normal ou perché	Arbustes plantés en ligne et récoltés tous les 2 à 3 ans environ	Arbustes plantés en ligne et récoltés tous les 7 à 10 ans environ

Constitution de la haie	Haie majoritairement constituée (>50%) d'essences à développements très forts	Haie majoritairement constituée (>50%) d'essences à développements forts	Haie majoritairement constituée (>50%) d'essences à développements moyens	Haie majoritairement constituée (>50%) d'essences à développements faibles
Informations	Peupliers, saules, etc...	Noisetiers, frênes, aulnes, robiniers, Erables, baguenaudiers, etc...	Chênes, arbres fruitiers, Aubépines, arbustes indigène, arbustes de la strate moyenne	Arbustes épineux, rosa, arbustes de la strate basse
Facteurs de correction	1,2	1,1	1	0,8

Les coefficients sont multipliés à la valeur de référence (6 tMS/ha/an) et à la surface concernée. Pour les arbres isolés, un arbre vaut 1 are, donc 100 arbres équivalents à 1 ha. Le coefficient est donc non pas multiplié par une surface mais par un nombre d'arbres. Prenons comme exemple 45 arbres têtards : la production de biomasse potentielle est alors de « 0,477 (arbre isolé entretenu)*(45/100)*6 » soit 1,28 tMS/an pour ces 45 arbres.

5.2.2 Thomas Vuillaume

On compte 5 haies sur la SAU de Thomas Vuillaume (tableau 10), ce qui représente à 2,63 ha.

Tableau 10 : Potentiel de production de BRF des surfaces boisées de l'exploitation de M. Vuillaume.

Type d'espace boisé	Surface (are)	Surface effective de haie (are)	Production de biomasse (kgMS/an)	Volume de BRF (m3)
Haies et bosquets	263	181,4	9274,92	44,59

La surface effective de haie (surface totale-bande herbeuse) est de 181,4 ares. Il est possible de produire 9,275 tMS de bois raméal ce qui représente 44,59 m³ de BRF. Cela fait une moyenne de 17 m³/an de BRF par hectare de haies/bosquets total ou 24 m³/an de BRF par hectare de haies/bosquets effective (sans les bandes herbeuses).

5.2.3 Joan Studer

L'exploitation de Joan Studer possède 19 haies/bosquets (7,03 ha), 5 forêts (7,54 ha) et 2 pâturages boisés (0,88 ha) (tableau 11).

Tableau 11 : Potentiel de production de BRF des surfaces boisées de l'exploitation de M. Studer.

Type de surface boisée	Surface (are)	Surface effective (are)	Production de biomasse (kgMS/an)	Volume de BRF (m3/an)
Haies et bosquets	703	550,99	25299,20	121,63
Forêts	754	68,55	2434,5	11,704
Pâturages boisés	88	88	913,2	4,4
Total			28646,88	137,73

La surface effective de production de bois raméal est de 5,51 ha pour les haies/bosquets, de 0,69 ha pour les forêts et de 0,88 ha pour les pâturages boisés. Les haies/bosquets peuvent fournir 25,29 tMS de bois raméal par an, ce qui représente 121,63 m³ de BRF. Les forêts peuvent fournir 2,43 tMS de bois raméal par an, ce qui représente 11,70 m³ de BRF. Les pâturages boisés peuvent fournir 0,91 tMS de bois raméal par an, ce qui représente 4,40 m³ de BRF. La totalité des surfaces boisées de l'exploitation peuvent fournir 28,65 tMS/an de bois raméal, ce qui représente 137,73 m³ de BRF. Les arbres isolés n'ont pas été recensés sur le terrain. Joan Studer possède environ 830 sujets isolés. Nous allons partir du principe que l'ensemble de ces arbres sont classés dans la catégorie « peu ou pas entretenus ». De ce fait, ces sujets sont en mesure de fournir environ 11,85 tMS (8,30*0,238*6) de bois raméal supplémentaire. La production moyenne en BRF des haies/bosquets est de 17,3 m³/ha de surface totale et 22,07 m³/ha de surface effective. La production moyenne en BRF des forêts est de 17,07 m³/ha de surface effective. Les pâturages boisés fournissent en moyenne 5 m³/ha.

5.3 Bilan humique

5.3.1 Thomas Vuillaume

Rotation type et entrées de carbone organique

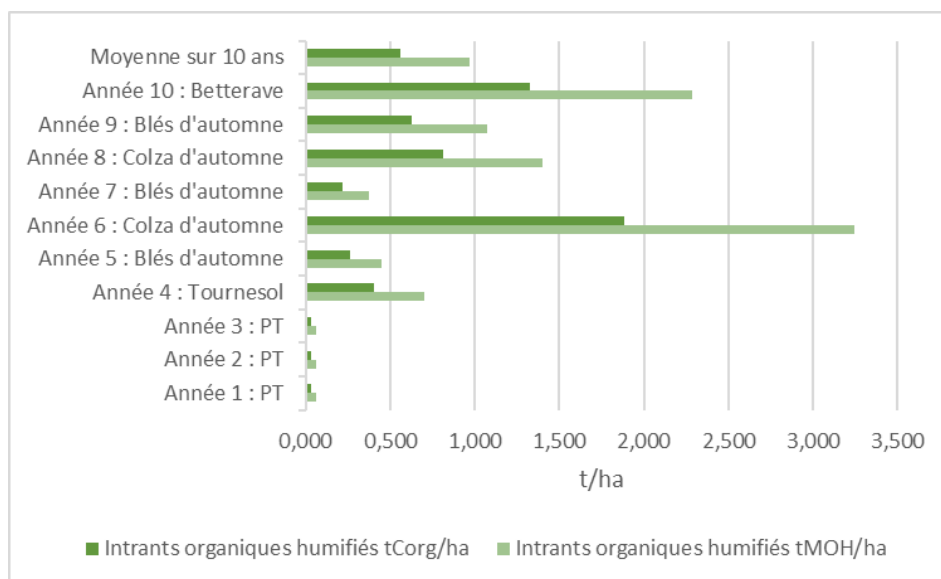


Figure 10 : Entrées d'humus et de carbone organique en fonction de la culture et des pratiques sur l'exploitation de Thomas Vuillaume.

Nous pouvons voir que les deux cultures qui possèdent l'entrée de carbone organique les plus importantes sont le colza et la betterave. C'est en partie dû à l'amendement de fumier composté et de BRF (figure 10). Le colza non amendé, correspond à la culture qui crée le plus d'humus grâce à ces résidus. Sur dix ans de rotation, il y a en moyenne **0,971 tonne d'humus** qui sont apportés par hectare et par an, ce qui représente **0,563 tonne de Corg**. Le détail des calculs du bilan humique (exemple pour parcelle T1) est en annexe (Annexe 29).

Coefficient de minéralisation et caractéristique de chaque parcelle

Tableau 12 : Caractéristiques utilisées pour établir le stock de carbone et le coefficient K2 des parcelles d'étude sur l'exploitation de M. Vuillaume.

Nom de la parcelle	Profondeur	Da	Teneur en grossier (>2mm)	Teneur en MO	Teneur en argile	Teneur en CaCo3	T° moyenne annuelle
	cm	g/cm3	%v	%p	g/kg	g/kg	°C
T1	30	1,15	2,20%	4,80%	321	28	8,9
T2	30	1,176	3,80%	4,30%	316	6	8,9
T3	28,75	1,176	2,80%	4,30%	316	8	8,9
T4	30	1,176	1,80%	4,30%	316	6	8,9
T5	28,75	1,176	1,40%	4,30%	316	16	8,9
T6	30	1,176	1,40%	4,30%	316	6	8,9
T7	30	1,2	2,60%	3,40%	281	98	8,9
T8	30	1,2	4,20%	3,40%	281	53	8,9

La teneur en MO des sols varie de 3,40 % à 4,80 % suivant les parcelles (tableau 12). Les parcelles les moins bien pourvues en MO (T7 et T8) sont seulement à 12,1 % du ratio MO/A. Ces dernières sont à la limite de la borne inférieure critique que ne devrait jamais dépasser les sols agricoles. La parcelle la mieux pourvue en MO (T1) possède un ratio MO/A de 15%. Les Da sont en général très peu élevées et varient de 1,15 à 1,2. Les sols contiennent entre 28 % d'argile et 32 %. Ces derniers sont peu à très peu carbonatés.

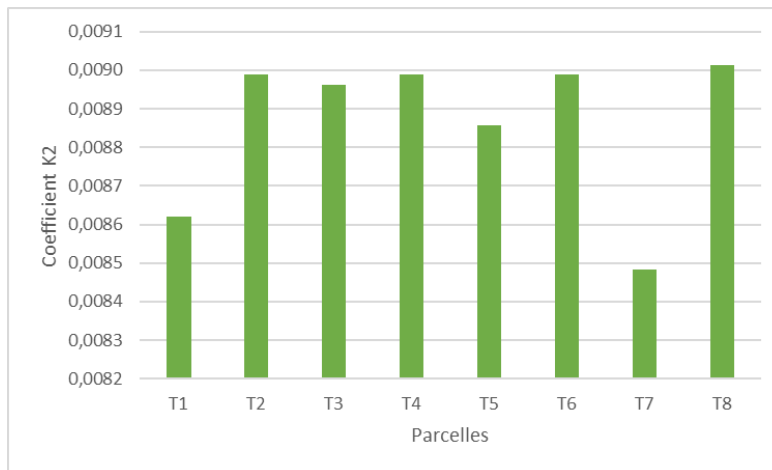


Figure 11 : Coefficient K2 des différentes parcelles de l'exploitation de Thomas Vuillaume.

Nous pouvons voir que les coefficients k2 varient entre 0,9 % et 0,85 % pour nos parcelles d'études (figure 11).

Stocks de carbone

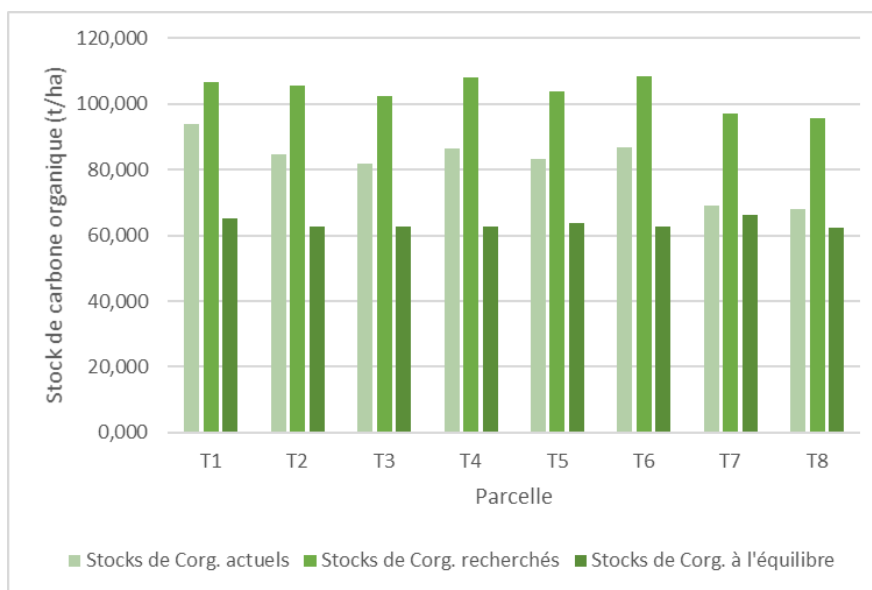


Figure 12 : Stocks de carbone organique actuels et à l'équilibre mis en parallèle avec les stocks de carbone recherchés (MO = 17% de la masse en argile) des parcelles d'études de l'exploitation de M. Vuillaume.

Les stocks de carbone varient de plus 90 t/ha (parcelle T1) à moins de 70 t/ ha (parcelle T7 et T8) (figure 12). Si aucune pratique ne change, les stocks de Corg à l'équilibre de chaque parcelle sont inférieurs au stock actuel. Cela signifie qu'il y a une perte de Corg et que les intrants organiques ne suffisent pas à maintenir ou à faire progresser ces stocks. Les stocks en carbone recherchés sont compris entre 90 et 110 t/ha.

Evolution des stocks

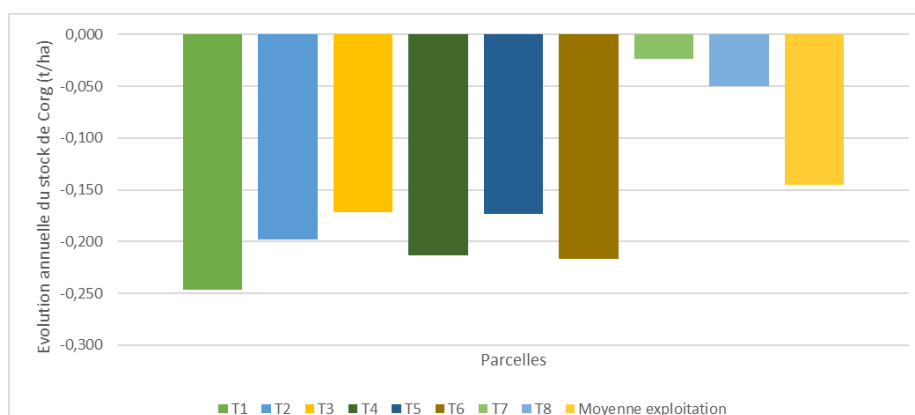


Figure 13 : Evolution annuelle du stock de carbone des différentes parcelles d'étude pour l'exploitation de Thomas vuillaume.

L'ensemble des parcelles perdent une proportion de carbone organique (figure 13). Il s'agit d'une vision au pas de temps annuel. Si les entrées d'humus restent les mêmes, les parcelles vont perdre chaque année un peu moins de carbone pour arriver à un équilibre. La parcelle T1 est celle qui perd le plus de carbone avec environ 250 kg de Corg/ha pour cette année. Sur l'ensemble des terres assolées de l'exploitation, la perte moyenne est d'environ 150 kg de Corg/ha.

Déficit de carbone par rapport aux exigences de qualité minimale (17% MO de la masse d'argile) et traduction de ce déficit en amendement BRF

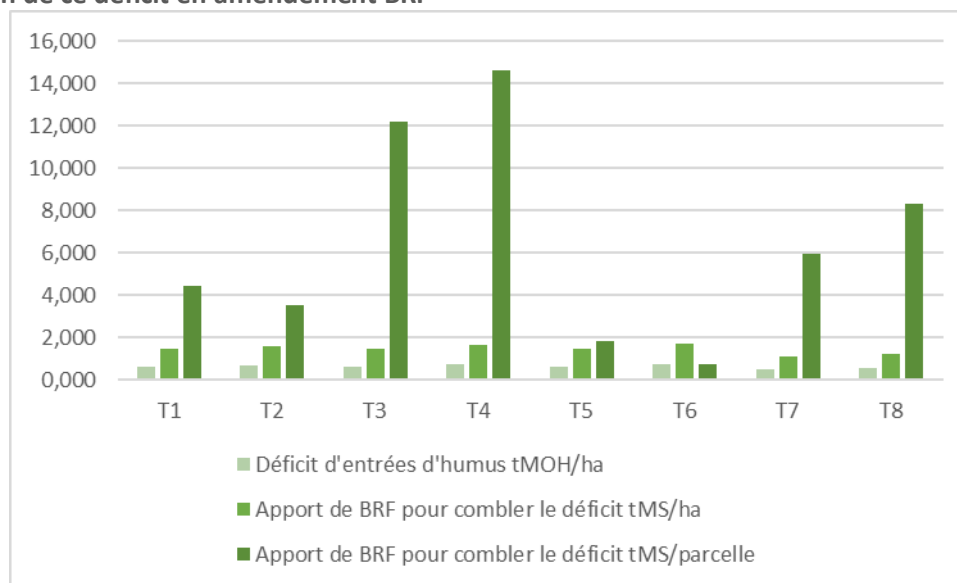


Figure 14 : Déficit annuel d'entrée en humus (tMOH/ha) traduit en quantité de BRF à apporter tous les ans pour combler ce déficit (MO/A = 17%).

Il faut apporter entre 0,89 tMS/ha (T7) et 1,42 tMS/ha (T6) de BRF par an pour combler le déficit et arriver aux stocks recherchés (figure 14). Sur l'ensemble de l'exploitation, il faut environ 43 tMS/an de bois raméal fragmenté pour compenser le déficit de toutes les parcelles. Cette pratique, si elle est réalisée jusqu'au niveau d'équilibre de chaque parcelle, permettrait de séquestrer environ 1'400 t de carbone sur l'ensemble des terres assolées de l'exploitation.

5.3.2 Joan Studer

Rotation type et entrées de carbone organique

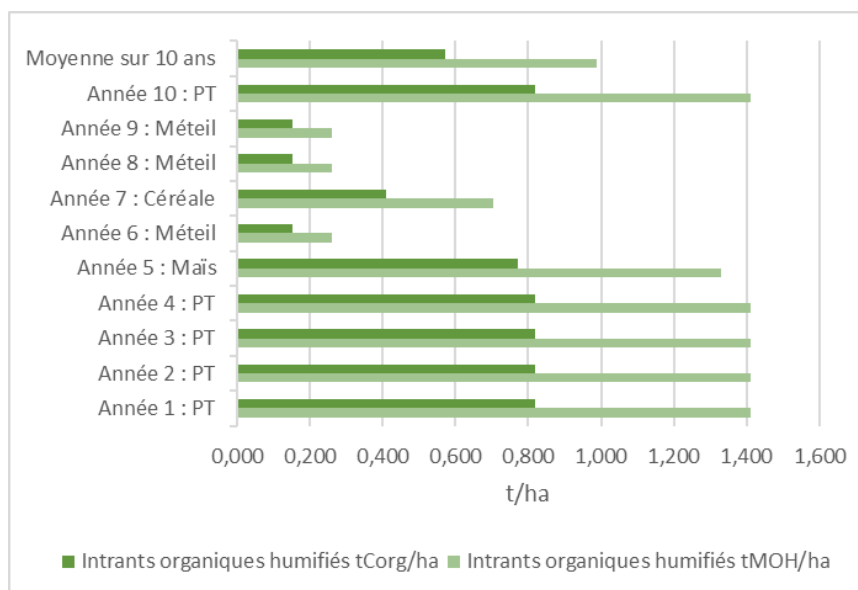


Figure 15 : Entrées d'humus et de carbone organique en fonction de la culture et des pratiques sur l'exploitation de Joan Studer.

Nous pouvons voir que la culture qui possède les entrées de carbone organique les plus importantes est la prairie temporaire avec un apport de 1,41 tMOH par hectare et par an (figure 15). C'est en partie dû à un apport important de lisier. Le maïs suit de près avec 1,33 tMOH/ha/an. Sur dix ans de rotation, il y a en moyenne **0,987 tonne d'humus** qui sont apportés par hectare et par an, ce qui représente **0,572 tonne de Corg**. C'est légèrement supérieur à ce que l'on peut retrouver chez M. Vuillaume.

Coefficient de minéralisation et caractéristique de chaque parcelle

Tableau 13 : Caractéristiques utilisées pour établir le stock de carbone et le coefficient K2 des parcelles d'étude sur l'exploitation de M. Studer.

Nom de la parcelle	Profondeur	Da	Teneur en grossier (>2mm)	Teneur en MO	Teneur en argile	Teneur en CaCo3	T° moyenne annuelle
	cm	g/cm3	%v	%p	g/kg	g/kg	°C
J1	30	1,078	3,20%	5,50%	369	4	8,3
J2	30	1,1	3,40%	5,00%	281	10	8,3
J3	28	1,078	6,00%	5,50%	369	30	8,3
J4	30	1,078	2,40%	5,50%	369	8	8,3
J5	26	0,788	18,00%	9,50%	534	40	8,3
J6	28	1,078	2,00%	5,50%	369	28	8,3
J7	30	1,3	5,40%	3,90%	164	0	8,3

La teneur en MO des sols varie de 3,90 % (parcelle J7) à 9,50 % (parcelle J5) suivant les parcelles (tableau 13). La parcelle la moins bien pourvue en MO (J7) est à 23,8 % du ratio MO/A ce qui représente un très bon score grâce à un taux d'argile assez bas (sol léger). Les parcelles J1, J3, J4 et J6 ont un ratio MO/A de 14,9 % ce qui est assez faible (en dessous des exigences de qualité). La parcelle la mieux pourvue en MO (J5) possède un ratio MO/A de 17,8% ce qui représente la limite de l'exigence de qualité. Les Da sont en général très peu élevées et varient de 0,788 à 1,1. Les sols contiennent entre 16,4 % et 53,4 % d'argile (grande variabilité). Ces derniers sont peu à très peu carbonatés.

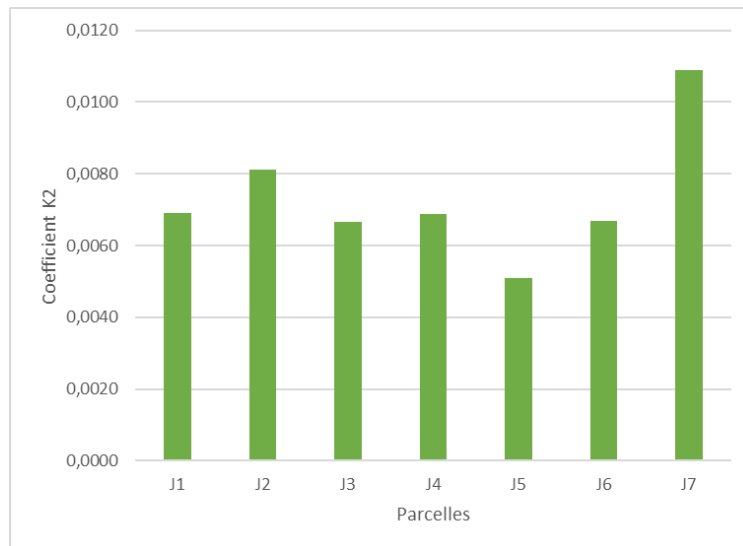


Figure 16 : Coefficient K2 des différentes parcelles de l'exploitation Joan Studer.

Les coefficients de minéralisation varient de 0,51% (J5) à 1,09% (J7) (figure 16). La parcelle J7 a le plus grand K2 et elle a aussi la plus petite teneur en argile (l'argile protège la matière organique des mécanismes oxydatifs).

Stocks de carbone

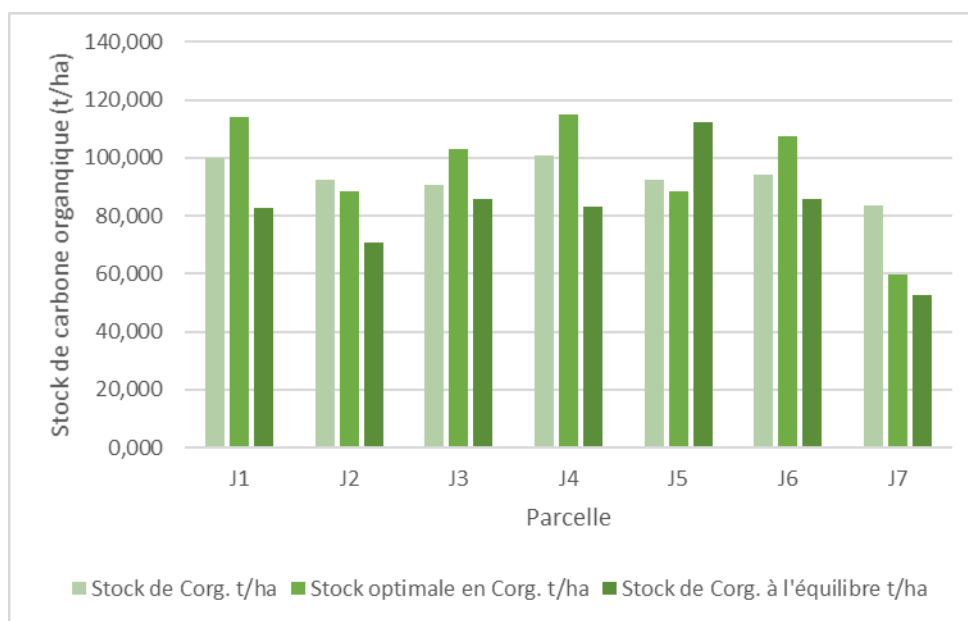


Figure 17 : Stocks de carbone organique actuel et à l'équilibre mis en parallèle avec les stocks de carbone recherchés (MO = 17% de la masse en argile) des parcelles d'études de l'exploitation de M. Studer.

Les stocks actuels de carbone varient de 83,5 t/ha (parcelle J7) à 100,7 t/ha (parcelle J4) (figure 17). Si aucune pratique ne change, les stocks de Corg à l'équilibre des parcelles J1, J2, J3, J4, J6 et particulièrement J7 sont inférieurs aux stocks actuels. Cela signifie qu'il y a une perte de Corg et que les intrants organiques ne suffisent pas à maintenir ou à faire progresser ces stocks. Les stocks en carbone recherchés sont compris entre 60 et 115 t/ha.

Evolution des stocks

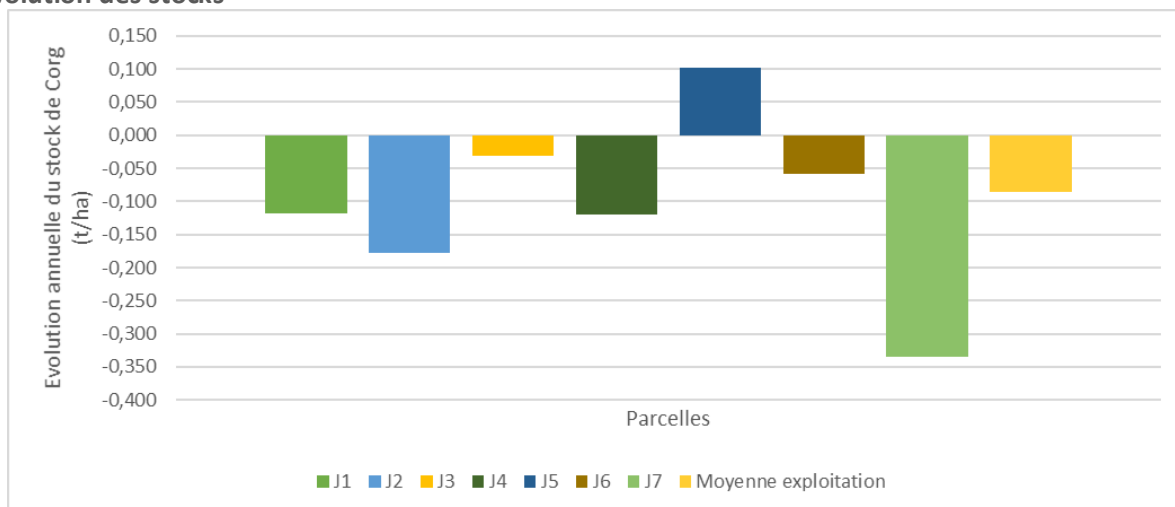


Figure 18 : Evolution annuelle du stock de carbone des différentes parcelles d'étude pour l'exploitation de Thomas Vuillaume.

