

Détermination des stocks de carbone organique des sols forestiers en fonction de la gestion sylvicole du Sapin Douglas



ALBERTIN Elise
Licence professionnelle « Espace Naturel », BAEE
Année 2014/2015

Tuteur : CECILLON Lauric
IRSTEA Grenoble

« Le présent rapport constitue un exercice pédagogique qui ne peut en aucun cas engager la responsabilité de l'entreprise ou du laboratoire d'accueil »

Remerciements

Je tiens à remercier mon maître de stage Lauric Cécillon pour m'avoir permis de réaliser ce stage à l'IRSTEA de Grenoble, ainsi que toute l'équipe EM pour leur accueil et leur disponibilité.

Un grand merci à Sébastien De Danieli pour sa disponibilité, ses conseils avisés et ses encouragements.

Un merci à Thomas Goïtré pour sa bonne humeur quotidienne et aussi merci à Alix Jourdan. Tous deux m'ont beaucoup soutenue pendant ces cinq mois.

Je remercie Noëlle Bru pour l'aide lors de la réalisation des analyses statistiques et Nadège Planté pour la relecture du rapport.

INDEX DES FIGURES.....	5
INTRODUCTION.....	6
MATERIEL ET METHODE	8
1. CHOIX DE L'ESPECE	8
2. CHOIX DES SITES D'ETUDES.....	10
2.1. Localisation des sites de Saint Brisson et de Chassenois.....	10
2.2. Géologie	10
2.3. Géomorphologie et climatologie	11
2.4. Historique des placettes	11
2.5. Description des essais.....	11
3. PROTOCOLE	13
3.1. Fosse pédologique	13
3.2. Densités apparentes des horizons de profondeur	15
3.3. Densité apparente des horizons superficiels	15
3.4. Echantillons composites	16
4. ANALYSE EN LABORATOIRE.....	16
4.1. Echantillons composites	16
4.2. Densités apparentes	16
4.3. Stock de carbone	17
5. METHODE DE TRAITEMENT	17
RESULTATS	17
1. SAINT BRISSON.....	18
1.1. Densité apparente.....	18
1.2. Concentration de carbone	19
1.3. Stocks de carbone.....	20
2. CHASSENOIX	21
2.1. Densité apparente du sol.....	21
2.2. Concentration de carbone	22
2.3. Stocks de carbone.....	23
3. SAINT BRISSON ET CHASSENOIX	24
4. INTERPRETATION DES RESULTATS.....	25
BILAN GENERAL.....	26
BIBLIOGRAPHIE	27
ANNEXES.....	29

Index des figures

Figure 1: Répartition française des productions de Douglas	8
Figure 2: Photo du sapin Douglas.....	8
Figure 3: Répartition des peuplements de Douglas par classes d'âge	9
Figure 4: Evolution de la production de sciages en m3.....	9
Figure 5: Localisation du site d'étude de Saint Brisson (1) et de Chassennoix (2)	10
Figure 6: Traitements appliqués sur le site de Saint Brisson.....	12
Figure 7: Traitements appliqués sur le site de Chassennoix	12
Figure 8: Localisation des 8 fosses pédologiques sur le site de Saint Brisson.....	14
Figure 9: Disposition d'une fosse pédologique	Erreur ! Signet non défini.
Figure 10: Fosse pédologique prête à être décrite	14
Figure 12: Densité apparente à l'eau	16
Figure 11: Densité apparente grâce à la méthode des cylindres	15
Figure 13: Densité apparente du sol en fonction du traitement et de la profondeur	18
Figure 14: Concentration de carbone en fonction du traitement et de la profondeur	19
Figure 15: Stocks de carbone du sol en fonction du traitement et de la profondeur	20
Figure 16: Densité apparente du sol en fonction du traitement en surface.....	21
Figure 17: Concentration en carbone en fonction du traitement en surface	22
Figure 18: Stocks de carbone du sol en fonction du traitement en surface	23
Figure 19: Effet site, profondeur et traitement (ACP).....	24
Figure 20: Cercle des corrélations	24
Figure 21: Géologie de Saint Brisson (1) et Chassennoix (2)	29
Figure 22: Historique de la géologie du Morvan	30
Figure 23: Régime de taillis	31
Figure 24: 3 grands types d'éclaircies	31
Figure 25: Plan du site d'étude de Saint Brisson	33
Figure 26: Plan du site d'étude de Chassennoix.....	34
Figure 27: Concentration de carbone en fonction du traitement.....	36
Figure 28: Stocks de carbone du sol en fonction du traitement pour le site de Saint Brisson	37
Figure 29: Résidus de l'Anova.....	45