L'ensemble des parcelles perdent une proportion de carbone organique à l'exception de la parcelle J5 (figure 18). Il s'agit d'une vision au pas de temps annuel. Si les entrées d'humus restent les mêmes, les parcelles vont perdre ou gagner chaque année un peu moins de carbone pour arriver à un équilibre. La parcelle J7 est celle qui perd le plus de carbone avec environ 335 kg de Corg/ha pour cette année. Sur l'ensemble des terres assolées de l'exploitation, la perte moyenne est d'environ 85 kg de Corg/ha. La parcelle J3 est quasiment au régime stationnaire.

Déficit de carbone par rapport aux exigences de qualité minimale (17% MO de la masse d'argile) et maximale (24% MO de la masse d'argile) et traduction de ces déficits en amendement BRF

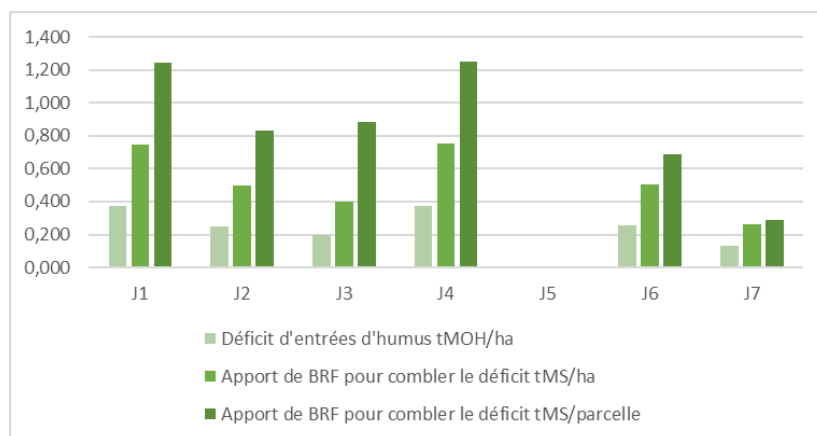


Figure 19 : Déficit annuelle d'entrée en humus (tMOH/ha) traduit en quantité de BRF à apporter tous les ans pour combler ce déficit (MO/A = 17%).

Il faut apporter entre 0,26 tMS/ha (J7) et 0,75 tMS/ha (J4) de BRF par an pour combler le déficit et arriver aux stocks recherchés (MO = 17% de la masse en argile) (figure 19). La parcelle J5 n'a pas besoin d'être amendée. En revanche, il faut apporter entre 0,22 tMS/ha (J5) et 1,87 tMS/ha (J4) de BRF par an pour combler le déficit et arriver aux stocks optimaux (24 % de la masse en argile). Sur l'ensemble de l'exploitation, il faut environ 5,18 tMS/an de bois raméal fragmenté pour compenser le déficit de toutes les parcelles par rapport aux stocks recherchés. Ce chiffre est trois fois supérieur si on souhaite atteindre un taux MO/A de 24 %, à savoir 15,62 tMS de BRF par an pour toute l'exploitation. Cette

pratique, si elle est réalisée jusqu'au niveau d'équilibre de chaque parcelle, permettrait de séquestrer environ 210 t de carbone sur l'ensemble des terres assolées de l'exploitation et jusqu'à 635 t de carbone si l'on souhaite atteindre 24 % en ratio MO/A.

5.4 Analyse économique

5.4.1 Thomas Vuillaume : mode de production de grande capacité

Tableau 14 : Coûts opérationnels des différents chantiers de la pratique "BRF" chez M. Vuillaume.

Création du BRF				
Opération	Total par heure de chantier	Coûts de production du BRF	Coûts de production du BRF	Temps main d'œuvre par unité de production
	Fr.	Fr./m ³	Fr./tMS	h/m ³
Chantier de taille de branches	95,61	4,78	22,98	0,050
Chantier de broyage	136,32	6,82	32,77	0,050
Total création du BRF		11,60	55,75	0,100
Transport du BRF				
Opération	Total par heure de transport	Coûts de transport du BRF	Coûts de transport du BRF	Temps main d'œuvre par unité de production
	Fr.	Fr./m ³ /km	Fr./tMS/km	h/m ³ /km
Transport du BRF	94,60	0,60	2,89	0,006
Epannage du BRF				
Opération	Total par heure d'épandage	Coûts d'épandage du BRF	Coûts d'épandage du BRF	Temps main d'œuvre par unité de production
	Fr.	Fr./m ³	Fr./tMS	h/m ³
Epannage du BRF	94,60	5,63	27,07	0,060

Les coûts de création de BRF avec un mode de production de grande capacité sont de 11,60 CHF/m³ et de 55,75 CHF/tMS (tableau 14). Le transport de cet amendement avec le matériel utilisé par M. Vuillaume coûte 0,6 CHF/m³/km. En ce qui concerne l'épandage, cette opération coûte 5,63 CHF/m³ avec un « épandeur » d'une capacité de 21 m³.

L'investissement lié au BRF est de 51'000 CHF (barre de coupe associée à une épareuse et broyeur de grande capacité).

Tableau 15 : Coûts de la pratique "BRF" au sein de l'exploitation de Thomas Vuillaume.

Zone	Production de biomasse valorisable en BRF	Volume de BRF correspondant	Coûts de production du BRF	Temps de main d'œuvre pour la production de BRF	Distance moyenne entre les haies et les TA	Coûts de transport	Temps de main d'œuvre pour le transport	Coûts d'épandage	Temps de main d'œuvre pour l'épandage	Total coûts par zone	Total temps de main d'œuvre par zone
	tMS/an	m ³ /an	Fr.	h	km	Fr.	h	Fr.	h	Fr.	h
Zone 1	9274,92	44,59	517,10	4,46	1	26,78	0,28	251,09	2,65	794,97	7,40
Total exploitation	9274,92	44,59	517,10	4,46	/	26,78	0,28	251,09	2,65	794,97	7,40

L'exploitation de la **zone 1** (à proximité de la ferme) permettrait de produire 9,3 tMS/an soit 45 m³ (tableau 15). La production, le transport ainsi que l'épandage du BRF produit dans cette zone coûte environ 800 CHF et demande 7h30min de main d'œuvre. Dans cette zone, le prix moyen du BRF (création, transport et épandage) est de **17,80 CHF/m³**.

5.4.2 Joan Studer : mode de production de moyenne capacité

Tableau 16 : Coûts opérationnels des différents chantiers de la pratique "BRF" chez M. Studer.

Création du BRF				
Opération	Total par heure de chantier	Coûts de production du BRF	Coûts de production du BRF	Temps main d'œuvre par unité de production
	Fr.	Fr./m ³	Fr./tMS	h/m ³
Chantier de taille de branches	71,49	15,89	76,37	0,222
Chantier de broyage	106,08	23,57	113,33	0,444
Total création du BRF		39,46	189,71	0,67
Transport du BRF				
Opération	Total par heure de transport	Coûts de transport du BRF	Coûts de transport du BRF	Temps main d'œuvre par unité de production
	Fr.	Fr./m ³ /km	Fr./tMS/km	h/m ³ /km
Transport du BRF	105,60	1,41	6,77	0,013
Epannage du BRF				
Opération	Total par heure d'épannage	Coûts d'épannage du BRF	Coûts d'épannage du BRF	Temps main d'œuvre par unité de production
	Fr.	Fr./m ³	Fr./tMS	h/m ³
Epannage du BRF	104,50	8,16	39,25	0,078

Les coûts de création de BRF avec un mode de production de moyenne capacité sont de 39,46 CHF/m³ (soit trois fois plus cher que le système grande capacité) et de 188,71 CHF/tMS (tableau 16). Le transport de cet amendement avec le matériel utilisé par M. Studer coûte 1,41 CHF/m³/km. En ce qui concerne l'épannage, cette opération coûte 8,16 CHF/m³ avec un « épandeur » d'une capacité de 8 m³.

L'investissement lié au BRF est de 29'000 CHF (barre de coupe associée à une épareuse et broyeur). Pour rappel, Joan Studer a déjà investi avec l'aide de deux autres agriculteurs avec lesquels il s'est associé. Le système de moyenne capacité est environ deux fois moins cher au niveau de l'investissement que le système de grande capacité.

Tableau 17 : Coûts de la pratique "BRF" au sein de l'exploitation de Joan Studer.

Zone	Production de biomasse valorisable en BRF	Volume de BRF correspondant	Coûts de production du BRF	Temps de main d'œuvre pour la production de BRF	Distance moyenne entre les haies et les TA	Coûts de transport	Temps de main d'œuvre pour le transport	Coûts d'épannage	Temps de main d'œuvre pour l'épannage	Total coûts par zone	Total temps de main d'œuvre par zone
	tMS/an	m ³ /an	Fr.	h	km	Fr.	h	Fr.	h	Fr.	h
Zone 1	16,99	81,70	3223,96	54,47	1	115,04	1,09	667,04	6,38	4006,04	61,94
Zone 2	3,48	16,72	659,90	11,15	1,5	35,32	0,33	136,53	1,31	831,76	12,79
Zone 3	8,17	39,30	1550,63	26,20	15	829,96	7,86	320,83	3,07	2701,41	37,13
Total exploitation	28,65	137,73	5434,49	91,82	/	980,32	9,28	1124,40	10,76	7539,21	111,86

L'exploitation de la **zone 1** (à proximité de la ferme) permettrait de produire 17 tMS/an soit 82 m³ (tableau 17). La production, le transport ainsi que l'épannage du BRF produit dans cette zone coûte environ 4'000 CHF et demande 62 heures de main d'œuvre. Dans cette zone le prix moyen du BRF (création, transport et épannage) est de **49,00 CHF/m³**. L'exploitation de la **zone 2** (à proximité de la ferme) permettrait de produire 3,5 tMS/an soit 17 m³. La production, le transport ainsi que l'épannage du BRF produit dans cette zone coûte environ 832 CHF et demande 13 heures de main d'œuvre. Dans cette zone, le prix moyen du BRF est de **49,80 CHF/m³**. L'exploitation de la **zone 3** (loin de la ferme) permettrait de produire 8,2 tMS/an soit 39 m³. La production, le transport ainsi que l'épannage du BRF produit dans cette zone coûte environ 2701 CHF et demande 37 heures de main d'œuvre. Dans cette zone, le prix moyen du BRF est de **68,70 CHF/m³**. Le cas des arbres isolés n'a pas été traité.

S'il exploite l'entier du potentiel de production de bois raméal, M. Studer doit consacrer 112 heures pour broyer, transporter et épandre les 138 m³ de BRF, ce qui lui coûterait 7540 CHF. Un UMOS vaut 2'600 heures de travail (OFAG, 2019). De ce fait, la pratique "BRF" représente 4 % d'un UMOS, Joan Studer a environ 4,5 UMOS, la pratique agricole "BRF" représenterait 0,9% du travail effectué actuellement.

5.4.3 Installation de nouvelles haies

Tableau 18 : Détail des coûts de l'installation d'une nouvelle haie de qualité 2 avec des espèces indigènes d'écotype CH.

Intitulé	Machine	Coûts machine	Taux d'utilisation du matériel	Nombre d'opérateurs	Main d'œuvre	Total coûts machines	Total coûts mains d'œuvre	Total par heure de chantier	Coûts de plantation	Coûts de plantation	Temps main d'œuvre par unité de production
		Fr./h	%								
Tranchée	Tracteur 55-64 kW (74-87 ch)	37,60	100%	1	28	43,30	28	71,30	1,78	59,42	0,833
	Chargeur arrière, pelle mécanique	5,70	100%								
Plantation	Tracteur 30-36 kW (41-49 ch)	25,37	100%	2	28	65,37	56	121,37	3,03	101,14	1,667
	Remorque	40,00	100%								
Total plantation								192,67	4,82	160,56	2,50

Type de plantes	Teneur	Prix Unité	Prix moyen Unité	Nombre de plante par mètre linéaire	Nombre de plantes par are	Coûts des plantes	Coûts des plantes
	%	Fr./U	Fr./U				
Arbre 200/225	20%	119	26,4	1	33,33	26,40	880,00
Arbuste 60/70	40%	2,75					
Arbuste 60/70	40%	3,75					
Total installation nouvelle haie						31,22	1040,56

L'installation d'une nouvelle haie coûte 31,22 CHF/ml (haie de 3 mètres de large) soit 1'040,56 CHF/are (104'056 CHF/ha) (tableau 18). La fourniture des plantes représente environ 85 % du coût total. L'ordonnance sur les paiements directs versés dans l'agriculture (OPD) subventionne 2'840 CHF/ha/an pour les haies et les bosquets de qualité 2 dans toutes les zones (zone de plaine, colline et montagne) (Callet-Bois et al., 2018). Cela signifie que le coût de l'installation de la haie, indépendamment d'une production de bois raméal, est amorti 37 ans après la plantation. Il est possible de rajouter 1'000 CHF/ha /an si cette haie respecte les critères de qualité « Réseau ».

5.4.4 Gains économiques

Quantifiable

Tableau 19 : Valeur fertilisante des BRF jurassiens analysés.

Eléments	Valeur fertilisante du BRF				Total
	N	P	K	Mg	
Concentration moyenne dans le BRF (kg/tMS)	6,570	0,072	2,486	0,600	12,52
Coûts de l'engrais (Fr./kg)	1,233	3,480	1,076	2,490	
Valeur fertilisante du BRF (Fr./tMS)	8,10	0,25	2,67	1,49	

Une tonne MS de BRF équivaut à apporter 6,57 kg de N ce qui a une valeur fertilisante de 8,10 CHF (tableau 19). Cette même tonne MS de BRF à une valeur fertilisante totale de 12,52 CHF. Ces calculs ne prennent pas en compte la part réellement disponible pour les plantes notamment pour l'azote.

Tableau 20 : Comparaison du prix de revient et du potentiel de séquestration de carbone du BRF issus de deux modes de production avec d'autre amendements organiques souvent utilisés dans le Canton du Jura.

Amendements	Prix de revient Fr./tMS	K1	Humus formé l'année de l'apport kg/tMS	Corg stocké l'année de l'apport kg/tMS	Equivalent CO2 kg	Prix du CO2 (compensation écologique) Fr./t	Valeur du carbone stocké Fr./tMS
Fumier frais (Acheté par M. Vuillaume)	40,5	0,25	250	145,01	532,19	57,38	30,54
Fumier de bovin en stabulation libre bien décomposé	68,15	0,5	500	290,02	1064,39		61,07
BRF produit avec un mode de production de moyenne capacité	189,71	0,5	500	290,02	1064,39		61,07
BRF produit avec un mode de production de grande capacité	55,75	0,5	500	290,02	1064,39		61,07

Le BRF issu du mode de production de grande capacité coûte en moyenne 38 % plus cher que du fumier de bovin frais mais il permet de séquestrer deux fois plus de carbone dans le sol l'année de l'épandage (tableau 20). Le fumier de bovin bien décomposé a le même potentiel de séquestration que le BRF. Il est néanmoins 22 % plus cher. La valeur du carbone séquestrée en équivalent CO₂ par 1 tMS de BRF ou de fumier bien décomposé est de 61 CHF. Le BRF issu du mode de production de moyenne capacité est 178 % plus cher que le fumier bien décomposé.

Au sein de l'exploitation de M. Vuillaume, pour obtenir le même résultat qu'un apport de 9,6 tMS/an de bois raméal fragmenté, un achat d'environ 650 Fr./an de fumier bien décomposé (sans le transport et l'épandage) doit être fait. La production de ces 9,6 tMS de bois raméal fragmenté coûte 517 Fr. avec un système de grande capacité.

Partie VII : Discussions

6.1 Variabilité des BRF

6.1.1 Masse volumique

Nous avons vu que la masse volumique au déballage variait beaucoup. Cette variation est essentiellement expliquée par la teneur en eau des échantillons. En effet, les BRF ont été échantillonnés dans des andains et un chargement qui ne possèdent pas de protection (bâche) contre la pluie. La teneur en eau des échantillons varie donc en fonction des précipitations que reçoivent les amendements mais également d'autres paramètres comme le potentiel de rétention du matériau, la perméabilité de la surface qui accueille l'amendement ainsi que les remontées capillaires. Nous pouvons d'ailleurs observer que le BRF qui est stocké dans la remorque a une moins grande teneur en eau (seulement 45 %) car il a certainement un meilleur drainage. La masse volumique de la MF moyenne est de 449 kg/m^3 ce qui est plus élevé que ce que l'on retrouve dans la littérature. En effet dans l'étude belge, la masse volumique moyenne de 5 échantillons est de 350 kg/m^3 (Noël and Marche, 2006). Le BRF était visiblement plus sec, ce qui paraît logique puisqu'ils ont échantillonné juste après le broyage, contrairement à notre cas où nous avons échantillonné quelques mois après l'entreposage.

La masse volumique de la matière sèche est utile dans notre étude pour convertir le potentiel de production de matière sèche valorisable des haies en m^3 de BRF que l'on peut épandre. Le volume de la matière sèche change peu voire pas du tout de celui de la matière fraîche car aucun retrait n'a été observé à la sortie de l'étuve sur le test de 1 litre. C'est ainsi que nous avons pu faire les mesures de vérification en extrapolant les valeurs de matière sèche avec le test sur la matière sèche dans un volume de 5 litres. Contrairement à la masse volumique de la matière fraîche, la masse volumique de la matière sèche varie très peu. La granulométrie n'a donc que très peu d'importance sur masse volumique (arrangement des particules dans l'espace). Cette faible variation est également expliquée par la densité réelle du bois qui diffère en fonction de l'espèce et l'âge de la branche. La valeur moyenne de nos 5 échantillons est de 208 kg/m^3 ce qui est très proche de ce que l'on peut trouver dans la littérature. En effet, dans l'étude belge, la masse volumique moyenne de la MS est de 200 kg/m^3 (Noël and Marche, 2006).

La masse volumique de la MF est importante dans la pratique pour les agriculteurs. Néanmoins, cette valeur varie beaucoup en fonction de la teneur en eau. De ce fait, nous pouvons attribuer des valeurs moyenne à chaque classe d'estimation de l'humidité visuelle : BRF très humide : entre 500 et 550 kg/m^3 ; BRF humide : entre 400 et 500 kg/m^3 ; BRF peu humide (BRF frais qui sort du broyeur) : entre 300 et 400 kg/m^3 .

6.1.2 Autres paramètres

L'ajout de fumier conjugué au compostage fait augmenter le pH et l'électro-conductivité. Les teneurs en ions ammoniums ainsi que tous les macronutriments (N, P, K, Mg, Ca) sont également plus importantes. Néanmoins, les taux de MO et de Corg sont moins élevés. Le C/N est donc inférieur au BRF pur. Cette pratique peut donc réduire les risques de faim d'azote. De plus, nous savons grâce à la littérature que les nutriments du fumier, notamment l'azote, sont retenus grâce au BRF, ce qui peut éviter les risques de lixiviation.

On observe que le BRF n° 3 (branche > 7 cm) est plus pauvre en nutriment ce qui confirme ce que l'on trouve dans la littérature. Son C/N est largement supérieur aux autres BRF. Cela confirme qu'il faut éviter de prendre de trop grosses branches pour la création de BRF afin d'éviter les faims d'azote.

Le pH moyen des BRF est neutre à légèrement acide (6,7) ce qui correspond à ce que l'on retrouve dans la littérature. Ce paramètre varie peu d'un BRF à l'autre. Les teneurs moyennes en nutriments sont inférieures à celles analysées dans l'étude belge (Noël and Marche, 2006). Ces teneurs varient surtout quand le diamètre des branches varie également. A l'inverse les teneurs en matière organique et en carbone sont plus élevées à celles analysées dans l'étude belge (en moyenne 97,2 MO% contre 85 MO%). Ces teneurs sont similaires d'un BRF à l'autre (faible écart-type). Néanmoins, il semble que plus les branches utilisées sont grosses, moins elles contiennent de carbone. Le C/N moyen est de 74,4 ce qui rentre dans la plage de valeur relevée dans la littérature (de 50 à 130). Ce dernier est très variable et dépend directement de la taille des branches utilisées.

6.2 Mise en parallèle de l'évolution des stocks de carbone avec le potentiel de ressource en BRF

6.2.1 Exploitation de Thomas Vuillaume

Thomas Vuillaume est capable de produire 9,3 tMS/an de BRF avec ses surfaces boisées. Cela permettrait de combler 21,7 % du déficit. Cet apport annuel permettrait de séquestrer environ 303 t de carbone (à la situation d'équilibre) dans les terres assolées de l'exploitation. Cette pratique lui coûterait environ 800 Fr. par an. Cet apport lui ferait économiser environ 120 Fr./an d'engrais. Pour combler l'entier du déficit avec le BRF, il faudrait planter 5,6 ha de haie (haie cépée à une strate, sans les bandes herbeuses). Ce chantier coûterait à Mr Vuillaume 582'713 Fr.. En plus de cet investissement pharamineux, exploiter cette ressource coûterait 2'860 Fr. par an.

La dose à épandre pour combler le déficit varie de 0,9 tMS/ha/an, ce qui représente un apport de 13 m³/ha tous les trois ans pour la parcelle T7 (monitoring) à 1,42 tMS/ha/an ce qui représente à un apport de 20,5 m³/ha tous les trois ans pour la parcelle T6. L'autre parcelle du monitoring (T1) a besoin d'un apport de 18 m³/ha tous les trois ans pour combler le déficit. Cette même parcelle a un sol silt-argileux donc relativement lourd (argile > 30 %). La parcelle T1 est donc un bon candidat pour l'expérimentation. La parcelle T7 à un sol silt-limoneux ce qui ressemble au type de sol déjà testé. De plus, elle est relativement hétérogène.

Après l'exposition de ces chiffres, on comprend bien que le BRF n'est pas l'unique solution à apporter pour assurer la qualité des sols de cette exploitation. L'exploitation autonome de la ressource existante est néanmoins possible à condition d'entrevoir un investissement coûteux. L'investissement n'est pas l'unique solution. La location peut être également envisager. En plus du BRF issu d'une ressource externe que M. Vuillaume apporte déjà à ces sols, l'utilisation de la ressource existante de son exploitation est intéressante pour combler une partie de son déficit. Si cette pratique convient à l'agriculteur, il peut implanter progressivement de nouvelles haies sur sa SAU, afin d'augmenter cette ressource et diminuer le déficit.

Nos estimations se basent sur un K2 estimé avec la norme de température moyenne sur 30 ans (de 1981 à 2010) qui est de de 8,9 °C à Fahy (station proche de l'exploitation). Or, nous savons que le réchauffement climatique a gagné en intensité ces dernières années. Nous avons effectué ces mêmes calculs avec la température moyenne des dix dernières années (2009-2018) qui est de 9,7 °C, soit pratiquement 1°C de plus. Cette augmentation de température fait augmenter logiquement le coefficient de minéralisation. De ce fait, les déficits sont encore plus élevés. La masse de BRF à apporter est donc supérieure pour arriver au stock recherché, soit de 66 tMS sur l'ensemble de l'exploitation contre 43 tMS auparavant. Ce chiffre devient alors de plus en plus grand et complètement démesuré pour une exploitation de taille moyenne. Le BRF (laissé en paillis) permet de maintenir le sol plus frais. La minéralisation est alors moins importante.

Nous ne connaissons pas la sensibilité du modèle, il faut donc rester prudent sur ce chiffre. De plus la température moyenne sur 10 ans n'est pas assez robuste pour pouvoir tirer des conclusions solides. Nous avons également vu que les sols devenaient de plus en plus secs. La formule du K2 utilisée ne prend pas en compte cet aspect. Un sol sec a une minéralisation plus faible car l'activité des micro-organismes est réduite.

Néanmoins, cela permet de nous rendre compte des impacts du réchauffement climatique. Pour lutter contre ce dernier et limiter son impact, il faut séquestrer du carbone dans les sols. Cette même séquestration devient plus difficile au fur et à mesure que le réchauffement gagne en intensité. Cet exemple illustre le caractère vicieux du processus.

6.2.2 Exploitation de Joan Studer

Joan Studer est capable de produire 28,6 tMS/an (40 tMS/an si l'on compte les arbres isolés) de BRF avec ses surfaces boisées. Cela permettrait de combler 100 % du déficit. Un apport annuel de 5 tMS permettrait de séquestrer environ 210 t de carbone (à la situation d'équilibre) dans les terres assolées de l'exploitation. Cette pratique lui coûterait environ 1'190 Fr. par an s'il exploite les surfaces boisées proches de ses terres assolées. Un apport annuel de 16 tMS permettrait d'atteindre une teneur en matière organique optimal (MO/A = 24 %) ce qui permettrait de séquestrer environ 635 t de carbone (à la situation d'équilibre) dans les terres assolées de l'exploitation. Cette pratique lui coûterait environ 3800 Fr. par an s'il exploite les surfaces boisées proches de ses terres assolées. Aucune haie ne doit nécessairement être plantée.

Pour atteindre un ratio MO/A de 17 %, les doses à apporter varient de 0,264 tMS/ha/an (J7, monitoring) soit un apport de 4 m³/ha tous les trois ans à 0,750 tMS/ha/an (J4) soit 11 m³/ha tous les trois ans. Pour atteindre un ratio MO/A de 24 %, les apports varient de 0,218 tMS/ha/an (J5) soit 3 m³/ha tous les trois ans à 1,87 tMS/ha/an (J4) soit 27 m³/ha tous les trois ans. Les parcelles du monitoring ont besoin d'être amendées avec 22 m³/ha tous les trois ans (J2) et avec 17 m³/ha (J7) tous les trois ans pour atteindre un ratio MO/A de 24 %. La parcelle J7 se prête particulièrement bien à l'expérimentation. En effet, elle a un sol limoneux-sableux (sol léger, argile > 20 %, avec plus de 50 % de sable). De plus, cette dernière possède une forte minéralisation et a du mal à conserver une bonne teneur en matières organiques.

Dans ce cas concret, nous pouvons voir que le BRF est un complément intéressant pour combler les déficits et même arriver aux objectifs de teneur en matières organiques les plus élevés. La ressource disponible est bien supérieure à ce dont l'exploitant a besoin. Dans ce type d'exploitation, la résilience face au changement climatique et la qualité des sols est assurée. Néanmoins si on parle d'autonomie alimentaire au niveau Suisse, le fait d'avoir moins de 20 % de la SAU affectées aux terres assolées ne constitue pas un modèle que tout le monde doit suivre. Nous avons conscience que ce genre de petite exploitation biologique avec une aussi grande proportion de SPB est loin de refléter la majorité des cas. En revanche, cela montre la crédibilité de cet amendement comme ressource organique complémentaire. Si cette exploitation peut produire plus de BRF qu'elle n'en a besoin pour arriver à un stock de carbone optimal il est alors possible d'envisager l'usage du BRF dans d'autres exploitations comme compléments.

Nous avons également réalisé les calculs avec la température moyenne des dix dernières années. M. Studer devrait éprendre sur l'ensemble de ses terres assolées 11 tMS de BRF pour combler le déficit et 25 tMS pour arriver à ratio MO/A de 24 %. L'exploitation est en mesure de répondre à cette demande et cela prouve sa résilience face au réchauffement climatique. Néanmoins, l'effort à fournir pour produire de telle quantité de BRF est conséquent.

6.3 Biais rencontrés

6.3.1 Le modèle Hénin Dupuis

Le modèle Hénin Dupuis est un modèle d'estimation des flux de matière organique à l'échelle d'une parcelle. Comme tout modèle, il possède des faiblesses. Dans notre cas, nous avons surtout repéré les problématiques au niveau des paramètres d'entrée du modèle. Ces biais sont susceptibles de rendre l'estimation moins précise.

Coefficient d'humification

Les premières incertitudes résident dans les coefficients d'humification. Au même titre que le BRF, tous les amendements organiques varient en fonction du matériel de base utilisé pour leur création (type de matière utilisée pour le compostage, nourriture donnée aux bêtes pour l'engrais de ferme, etc...). Les K1 ont été estimés sur la base d'essais en champs. Chaque essai utilise un type de matériel propre à ce dernier. Les coefficients que nous avons tirés des publications sont en réalité des coefficients moyens de plusieurs essais. La variation des amendements organiques est donc prise en compte. Néanmoins, les amendements utilisés par les deux agriculteurs de l'étude sont différents de ceux qui ont servis à l'estimation des K1. Les coefficients d'humification peuvent alors être sous ou surestimés par rapport à la réalité. Si l'on rajoute l'incertitude qu'il réside parfois concernant la différenciation entre les K1(c) et les K1(MOH), ce paramètre peut être sujet à des biais.

Coefficient de minéralisation

Nous avons vu qu'il existait plusieurs formules pour déterminer le K2. Celle que nous avons choisi d'utiliser prend comme paramètre la température moyenne annuelle, la teneur en argile et en CaCO_3 de la parcelle concernée. Pour la température moyenne, il est habituellement pris la norme sur 30 ans. Dans notre cas, cette dernière est la moyenne de la période 1981-2010. Avec le dérèglement climatique, cette température moyenne ne reflète pas ce qui s'est réellement passé les dernières années. C'est pour cela que nous avons voulu illustrer dans la discussion d'autres résultats issus de calculs avec la température moyenne annuelle des dix dernières années. Certaines formules n'utilisent même pas ce paramètre comme celle-ci-dessous (Neyroud, 1997) :

$$(12) K2 = (1.6 - 0.012 \cdot A \%) - (0.002 \cdot (\text{pH}-7) \text{ (si } \text{pH}>7) + 0.005 \cdot \% \text{ sarclées (0 - 40 \%)} - 0.005 \cdot \% \text{ PT (0 - 40 \%)})$$

Nous pouvons voir que les paramètres de cette formule ne comprennent ni la teneur en CaCO_3 , ni la T° moyenne annuelle. En revanche, ils comprennent encore la teneur en argile auquel il faut rajouter le pH, la proportion des surfaces sarclées et de prairies temporaires.

Nous avons procédé au calcul du K2 avec cette nouvelle formule pour comparer les résultats. Chez M. Studer, il en est ressorti que les K2 issus de cette dernière formule sont tous supérieurs aux K2 issus de la formule retenue pour le bilan humique et ce quelque soit la température choisie. Chez M. Vuillaume, les K2 issus de cette dernière formule sont supérieurs (mais proche) aux autres quand il s'agit de la température moyenne annuelle de la norme 1981-2010 et sont inférieurs aux K2 issus de la formule retenue pour le bilan humique quand il s'agit de température moyenne annuelle des dix dernières années.

La température a son importance dans le calcul du K2, c'est ainsi que l'on a choisi d'utiliser cette formule. Néanmoins, il ne faut pas oublier que les mécanismes en jeu sont beaucoup plus complexes et qu'il s'agit d'une estimation.

La teneur en cailloux

Pour rappel, la teneur en cailloux a été estimée de manière visuelle sur le terrain. Ce paramètre est donc en parti subjectif et dépend de l'opérateur qui a pris la mesure. Pour l'ensemble des paramètres, une seule personne a réalisé les mesures ce qui limite les biais.

L'estimation de la teneur en CaCO₃

Comme l'estimation de la teneur en grossier, la teneur en CaCO₃ est estimée de façon subjective par l'intensité de la réaction après avoir déversé de HCl sur la terre fine. Nous avons utilisé comme mesure de vérification les teneurs obtenues dans les analyses composites réalisées par nos soins ou dans le cadre du projet « Terres Vivantes ». Ces mesures concernent 3 parcelles sur l'exploitation de Thomas Vuillaume et 4 parcelles sur l'exploitation de Joan Studer. Dans ces 7 cas nous avons remarqué que le degré de précision de notre estimation était de plus ou moins 6 %. Cette précision nous suffit dans notre cas. De plus, parmi les 5 sondages que nous avons fait pour ces estimations, certains ne sont pas positionnés dans la trajectoire des diagonales. Certaines zones sont plus ou moins carbonatées sur la parcelle, ce qui peut expliquer cet écart entre les deux valeurs. Par exemple la parcelle T7 a une teneur en CaCO₃ plus importante que la valeur obtenue par les analyses composites. Parmi nos cinq sondages, deux d'entre eux sont positionnées dans une zone carbonatée qui n'est pas sur la trajectoire des diagonales. Pour la parcelle J7, les analyses composites nous renseignent que la teneur en CaCO₃ est de 1 %. Nous pensons qu'il s'agit d'une erreur analytique car cette parcelle homogène est positionnée sur des graviers des Vosges, le sol est relativement acide et aucune réaction à HCl ne s'est fait ressentir lors d'observation de terrain.

La profondeur retenue pour estimer les stocks de carbone

La profondeur maximale retenue est de 30 cm. Cette couche représente l'horizon qui contient le plus de matière organique, c'est pourquoi nous avons retenu cette profondeur pour calculer les stocks de carbone. Néanmoins, les prélèvements composites ont été fait jusqu'à 22 cm de profondeur. La concentration en matière organique diminue avec la profondeur. Les stocks de carbone peuvent alors être légèrement surestimés. Cela a pour conséquence que les déficits estimés et les quantités de matière organique supplémentaires à apporter ne sont pas forcément aussi grands qu'en réalité.

6.3.2 Variation des résultats des analyses de sol

Suivant la méthode d'échantillonnage, l'opérateur qui prélève et la procédure utilisée pour les analyses, les résultats peuvent varier d'une analyse à l'autre. Nous avons été confrontés à ce problème puisque nous voulions utiliser les analyses déjà existantes. Malheureusement, selon la législation, les analyses tactiles et visuelles pour la teneur en MO et en argile sont autorisées ce qui n'est pas précis. Les analyses composites PER des agriculteurs que nous avons récupéré comportaient des valeurs aberrantes par rapport à l'observation de terrain. Le tableau n° 21 ci-dessous illustrent ces variations.

Tableau 21 : Comparaisons des analyses de sol des deux exploitations d'études.

		MO (%)							Argile (%)							pH						
		T1	T3	T7	J1	J2	J5	J7	T1	T3	T7	J1	J2	J5	J7	T1	T3	T7	J1	J2	J5	J7
Analyses Composite PER	Prélèvements réalisés par les agriculteurs en 2013 et 2015	4	3,5	3,5	9,1	9,1	13	3,1	21	21	26	17,5	12,5	27,5	27,5	7,1	7,2	7,3	7,3	7,3	6,5	5,9
	Prélèvements réalisés dans le cadre d'projet "TV" (conseillé) ou de l'étude "BRF" (étudiant) en 2019	4,8	4,3	3,4	5,5	5,0	9,5	3,9	32,1	31,6	28,1	36,9	28,1	53,4	16,4	7,1	6,9	7,7	7,2	6,7	7,6	6,1
Analyses de sol externes	Prélèvement réalisé par un étudiant en 2018					4,8							34							6,9		

Si la teneur en MO peut évoluer au cours du temps, ce n'est pas le cas de l'argile. Il existe parmi ces analyses, des résultats qui ne sont pas représentatifs de la parcelle. C'est notamment le cas des analyses issues des prélèvements des agriculteurs qui sous-estiment à chaque fois l'argile. Il y a donc un problème de prélèvement et/ou de méthode.

6.4 Subventionner l'augmentation du carbone dans le sol

En plus de toutes les subventions déjà existantes, les aides pour favoriser la séquestration de carbone, notamment en récompensant les résultats, sont en études. Malheureusement, cette mesure nécessite que les analyses de sol soient fiables et représentatives. En vue du paragraphe précédent, il semble que cette dernière ne peut être mise en place pour le moment. Néanmoins, son application pourrait réellement favoriser la séquestration de carbone dans les sols et permettre à la pratique BRF de faire un bond en avant. Un réel progrès a été fait en proposant un mode de prélèvement composite normé (Deluz, 2017) et en la vulgarisant mais des efforts sont encore à fournir avant de voir apparaître cette mesure prometteuse.

6.5 Zone d'étude

Les deux zones d'études se concentrent uniquement en Ajoie. Cela pose le problème de la représentativité de cette étude. Néanmoins, l'Ajoie est la région la plus ouverte et ressemble au district de Delémont avec un grand bassin de plaine surtout composé de grande culture. L'exploitation de Thomas Vuillaume représente bien les fermes de ces plaines. Delémont est également composé de zones de collines et de montagnes plus riches en bosquets et en forêts au même titre que le district de Franche montagne. L'exploitation d'étude sur la commune de Lucelle représente ces zones.

6.6 Conseils et stratégies à adopter pour les deux exploitations d'études

6.6.1 Exploitation de Thomas Vuillaume

Thomas Vuillaume souhaite augmenter les qualités et la fertilité de ses sols. Pour cela, il utilise du BRF. Une commune lui donne (simplement le prix du transport) un peu moins de 20 tMS de BRF par an. Malheureusement, cette ressource commence à être prisée et Mr Vuillaume ne pourra plus compter sur cette ressource tous les ans. Ce cas est l'exemple parfait pour illustrer qu'il faut pouvoir créer la ressource au sein de son exploitation. Nous conseillons donc à M. Vuillaume d'exploiter le potentiel de ressource en bois raméal de son exploitation qui se chiffre à 9,3 tMS/an. L'investissement est conséquent. Il est possible de louer du matériel ou de sous-traiter cette pratique. L'effort à fournir est selon nous justifié et pertinent quand on regarde le contexte et l'enjeu. En effet, pour moins de 800 Fr. et moins d'une journée de travail, M. Vuillaume pourrait combler plus de 21 % de son déficit sans oublier tous les bienfaits de cet amendement. Néanmoins, cette pratique ne suffira pas à elle seule à combler l'entier du déficit. Thomas Vuillaume doit donc continuer dans ce sens en favorisant des pratiques agricoles de séquestration de carbone comme par exemple réduire le labour, installer des couverts systématiquement, etc... Si l'usage du BRF lui convient, il est possible d'installer de nouvelles haies. Les haies de qualité 2 sont compatibles avec la création de BRF. Nous lui conseillons d'implanter ce type de haie (cf. conseil pour installation de nouvelles haies). L'investissement devient d'autant plus crédible qu'il y a de haies à exploiter. Une potentielle association avec d'autres agriculteurs qui veulent se lancer dans cette pratique est possible et conseillée pour faciliter l'investissement. De plus, il faut être minimum deux personnes pour produire le BRF. Thomas Vuillaume est actuellement seul sur son exploitation.

Nous conseillons également d'essayer de conserver la ressource extérieure en BRF. En effet, nous avons vu que cet amendement a une valeur agronomique et économique plus élevée que le fumier. De ce fait, nous préconisons de payer le BRF afin de l'obtenir face à la concurrence. Thomas Vuillaume achète chaque année du fumier. Dans un futur proche, il sera en mesure de le produire lui-même. Nous conseillons donc d'accorder la valeur du fumier acheté aujourd'hui pour obtenir les futures ressources externes de BRF. En effet, sans cet amendement, les déficits seraient encore plus importants.

Nous préconisons de répartir l'amendement sur l'ensemble de ces parcelles en faisant un cycle de trois ans (un tiers des surfaces de terre assolées amendées chaque année). La taille s'effectue sur un tiers de la surface de ses haies chaque année. Etant donné que le BRF est mélangé au fumier puis composté, les risques de faim d'azote sont minimes. En effet, cet amendement a été analysé durant l'étude et son C/N est peu élevé. Néanmoins, nous préconisons quand même de réaliser l'épandage à l'automne sur un couvert ou un engrais vert qui est broyé avant l'installation d'une nouvelle culture, comme par exemple entre le blé d'automne et la betterave. Le labour dans l'année qui suit l'épandage n'est pas conseillé pour éviter d'enfuir la matière organique. Ces apports devraient limiter l'érosion et les phénomènes de battance observés sur le terrain.

6.6.2 Exploitation de Joan Studer

M. Studer est déjà équipé pour la création de BRF. Nous lui préconisons de créer les 15 tMS/an qu'il a besoin pour viser l'objectif de qualité maximale. Ces 15 tMS de bois raméal nécessaires sont disponibles dans les zones proches des TA. Pour limiter les coûts de transport, nous lui conseillons d'exploiter en priorité ces zones. Les parcelles J1, J2, J4 et J7 sont à amender en premier lieu car elles perdent les plus grandes quantités de carbone (entre 100 et 330 kg Corg/ha/an). Les autres sont soit proches de la situation d'équilibre (J3 et J6) soit en augmentation (J5). Le surplus de ressource de bois raméal disponible peut être exploité afin de créer du BRF destiné à être vendu. Néanmoins, avec un mode de production de moyenne capacité, le prix de revient du BRF est assez élevé. Il sera difficile de trouver preneur dans le secteur agricole. L'excédentaire peut être exploité directement par d'autre exploitant afin de valoriser cette ressource, surtout pour les haies les plus lointaines des TA.

Nous préconisons de tailler 1/3 de la surface boisée tous les ans afin de créer du BRF et de l'épandre sur 1/3 des TA déficitaires pour créer une rotation équilibrée. Pour certaines parcelles, il est possible d'amender tous les 6 ans pour éviter de se retrouver à épandre des doses insignifiantes (4 m³/ha sur J5 par exemple).

Nous conseillons de placer cet amendement plutôt en début de rotation après les PT entre un maïs et un méteil de printemps constitué de légumineuses. L'épandage se déroule en automne après la récolte du maïs. M. Studer ne plante actuellement aucun couvert. Nous préconisons de semer un couvert riche en légumineuse en même temps que l'apport de BRF, qui sera broyé sur place avant de semer le méteil de printemps. Un apport de lisier est également possible lors du premier épandage pour réduire le risque de faim d'azote.

6.7 Points à retenir

Concernant les exploitations de l'étude :

- **Au sein de l'exploitation de Thomas Vuillaume :**
 - La ressource existante en bois raméal sur l'exploitation de M. Vuillaume (9,6 tMS), permettrait de **combler 21,7 % du déficit** (43 tMS). Cet apport annuel permettrait de **séquestrer environ 303 t de carbone** (à la situation d'équilibre) dans les terres assolées de l'exploitation.
 - Les doses à apporter sur l'exploitation de M. Vuillaume pour combler le déficit (MO/A = 17 %) varient **de 13 m³/ha à 20,5 m³/ha tous les trois ans**.
 - La valorisation des 9,3 tMS de bois raméal coûterait **800 Fr.** et demanderait **7h30min** de main d'œuvre, ce qui fait un coût moyen de la pratique BRF (production, transport et épandage) de **17,80 Fr./m³**. Cet apport lui ferait économiser environ **120 Fr./an d'engrais**.

- Par comparaison, il faudrait qu'il achète environ 650 Fr./an de fumier bien décomposé (sans le transport et l'épandage) pour obtenir le même résultat (contre seulement 517 Fr. pour la simple production de ces 9,6 tMS de BRF).
- **Au sein de l'exploitation de Joan Studer :**
 - La ressource existante en bois raméal sur l'exploitation de M. Studer permettrait de combler **100 % du déficit** (MO/A = 17%). Un apport annuel de **5 tMS** permettrait de séquestrer environ **210 t de carbone** (à la situation d'équilibre) dans les terres assolées de l'exploitation. Cette pratique lui coûterait environ **1'190 Fr. par an** s'il exploite les surfaces boisées proches de ses terres assolées.
 - Un apport annuel de **16 tMS** permettrait **d'atteindre une teneur en matière organique optimal** (MO/A = 24 %) ce qui permettrait de séquestrer environ **635 t de carbone** (à la situation d'équilibre) dans les terres assolées de l'exploitation. Cette pratique lui coûterait environ **3800 Fr. par an** s'il exploite les surfaces boisées proches de ses terres assolées.
 - Pour arriver aux teneurs en matières organiques optimales (MO/A = 24 %) au sein de l'exploitation de M. Studer, il faut faire des apports de **3 m³/ha à 27 m³/ha tous les trois ans**.
 - La valorisation des **28,7 tMS** de bois raméal coûterait **7'500 Fr.** et demanderait **112 h** de main d'œuvre, ce qui fait un coût moyen de la pratique BRF (production, transport et épandage) de **49,40 Fr./m³** pour les zones proches de l'exploitation et **68,70 Fr./m³** pour la zone plus lointaine.

Particularité du BRF :

- **Economie :**
 - La production (taille de branches et broyage) de BRF coûte environ **11,60 Fr./m³ (soit 55,75 Fr./tMS)** avec un broyeur de **grande capacité** (150 à 300 m³ de branches/heure en capacité de pointe) contre **39,46 Fr./m³ (soit 189,71 Fr./tMS)** avec un broyeur de **moyenne capacité** (30 à 80 m³ de branches/heure en capacité de pointe).
 - Issu d'un mode de production de **grande capacité**, le BRF a un prix de revient **18 % moins cher que le fumier de bovin bien décomposé**.
 - Avec un système de **grande capacité** on peut produire environ **20 m³/h** (avec deux personnes, soit **10 m³/heure de MOh**) contre **4,5 m³/h** (avec trois personnes, soit **1,5 m³/heure de MOh**) avec un système de **moyenne capacité**.
 - L'**investissement** lié à la création de BRF (taille et broyage) est d'environ **51'000 Fr. pour le système de grande capacité** et d'environ **29'000 Fr. pour le système de moyenne capacité**.
 - Les bords de forêts, les pâturages boisés et les arbres isolés sont des sources de bois raméal présents dans le paysage agricole Suisse.
 - Le BRF a une **valeur fertilisante** d'environ **12,50 Fr./tMS**.
 - Le carbone que permet de séquestrer **1 tMS de BRF** équivaut à **61 Fr. de compensation CO₂** (en utilisant l'estimation du GIEC).

- **Valeur agronomique des BRF analysés :**
 - Les **BRF** ont en moyenne le **même potentiel de séquestration** de carbone que le **fumier de bovin bien décomposé** (si on se base sur le K1).
 - Le **mélange du BRF avec du fumier de bovin** permet d'avoir un **C/N inférieur au matériel de base**, ce qui peut être intéressant pour **lutter contre la faim d'azote**. Les teneurs en nutriments sont plus élevées. D'après la littérature, le mélange des deux amendements permettrait de réduire la lixiviation des nitrates du fumier. Il s'agit de vérifier si le mélange ne diminue pas le pouvoir de séquestration de carbone du BRF.
 - Les BRF analysés contiennent en moyenne **6,57 kg/tMS d'azote, 0,072 kg/tMS de phosphore, 2,486 kg/tMS de potassium, 0,6 kg/tMS de magnésium et 11,354 kg/tMS de calcium**.
 - Ils ont un **C/N moyen de 74,4**, un **pH moyen de 6,7**, une teneur moyenne en **MO de 97,2 %** et un **taux moyen de matière sèche de 49,4 %**.

- **Masse volumique :**
 - La **masse volumique du BRF sec (MS)** varie très peu. Nous pouvons donc affirmer qu'elle est en moyenne **comprise entre 200 et 210 kg/m³**. Ce paramètre est important pour l'étude de viabilité et le bilan humique.
 - La **masse volumique du BRF (MF)** varie beaucoup en fonction de la teneur en eau. Avec une simple appréciation visuelle et tactile, l'agriculteur est capable d'obtenir une valeur de la masse volumique de l'amendement grâce au classe suivante : **BRF très humide : entre 500 et 550 kg/m³ ; BRF humide : entre 400 et 500 kg/m³ ; BRF peu humide (BRF frais qui sort du broyeur) : entre 300 et 400 kg/m³**.

Haies et autres espaces boisés :

- Les **haies et bosquets** peuvent **produire en moyenne 17 m³** (soit environ 3,53 tMS, bandes herbeuse comprises) de **BRF par ha**.
- Les **taillis à courte rotation** peuvent être une option intéressante puisque ce mode de production peut **produire de 3 à 5 fois plus de biomasses** (branches et rameaux) qu'une haie ou un bosquet.
- L'installation d'une nouvelle haie coûte environ **104'000 Fr./ha**.
- Les OPD **subventionnent 2'840 Fr./ha/an** pour cette SPB (qualité 2).

6.8 Conseil pour l'installation de nouvelles haies dans l'optique de créer du BRF

L'installation de nouvelles haies sur son exploitation peut être une solution pour augmenter son potentiel de production en bois raméal. Nous avons vu que les contributions liées à ces espaces sont précieuses et peuvent permettre de compenser les coûts d'installation et d'entretien. Nous conseillons alors de respecter les critères de qualité 2 car il n'empêche pas la valorisation de bois raméal. La contribution de mise en réseau n'est pas impossible, en revanche les bandes doivent faire minimum 5 mètres de large de part et d'autre de la haie. La surface agricole consacrée à cette espace est alors conséquente.

Hormis la production de biomasse, la haie doit favoriser la biodiversité. Néanmoins, nous avons pu constater sur le terrain que les haies qui étaient les plus productives étaient également celles qui contenaient le moins de biodiversité (observation empirique). En effet, les surfaces les plus

productives sont les haies de type taillis avec peu d'espèces fleuries. Nous avons vu que la taille favorisait la production de bois au détriment des autres organes. Nous conseillons alors d'installer des haies type taillis à deux strates avec des arbustes buissonnants qui reviennent rapidement en fleurs après une taille, comme par exemple le chèvrefeuille. Il faut également planter une proportion d'arbres et d'arbustes de fort développement. Ce type de haie est selon nous le bon compromis pour permettre une production de biomasse optimale en bois raméal mais également favoriser la biodiversité.

6.9 Recommandations pour la « Fondation Rurale Interjurassienne »

Le coût de la pratique « BRF », notamment celui du broyage, peut être un frein à l'utilisation de cette dernière. En effet, nous avons vu que certains agriculteurs n'étaient pas prêts à acheter ou créer cet amendement. La mise en place d'un service de broyage cantonal pour les exploitants permettrait de valoriser le potentiel en bois raméal existant et d'aider les praticiens à se lancer dans cette pratique. Des quotas de volume de branches à broyer doivent être mis en place en fonction de la taille de l'exploitation et des haies disponibles. Ceux qui possèdent plus de haie que nécessaire peuvent fournir la ressource à d'autres exploitations voisines. Ce service de broyage est un levier pour faire connaître cette pratique. Une fois que les exploitants auront pris en main cet amendement, le BRF deviendra un intrant organique incontournable au même titre que le fumier actuellement. De ce fait, les fermes s'équiperont au fur et à mesure pour créer des quantités supérieures aux quotas.

La FRI doit encourager les agriculteurs à se regrouper, car nous avons vu que l'investissement seul dans ce genre de matériel est difficile. De plus, le matériel n'est pas suffisamment utilisé pour l'amortir au sein d'une seule exploitation.

Les agriculteurs doivent être guidés et conseillés pour que cette pratique soit correctement effectuée. Ils doivent apprendre à estimer le potentiel de production en bois raméal qu'ils peuvent valoriser afin de se rendre compte ce que cela représente. Ils doivent également apprendre comment bien utiliser cet amendement afin de limiter les risques et d'éviter les découragements. Les outils de vulgarisation sont alors essentiels.

Nous avons vu que les haies et les bosquets avaient un rôle essentiel dans l'espace agricole. Nous préconisons de continuer à encourager leur installation au sein des exploitations.

Partie VIII : Proposition d'expérimentation pour le projet « Terres Vivantes »

7.1 Sur l'exploitation de Thomas Vuillaume

7.1.1 Parcelle choisie

Les deux parcelles du monitoring sont la T1 et T7. Nous avons vu que T1 est relativement homogène et que T7 plutôt hétérogène. L'hétérogénéité de T7 est marquée d'est en ouest (profond, peu pierreux à l'est et peu profond avec beaucoup de grossier à l'ouest). Les unités expérimentales devront être sous forme de bande perpendiculaire à la variation. Elles devront donc être positionnées d'est en ouest afin d'avoir tout le gradient de variation sur chaque unité expérimentale. A l'issue du bilan humique, nous avons pu voir que T1 est proche de la teneur en matière organique recherchée mais qu'elle perd une grande proportion de MO chaque année. Nous chercherons donc à vérifier si le BRF permet de maintenir le statut organique de cette parcelle voire de l'augmenter. Le sol de cette dernière est « Silt-argileux ». En ce qui concerne T7, elle est loin de l'objectif mais proche de la situation d'équilibre. Nous pourrions vérifier si l'apport de BRF permet l'augmentation de la teneur en MO escomptée. Le sol de cette parcelle est « Silt-limoneux ».