Introduction

L'un des défis majeurs du XXI^{ème} siècle est le changement climatique et ses conséquences sociales, économiques et environnementales. L'augmentation régulière des concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre a conduit à s'interroger sur le rôle des écosystèmes et des sols en tant que source ou puits de carbone. Les surfaces boisées jouent un rôle majeur dans le stockage biologique du carbone mais ont aussi un potentiel énergétique significatif (Prieur et al., 2004). La contribution des forêts à la lutte contre l'intensification de l'effet de serre est abordée, à l'échelle globale, sous les deux points de vues, parfois considérés comme contradictoires, du stockage de carbone et de la production de bois énergie (Prieur et al., 2004).

La France est le premier pays consommateur de bois énergie en Europe (Couture et al., 2008). Cette filière utilise la biomasse pour la production de chaleur, d'électricité ou de dérivés de la chimie verte. Dans le cadre du Grenelle de l'Environnement, la France s'est fixée l'objectif de porter à 23 % la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie à l'horizon 2020, dont le bois pourrait en assurer une part majoritaire. L'augmentation de la consommation de bois-énergie et de bois-matériau implique un prélèvement de bois plus important dans les forêts gérées par le biais d'une intensification et d'une dynamisation de l'exploitation forestière. De nouveaux modes de sylviculture sont ainsi en développement : plantations semi-dédiées, taillis à courte ou très courte rotation (TCR et TTCR). Il s'agit de plantations d'espèces ligneuses à croissance rapide, souvent sur des parcelles agricoles peu productives et à faible stocks de carbone organique du sol. Les changements dans la gestion des forêts imposés par la filière bois-énergie et l'apparition de nouveaux modes de gestion sylvicole rend indispensable leur évaluation environnementale et notamment leur bilan carbone.

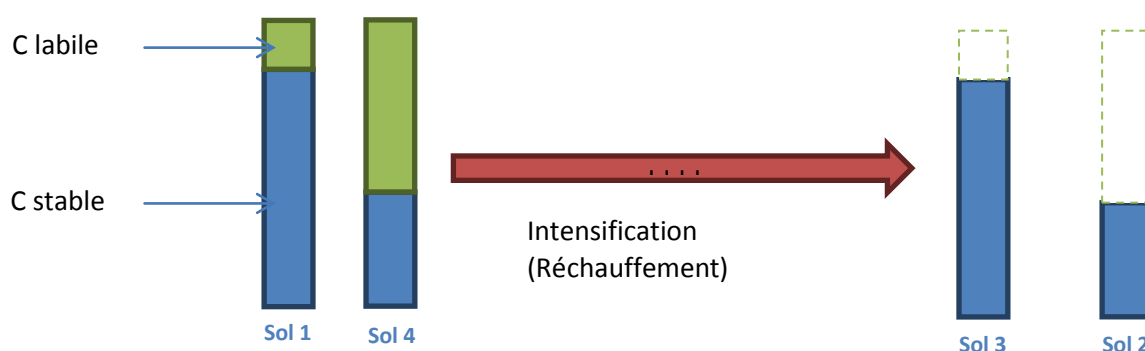
Quels seraient les impacts de cette intensification sur le bilan carbone des forêts ?

Les forêts constituent le stock de carbone le plus important en France, dont la majeure partie se situe dans les sols. Les stocks de carbone de la forêt française sont estimés à 860 millions de tonnes dans la biomasse et 1140 millions de tonnes dans le sol (Dupouey et al., 2000). En France métropolitaine, le stock de carbone dans les sols forestiers est estimé à environ 70tC/ha, ce qui représente plus de 70% des stocks de carbone (Liski et al., 2002 ; Dupouey et al., 2000, Bolin et al., 2000). Ces derniers ont été fortement dégradés par les activités humaines comme l'urbanisation ou la conversion de forêts en terres agricoles (Erb, 2004 ; Lal, 2004). Les stocks de carbone des sols forestiers dépendent d'une multitude de facteurs (climat, type de sol, gestion sylvicole) dont les effets sont mal connus (Jandl et al., 2007). L'apparition de modes de gestion sylvicole plus intensifs (TCR, TTCR) renforce l'incertitude quant à la durabilité du stockage du carbone dans les sols forestiers.