7.1.2 Modalités à mettre en place

▪ Parcelle T1 :

Il faut 1,23 tMS/ha/an de BRF pour atteindre le stock cible (MO = 17 % de masse en argile) soit un apport de 3,7 tMS/ha tous les trois ans (environ 18 m³/ha). Nous aurons donc 4 modalités :

- Apport de BRF pur à raison de 3,7 tMS/ha tous les trois ans,
- Apport de mélange BRF/fumier de M. Vuillaume à raison de 3,7 tMS/ha (quantité avant compostage) tous les trois ans,
- Apport de fumier pur à raison de 3,7 tMS/ha tous les trois ans.
- Zone témoin : pas d'amendement

Ces 4 modalités doivent être répétées 2 fois ce qui est peu mais suffisant pour éviter d'être trop contraignant pour l'exploitant. Il y a donc 8 blocs expérimentaux de 35 ares chacun.

▪ Parcelle T7 :

Il faut 0,90 tMS/ha/an de BRF pour atteindre le stock cible (MO = 17 % de masse en argile) soit un apport de 2,7 tMS/ha tous les trois ans (environ 13 m³/ha). Nous aurons donc 4 modalités :

- Apport de BRF pur à raison de 2,7 tMS/ha tous les trois ans,
- Apport de mélange BRF/fumier de M. Vuillaume à raison de 2,7 tMS/ha (quantité avant compostage) tous les trois ans,
- Apport de fumier pur à raison de 2,7 tMS/ha tous les trois ans,
- Zone témoin : pas d'amendement.

Ces 4 modalités doivent être répétées 2 fois ce qui est peu mais suffisant pour éviter d'être trop contraignant pour l'exploitant. Il y a donc 8 blocs expérimentaux de 50 ares chacun.

L'expérimentation à une demande en BRF de 7,9 tMS de BRF tous les trois ans (soit environ 40 m³). Cette ressource est actuellement disponible.

7.2 Sur l'exploitation de Joan Studer

7.2.1 Parcelle choisie

Les parcelles J2 et J7 sont retenues pour le monitoring. Les deux sont relativement homogènes. J2 est loin de l'objectif visé (MO%) mais elle perd peu de matière organique. Nous pourrions ainsi observer si l'ajout de BRF permet l'augmentation de la teneur en MO escomptée. Le sol de cette parcelle est « silt-Limoneux ». J7 est proche de l'objectif mais elle perd beaucoup de MO. Malgré qu'elle soit proche de l'objectif elle constitue la parcelle la moins fertile. Nous pourrions vérifier si l'apport de BRF permet de conserver cette teneur en MO ainsi qu'augmenter la fertilité de cette parcelle. Le sol de cette dernière est « limon-sableux ».

7.2.2 Modalités à mettre en place

▪ Parcelle J2 :

Il faut 1,51 tMS/ha/an de BRF pour atteindre le stock cible (MO = 24 % de masse en argile) soit un apport de 4,5 tMS/ha tous les trois ans (environ 22 m³/ha). Nous aurons donc 3 modalités :

- Apport de BRF pur à raison de 4,5 tMS/ha tous les trois ans,
- Apport de compost de fumier à M. Studer à raison de 4,5 tMS/ha tous les trois ans,
- Zone témoin : pas d'amendement.

Ces 3 modalités doivent être répétées 2 fois ce qui est peu mais suffisant pour éviter d'être trop contraignant pour l'exploitant. Il y a donc 6 blocs expérimentaux de 25 ares chacun.

▪ Parcelle J7 :

Il faut 1,19 tMS/ha/an de BRF pour atteindre le stock cible (MO = 24 % de masse en argile) soit un apport de 3,6 tMS/ha tous les trois ans (environ 18 m³/ha). Nous aurons donc 3 modalités :

- Apport de BRF pur à raison de 3,6 tMS/ha tous les trois ans,
- Apport de compost de fumier à M. Studer à raison de 3,6 tMS/ha tous les trois ans,
- Zone témoin : pas d'amendement.

Ces 3 modalités doivent être répétées 2 fois ce qui est peu mais suffisant pour éviter d'être trop contraignant pour l'exploitant. Il y a donc 6 blocs expérimentaux de 15 ares chacun.

L'expérimentation à une demande en BRF de 3,3 tMS de BRF tous les trois ans (soit environ 16 m³). Cette ressource est actuellement disponible puisqu'elle correspond environ à ce que produit M. Studer chaque année.

7.3 Vérification des valeurs de production de biomasse de la charte

Il s'agit de vérifier si les valeurs indiquées sur la charte sont correctes. Pour cela, il faut prendre chaque type de haie et les tailler. Trois ans plus tard, on les taille à nouveau et on en déduit la production de biomasse annuelle de la haie. Ces estimations peuvent être faites sur un tronçon de 10 mètres. Nous préconisons de répéter deux fois la mesure sur deux haies différentes par catégories de la charte.

7.4 Suivi et prise de mesures

Pour suivre l'évolution de la teneur en matière organique, nous préconisons de faire un prélèvement composite en suivant les recommandations de prélèvement pour chaque bloc. Pour évaluer la densité apparente du sol, nous préconisons de prendre 5 échantillons sur chaque bloc. La RU est évaluée sur ces échantillons. Ces échantillonnages seront pris au « temps t0 » (avant le premier apport), au

« temps t+3 » (avant de renouveler le deuxième apport), au « temps t+6 » (avant de renouveler le troisième apport) et au « temp t+9 ».

Le rendement ainsi que les observations de terrain (état de la culture, adventices) sont réalisés chaque année.

Le projet « Terres Vivantes » dure 6 ans avec 2 ans supplémentaires de suivi scientifique, ce qui va permettre d'interpréter les 3 premières mesures.

Conclusion

Dans ce travail sur le BRF, un état de la recherche sur le sujet a d'abord été présenté. Dans la majorité des cas, les études ont conclu sur un effet positif de cet amendement pour le sol et les cultures à condition de l'utiliser correctement. Il faut rester prudent sur certains aspects car la majorité des informations à ce sujet proviennent de littérature grise. Il découle de cette recherche bibliographique : (1) cet amendement est utilisé depuis longtemps mais c'est réellement à partir des années 1970 que les scientifiques se sont intéressés à lui pour sa faculté à restaurer la fertilité des sols. (2) Les BRF n'ont pas connu un grand succès mais commencent depuis peu à être utilisés de façon moins marginale en culture spéciale ainsi que dans les collectivités et ce grâce à un engouement grandissant pour cette ressource (3) Le rejet de cet amendement par l'agriculture peut être expliqué par (i) la difficulté pour trouver la ressource, (ii) la difficulté de mettre en place cette pratique et (iii) un intérêt d'usage de cette matière qui n'est pas suffisamment démontré par rapport à d'autres amendements. (4) Les BRF sont riches en carbone aussi bien sous forme de longs polymères (lignine, cellulose, etc...) que de molécules plus simples (sucre, protéine, etc...). (5) Il semble que cet amendement soit capable de former une grande proportion de sa masse en humus stable. (6) L'apport de BRF sur le sol permettrait (i) de réactiver les mécanismes de pédogénèse et d'aggradation de ce dernier, (ii) de lutter contre l'érosion, (iii) d'augmenter le pH, la disponibilité de l'eau et des nutriments du sol, (iv) de limiter l'impact des adventices. (7) Les bienfaits sur les cultures se résument par (i) l'augmentation de la résistance face au stress externe, (ii) il en résulte une augmentation de rendement. (8) La principale problématique liée à cet amendement est la faim d'azote qui peut apparaître lors des premiers épandages. (9) L'intégration dans la rotation en grande culture est possible et ne demande pas de grande modification au parc matériel ainsi qu'au pratique habituel. (10) Les doses habituellement testées tournent autour des 100 m³/ha ce qui représentent un apport conséquent.

Nous avons mis en évidence le manque de ressource organique pour alimenter l'agriculture dans le monde et en Suisse. Nous avons montré au combien les pratiques favorisant la séquestration de carbone dans le sol sont une nécessité pour réduire l'impact du réchauffement climatique et augmenter la résilience du système agricole. Nous savons maintenant que les bois raméaux fragmentés constituent une ressource complémentaire aux autres amendements utilisés en pratique. Néanmoins, cette ressource est limitée et intégrer cette nouvelle pratique au sein du système grande culture est délicat. C'est au sein même de l'exploitation qu'il est conseillé de créer cet amendement. Le coût de cette pratique et les moyens humains demandés peuvent être un frein à son utilisation.

Ce travail s'est donc articulé autour de divers questionnements soulevés par la partie bibliographique et l'approche de terrain. Nous nous sommes fixés les objectifs suivants : (1) évaluer le potentiel d'amélioration du statut organique des sols par le BRF dans deux exploitations agricoles jurassiennes, notamment par, (i) la réalisation de bilans humiques permettant de mettre en évidence les déficits au niveau de chaque parcelles et de l'exploitation, (ii) l'estimation du potentiel de production en bois raméal des espaces boisés des deux exploitations, notamment grâce à la création d'une charte, (iii) l'analyse de BRF indigène pour caractériser cette matière organique, évaluer les paramètres physiques et chimiques de cet amendement. (2) Réaliser une étude agroéconomique complète pour juger de la viabilité et de faisabilité d'une telle pratique, notamment en calculant les coûts opérationnels de deux modes de production (3) Proposer des outils de vulgarisation afin d'aider les agriculteurs à intégrer cette pratique au sein de leur exploitation.

Nous avons vu dans cette étude que le BRF avait sa place dans l'agriculture jurassienne et notamment en grande culture. Nous avons pu observer qu'il peut permettre de combler une partie des déficits de matière organique des sols agricoles. Il peut même dans certains cas permette d'arriver aux teneurs

de matières organiques optimales pour les exploitations les plus avancées dans le domaine et les mieux pourvues en haies. Cette étude a montré que les doses testées dans la bibliographie sont beaucoup trop importantes que ce qu'ont réellement besoin les sols. Les apports nécessaires pour combler les déficits ou arriver au stock optimal de carbone organique sont majoritairement compris entre 10 et 30 m³/ha tous les trois ans ce qui représente 3 à 5 fois moins que les quantités mises en avant par la littérature. Cet aspect permet de redonner de la crédibilité à cette pratique.

Au niveau économique, le prix de revient avec un mode de production de grande capacité, n'est pas forcément plus élevé que d'autres amendements utilisés dans le Canton. Certains gains et avantages de cette pratique ont pu être chiffrés. Les bois raméaux fragmentés ont une valeur agronomique qui n'est pas négligeable.

Ces études de cas au sein d'exploitations utilisant déjà cet amendement nous ont permis de voir que l'usage du BRF en grande culture est envisageable. Les exploitants précurseurs à l'échelle du Canton sont des exemples qui peuvent servir de levier. Le projet « Terres Vivantes » va permettre d'implanter cette innovation technique dans le monde agricole jurassien. Les outils de vulgarisation vont servir à faciliter la diffusion de cette pratique. Le bois raméal fragmenté a toute sa place dans le système agricole Suisse qui contribue à promouvoir ce genre de pratique notamment grâce à de précieuses subventions. Les contributions pour la séquestration de carbone ne sont pas encore au goût du jour, mais pourraient bien être une mesure favorisant l'essor de la pratique BRF.

L'expérimentation qui va être lancée pourra apporter certains éléments de réponse : (1) une quantité inférieure à 100 m³/ha est-elle en mesure de prodiguer les avantages identifiés dans la littérature ? (2) Les doses d'amendement estimées grâce au bilan humique permettent-elles d'arriver à l'augmentation de la teneur en matière organique escomptée sur différents types de sol ? (3) L'intégration dans la rotation de cet amendement pose-t-il des problèmes comme (i) la faim d'azote, (ii) des problèmes phytosanitaires. (4) Existe-t-il des augmentations de rendement et au bout de combien d'année après les apports ?

Bibliographie

- Agridea, 2019. Mémento agricole.
- Agridea, 2018. Mémento agricole.
- Altwegg, D., Weibel, F., 2015. L'utilisation du sol en Suisse Exploitation et analyse. l'Office fédéral de la statistique (OFS), Neuchâtel.
- Asselineau, E., Domenech, G., 2007. De l'arbre au sol, les bois raméaux fragmentés, Rouergue. ed. France.
- Barthès, B.G., Manlay, R.J., Porte, O., 2010. Effets de l'apport de bois raméal sur la plante et le sol: une revue des résultats expérimentaux. *Cah. Agric.* 19, 280–287. <https://doi.org/10.1684/agr.2010.0412>
- Baveye, P., Berthelin, J., Tessier, D., Lemaire, G., 2018. The “4 per 1000” initiative: A credibility issue for the soil science community? *Geoderma* 309, 118–123. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.05.005>
- Benz, R., Jucker, P., Koller, N., Kuchen, S., Marebdaz Guignet, E., Mulhauser, G., Schiess-Bühler, C., 2015. Comment planter et entretenir les haies.
- Blasing, T.J., 2016. Recent greenhouse gas concentrations. *Environ. Syst. Sci. Data Infrastruct. Virtual Ecosyst. Carbon Dioxide Inf. Anal. Cent. CDIAC Oak Ridge Natl. Lab. ORNL Oak Ridge TN U. S. USDOE Off. Sci. SC Biol. Environ. Res. BER SC-23.* <https://doi.org/10.3334/CDIAC/atg.032>
- Boiffin, J., Zagbahi, J.K., Sebillotte, M., 1986. Systèmes de culture et statut organique des sols dans le Noyonnais: application du modèle de Hénin-Dupuis 11.
- Boivin, P., Brunet, D., Gascuel-Oudou, C., 1990. Densité apparente d'échantillon de sol: méthode de la poche plastique. *Bulletin du GFHN* 28–71.
- Boivin, P., Schäffer, B., Sturny, W., 2009. Quantifying the relationship between soil organic carbon and soil physical properties using shrinkage modelling. *Eur. J. Soil Sci.* 60, 265–275.
- Broyeur de branches sur Tracteur : XYLOCHIP 200T [WWW Document], 2019. . Rabaud. URL <https://www.rabaud.com/fr/materiels/broyeur-de-branches/broyeur-de-branches-sur-tracteur-xylochip-200t.html?filier=forestiere> (accessed 8.12.19).
- Callet-Bois, D., Weiss, B., Benz, R., Stäheli, B., 2018. Promotion de la biodiversité dans l'exploitation agricole.
- Campbell, E.E., Paustian, K., 2015. Current developments in soil organic matter modeling and the expansion of model applications: a review. *Environ. Res. Lett.* 10, 123.
- Ceballos, G., Ehrlich, P.R., Barnosky, A.D., García, A., Pringle, R.M., Palmer, T.M., 2015. Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Sci. Adv.* 1, 6. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1400253>
- Céline Gilli, 2012. Le bois raméal fragmenté (BRF). *Agroscope Chang.-Wädenswil ACW* 2.
- Chambres d'agriculture France, 2015. Haies bocagères - Chambres d'agriculture.
- Christian Gazzarin, 2018. Coûts machines 2018 (No. N°243/2018). Confédération Suisse, département fédéral de l'économie, de la formation et de la recherche DEFR, Agroscope, Suisse.
- Christopher, J., 2016. The 2015 Paris climate change conference: COP21. *Sci. Prog.* 99, 97. <https://doi.org/https://doi.org/10.3184/003685016X14528569315192>
- Collaud, G., 2014. Production végétale: Calculer les rendements en humus. *Rev. UFA* 11, 14.
- Compteco2, 2018. Pourquoi donner un prix au CO2 ? - Compte CO2 [WWW Document]. Compteco2. URL <https://www.compteco2.com/article/pourquoi-un-prix-au-co2/> (accessed 8.13.19).
- Confédération Suisse, 2005. Ordonnance sur la réduction des risques liés à l'utilisation de substances, de préparations et d'objets particulièrement dangereux.

- Cotrufo, M.F., Wallenstein, M.D., Boot, C.M., Deneff, K., Paul, E., 2013. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Glob. Change Biol.* 19, 988–995.
- COUETTE, A.-C., 2011. Les Journées Paysannes, l’humus : quantité et qualité [WWW Document]. *Journ. Paysannes*. URL <http://www.journees-paysannes.org/L-humus-quantite-et-qualite.html> (accessed 1.1.19).
- CRSNG, 2004. La vulgarisation scientifique : Comment bien vulgariser.
- DELAUNOIS, A., FERRIE, d’Yves, BOUCHE, M., COLIN, C., RIONDE, C., 2008. Guide pour la description et l’évaluation de la fertilité des sols destiné aux agriculteurs et aux agronomes.
- Deluz, C., 2017. Évaluation de la teneur en matière organique du sol d’une parcelle cultivée: Quel échantillonnage pour quel objectif? (Thèse de bachelor). Hepia, Suisse.
- Diss, C., 2017. Agriculture de conservation La Suisse veut rémunérer l’humus [WWW Document]. *Terre-Net*. URL <https://www.terre-net.fr/observatoire-technique-culturelle/strategie-technique-culturelle/article/la-suisse-veut-remunerer-l-humus-217-126655.html> (accessed 11.10.18).
- Dodelin, B., Eynard-Mach, R., Athanaze, P., André, J., 2007. Les rémanents en foresterie et agriculture: les branches, matériaux d’avenir. Lavoisier, France.
- Dupla, X., 2018. FARMING AGAINST CLIMATE CHANGE Assessment of potential carbon sequestration in arable land topsoil - Geneva Canton (Thèse de bachelor). Hepia, Suisse.
- EASAC, 2018. Negative emission technologies: What role in meeting Paris Agreement targets? (No. 35). German National Academy of Sciences, Germany.
- Faessler, J., Gallay, D., Lachal, B.M., 2009. Métabolisme agricole franco-valdo-genevois: état des lieux et synthèse. *Unige, VIRAGE*; 7 77.
- FAO, 2018. Estimation des émissions dans le secteur AFOLU | Le Projet d’atténuation du changement climatique dans l’agriculture (MICCA) | Organisation des Nations Unies pour l’alimentation et l’agriculture [WWW Document]. URL <http://www.fao.org/in-action/micca/knowledge/emission/fr/> (accessed 10.12.18).
- Félix, G.F., Clermont-Dauphin, C., Hien, E., Groot, J.C., Penche, A., Barthès, B.G., Manlay, R.J., Tiftonell, P., Cournac, L., 2018. Ramial wood amendments (*Piliostigma reticulatum*) mitigate degradation of tropical soils but do not replenish nutrient exports. *Land Degrad. Dev.* 29, 2694–2706.
- Fietier, A., Scherrer, L., 2018. Terres Vivantes Demande de soutien. FRI, Jura, Suisse.
- France bois forêt, Interprofession nationale de la filière forêt-bois, 2013. Le bois, la première des énergies renouvelables [WWW Document]. *Obs. Économique*. URL <http://observatoire.franceboisforet.com/> (accessed 12.1.18).
- FRI, 2015. L’agriculture dans le Jura [WWW Document]. *Fond. Rurale Interjurassienne*. URL <https://www.frij.ch/LA-FRI/Portrait/Lagriculture-en-terre-JU> (accessed 8.8.19).
- Girard, M.-C., Walter, C., Rémy, J.-C., Berthelin, J., Morel, J.-L., 2005. Sols et Environnement. Cours et Etudes de cas. Dunod, coll, Sciences Sup.
- Giraud-Héraud, L., 2016. La résilience des exploitations agricoles (Phase 1 de recherche, approche à partir d’un échantillon d’exploitations en France de 2000 à 2009), Université de la Méditerranée. ed. Aix-Marseille.
- Hansen, K., 2008. Water vapor confirmed as major player in climate change. National Aeronautics and Space Administration (NASA), USA.
- Ined, 2018. Croissance démographique [WWW Document]. Ined - Inst. Natl. D’études Démographiques. URL <https://www.ined.fr/fr/lexique/croissance-demographique/> (accessed 10.26.18).
- INRA, 2015. Le phosphore : une ressource limitée et un enjeu planétaire pour l’agriculture du

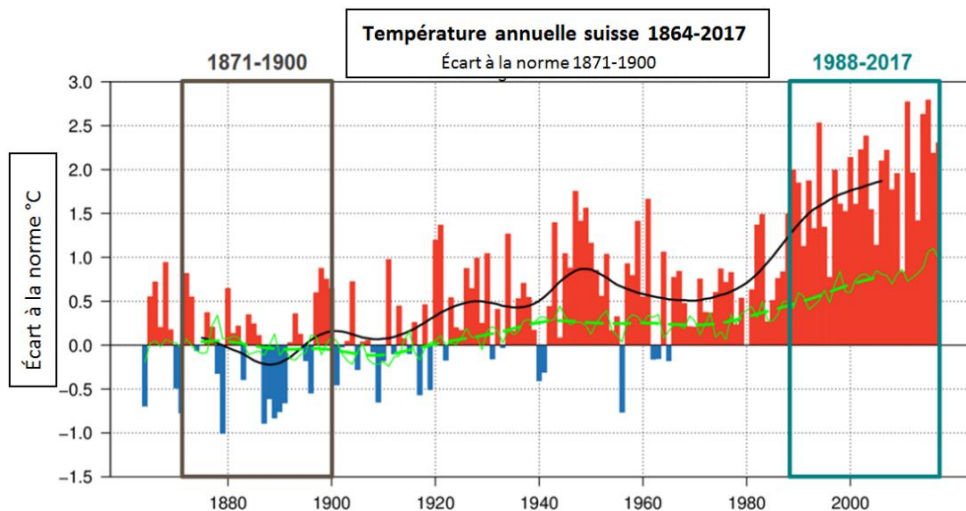
- 21ème siècle [WWW Document]. URL <http://www.inra.fr%2FChercheurs-etudiants%2FSystemes-agricoles%2FToutes-les-actualites%2FLe-phosphore-une-ressource-limitee-et-un-enjeu-planetaire-pour-l-agriculture-du-21eme-siecle> (accessed 11.15.18).
- INRA, 2002. Les haies : Evolution du linéaire en France depuis quarante ans [WWW Document]. URL <http://www7.inra.fr/dpenv/pointc46.htm> (accessed 12.5.18).
- IPCC, 2019. Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in (No. 50). Genève, Suisse.
- IPCC, 2018. GLOBAL WARMING OF 1.5 °C an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. UK.
- Jancovici, J.-M., 2018. Cesser rapidement d'émettre des gaz à effet de serre suffirait-il à tout arrêter ? [WWW Document]. URL <https://jancovici.com/changement-climatique/predire-lavenir/cesser-rapidement-demettre-des-gaz-a-effet-de-serre-suffirait-il-a-tout-arreter/> (accessed 11.7.18).
- Koga, N., Tsuji, H., 2009. Effects of reduced tillage, crop residue management and manure application practices on crop yields and soil carbon sequestration on an Andisol in northern Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.* 55, 546–557. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172861>
- Kögel-Knabner, I., Amelung, W., 2014. Dynamics, chemistry, and preservation of organic matter in soils. Elsevier 157.
- KUPFER, J., 2018. Impact des pratiques biodynamiques sur la qualité des sols (Thèse de bachelor). Hepia, Genève.
- Kupper, T., Fuchs, J., 2007. Compost et digestat en Suisse. Off. Fédéral L'environnement OFEV Off. Fédéral L'énergie OFEN Off. Fédéral L'agriculture OFAG 126.
- LABOUBEE, C., 2007. Retour au sol des matières organiques nécessaire a leur maintien en état en sols agricoles. ARVALIS, France.
- Larochelle, L., 1994. L'IMPACT DU BOIS RAMÉAL FRAGMENTÉ SUR LA DYNAMIQUE DE LA MÉSOFAUNE DU SOL. Univ. LAVAL Fac. For. Géomat. Dép. Sci. Bois For. 68.
- Le Roux, X., Barbault, R., Baudry, J., Burel, F., Doussan, I., Garnier, E., Herzog, F., Lavorel, S., Lifran, R., Roger-Estrade, J., 2008. Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies. INRA Minist. L'Écologie L'Énergie Dév. Durable Aménage. Territ. MEEDDAT 117.
- Le Villio, M., Arrouays, D., Deslais, W., Daroussin, J., Le Bissonnais, Y., Clergeot, D., 2001. Estimation des quantités de matière organique exogène nécessaire pour restaurer et entretenir les sols limoneux français à un niveau organique donné. *Étude Gest. Sols* 8, 47–63.
- Lecourtier, M., 2018. Bois raméal fragmenté, encore beaucoup d'aspects à défricher. *Cultivar* 10.
- Lemieux, G., 1995. La dynamique de l'humus et la méthode expérimentale: l'apport de la forêt à l'agriculture par le bois raméal fragmenté, in: Texte présenté à la conférence constitutive du Réseau Africain du Compost, Dakar. Université Laval, Québec, p. 11.
- Lemieux, G., Lachance, L., Lapointe, A., 1988. L'importance du bois raméal dans la "synthèse" de l'humus, Université Laval. ed. Gouvernement du Québec, Ministère de l'énergie et des ressources, Service ..., Québec, Canada.
- Lemieux, G., Lapointe, A., 1990. Le bois raméal et la pédogénèse: une influence agricole et forestière directe, Université Laval. ed. Université Laval, Faculté de foresterie et de

- géomatique, Dép. des sciences ..., Québec, Canada.
- Les Mots de l'agronomie, 2017. Du taux de carbone à celui de matières organiques dans les sols [WWW Document]. Mots Agron. URL https://loexplor.istex.fr/mots-agronomie.fr/index.php/Du_taux_de_carbone_%C3%A0_celui_de_mati%C3%A8res_organiques_dans_les_sols (accessed 8.6.19).
- Levavasseur, F., Germain, M., Duparque, A., Mary, B., Houot, S., 2018. Amélioration du paramétrage du modèle AMG pour les entrées de carbone dans le sol par les Produits Résiduaux Organiques (Rapport de projet SOLEBIOM No. Sous-volet 1.1.3). INRA, EcoSys, groParisTech, Paris.
- Maillard, É., 2014. Évaluation des changements quantitatifs et qualitatifs du stock de carbone du sol après l'application d'effluents d'élevage. Univ. LAVAL Dr. En Sols Environ. 135.
- Météo France, 2018. ClimatHD : le climat passé et futur en France – Une application de Météo-France [WWW Document]. URL <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd> (accessed 10.25.18).
- Météo Suisse, 2016. Normes climatologiques Fahy Période de référence 1981–2010.
- Meyre, S., 2018. Agriculture et alimentation, statistique de poche 36.
- Minasny, B., Malone, B.P., McBratney, A.B., Angers, D.A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z.-S., Cheng, K., Das, B.S., 2017. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* 292, 59–86.
- Moussa, S., 2014. EFFET DE L'UTILISATION DU BOIS RAMEAL FRAGMENTÉ (BRF) DANS LA CULTURE DE LA FRAISE D'ÉTÉ.
- NCCS, N.C. for C.S., 2018. Rapport technique CH2018. Suisse.
- Neyroud, J.A., 1997. La part du sol dans la production intégrée. *Rev. Suisse Agric.* 29, 45–51.
- Noël, B., Marche, C., 2006. Mise en œuvre de la technique du Bois Raméal Fragmenté (BRF) en agriculture wallonne. Juin 2006. *Cent. Technol. Agron. Communauté Fr.* 168.
- NOUET, Y., 2011. Evaluation de la production de Bois Raméal Fragmenté (B.R.F.) à partir d'une coupe de peupliers issue d'une parcelle en agroforesterie. *Serv. Dév. Économique Filières Serv. Environ. Territ. Chamb. D'Agriculture Gard* 15.
- OFAG, 2018. Ordonnance sur les paiements directs versés dans l'agriculture (No. AS 2013 4145, 2014 3909). Office fédéral de l'agriculture OFAG, Confédération Suisse, Berne.
- OFAG, O. fédéral de l'agriculture, 2019. UMOS [WWW Document]. Confédération Suisse. URL <https://www.blw.admin.ch/blw/fr/home/instrumente/grundlagen-und-querschnittsthemen/sak.html> (accessed 7.31.19).
- Office fédéral de météorologie et de climatologie, 2018. Rapport spécial 2018 du GIEC - MétéoSuisse [WWW Document]. Météo Suisse. URL <https://www.meteosuisse.admin.ch/home.subpage.html/fr/data/blogs/2018/10/rapport-special-du-giec.html> (accessed 10.16.18).
- Office fédéral de météorologie et de climatologie, 2014. Scénarios climatiques Suisse – un aperçu régional (Rapport technique). Suisse.
- Office Fédéral de Météorologie et de Climatologie, 2014. Scénarios climatiques Suisse – un aperçu régional (Rapport technique No. 243). Suisse.
- Office Fédéral de Topographie Swisstopo, 2019. Cartes géologiques [WWW Document]. swisstopo.admin.ch. URL <https://www.swisstopo.admin.ch/fr/connaissances-faits/geologie/donnees-de-base/cartes-geologiques.html> (accessed 8.15.19).
- Ori, D., Béral, C., 2011. Comment produire de la biomasse en agroforesterie? Pistes d'innovations en systèmes agroforestiers et propositions d'aménagements. AGROOF, Ministère de l'Alimentation de l'Agriculture et de la Pêche, France.
- Pachauri, R.K., Reisinger, A., 2007. Climate change 2007: Synthesis report. IPCC Geneva, Switzerland, Geneva, Switzerland.

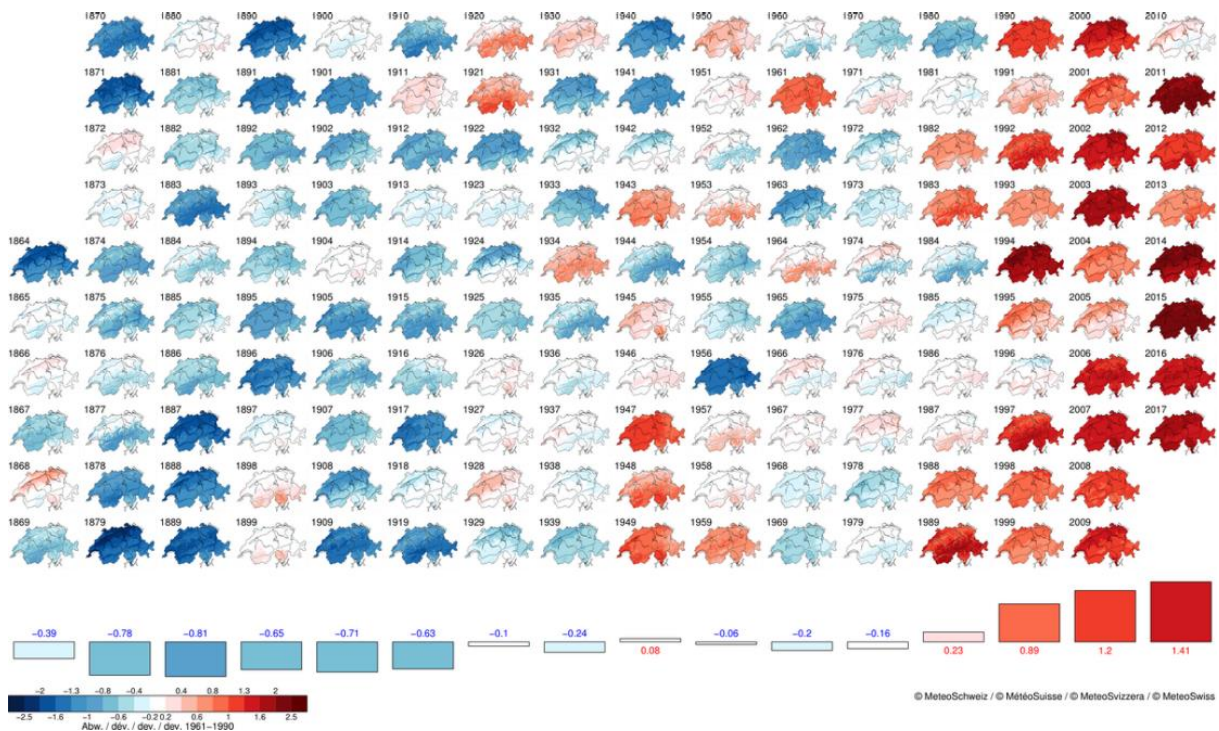
- Previsionmeteo.ch, 2019. Récapitulatif du climat pour Fahy [WWW Document]. Previsionmeteo.ch. URL <https://www.prevision-meteo.ch/climat/annuel/fahy> (accessed 7.17.19).
- QualiAgro, 2013. QualiAgro - Modélisation de la dynamique de la matière organique [WWW Document]. QualiAgro. URL <https://www6.inra.fr/qualiagro/Efficacite-Agronomique/Matieres-organiques-du-sol/Modelisation-de-la-dynamique-de-la-matiere-organique> (accessed 8.6.19).
- Rémy, J.C., Marin-Laflèche, A., 1976. L'entretien organique des terres. Coût d'une politique de l'humus. *Entrep. Agric.* 4, 63–67.
- REY, F., BRETON, V., MEISTERMANN, S., CROSAZ, Y., 2009. Le bois raméal fragmenté (BRF) en végétalisation pour la lutte contre l'érosion de surface. *Cons. Général L'Isère* 45.
- Robert, N., Tanguy, M., Riss, J., Gallois, R., 2011. Effects of Ramial chipped wood amendments on weed control, soil properties and tomato crop yield, in: *I International Symposium on Organic Matter Management and Compost Use in Horticulture* 1018. Media Dordrecht, Montpellier, pp. 383–389. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1018.41>
- Rousselet, M., Piron, E., Thirion, F., 2005. L'épandage des produits organiques De la caractérisation des produits à la qualité d'épandage.
- Simon, M., Letouzé, F., Colin, A., 2018. Evaluation de la biomasse bocagère en Bretagne. *IGN* 63.
- Smith, P., Clark, H., Dong, H., Elsiddig, E.A., Haberl, H., Harper, R., House, J., Jafari, M., Masera, O., Mbow, C., Ravindranath, N.H., Rice, C.W., Roble do Abad, C., Romanovskaya, A., Sperling, F., Tubiello, F., 2014. Chapter 11 - Agriculture, forestry and other land use (AFOLU), in: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. IPCC Working Group III Contribution to AR5*. Cambridge University Press, Brazil, UK, Netherlands, Canada, p. 922.
- SOL-CONSEIL, www sol-conseil ch, 2019. Agriculture - SOL-CONSEIL [WWW Document]. SOL-Cons. URL <http://www.sol-conseil.ch/fr/Agriculture/Agriculture.html> (accessed 8.7.19).
- Soltner, D., 1996. *The Bases of Plant Production, vol. I, The Soil and its Improvement*. Saint-Gemmesur-Loire.
- Station Fédérale de Recherches en Chimie Agricole et sur l'Hygiène de l'Environnement (FAC), 1995. *Compost et boues d'épuration: Instruction et recommandations de la Station Fédérale de recherches en chimie agricole et sur l'hygiène de l'environnement (FAC) dans le domaine des engrais à base de déchets*.
- Stocker, T., Dahe, Q., Plattner, G.-K., 2014. *Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Sylvie Joussaume (France), Joyce Penner (USA), Fredolin Tangang (Malaysia). ed. Cambridge University Press.
- The World Bank, 2018. *Agriculture & Rural Development | Data* [WWW Document]. URL <https://data.worldbank.org/topic/agriculture-and-rural-development> (accessed 11.9.18).
- Tissaux, J.-C., 1996. Une revue bibliographique des principaux mécanismes pédogénétiques pour caractériser le rôle du bois raméal fragmenté, BRF, dans le processus d'humification: texte présenté comme mémoire de fin d'étude. *Univ. LAVAL Fac. For. Géomat. Dép. Sci. Bois For.* 38.
- Tremblay, J., Beauchamp, C.J., 1998. Fractionnement de la fertilisation azotée d'appoint à la suite de l'incorporation au sol de bois raméaux fragmentés: modifications de certaines propriétés biologiques et chimiques d'un sol cultivé en pomme de terre. *Can. J. Soil Sci.* 78, 275–282.

- Valbiom, Wallonie, 2016. Des haies - Mon Projet biomasse en Wallonie : Entretenir haies et bandes boisées pour me chauffer.
- Wigley, T.M.L., 1983. The pre-industrial carbon dioxide level. *Clim. Change* 5, 315–320. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF02423528>
- Wiki Auréa, 2016. Matières organiques [WWW Document]. Wiki Auréa. URL https://wiki.aurea.eu/index.php/Mati%C3%A8res_organiques (accessed 4.30.19).
- Winkelmann, C., 2016. Grandes cultures - AgriJura - Chambre d’agriculture [WWW Document]. URL <https://www.agrijura.ch/cja/grand-public/en-chiffres/grandes-cultures> (accessed 3.1.19).
- WWF, 2018. Découvrez le Rapport Planète Vivante 2018 | WWF France [WWW Document]. URL <https://www.wwf.fr/rapport-planete-vivante-2018> (accessed 10.31.18).

Annexes

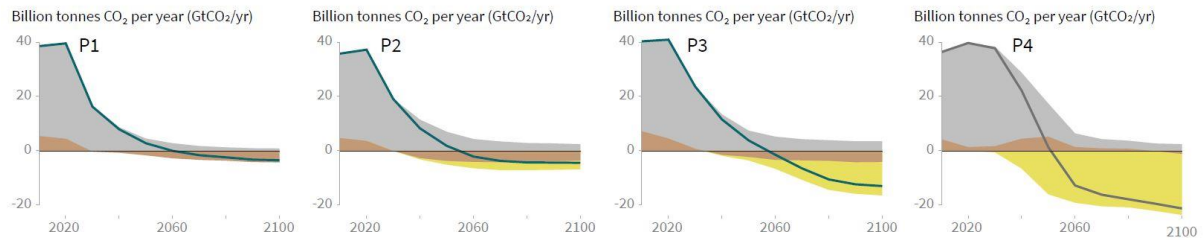


Annexe 1 : Écart de la température en comparaison à la période préindustrielle 1871-1900. Les écarts annuels sont indiqués en rouge et bleu. La ligne noire indique la moyenne sur plusieurs années. La température globale est représentée en vert et montre une augmentation d'environ 1 degré Celsius en 2017 (Office fédéral de météorologie et de climatologie, 2018).



Annexe 2 : Écarts de température à la moyenne 1961-1990 en Suisse pour chaque année depuis 1864. Les années en dessous de la moyenne sont en bleu, les années au-dessus de la moyenne sont en rouge. La partie inférieure du graphique montre les écarts à la moyenne sur une décennie avec les colonnes colorées en bleu ou en rouge (Office fédéral de météorologie et de climatologie, 2018b).

● Fossil fuel and industry ● AFOLU ● BECCS



P1: A scenario in which social, business, and technological innovations result in lower energy demand up to 2050 while living standards rise, especially in the global South. A down-sized energy system enables rapid decarbonisation of energy supply. Afforestation is the only CDR option considered; neither fossil fuels with CCS nor BECCS are used.

P2: A scenario with a broad focus on sustainability including energy intensity, human development, economic convergence and international cooperation, as well as shifts towards sustainable and healthy consumption patterns, low-carbon technology innovation, and well-managed land systems with limited societal acceptability for BECCS.

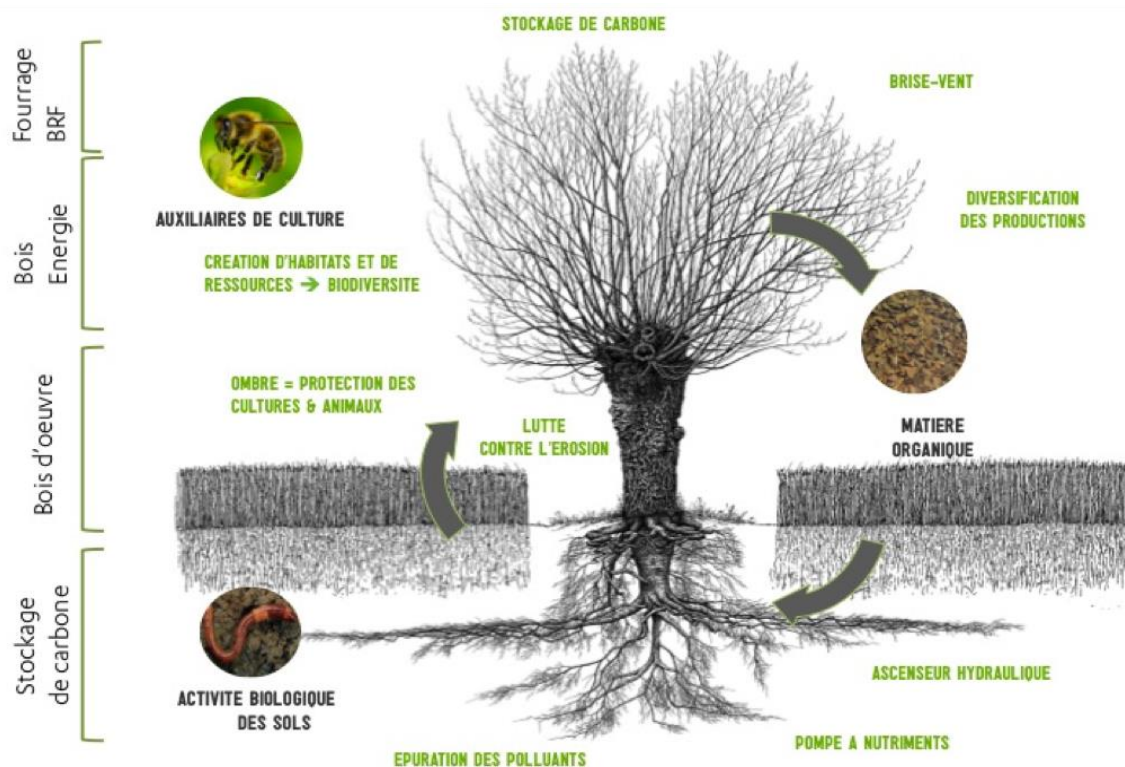
P3: A middle-of-the-road scenario in which societal as well as technological development follows historical patterns. Emissions reductions are mainly achieved by changing the way in which energy and products are produced, and to a lesser degree by reductions in demand.

P4: A resource and energy-intensive scenario in which economic growth and globalization lead to widespread adoption of greenhouse-gas intensive lifestyles, including high demand for transportation fuels and livestock products. Emissions reductions are mainly achieved through technological means, making strong use of CDR through the deployment of BECCS.

Annexe 3 : Evolution des contributions aux émissions nettes mondiales de CO₂ de quatre scénarios (IPCC, 2018).

Annexe 4 : Caractéristiques pondérales de différents BRF (B. Noël and C. Marche, 2006).

	0	1	2	3	4	5			6
Mesure	marronnier fin	divers feuillus rebroyés	robiniers faux acacias	hêtres, chênes	divers stocké	conifères grossiers	Moyenne	IC 95%	Compost de DV
Masse volumique (kg/m ³)	394	372	245	365	394	334	350,7	49,37	597
% MS sur poids frais	57,02%	57,58%	77,50%	59,39%	51,29%	52,71%	59,25%	8,29%	59,36%
Masse volumique sec (kg/m ³)	224,66	214,20	189,88	216,77	202,08	176,05	203,94	16,06	354,38
Capacité d'absorption kg/ m ³	456,06	325,58	282,91	292,64			339,30	70,08	
Carbone % MS		33,16%	43,20%	26,17%	40,52%	44,99%	37,61%	6,86%	23,92%
Carbone % MF		19,09%	33,48%	15,54%	20,78%	23,71%	22,52%	5,96%	15,89%
Carbone kg/m ³		71,0	82,0	56,7	81,9	79,2	74,2	9,41	84,8
Azote % MF		0,43%	0,41%	0,45%	0,77%	0,53%	0,52%	0,13%	1,15%
Azote % MS		0,75%	0,53%	0,76%	1,50%	1,01%	0,91%	0,33%	1,93%
Azote kg/m ³		1,6	1,0	1,6	3,0	1,8	1,8	0,65	6,8
Matières organiques (% MF)		42,18%	72,42%	35,21%	44,63%	45,89%	48,07%	12,47%	24,02%
Matières organiques (%MS)		73,25%	93,45%	59,29%	87,02%	87,06%	80,01%	12,04%	40,46%
NO3 ppm/MF		0	0	1,98	0	0	0,4	0,78	10
NH4 ppm/MF		16,0	15,5	0,5	0,0	0,0	6,4	7,48	140,0
P2O5 (% MF)		0,09%	0,53%	0,71%	0,09%	0,13%	0,31%	0,25%	0,36%
P (% MF)		0,04%	0,23%	0,31%	0,04%	0,05%	0,14%	0,11%	0,16%
P(% MS)		0,07%	0,30%	0,52%	0,08%	0,10%	0,21%	0,17%	0,26%
kg P/m ³		0,15	0,57	1,13	0,16	0,18	0,44	0,37	0,93
K2O (%MF)		0,19%	0,26%	0,23%	0,32%	0,32%	0,26%	0,05%	0,81%
K (% MF)		0,16%	0,22%	0,19%	0,26%	0,27%	0,22%	0,04%	0,67%
K (% MS)		0,27%	0,28%	0,32%	0,51%	0,51%	0,38%	0,11%	1,14%
kg K/m ³		0,58	0,53	0,70	1,04	0,90	0,75	0,19	4,02
CaO (% MF)		3,02%	0,75%	2,67%	1,60%	1,52%	1,91%	0,81%	2,51%
Ca (% MF)		2,16%	0,54%	1,91%	1,14%	1,09%	1,37%	0,58%	1,79%
Ca (% MS)		3,75%	0,70%	3,21%	2,22%	2,06%	2,39%	1,03%	3,02%
kg Ca/m ³		8,04	1,32	6,97	4,49	3,63	4,89	2,35	10,71
MgO (% MF)		1,78%	0,02%	0,46%	0,17%	0,17%	0,52%	0,63%	0,41%
Mg (% MF)		1,07%	0,01%	0,28%	0,10%	0,10%	0,31%	0,38%	0,25%
Mg (% MS)		1,86%	0,02%	0,47%	0,20%	0,20%	0,55%	0,66%	0,42%
kg Mg/m ³		3,98	0,03	1,02	0,41	0,35	1,16	1,42	1,49

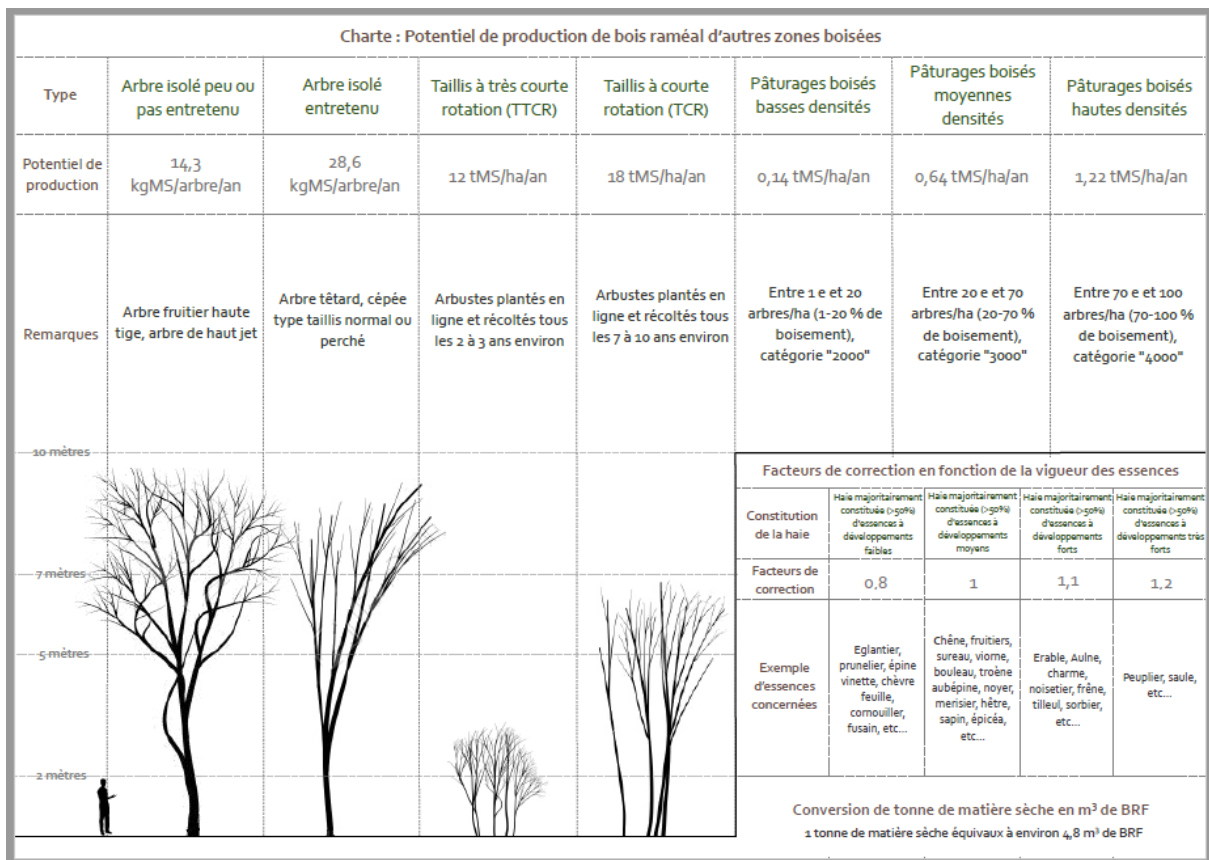
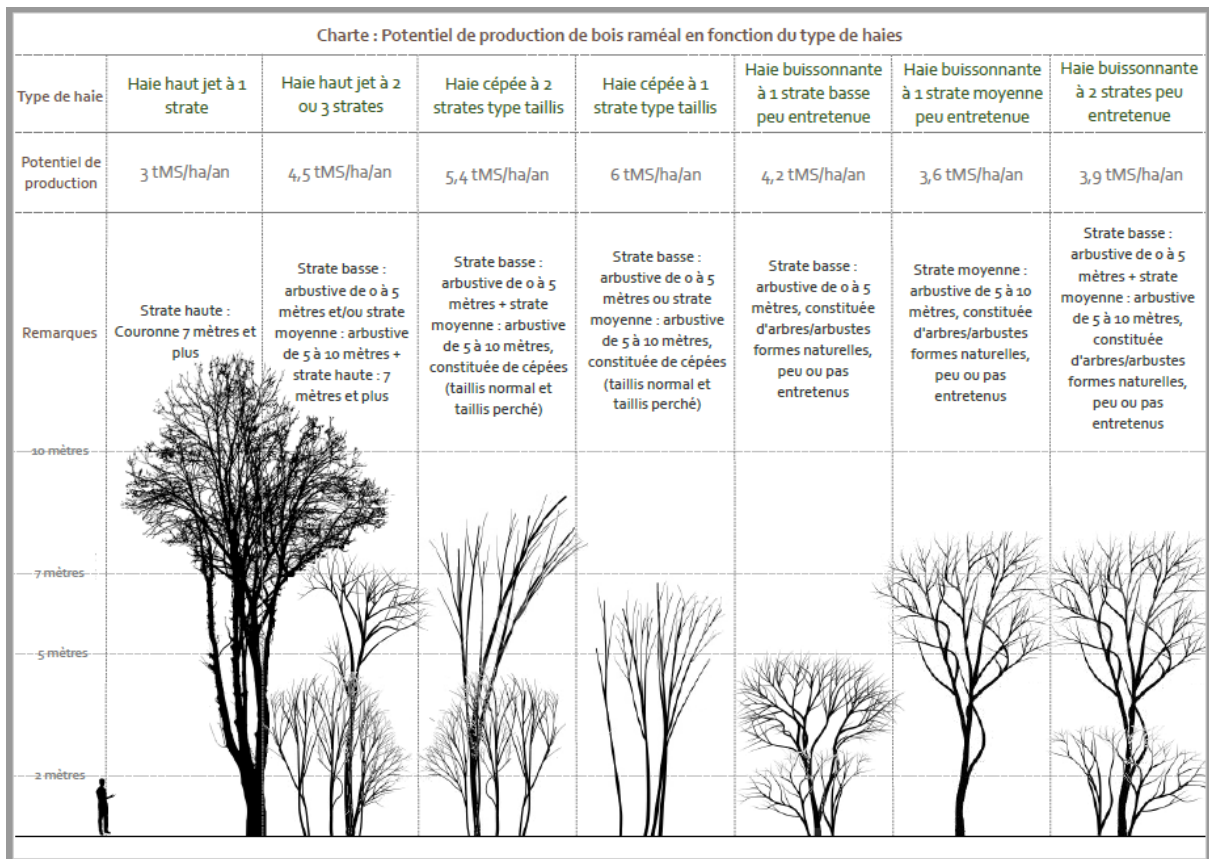


Annexe 5 : Rôle de l'arbre dans le système agricole (Association Française d'Agroforesterie, 2018).

Annexe 6 : Synthèse de différents travaux réalisés.

Réf.	Climat, texture	Modalité différent du témoin	Apports ligneux (tMS/ha)*	Rendement ¹			Physique et chimie du sol	Matière organique et biologie du sol
				Cult.1	Cult.2	Cult.4		
1,2	Tempéré, sableux	BRF enfoui	12,5, 25 ou 50/2 ans	-	(+) ⁵	+	CEC= à 4 ans, agrégation= à 9 ans	%C+ et +, N= et +, C/N+ et = à 4 et 9 ans
		BRF enfoui avec N	12,5, 25 ou 50/2 ans	-	+ ⁶	+	CEC= à 4 ans, agrégation= à 9 ans	%C+, N= et C/N+ à 4 et 9 ans
3,4	Tempéré, sableux	BRF enfoui	25 (1 fois)	-	(-)	nd	Minéralisation N - ; humidité an2+	
		BRF enfoui avec N	25 (1 fois)	+	+	nd	Minéralisation N - ; humidité an2+	
5	Tempéré, limono-argileux	BRF enfoui	15 ou 30 (1 fois)	(-)	nd	nd	%nitrate -	Mésosofaune + ou (+)
		BRF enfoui avec N	15 (1 fois)	=	nd	nd		Mésosofaune + ou (+)
6	Tempéré, sablo-limoneux	BRF enfoui	150** (1 fois)	nd	nd	nd	%nitrate an1-, an2= ; Humidité +, agrégation an2+	%C et N an1=, an2+ ; champignons + ; autres microbes an1+, an2=
7	Tempéré, sableux	BRF enfoui	37.5** /an ou /2 ans	nd	nd	nd	%P _{ass} an1-, an2(-) ; pH= ; Humidité an1=, an2+	Champignons an1+, an2= ; autres microbes = ; %C an1=, an2+, C/N=
8	Tropical subhumide, argileux	BRF enfoui	16 à 26 (1 fois)	+ ³	nd	nd		
		BRF enfoui avec N	16 à 26 (1 fois)	+	nd	nd		
9	Tropical sec, sableux	BRF enfoui	8, 16 ou 31 (1 fois)	- ⁴	+	nd	CEC+, %K _{éch} +, %P _{ass} -, humidité + et densité - à la récolte 2	%C(+) et N+ à la récolte 2
10	Tropical subhumide ²	BRF enfoui	11 (1 fois)	+	nd	nd	pH= et CEC(-)	%C(+)
11	Tropical humide, argilo-sableux	BRF enfoui sans NP	5 /an	=	=	nd	%P _{ass} = après 3 mois	
12	Tropical sec, sabl.	Mulch de rameaux	1 ou 2 (1 fois)	(+)	(+)	nd		
13	Tropical humide, sablo-argileux	Mulch de copeaux	Non indiqué	+	nd	nd	Humidité =, densité -, érosion -, %Pass= à 1 an	%C+ à 1 an
14	Tropical humide, sablo-argileux	Mulch de copeaux	50 /an	(+)	+	nd	Humidité +, densité = et infiltration + an1 ; CEC+, stock P _{ass} (-) et pH+ an2	Stocks C+ et N(+) à 2 ans
15	Tropical humide, limono-argileux	Mulch de copeaux et fumier sans NK	49 an1, 19 an2	+	+	nd	pH=, %K _{éch} =, %Ca _{éch} + et %Mg _{éch} + an1 et an2	%C et N an1(+), an2+

Les symboles + et - signalent des effets significatifs (p < 0,05), (+) et (-) des effets non significatifs, = l'absence d'effet. nd non déterminé ; * quand la source citée n'exprime pas l'apport en tMS, l'humidité a été estimée à 50 % ; ** estimé d'après le volume ; ¹rendement de la première, deuxième ou quatrième culture suivant le premier apport de BRF ; ²texture inconnue, ³(+) pour *Acacia auriculiformis*, ⁴(-) pour 16 tMS/ha, ⁵ pour 50 tMS/ha, ⁶(+) pour 25 tMS/ha. CEC : capacité d'échange cationique ; MS : matière sèche.
Références : 1 : N'dayegamiye et Dubé, 1996 ; 2 : N'dayegamiye et Angers, 1993 ; 3 : Beauchemin et al., 1990 ; 4 : Beauchemin et al., 1992 ; 5 : Larochelle, 1994 ; 6 : Lalande et al., 1998 ; 7 : Tremblay et Beauchamp, 1998 ; 8 : Aman, 1996 ; 9 : Soumare et al., 2002 ; 10 : Gómez, 2003 ; 11 : Kwabiah et al., 2003 ; 12 : Wezel et Böcker, 1999 ; 13 : Obiefuna, 1991 ; 14 : Salau et al., 1992 ; 15 : Miyasaka et al., 2001.



Annexe 7: Charte vulgarisé : Potentiel de production de biomasse (bois raméal) des différents types d'espaces boisés.

Annexe 8 : Potentiel de production des haies et bosquets de l'exploitation de Thomas Vuillaume.

Haies	Type	Principales essences	Vigueur des végétaux dominant (> 50%)	Densité de la haie	Remarques	Surface (are)	Périmètre de bandes herbives	Surface effective de haie (are)	Coefficient de production de biomasse	Facteur de correction (Vigueur)	Production de biomasse (kgMS/an)	Masse volumique sèche du BRF	Volume de BRF (m3)
TH1	Haie de haut jet à 2 strates (Strate basse)	<i>Abies alba</i> , <i>Crataegus laevigata</i> , <i>Prunus avium</i> , <i>Quercus pedunculata</i>	Développement moyen	Moyenne	Faible potentiel de production de BRF, vieux arbres	9	55	7,35	0,75	1	330,75	208	1,59
	TH2.1	<i>Acer campestre</i> , <i>Acer platanoides</i> , <i>Acer pseudoplatanus</i> , <i>Carpinus betulus</i> , <i>Cornus sanguinea</i> , <i>Crataegus</i> , <i>Eonyunus europaeus</i> , <i>Prunus spinosa</i> , <i>Viburnum opulus</i>	Développement faible	Moyenne	Majoritairement composé d'arbustes à faible développement	9	75	6,75	1	0,8	324	208	1,56
TH2	TH2.2	<i>Carpinus betulus</i> , <i>Corylus avellana</i> , <i>Prunus avium</i>	Développement fort	Moyenne	Majoritairement composé de noisetier et de charme, bon potentiel de production de BRF	35	395	23,15	0,9	1,1	1375,11	208	6,61
	TH3.1	<i>Acer campestre</i> , <i>Carpinus betulus</i> , <i>Cornus sanguinea</i> , <i>Corylus avellana</i> , <i>Crataegus monogyna</i> , <i>Eonyunus europaeus</i> , <i>Prunus spinosa</i> , <i>Rosa canina</i>	Développement fort	Faible	Majoritairement composé de noisetier, bon potentiel de production de BRF	85	905	57,85	0,9	1,1	3436,29	208	16,52
TH3	TH3.2	<i>Acer campestre</i> , <i>Acer pseudoplatanus</i> , <i>Carpinus betulus</i> , <i>Corylus avellana</i> , <i>Crataegus</i> , <i>Eonyunus europaeus</i> , <i>Prunus avium</i> , <i>Pyrus</i> , <i>Quercus pedunculata</i>	Développement moyen	Forte	Bon potentiel de production de BRF, beaucoup de branches basses	42	420	29,4	0,75	1	1323	208	6,36
	TH3.3	<i>Acer campestre</i> , <i>Acer pseudoplatanus</i> , <i>Carpinus betulus</i> , <i>Corylus avellana</i> , <i>Crataegus</i> , <i>Eonyunus europaeus</i> , <i>Prunus avium</i> , <i>Pyrus</i> , <i>Quercus pedunculata</i> , <i>Sambucus nigra</i>	Développement moyen	Forte	Bon potentiel de production de BRF, beaucoup de branches basses	9	140	4,8	0,75	1	216	208	1,04
TH3	TH3.4	<i>Acer campestre</i> , <i>Alnus incana</i> , <i>Cornus sanguinea</i> , <i>Corylus avellana</i> , <i>Crataegus</i> , <i>Ligustrum vulgare</i> , <i>Prunus spinosa</i> , <i>Rosa canina</i> , <i>Rubus fruticosus</i> , <i>Viburnum opulus</i>	Développement faible	Moyenne	Majoritairement composé d'arbustes à faible développement	31	315	21,55	1	0,8	1034,4	208	4,97
	TH3.5	<i>Acer campestre</i> , <i>Acer pseudoplatanus</i> , <i>Carpinus betulus</i> , <i>Corylus avellana</i> , <i>Crataegus</i> , <i>Eonyunus europaeus</i> , <i>Prunus avium</i> , <i>Pyrus</i> , <i>Quercus pedunculata</i>	Développement moyen	Forte	Bon potentiel de production de BRF, beaucoup de branches basses	8	140	3,8	0,75	1	171	208	0,82
TH4	Haie buissonnante à 2 strates peu entretenue	<i>Juglans regia</i> , <i>Malus domestica</i> , <i>Prunus domestica</i> , <i>Rosa canina</i> , <i>Rubus fruticosus</i>	Développement moyen	Moyenne	Quelques arbres morts	5	70	2,9	0,65	1	113,1	208	0,54
	TH5.1	<i>Cornus sanguinea</i> , <i>Corylus avellana</i> , <i>Crataegus laevigata</i> , <i>Ligustrum vulgare</i> , <i>Lonicera xylosteum</i> , <i>Prunus spinosa</i> , <i>Rosa canina</i> , <i>Rubus fruticosus</i> , <i>Viburnum lantana</i> , <i>Viburnum opulus</i>	Développement faible	Moyenne	Majoritairement composé d'arbustes à faible développement	14	110	10,7	0,7	0,8	359,52	208	1,73
TH5	Haie de haut jet à 2 strates (Strate basse)	<i>Acer campestre</i> , <i>Carpinus betulus</i> , <i>Cornus sanguinea</i> , <i>Corylus avellana</i> , <i>Crataegus</i> , <i>Eonyunus europaeus</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Ligustrum vulgare</i> , <i>Prunus avium</i> , <i>Prunus spinosa</i> , <i>Quercus pedunculata</i> , <i>Rosa canina</i> , <i>Viburnum lantana</i>	Développement fort	Forte	Bon potentiel de production de BRF, beaucoup de branches basses	16	95	13,15	0,75	1	591,75	208	2,84
	Total					263		181,4			9274,92		44,59

Annexe 9 : Potentiel de production des haies et bosquets de l'exploitation de Joan Studer.

Haies	Type	Principales essences	Vigueur des végétaux dominant (> 50%)	Densité de la haie	Remarques	Surface (are)	Périmètre de bandes herbeuses (m)	Surface effective de haie (are)	Coefficient de production de biomasse	Facteur de correction (Vigueur)	Production de biomasse (kgMS/an)	Masse volumique sèche du BRF (kg/m3)	Volume de BRF (m3/an)	Zone	
JH1	JH1.1	Haie buissonnante à 2 strates peu entretenue	<i>Corylus avellana</i> , <i>Carpinus betulus</i> , <i>Acer campestre</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Quercus pedunculata</i> , <i>Prunus spinosa</i> , <i>Crataegus monogyna</i> , <i>Rosa canina</i>	Développement moyen	Moyenne	Accessible, en pente	39	320	29,4	0,65	1	1146,6	208	5,513	1
	JH1.2	Haie de haut jet à 2 strates (Strate basse)	<i>Abies alba</i> , <i>Alnus glutinosa</i> , <i>Crataegus monogyna</i> , <i>Prunus avium</i> , <i>Acer pseudoplatanus</i> , <i>Carpinus betulus</i> , <i>Quercus pedunculata</i> , <i>Sambucus nigra</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Sambucus nigra</i> , <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Prunus spinosa</i>	Développement moyen	Moyenne	Accessible, en pente	95	430	82,1	0,75	1	3694,5	208	17,762	1
JH2	JH2.1	Haie de haut jet à 2 strates (Strate basse)	<i>Acer campestre</i> , <i>Corylus avellana</i> , <i>Crataegus</i> , <i>Prunus avium</i> , <i>Quercus pedunculata</i> , <i>Rosa canina</i> , <i>Sambucus nigra</i>	Développement moyen	Faible	Forte pente	50	350	39,5	0,75	1	1777,5	208	8,546	1
	JH2.2	Haie de haut jet à 1 strate	<i>Acer pseudoplatanus</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Tilia cordata</i> , <i>Acer platanoides</i>	Développement fort	Moyenne	Accessible, plat, 2 mètres entre chaque arbre en moyenne, majoritairement composée de tilleul	45	150	40,5	0,5	1,1	1336,5	208	6,425	1
JH3	JH3.1	Haie buissonnante à 1 strate (basse) peu entretenue	<i>Ligustrum vulgare</i> , <i>Sorbus aucuparia</i> , <i>Berberis vulgaris</i> , <i>Euonymus europaeus</i> , <i>Lonicera xylosteum</i> , <i>Cornus sanguinea</i> , <i>Prunus spinosa</i> , <i>Rosa canina</i>	Développement faible	Moyenne	Jeune haie	4	105	0,85	0,7	0,8	28,56	208	0,137	1
	JH3.2	Haie buissonnante à 2 strates peu entretenue	<i>Cornus sanguinea</i> , <i>Crataegus laevigata</i> , <i>Pyrus</i> , <i>Rosa canina</i> , <i>Sambucus nigra</i> , <i>Sorbus aucuparia</i> , <i>Malus domestica</i> , <i>Viburnum lantana</i> , <i>Juglans regia</i> , <i>Euonymus europaeus</i>	Développement moyen	Faible	Jeune haie	5	120	1,4	0,65	1	54,6	208	0,263	1
JH4	Haie buissonnante à 1 strate (basse) peu entretenue	<i>Cornus sanguinea</i> , <i>Ligustrum vulgare</i> , <i>Prunus spinosa</i> , <i>Sorbus aucuparia</i> , <i>Viburnum opulus</i>	Développement faible	Moyenne	Haie fleurie avec beaucoup de biodiversité	3	95	0,15	0,7	0,8	5,04	208	0,024	1	
JH5	JH5.1	Haie de haut jet à 3 strates	<i>Acer pseudoplatanus</i> , <i>Corylus avellana</i> , <i>Crataegus</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Prunus spinosa</i> , <i>Pyrus communis</i> , <i>Rosa canina</i> , <i>Rubus fruticosus</i> , <i>Ilex aquifolium</i> , <i>Acer pseudoplatanus</i>	Développement moyen	Moyenne	Majoritairement composée d'aubépine	17	270	8,9	0,75	1	400,5	208	1,925	1
	JH5.2	Haie de haut jet à 2 strates (Strate basse)	<i>Carpinus betulus</i> , <i>Crataegus monogyna</i> , <i>Prunus avium</i> , <i>Prunus spinosa</i> , <i>Pyrus</i> , <i>Quercus pedunculata</i> , <i>Rosa canina</i> , <i>Sambucus nigra</i>	Développement moyen	Faible	Accessible	11	130	7,1	0,75	1	319,5	208	1,536	1
JH6	JH6.1	Haie de haut jet à 1 strate	<i>Acer campestre</i> , <i>Carpinus betulus</i> , <i>Corylus avellana</i> , <i>Prunus avium</i> , <i>Quercus pedunculata</i>	Développement moyen	Moyenne	Accessible	11	140	6,8	0,5	1	204	208	0,981	1
	JH6.2	Haie de haut jet à 3 strates	<i>Acer platanoides</i> , <i>Alnus incana</i> , <i>Corylus avellana</i> , <i>Crataegus</i> , <i>Picea abies</i> , <i>Prunus spinosa</i> , <i>Quercus pedunculata</i> , <i>Rosa canina</i>	Développement moyen	Moyenne		62	410	49,7	0,75	1	2236,5	208	10,752	1
JH7	Haie cépée à 1 strate (basse) type taillis	<i>Acer campestre</i> , <i>Carpinus betulus</i> , <i>Corylus avellana</i> , <i>Crataegus monogyna</i> , <i>Prunus spinosa</i> , <i>Sambucus nigra</i>	Développement fort	Forte	Très bon potentiel de production en BRF, majoritairement composé de noisetier, peu de biodiversité	20	175	14,75	1	1,1	973,5	208	4,680	1	
JH8	Haie buissonnante à 2 strates peu entretenue	<i>Acer campestre</i> , <i>Acer pseudoplatanus</i> , <i>Carpinus betulus</i> , <i>Corylus avellana</i> , <i>Crataegus</i> , <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Prunus avium</i> , <i>Prunus spinosa</i> , <i>Sambucus nigra</i>	Développement fort	Forte	Bon potentiel de production en BRF	12	130	8,1	0,65	1,1	347,49	208	1,671	1	
JH9	Haie buissonnante à 2 strates peu entretenue	<i>Acer campestre</i> , <i>Carpinus betulus</i> , <i>Corylus avellana</i> , <i>Crataegus monogyna</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Pyrus</i> , <i>Quercus pedunculata</i>	Développement fort	Forte	Bon potentiel de production en BRF	24	205	17,85	0,65	1,1	765,765	208	3,682	1	
JH10	Haie buissonnante à 2 strates peu entretenue	<i>Abies alba</i> , <i>Carpinus betulus</i> , <i>Corylus avellana</i> , <i>Crataegus laevigata</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Prunus avium</i> , <i>Sambucus nigra</i>	Développement fort	Forte	Bon potentiel de production en BRF, majoritairement composé de sureau et de noisetier, en pente et peu accessible	32	245	24,65	0,65	1,1	1057,485	208	5,084	1	
JH11	Haie buissonnante à 2 strates peu entretenue	<i>Carpinus betulus</i> , <i>Cornus sanguinea</i> , <i>Corylus avellana</i> , <i>Crataegus</i> , <i>Euonymus europaeus</i> , <i>Ligustrum vulgare</i> , <i>Rosa canina</i>	Développement moyen	moyenne	Bon potentiel de production en BRF, majoritairement composé d'aubépine	12	115	8,55	0,65	1	333,45	208	1,603	1	
JH12	Haie de haut jet à 1 strate	<i>Carpinus betulus</i> , <i>Prunus avium</i> , <i>Tilia platyphyllos</i> , <i>Populus tremula</i>	Développement moyen	Faible	Peu de branches basses	16	90	13,3	0,5	1	399	208	1,918	2	
JH13	Haie buissonnante à 2 strates peu entretenue	<i>Carpinus betulus</i> , <i>Corylus avellana</i> , <i>Crataegus monogyna</i> , <i>Populus tremula</i> , <i>Prunus avium</i> , <i>Prunus spinosa</i> , <i>Quercus pedunculata</i> , <i>Salix cinerea</i>	Développement fort	Forte	Bon potentiel de production en BRF	11	70	8,9	0,65	1,1	381,81	208	1,836	2	
JH14	Haie de haut jet à 2 strates (Strate moyenne)	<i>Alnus incana</i> , <i>Crataegus laevigata</i> , <i>Populus tremula</i> , <i>Quercus pedunculata</i>	Développement moyen	Moyenne	Majoritairement composée d'aune et de chêne, peu de branches basses	27	130	23,1	0,75	1	1039,5	208	4,998	2	
JH15	Haie de haut jet à 1 strate	<i>Corylus avellana</i> , <i>Prunus avium</i> , <i>Quercus pedunculata</i> , <i>Tilia platyphyllos</i> , <i>Betula pendula</i>	Développement moyen	Faible	Arbres anciens, peu de potentiel, branches hautes	27	230	20,1	0,5	1	603	208	2,899	2	
JH16	Haie de haut jet à 2 strates (Strate moyenne)	<i>Alnus glutinosa</i> , <i>Betula pendula</i> , <i>Carpinus betulus</i> , <i>Corylus avellana</i> , <i>Populus tremula</i>	Développement fort	Moyenne	Zone humide, ruisseau, Bon potentiel de production en BRF	17	100	14	0,75	1,1	693	208	3,332	2	
JH17	JH17.1	Haie de haut jet à 3 strates	<i>Carpinus betulus</i> , <i>Cornus sanguinea</i> , <i>Crataegus</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Quercus pedunculata</i>	Développement moyen	Moyenne	En pente, accessible	3	55	1,35	0,75	1	60,75	208	0,292	2
	JH17.2	Haie de haut jet à 2 strates (Strate basse)	<i>Quercus pedunculata</i> , <i>Rosa canina</i> , <i>Salix cinerea</i> , <i>Fraxinus excelsior</i>	Développement moyen	Moyenne	Bord de chemin agricole	7	100	4	0,75	1	180	208	0,865	2
JH18	JH18.1	Haie de haut jet à 2 strates (Strate basse)	<i>Abies alba</i> , <i>Alnus glutinosa</i> , <i>Carpinus betulus</i> , <i>Corylus avellana</i> , <i>Prunus spinosa</i> , <i>Quercus pedunculata</i> , <i>Salix elaeagnos</i> , <i>Sambucus nigra</i>	Développement fort	Faible	Zone humide, bon potentiel de production en BRF	60	395	48,15	0,75	1,1	2383,425	208	11,459	3
	JH18.2	Haie buissonnante à 2 strates peu entretenue	<i>Alnus glutinosa</i> , <i>Euonymus europaeus</i> , <i>Prunus spinosa</i> , <i>Quercus pedunculata</i> , <i>Salix cinerea</i> , <i>Salix elaeagnos</i>	Développement très fort	Forte	Fort potentiel de production de BRF, zone humide, peu accessible, majoritairement composé de saule	14	40	12,8	0,65	1,2	599,04	208	2,880	3
JH19	JH19.1	Haie cépée à 1 strate (basse) type taillis	<i>Carpinus betulus</i> , <i>Cornus sanguinea</i> , <i>Prunus spinosa</i> , <i>Salix cinerea</i> , <i>Salix elaeagnos</i> , <i>Viburnum opulus</i> , <i>Ligustrum vulgare</i> , <i>Viburnum lantana</i>	Développement fort	Forte	Très bon potentiel de production de BRF	17	67	14,99	1	1,1	989,34	208	4,756	3
	JH19.2	Haie cépée à 1 strate (basse) type taillis	<i>Carpinus betulus</i> , <i>Cornus sanguinea</i> , <i>Prunus spinosa</i> , <i>Salix cinerea</i> , <i>Salix elaeagnos</i> , <i>Viburnum opulus</i> , <i>Ligustrum vulgare</i> , <i>Viburnum lantana</i>	Développement fort	Forte	Très bon potentiel de production de BRF	8	50	6,5	1	1,1	429	208	2,063	3
	JH19.3	Haie buissonnante à 1 strate (basse) peu entretenue	<i>Salix cinerea</i> , <i>Salix elaeagnos</i>	Développement très fort	Forte	majoritairement composé de saule, zone humide	15	80	12,6	0,7	1,2	635,04	208	3,053	3
	JH19.4	Haie cépée à 1 strate (basse) type taillis	<i>Carpinus betulus</i> , <i>Cornus sanguinea</i> , <i>Prunus spinosa</i> , <i>Salix cinerea</i> , <i>Salix elaeagnos</i> , <i>Viburnum opulus</i>	Développement très fort	Forte	Très bon potentiel de production en BRF, majoritairement composé de saule	39	270	30,9	1	1,2	2224,8	208	10,696	3
Total						703		550,99			25299,20		121,63		

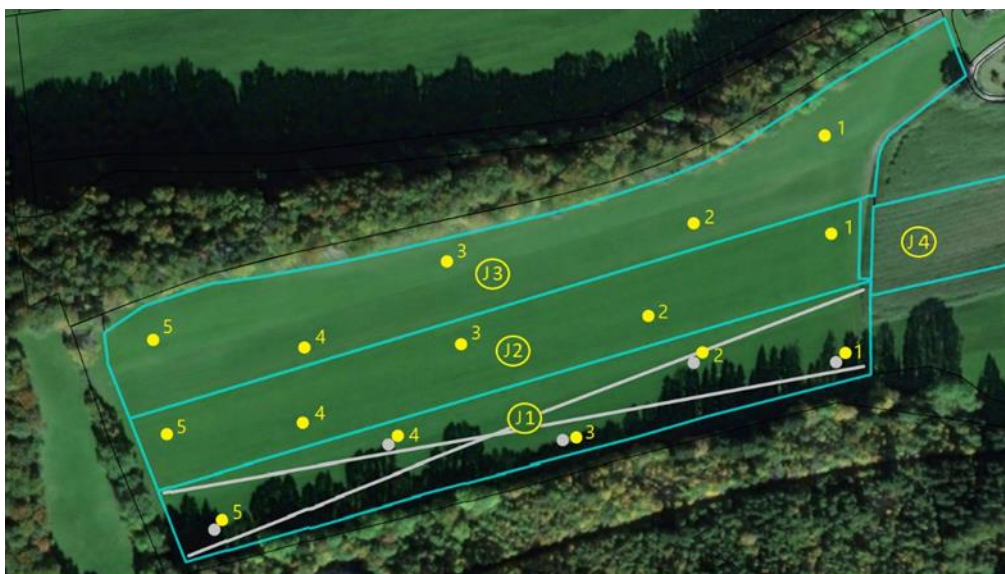
Annexe 10 : Potentiel de production des forêts et des pâturages boisés de l'exploitation de Joan Studer.

Bords de forêt	Type	Principales essences	Vigueur des végétaux dominant (> 50%)	Densité	Remarques	Périmètre exploitable (m)	Surface exploitable (are)	Coefficient de production de biomasse	Facteur de correction (Vigueur)	Production de biomasse (kgMS/an)	Masse volumique sèche du BRF (kg/m ³)	Volume de BRF (m ³ /an)	Zone
JF1	JF1.1	Haie de haut jet à 2 strates (Strate basse)	Développement moyen	Moyenne		270	8,1	0,75	1	364,5	208	1,752	1
	JF1.2	Haie de haut jet à 2 strates (Strate basse)	Développement moyen	Fort	Branches qui dépassent de 2 mètres sur la parcelle	570	17,1	0,75	1	769,5	208	3,700	1
JF2	Haie de haut jet à 1 strate	Principales essences : <i>Crataegus laevigata</i> , <i>Fagus sylvatica</i> , <i>Abies alba</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Acer pseudoplatanus</i> , <i>Carpinus betulus</i> Végétaux dominants : <i>Acer campestris</i> , <i>Alnus incana</i> , <i>Prunus</i> , <i>Cornus sanguinea</i> , <i>Abies alba</i> , <i>Crataegus laevigata</i> , <i>Quercus pedunculata</i> , <i>Fagus sylvatica</i>	Développement moyen	Fort	Branches qui dépassent de 2 mètres sur la parcelle	90	28,5	0,5	1	855	208	4,111	1
JF3	Haie de haut jet à 1 strate	Principales essences : <i>Abies alba</i> , <i>Carpinus betulus</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Picea abies</i> , <i>Quercus pedunculata</i>	Développement moyen	Fort	Peu de branches basses	90	2,7	0,5	1	81	208	0,389	1
JF4	Haie de haut jet à 1 strate	Principales essences : <i>Abies alba</i> , <i>Acer pseudoplatanus</i> , <i>Carpinus betulus</i> , <i>Fagus sylvatica</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Prunus avium</i>	Développement moyen	Moyenne	En pente	270	8,1	0,5	1	243	208	1,168	1
JF5	Haie de haut jet à 1 strate	Principales essences : <i>Carpinus betulus</i> , <i>Fagus sylvatica</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Picea abies</i> , <i>Prunus avium</i> , <i>Quercus pedunculata</i>	Développement moyen	Moyenne	En pente	135	4,05	0,5	1	121,5	208	0,584	2
Total							68,55			2434,5		11,704	

Pâturages boisés	Type	Principales essences	Vigueur des végétaux dominant (> 50%)	Surface (are)	Remarques	Coefficient de production de biomasse	Facteur de correction (Vigueur)	Production de biomasse (kgMS/an)	Masse volumique sèche du BRF (kg/m ³)	Volume de BRF (m ³ /an)	Zone
JP1	Pâturage boisé moyenne densité	<i>Alnus glutinosa</i> , <i>Quercus pedunculata</i> , <i>Salix elaeagnos</i>	Développement fort	31	Environ 50 arbres/ha, peu de branches basses, majoritairement composé d'auline	0,107	1,1	218,922	208	1,053	3
JP2	Pâturage boisé haute densité	<i>Abies alba</i> , <i>Acer platanoides</i> , <i>Acer pseudoplatanus</i> , <i>Alnus incana</i> , <i>Prunus spinosa</i> , <i>Salix cinerea</i>	Développement moyen	57	Environ 100 arbres/ha jeunes arbres, bon potentiel	0,203	1	694,26	208	3,338	3
Total				88				913,2		4,4	



Annexe 11 : Localisation des sondages à la tarière (points jaunes) pour la caractérisation des sols et analyses effectuées par nos soins (prélèvements composites pour analyses de sols : traits gris et prélèvements pour les analyses de densité apparente de la terre fine : points gris) chez Thomas Vuillaume.



Annexe 12: Localisation des sondages à la tarière (points jaunes) pour la caractérisation des sols et analyses effectuées par nos soins (prélèvements composites pour analyses de sols : traits gris et prélèvements pour les analyses de densité apparente de la terre fine : points gris) chez Joan Studer.



Annexe 13 : Localisation des sondages à la tarière (points jaunes) pour la caractérisation des sols et analyses effectuées par nos soins (prélèvements composites pour analyses de sols : traits gris et prélèvements pour les analyses de densité apparente de la terre fine : points gris) chez Joan Studer (suite).

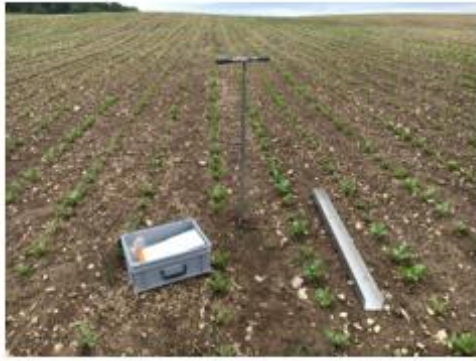
T1



T2



Annexe 14 : Caractérisation des sols chez M. Vuillaume.



T3



T4



Annexe 15 : Caractérisation des sols chez M. Vuillaume suite.

T5



T6



Annexe 16 : Caractérisation des sols chez M. Vuillaume suite.

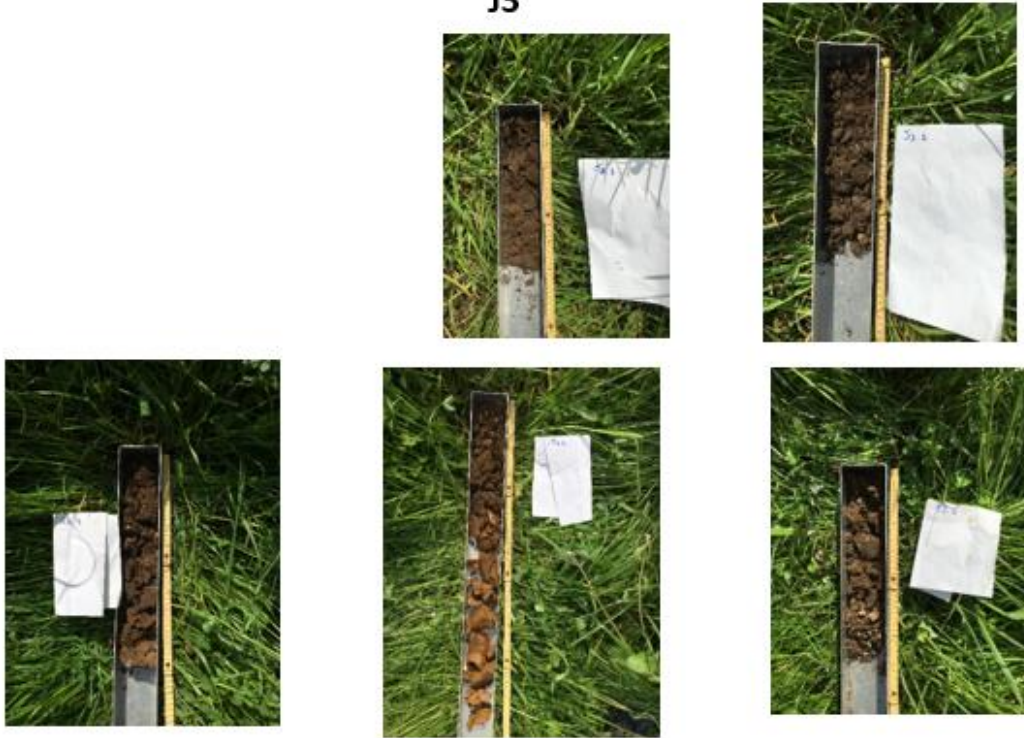


Annexe 17 : Caractérisation des sols chez M. Vuillaume suite.

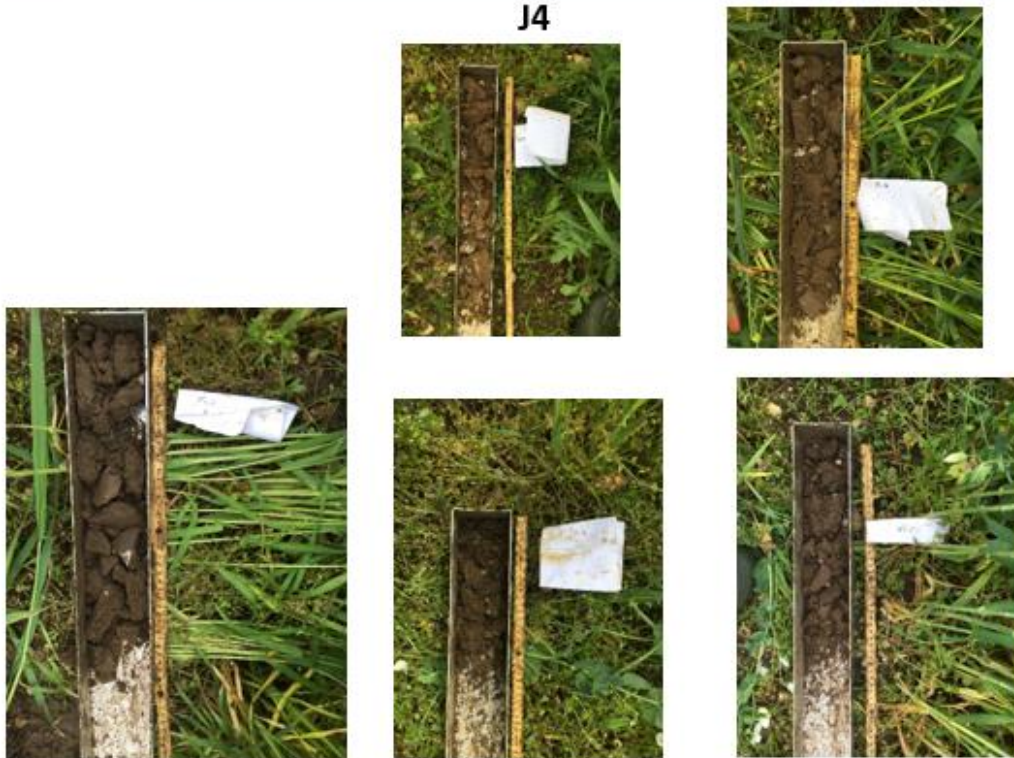


Annexe 18 : Caractérisation des sols chez M. Studer.

J3



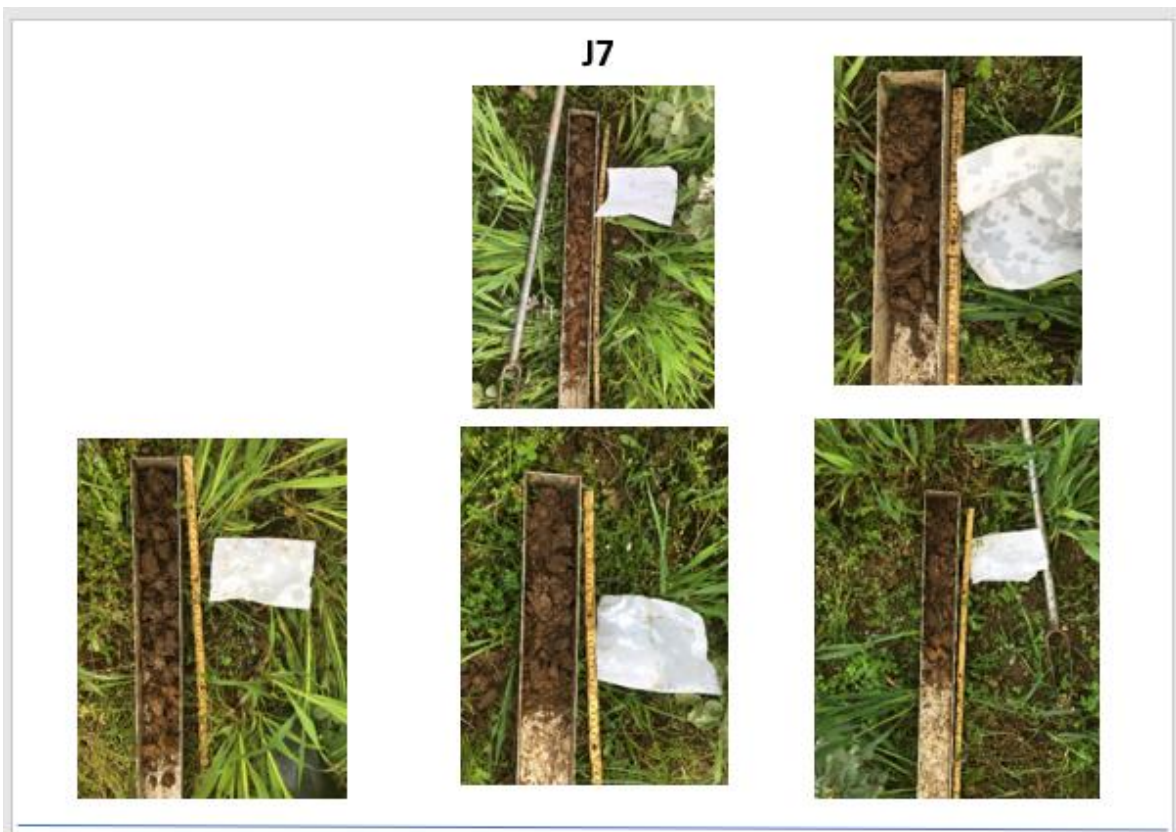
J4



Annexe 19 : Caractérisation des sols chez M. Studer suite.



Annexe 20 : Caractérisation des sols chez M. Studer suite.



Annexe 21 : Caractérisation des sols chez M. Studer suite.

Annexe 22 : Résultats de la caractérisation des sols de l'exploitation de Thomas Vuillaume (Le code couleur n'a pas d'importance particulière, il est juste destiné à voir quelles parcelles sont regroupées ensemble).

ID_BRF	ID_TV	Culture	Piqure	Valeurs observées			Remarques	Valeurs retenues pour le bilan humique			Remarque général	Dernières Analyses effectuées	Regroupement de parcelles	
				Hauteur culture cm	CaCO3 %p	Grossiers %v		Profondeur cm	CaCO3 %p	Grossiers %v				Profondeur cm
T1	-10082_1552 (monitoring)	Colza d'automne huile	1	155	1	3	30	Relativement foncé, sol bien pourvu en MO	2,8	2,2	30	Belle culture en place, sol avec une belle structure et bien pourvu en MO -> d'apparence foncé, homogène dans sa surface	Analyse TV -> composite PER + DA Analyses composites PER exploitant (tactile et visuel)	
			2	165	1	1	55	Relativement foncé, sol bien pourvu en MO						
			3	150	0	2	40	Relativement foncé, sol bien pourvu en MO						
			4	135	6	2	60	Relativement foncé, sol bien pourvu en MO						
			5	135	6	3	35	Relativement foncé, sol bien pourvu en MO						
T2	-10082_541	Tournesol huile	1	7	1	5	35	Légèrement plus foncé que T3	0,6	3,8	30	Légèrement plus foncé que T3, moins battent, un peu d'érosion	Analyses composite PER exploitant (tactile et visuel)	
			2	6	1	7	35	Légèrement plus foncé que T3						
			3	7	0	2	40	Sol battant, ressemble à T3						
			4	6	1	3	40	Légèrement plus foncé que T3						
			5	6	0	2	40	Légèrement plus foncé que T3						
T3	-10082_01551	Betteraves sucrières	1	9	1	5	25	Erosion de surface, sol peu foncé	0,8	2,8	28,75	Parcelle possédant un sol battant, construite sur matériaux calcaire, présence d'érosion (gros orages quelques jours auparavant sur la commune de Grandfontaine, 25 mm en 20 min d'après l'exploitant)	Composite PER + DA (TB) Analyses composites PER exploitant (tactile et visuel)	
			2	6	1	3	55	Erosion de surface, sol peu foncé						
			3	5	0	1	65	Erosion de surface, encore moins foncé, couche superficielle partie avec la pluie						
			4	5	1	2	55	Sol battant et érodé, sol peu foncé						
			5	6	1	3	55	Sol peu foncé						
T4	-10082_1551	Blé d'automne	1	70	0	1	50	Erosion et battance, similaire à T3	0,6	1,8	30	Parcelle homogène avec phénomène de battance et d'érosion, les résidus de la culture précédente sont enfouis à 20 cm et ne sont pas dégradés	Analyses composite PER exploitant (tactile et visuel)	
			2	70	1	2	35	Résidus mal décomposés à 20 cm de profondeur, similaire à T3						
			3	55	1	3	30	Similaire à T3						
			4	80	0	0	50	Similaire à T3						
			5	80	1	3	50	Similaire à T3						
T5	10082_001551	Prairie temporaire	1	15	6	1	40	Similaire à T3, érosion	1,6	1,4	28,75	Parcelle divisée en deux dans l'espace, avec une prairie temporaire semée récemment sur un bout de la parcelle et une prairie temporaire plus ancienne sur l'autre partie	Analyses composite PER exploitant (tactile et visuel)	
			2	13	1	2	40	Similaire à T3, érosion						
			3	55	0	2	30	Similaire à T3						
			4	50	1	1	25	Similaire à T3						
			5	70	0	1	50	Similaire à T3						
T6	-10082_31	Prairie temporaire	1	20	1	1	35	Similaire à T3	0,6	1,4	30	Parcelle homogène, ressemble à T3	Analyses composite PER exploitant (tactile et visuel)	
			2	30	1	1	50	Similaire à T3						
			3	25	0	1	45	Légèrement plus foncé que T3						
			4	25	1	2	45	Légèrement plus foncé que T3						
			5	20	0	2	45	Similaire à T3						
T7	-10082_01553 (monitoring)	Colza d'automne huile	1	130	1	2	40	Terre plus clair que T7.2	9,8	2,6	30	Parcelle hétérogène avec bande de cailloux calcaires en son centre	Analyse TV -> composite PER + DA Analyses composites PER exploitant (tactile et visuel)	
			2	100	40	2	40	Foncé sur 15 cm puis clair						
			3	140	1	5	40	Idem T8.5						
			4	120	6	3	45	Idem T7.2						
			5	140	1	1	45	Sol profond, plus foncé						
T8	-10082_1553	Blé d'automne	1	95	17,5	5	30	Légèrement plus clair que T7.5	5,3	4,2	30	Parcelle hétérogène, ressemblant à T7 et possèdent les mêmes hétérogénéités	Analyses composite PER exploitant (tactile et visuel)	
			2	100	6	10	30	Idem T7.5						
			3	105	1	3	40	Idem T8.1						
			4	95	1	1	45	Idem T7.5						
			5	95	1	2	50	Idem T7.5						

Annexe 23: Résultats de la caractérisation des sols de l'exploitation de Joan Studer (Le code couleur n'a pas d'importance particulière, il est juste destiné à voir quelle parcelles sont regroupés ensemble).

ID_BRF	ID_TV	Culture	Piqure	Valeurs observées			Remarques	Valeurs retenues pour le bilan humique			Remarque général	Dernières Analyses effectuées	Regroupement de parcelles	
				Hauteur culture cm	CaCO3 %p	Grossiers %v		Profondeur cm	CaCO3 %p	Grossiers %v				Profondeur cm
J1		Métail féverole	1	70	1	7	35	Bien pourvu en MO	0,4	3,2	30	Parcelle peu homogène avec la roche affleurante (calcaire) à sa moitié sud (terre plus foncée) et sol plus profond ainsi que ressemblant à J2 dans sa moitié nord (terre moins foncée), présence de quelque adventice, notamment du mouron, parcelle sur même roche mère que J3, cailloux concassés	Composite et Da/TB	
			2	115	0	0	50	Moins foncé, ressemble à J2						
			3	80	0	5	35	Bien pourvu en MO						
			4	110	0	1	55	Moins foncé, ressemble à J2						
			5	85	1	3	35	Bien pourvu en MO jusqu'à la roche						
J2	-4557_40 (monitoring)	Prairie temporaire	1	60	1	7	80	Très peu de réaction carbonatée sur la terre fine	1,0	3,4	30	Parcelle du monitoring, relativement homogène, avec une bande ressemblant à J3 et J1 à l'ouest, les cailloux sont calcaires mais la terre fine est très peu carbonatée (ceci s'applique généralement à toutes les parcelles analysées)	Composite et Da/TV	
			2	55	1	2	80	Fort réaction au HCl sur cailloux						
			3	45	1	2	80	Terre plus claire que J3						
			4	40	1	3	40	Terre foncée comme J3						
			5	60	1	3	40	Légèrement moins foncé que J3						
J3		Prairie temporaire	1	35	1	5	30	Terre plus foncée que J2	3,0	6,0	28	Parcelle proche de J1 avec en son centre une ressemblance avec J2, plus de cailloux et la terre fine semble être plus carbonatées surtout côté ouest	Analyse de sol PER: MO, Argile (tactile), CaCO3, pH...	
			2	30	1	7	25	Sol peut profond						
			3	50	6	3	40	Terre moins foncée que J3.2						
			4	45	1	5	80	Terre moins foncée que J3.3						
			5	30	6	10	25	Terre fine carbonatée						
J4		Epeautre	1	80	1	2	55	Beaucoup de cailloux après 30 cm, foncé idem J2	0,8	2,4	30	Sol construit sur la même roche mère que J2 mais ressemblant à J1 et J3	Analyse de sol PER: MO, Argile (tactile), CaCO3, pH...	
			2	80	1	2	35	Foncé entre J1 et J2, ressemble à J3						
			3	60	1	3	35	Foncé entre J1 et J2						
			4	75	0	3	40	Foncé entre J1 et J2 jusqu'à la roche						
			5	65	1	2	50	Moins foncé						
J5		Métail féverole	1	85	6	15	25	Très foncé jusqu'à la roche	4,0	18,0	26	Parcelle peut profonde, avec une forte proportion de grossiers et de matière organique, construite sur la même roche mère que J1 et J3 contrairement à ce que indique la carte géologique qui affirme que ce sol est construit sur le même matériau mère que J2 et J4, présence d'adventices (mourons et autre)	Composite et Da/TB	
			2	80	6	20	20	Très foncé jusqu'à la roche, présence de mourons						
			3	80	1	15	25	Très foncé jusqu'à la roche						
			4	80	6	25	30	Très foncé jusqu'à la roche						
			5	90	1	15	30	Très foncé jusqu'à la roche						
J6		Prairie temporaire	1	70	0	1	25	Ressemble à J1	2,8	2,0	28	Parcelle hétérogène, parfois profonde, parfois peu profonde, sol construit sur la même roche mère que J1 et J3	Analyse de sol PER: MO, Argile (tactile), CaCO3, pH...	
			2	50	1	0	50	Entre J1 et J2						
			3	50	1	1	45	idem						
			4	60	6	3	30	idem						
			5	55	6	5	25	Un peu plus foncé						
J7	-4557_41 (monitoring)	Métail féverole	1	45	0	5	70	Peu foncé	0,0	5,4	30	Parcelle avec graviers et cailloux rond (roulés), pas de réaction à l'acide même sur les grossiers, sol construit sur moraine des Vosges, culture peut développée, parcelle à problème, parcelle homogène	Composite et Da/TV	
			2	50	0	5	30	Légèrement plus foncé						
			3	35	0	5	55	idem						
			4	40	0	7	35	idem						
			5	35	0	5	40	idem						

Annexe 24: Analyses de sols composites PER réalisées dans le cadre du projet "Terre Vivantes" et de l'étude "BRF" au sein de l'exploitation de M. Vuillaume.

Parcelle	pH	CaCO3 tot. [%]	MO [%]	Argile [%]	Silt [%]	Sable [%]	Texture	P2O5 [indice]	K2O	Mg [indice]	Facteurs de correction		
	PH-H2O	CACO3	CORG./MO	GRAN (KOM)				CO2-CACL2			P2O5	K2O	MG
T1 (monitoring)	7,1	0	4,8	32,1	63	4,9	Silt-argileux	4,80	3,20	7,60	1,00	0,80	1,40
T3	6,9	0	4,3	31,6	61,5	6,9	Silt-argileux	5,5	5	10,2	1	0,4	1
T7 (monitoring)	7,7	2,1	3,4	28,1	61,4	10,5	Silt-limoneux	22,3	4,7	7,9	0	1,1	1,2

Annexe 25 : Analyses de sols composites PER réalisées dans le cadre du projet "Terre Vivantes" et de l'étude "BRF" au sein de l'exploitation de M. Studer.

Parcelle	pH	CaCO3 tot. [%]	MO [%]	Argile [%]	Silt [%]	Sable [%]	Texture	P [mg/kg]	K [mg/kg]	Mg [mg/kg]	Facteurs de correction		
	PH-H2O	CACO3	CORG./MO	GRAN (KOM)				AAE10			P2O5	K2O	MG
J2 (monitoring)	6,7	0	5	28,1	62,9	9	Silt-Limoneux	77,60	166,10	157,40	0,60	1,00	1,00
J7 (monitoring)	6,1	1	3,9	16,40	32,80	50,70	Limon-sableux	104,40	167,60	125,30	0,40	1,00	1,00
Parcelle	pH	CaCO3 tot. [%]	MO [%]	Argile [%]	Silt [%]	Sable [%]	Texture	P2O5 [indice]	K2O	Mg [indice]	Facteurs de correction		
	PH-H2O	CACO3	CORG./MO	GRAN (KOM)				CO2-CACL2			P2O5	K2O	MG
J1	7,2	0	5,5	36,9	56,1	6,9	Silt-argileux	8,8	1,4	9,3	0,8	1,4	1,2
J5	7,6	10,1	9,5	53,4	37,9	8,6	Argile	9,6	3,6	6,4	0,6	1,2	1,6

Annexe 26 : Résultats des densités apparentes réalisées par nos soins.

Parcelle	Echantillons	Masse au déballage (g)	Volume au déballage avec plastique (cm3)	Hauteur plastique (cm)	Volume plastique (cm3)	Volume au déballage (cm3)	Volume moyen au déballage (cm3)	Masse sèche (105°C, 48h) avec barquette (g)	Masse (105°C, 48h) barquette (g)	Masse sèche (105°C, 24h) barquette (g)	Masse cailloux avec barquette (g)	Masse cailloux (105°C, 24h) (g)	Densité réel cailloux (g/cm3)	Volume de cailloux (cm3)	Teneur en cailloux (%)	Densité apparente au déballage (g/cm3)	Porosité (%)	Porosité moyenne (%)	Teneur en eau au déballage (%)	Teneur moyenne en eau au déballage (%)	
																					105°C, 48h
J1	J1.1	226,64	140,7	12	1,56	139,14	139,31	169,01	432	164,69	21,77	17,45	1,11	6,79	4,87%	1,11	58,07%		26,68%		
	J1.2	205,17	130,6	10	1,43	129,30	129,04	151,05	431	146,74	20,35	16,04	1,06	6,24	4,84%	1,06	59,83%		28,48%		
	J1.3	246,62	156,2	12	1,56	154,64	154,44	173,5	436	169,14	17,09	12,73	2,57	4,95	3,21%	1,05	60,52%	1,078	31,42%	29,32%	
	J1.4	223,65	145,8	10	1,43	144,20	144,29	160,53	435	156,18	12,14	7,79	1,05	3,03	2,10%	1,05	60,36%		30,17%		
	J1.5	252,96	160,3	12	1,56	158,44	158,72	181,8	434	177,46	5,03	0,69	1,12	0,27	0,17%	1,12	57,90%		29,85%		
	J5.1	257,01	158,2	11	1,43	156,77	156,91	199,67	434	195,33	99,09	94,75	0,83	35,89	22,87%	0,83	68,64%		24,00%		
	J5.2	251,67	152,7	11	1,43	151,37	151,40	191,58	434	187,24	92,78	88,44	0,84	33,50	22,13%	0,84	68,38%		25,60%		
	J5.3	2015,12	130	11	1,43	128,57	128,32	172,02	433	167,69	97,33	93	2,64	35,23	27,45%	0,80	69,72%	0,788	70,26%	91,68%	39,28%
	J5.4	204,42	148,1	12	1,56	146,54	146,37	150,77	433	146,44	63,5	59,17	0,70	22,41	15,31%	0,70	73,43%		28,36%		
	J5.5	187,41	147,7	10	1,43	146,21	146,35	141,56	433	137,23	61,39	57,06	0,77	21,61	17,11%	0,77	71,12%		26,78%		
	T3.1	238,83	151,5	13	1,69	149,81	149,78	168,18	432	163,86	9,71	5,39	1,07	2,14	1,43%	1,07	59,50%		31,39%		
	T3.2	315,76	184,5	14	1,82	182,68	182,75	225,19	434	220,85	6,89	2,55	1,20	1,01	0,55%	1,20	54,67%		30,06%		
	T3.3	258,29	156,2	12,5	1,625	154,58	154,87	182,77	432	178,45	4,63	0,31	2,52	0,12	0,08%	1,15	56,56%	1,176	55,63%	30,91%	28,75%
	T3.4	346,96	206,6	10,5	1,365	205,24	205,35	267,88	435	263,53	4,78	0,43	0,43	0,17	0,08%	1,28	51,61%		24,05%		
	T3.5	329,37	206	14	1,82	204,18	204,15	243,62	431	239,31	4,59	0,28	0,28	0,11	0,05%	1,17	55,79%		27,34%		

Annexe 27 : Détail des entrées de carbone organique dans les sols de l'exploitation de Thomas Vuillaume.

Rotation sur 10 ans	Amendement 1		Amendement 2		Résidus aériens 1		Résidus racinaires 1		Engrais vert/couvert racines		Engrais vert/couvert parties aériennes		Entrées organiques humifiées	
	tMS/ha	k1	tMS/ha	k1	tMS/ha	k1	tMS/ha	k1	tMS/ha	k1	tMS/ha	k1	tMOH/ha	tCorg/ha
Année 1 : PT	0	0	0	0	0	0	0,5	0,12	0	0	0	0	0,060	0,035
Année 2 : PT	0	0	0	0	0	0	0,5	0,12	0	0	0	0	0,060	0,035
Année 3 : PT	0	0	0	0	0	0	0,5	0,12	0	0	0	0	0,060	0,035
Année 4 : Tournesol	0	0	0	0	4	0,1	2	0,15	0	0	0	0	0,700	0,406
Année 5 : Blés d'automne	0	0	0	0	0	0	3	0,15	0	0	0	0	0,450	0,261
Année 6 : Colza d'automne	2,2815	0,5	1,41	0,5	5	0,15	2	0,15	1,00	0,15	4	0,05	3,246	1,883
Année 7 : Blés d'automne	0	0	0	0	0	0	2,5	0,15	0	0	0	0	0,375	0,218
Année 8 : Colza d'automne	0	0	0	0	5	0,15	2	0,15	1,00	0,15	4	0,05	1,400	0,812
Année 9 : Blés d'automne	0	0	0	0	0	0	3	0,15	1,50	0,15	5	0,08	1,075	0,624
Année 10 : Betterave	2,2815	0,5	1,41	0,5	4	0,08	0,8	0,15	0	0	0	0	2,286	1,326
Moyenne sur 10 ans													0,971	0,563

Annexe 28 : Tableau récapitulatif des calculs des bilans humiques des parcelles de l'exploitation de Thomas Vuillaume. Le stock optimal est ici considéré comme MO = 17 % de la masse en argile.

Nom de la parcelle	Surface de la parcelle ha	Entrées de Corg. tCorg/ha/an	Stock de Corg. t/ha	K2 K2/an	Evolution annuelle du stock de Corg t/ha	Teneur en argile %p	Teneur optimale en MO %p	Teneur optimale en Corg. %p	Profondeur cm	Da g/cm3	Teneur en grossier %v	Stock optimale en Corg. t/ha	Stock de Corg. à l'équilibre t/ha	Teneur en MO à l'équilibre %p	Déficit d'entrées d'humus tMOH/ha/an	Apport de BRF pour combler le déficit tMS/ha/an	Apport de BRF pour combler le déficit tMS/parcelle/an	Déficit/surplus de Corg. t/parcelle
T1	3	0,563	93,942	0,0086	-0,2465	32,10%	5,46%	3,17%	30	1,15	2,20%	106,80	65,34	3,34%	0,616	1,232	3,697	-124,37
T2	2,21	0,563	84,652	0,0090	-0,1976	31,60%	5,37%	3,12%	30	1,176	3,80%	105,76	62,67	3,18%	0,668	1,335	2,951	-95,22
T3	8,32	0,563	81,968	0,0090	-0,1713	31,60%	5,37%	3,12%	28,75	1,176	2,80%	102,40	62,85	3,30%	0,611	1,222	10,168	-329,04
T4	8,75	0,563	86,411	0,0090	-0,2134	31,60%	5,37%	3,12%	30	1,176	1,80%	107,95	62,67	3,12%	0,702	1,404	12,281	-396,25
T5	1,22	0,563	83,148	0,0089	-0,1731	31,60%	5,37%	3,12%	28,75	1,176	1,40%	103,88	63,60	3,29%	0,615	1,230	1,501	-49,14
T6	0,42	0,563	86,763	0,0090	-0,2166	31,60%	5,37%	3,12%	30	1,176	1,40%	108,39	62,67	3,11%	0,709	1,417	0,595	-19,20
T7	5,49	0,563	69,152	0,0085	-0,0233	28,10%	4,78%	2,77%	30	1,2	2,60%	97,16	66,41	3,27%	0,450	0,899	4,938	-168,83
T8	6,71	0,563	68,016	0,0090	-0,0497	28,10%	4,78%	2,77%	30	1,2	4,20%	95,56	62,50	3,12%	0,514	1,028	6,895	-221,86
Total	36,12			Moyenne exploitation	-0,145													

Exemple de calculs du Bilan Humique

Entrées d'humus :

- Exemple pour le colza d'automne (exploitation de Thomas Vuillaume) :
 - Entrées d'humus = (masse amendement 1 (Fumier composté)*K1 amendement 1) + (masse amendement 2 (BRF)*K1 amendement 2) + (masse résidus aériens*K1 résidus aériens) + (masse résidus racinaires*K1 résidus racinaires) + (masse résidus couvert parties aériennes*K1 résidus couvert parties aériennes) + (masse résidus couvert parties racinaires *K1 résidus couvert parties racinaires)
 - Soit : $(2,2815*0,5)+(1,41*0,5)+(5*0,15)+(2*0,15)+(1*0,15)+(4*0,05) = 3,246$ tMOH/ha
 - Conversion en en Corg = $3,246/1,724 = 1,883$ tCorg/ha
- Entrée moyenne de Corg sur l'ensemble de la rotation = (Entrées de Corg année 1 + entrées de Corg année 2 + [...] + Entrées de Corg année 10)/10
Soit : $(0,35+0,35+[...]+1,326)/10 = 0,5633$ tCorg/ha

Stocks, K2 et déficit :

- Exemple pour la parcelle T1 :
 - $K2 = 0,03 \cdot [1 + 0,2 \cdot (8,9-10)] \cdot [1/(1 + 0,005 \cdot 321)] \cdot [1/(1 + 0,0015 \cdot 28)] = 0,0086$
 - Stock de carbone actuel = $((0,30*10'000) - (0,30*10'000*0,022)) * 1,15 * (0,0480/1,724) = 93,94$ tCorg/ha
 - Stock recherché en Corg (MO = 17 % de la masse en argile) = $((0,3*10'000) - (0,3*10'000*0,022)) * 1,15 * ((0,321*0,17)/1,724) = 106,8$ tCorg/ha
 - Stock à l'équilibre = $0,563/0,0086 = 65$ tCorg/ha
 - Evolution du stock (pas de temps annuelle) = $0,563 - 0,0086 * 93,94 = -0,24$ tCorg/ha/an
 - Déficit d'entrée d'humus = $[((106,8*0,0086) - 0,563)] * 1,724 = 0,61$ tMOH/ha/an
 - Conversion de ce déficit en quantité de BRF à apporter = $0,61/0,5 = 1,2$ tMS/ha/an*3 = $3,6$ tMS/parcelle/an,
 - Séquestration de Corg à la situation d'équilibre que permet cet apport de BRF annuel = $106,8 - 65,34 = 41,46$ tCorg/ha*3 = $124,3$ tCorg/parcelle

Annexe 29 : Détails des calculs du bilan humique pour une parcelle.

Annexe 30 : Détail des entrées de carbone organique dans les sols de l'exploitation de Joan Studer.

Rotation sur 10 ans	Amendement 1		Amendement 2		Résidus aériens 1		Résidus racinaires 1		Engrais vert/couvert racines		Engrais vert/couvert parties aériennes		Entrées organiques humifiées	
	tMS/ha	k1	tMS/ha	k1	tMS/ha	k1	tMS/ha	k1	tMS/ha	k1	tMS/ha	k1	tMOH/ha	tCorg/ha
Année 1 : PT	9	0,15	0	0	0	0	0,5	0,12	0	0	0	0	1,410	0,818
Année 2 : PT	9	0,15	0	0	0	0	0,5	0,12	0	0	0	0	1,410	0,818
Année 3 : PT	9	0,15	0	0	0	0	0,5	0,12	0	0	0	0	1,410	0,818
Année 4 : PT	9	0,15	0	0	0	0	0,5	0,12	0	0	0	0	1,410	0,818
Année 5 : Maïs	2,06	0,5	0	0	0	0	2	0,15	0	0	0	0	1,330	0,771
Année 6 : Méteil	0	0	0	0	0	0	1,74	0,15	0,00	0,00	0	0	0,261	0,151
Année 7 : Céréale	2,7	0,15	0	0	0	0	2	0,15	0	0	0	0	0,705	0,409
Année 8 : Méteil	0	0	0	0	0	0	1,74	0,15	0,00	0,00	0	0	0,261	0,151
Année 9 : Méteil	0	0	0	0	0	0	1,74	0,15	0,00	0,00	0	0	0,261	0,151
Année 10 : PT	9	0,15	0	0	0	0	0,5	0,12	0	0	0	0	1,410	0,818
Moyenne sur 10 ans													0,987	0,572

Annexe 31 : Tableau récapitulatif des calculs des bilans humiques des parcelles de l'exploitation de Joan Studer. Le stock optimal est ici considéré comme MO = 17 % de la masse en argile.

Nom de la parcelle	Surface de la parcelle	Entrées de Corg.	Stock de Corg.	K2	Evolution annuelle du stock de Corg	Teneur en argile	Teneur optimale en MO	Teneur optimale en Corg.	Profondeur	Da	Teneur en grossier	Stock optimale en Corg.	Stock de Corg. à l'équilibre	Teneur en MO à l'équilibre	Déficit d'entrées d'humus	Apport de BRP pour combler le déficit	Apport de BRP pour combler le déficit	Déficit/surplus de Corg.
	ha	tCorg/ha/an	t/ha	K2/an	t/ha	%p	%p	%p	cm	g/cm3	%v	t/ha	t/ha	%p	tMOH/ha/an	tMS/ha/an	tMS/parcelle/an	t/parcelle
J1	1,67	0,572	99,871	0,0069	-0,1185	36,90%	6,27%	3,64%	30	1,078	3,20%	113,91	82,74	4,56%	0,372	0,743	1,242	-52,05
J2	1,67	0,572	92,454	0,0081	-0,1775	28,10%	4,78%	2,77%	30	1,1	3,40%	88,33	70,57	3,82%	0,248	0,497	0,830	-29,66
J3	2,23	0,572	90,517	0,0067	-0,0304	36,90%	6,27%	3,64%	28	1,078	6,00%	103,24	85,95	5,22%	0,199	0,397	0,886	-38,56
J4	1,67	0,572	100,697	0,0069	-0,1201	36,90%	6,27%	3,64%	30	1,078	2,40%	114,85	83,23	4,55%	0,375	0,750	1,252	-52,80
J5	2,03	0,572	92,576	0,0051	0,1012	53,40%	9,08%	5,27%	26	0,788	18,00%	88,46	112,46	11,54%	-0,211	-0,421	-0,855	48,71
J6	1,36	0,572	94,369	0,0067	-0,0579	36,90%	6,27%	3,64%	28	1,078	2,00%	107,63	85,70	4,99%	0,253	0,505	0,687	-29,83
J7	1,08	0,572	83,461	0,0109	-0,3356	16,40%	2,79%	1,62%	30	1,3	5,40%	59,66	52,61	2,46%	0,132	0,264	0,286	-7,61
Total	11,71				Moyenne exploitation											Total exploitation	5,181	-210,52

Annexe 32: Tableau récapitulatif des calculs des bilans humiques des parcelles de l'exploitation de Joan Studer. Le stock optimal est ici considéré comme MO = 24 % de la masse en argile.

Nom de la parcelle	Surface de la parcelle	Entrées d'humus	Stock de Corg.	K2	Bilan humique pas de temps annuel	Teneur en argile	Teneur optimale en MO	Teneur optimale en Corg.	Profondeur	Da	Teneur en grossier	Stock optimale en Corg.	Stock de Corg. à l'équilibre	Teneur en MO à l'équilibre	Déficit d'entrées d'humus	Apport de BRP pour combler le déficit	Apport de BRP pour combler le déficit	Déficit/surplus de Corg.
	ha	t/ha/an	t/ha	K2/an	t/ha	%p	%p	%p	cm	g/cm3	%v	t/ha	t/ha	%p	tMOH/ha/an	tMS/ha/an	tMS/parcelle/an	t/parcelle
J1	1,67	0,572	99,871	0,0069	-0,1185	36,90%	8,86%	5,14%	30	1,078	3,20%	160,81	82,74	4,56%	0,931	1,862	3,110	-130,38
J2	1,67	0,572	92,454	0,0081	-0,1775	28,10%	6,74%	3,91%	30	1,1	3,40%	124,70	70,57	3,82%	0,757	1,514	2,528	-90,40
J3	2,23	0,572	90,517	0,0067	-0,0304	36,90%	8,86%	5,14%	28	1,078	6,00%	145,75	85,95	5,22%	0,687	1,373	3,062	-133,36
J4	1,67	0,572	100,697	0,0069	-0,1201	36,90%	8,86%	5,14%	30	1,078	2,40%	162,14	83,23	4,55%	0,936	1,871	3,125	-131,78
J5	2,03	0,572	92,576	0,0051	0,1012	53,40%	12,82%	7,43%	26	0,788	18,00%	124,89	112,46	11,54%	0,109	0,218	0,443	-25,23
J6	1,36	0,572	94,369	0,0067	-0,0579	36,90%	8,86%	5,14%	28	1,078	2,00%	151,95	85,70	4,99%	0,763	1,526	2,075	-90,10
J7	1,08	0,572	83,461	0,0109	-0,3356	16,40%	3,94%	2,28%	30	1,3	5,40%	84,23	52,61	2,46%	0,593	1,186	1,281	-34,15
Total	11,71				Moyenne exploitation											Total exploitation	15,624	-635,40

Annexe 34 : Détail du calcul du coût horaire du broyeur Greenmech de M. Studer avec le tableur "TractoScope"

Groupe de machine / désignation		Type de machine			
Broyeur à fléaux, 90-110 cm		2115	Code		
Unité de travail (UT): heures (h)		sans carburant			
Capacité de travail (Budget de travail Agroscope)					
Arbeitsleistung	#N/A	Broyeur Greenmech Ltd EC 150 TMP			
Leistung	#VAEUR!				
	1	0			
Indications personnelles données ont été modifiées					
Poste	Unité	Valeur Agroscope (default)			
Prix d'achat	Fr.	5500		9000	
Neuf ou occasion?				Neuf	
Utilisation par an	UT	80 heures (h)		50 heures (h)	
Durée d'amortissement	Années	12		12	
Durée d'utilisation technique	UT	2000 heures (h)		3000 heures (h)	
Taux d'utilisation	%	48%		20%	
Valeur résiduelle	Facteur	0,25		0,25	
Valeur résiduelle, indic. personne	Fr.				
Degré de charge du moteur	%				
Facteur de réparation et entretien	Facteur	1,5		2,5	
Bâtiments nécessaires	m3	8		8	
Supplément administration et risq	%	10%		10%	
Autres suppléments		0%		0%	
Calcul des coûts en Fr.		par an	par UT	par an	pro UT
Amortissement		344		563	
Coûts d'intérêt		77		126	
Coûts des bâtiments		48		48	
Assurances et taxes		11		11	
Total des coûts fixes		480	6,00	748	14,95
Réparations et entretien			4,13		7,50
Carburant			0,00		0,00
Additifs			0,00		
Total des coûts variables			4,13		7,50
Tarif d'indemnisation net (sans suppléments)			10,12		22,45
Tarif d'indemnisation, suppléments compris			11,13		24,70

Annexe 35 : Détail des calculs des coûts opérationnels de la pratique BRF pour l'exploitation de M. Vuillaume.

Opération	Machine	Coûts machine	Taux d'utilisation du matériel	Nombre d'opérateurs	Main d'œuvre	Total coûts machines	Total coûts mains d'œuvre	Total par heure de chantier	Coûts de production du BRF	Coûts de production du BRF	Temps main d'œuvre par unité de production
		Fr./h	%						UT	Fr.UT/h	
Chantier de taille de branches	Tracteur 55-64 kW (74-87 ch)	37,6	100%	1	28	67,61	28	95,61	4,781	22,983	0,050
	Epareuse à bras, attelage 3 points, 800 kg	30,01	100%								
Chantier de broyage	Tracteur 105-124 kW (143-169 ch)	63,33	100%	1	28	108,32	28	136,32	6,816	32,769	0,050
	Broyeur forestier	44,99	100%								
Total création du BRF									11,60	55,75	0,10
Transport du BRF											
Opération	Machine	Coûts machine	Taux d'utilisation du matériel	Nombre d'opérateurs	Main d'œuvre	Total coûts machines	Total coûts mains d'œuvre	Total par heure de transport	Coûts de transport du BRF	Coûts de transport du BRF	Temps main d'œuvre par unité de production
		Fr./h	%						UT	Fr.UT/h	
Transport du BRF	Tracteur 55-64 kW (74-87 ch)	37,6	100%	1	28	66,6	28	94,6	0,601	2,888	0,006
	Epandeur universelle, 21 m3	29	100%								
Epandage du BRF											
Opération	Machine	Coûts machine	Taux d'utilisation du matériel	Nombre d'opérateurs	Main d'œuvre	Total coûts machines	Total coûts mains d'œuvre	Total par heure d'épandage	Coûts d'épandage du BRF	Coûts d'épandage du BRF	Temps main d'œuvre par unité de production
		Fr./h	%						UT	Fr.UT/h	
Epandage du BRF	Tracteur 55-64 kW (74-87 ch)	37,6	100%	1	28	66,6	28	94,6	5,631	27,072	0,060
	Epandeur universelle, 21 m3	29	100%								

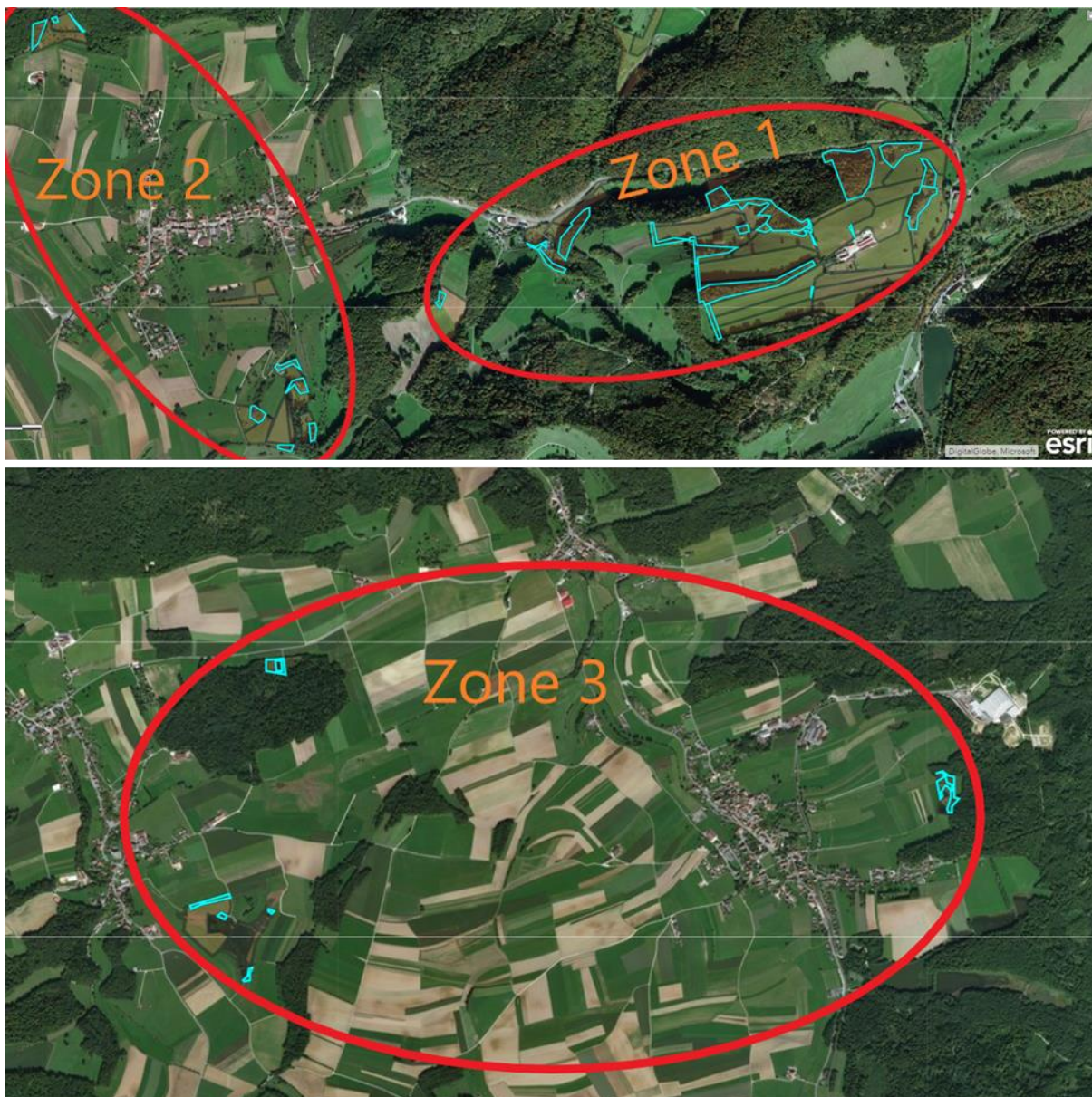
Annexe 36 : Détail des calculs des coûts opérationnels de la pratique BRF pour l'exploitation de M. Studer.

Création du BRF											
Opération	Machine	Coûts machine	Taux d'utilisation du matériel	Nombre d'opérateurs	Main d'œuvre	Total coûts machines	Total coûts mains d'œuvre	Total par heure de chantier	Coûts de production du BRF	Coûts de production du BRF	Temps main d'œuvre par unité de production
		Fr./h	%						UT	Fr.UT/h	Fr.
Chantier de taille de branches	Tracteur 55-64 kW (74-87 ch)	37,6	50%	1	28	43,485	28	71,485	15,886	76,373	0,222
	Epareuse à bras, attelage 3 points, 800 kg	30,01	50%								
	Tronçonneuse, 50 cm, moteur à essence, 4 kW (5 ch)	19,36	50%								
Chantier de broyage	Tracteur 30-36 kW (41-49 ch)	25,37	100%	2	28	50,08	56	106,08	23,573	113,333	0,444
	Broyeur Greenmech Ltd EC 150 TMP	24,71	100%								
Total création du BRF									39,46	189,71	0,67

Transport du BRF											
Opération	Machine	Coûts machine	Taux d'utilisation du matériel	Nombre d'opérateurs	Main d'œuvre	Total coûts machines	Total coûts mains d'œuvre	Total par heure de transport	Coûts de transport du BRF	Coûts de transport du BRF	Temps main d'œuvre par unité de production
		Fr./h	%						UT	Fr.UT/h	Fr.
Transport du BRF	Tracteur 55-64 kW (74-87 ch)	37,6	100%	1	28	77,6	28	105,6	1,408	6,769	0,013
	Remorque, basculement hydraulique (bh), 7 t (10 m3)	40	100%								

Epannage du BRF											
Opération	Machine	Coûts machine	Taux d'utilisation du matériel	Nombre d'opérateurs	Main d'œuvre	Total coûts machines	Total coûts mains d'œuvre	Total par heure d'épannage	Coûts d'épannage du BRF	Coûts d'épannage du BRF	Temps main d'œuvre par unité de production
		Fr./h	%						UT	Fr.UT/h	Fr.
Epannage du BRF	Tracteur 55-64 kW (74-87 ch)	37,6	100%	1	28	76,5	28	104,5	8,164	39,250	0,078
	Epandeur à fumier latéral, 8 m3	45	80%								
	Chargeur frontal, moyen, 49-66 kW (66-90 ch)	14,5	20%								

	Production de biomasse valorisable en BRF (tMS/an)	Volume de BRF correspondant (m3/an)
Total exploitation	28,65	137,73
Zone 1	16,99	81,70
Zone 2	3,48	16,72
Zone 3	8,17	39,30



Annexe 37 : Localisation des zones délimitées pour les calculs des coûts de transport du BRF sur l'exploitation de M.Studer.

Le Bois Raméal Fragmenté (BRF) en grande culture

Un amendement organique complémentaire
pour enrichir vos sols en carbone



Annexe 38: Première page du manuel de vulgarisation.