Comme dit dans le quatrième rapport du GIEC (groupe intergouvernemental d'experts sur le climat) : « Sur le long terme, une stratégie de gestion durable des forêts visant à augmenter les stocks de carbone en forêt tout en approvisionnant la filière bois (grume, fibre et énergie) à un niveau de prélèvement durable, génèrera les bénéfices d'atténuation maximum ». Lors de l'intervention du ministre de l'agriculture S. Le Foll en mars 2015, un « plan 4 pour 1000 » a été mis en place : « une augmentation relative de 4 pour mille par an des stocks de matière organique des sols suffirait à compenser l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre de la planète. Inversement, une diminution relative de 4 pour mille doublerait nos émissions ». La protection et le développement des stocks de carbone du sol ainsi que de la matière organique semblent donc primordiaux.

Le reboisement de parcelles agricoles permet d'augmenter les stocks de carbone dans la biomasse et de réapprovisionner le stock de carbone du sol (Post and Kwon, 2000). En moyenne le reboisement augmente le stock global de carbone de 18% sur plusieurs années (Guo et Grofford, 2002) et varie en fonction des essences d'arbres (Vesterdal et Raulund-Rasmussen, 1998 ; Six et al., 2002a)

Les sols forestiers accumulent rapidement du carbone mais la plus grande quantité est retrouvée sous forme labile (Jandl et al., 2007). L'accumulation de carbone stable dans le sol est un processus lent (Conen et al., 2004). Le taux de formation de matière organique stable du sol est compris entre 2 et 12 kg C/ha/an (Schlesinger et al., 2000). Seulement une faible proportion du carbone des plantes se stabilise dans le sol (Martin et Haider, 1986 ; Mayer, 1994 ; Richter et al., 1999 ; Kaiser et Guggenberger, 2003 ; Giardina et al., 2005). Une fois le carbone stabilisé dans le sol, le stock ne change plus, même lors de modification de gestion ou de climat (Torn et al., 2002). Le carbone stable du sol peut être érodé sur du long terme, mais de manière bien plus lente que le carbone labile. Des études ont montré que la perte de carbone du sol dû à un réchauffement est temporaire car seulement le carbone labile est relâché (Jarvis et Linder, 2000 ; Melillo et al, 2002). L'intensification des pratiques sylvicoles devrait donc être concentrée sur des sols ayant un fort taux de carbone stable de manière à limiter la perte (Corsi et al., 2012).



Piloter, par la gestion, les stocks de carbone du sol pourrait compenser les émissions anthropiques de CO₂ en grande culture ainsi qu'en forêt. Le projet piCaSo (pilotage sylvicole et contrôle pédologique des stocks de carbone des sols forestiers) de l'IRSTEA de Grenoble vise à mieux connaître l'effet de la sylviculture sur les stocks de carbone organique des sols. Un référentiel national de l'effet de plusieurs modes de gestion sylvicole (forêt non exploitée, gérée, plantation, TCR, TTCR) sur les stocks de carbone organique du sol dans différentes situations pédoclimatiques sera créé. Le projet est initialement basé sur les placettes des réseaux suivants : Gestion Naturalité Biodiversité (Irstea, ONF, RNF), les essais « biomasse » du FCBA (Institut technologique Formation, Construction, Ameublement, Forêt, Bois) et certains essais du GIS Coop de données (Groupement d'Intérêt Scientifique). Cela permettra de mesurer les stocks de carbone organique du sol au sein de peuplements (plantation/semis/régénération naturelle) de Douglas (*Pseudotsuga menziesii*), Pin maritime (*Pinus pinaster*), Chêne (*Quercus petraea*) et Peuplier (*Populus*) avec des densités de peuplement contrastées.

Trois hypothèses seront testées : (1) les stocks de carbone organique du sol sont plus élevés en TCR qu'en TTCR et eux même plus élevés qu'en grande culture ; (2) les stocks de carbone organique du sol sont plus élevés en plantation qu'en grande culture ; (3) les stocks de carbone organique du sol sont plus faibles en plantation qu'en forêt mature.

Matériel et méthode

Le protocole général prévoit une description biogéographique générale (coordonnées, topographie,...) ainsi qu'une description et une analyse du sol. Sur chacun des sites utilisés, des couples ou des triplets de placettes avec une gestion sylvicole différente sont comparés.

Les sols de 5 sites ont été étudiés durant ce stages, ce qui correspond à une semaine sur deux de terrain de avril à juin. Le travail en laboratoire n'étant pas terminé, les résultats sont disponibles pour deux sites seulement : Saint Brisson et Chassennoix sur le sapin Douglas. Le Douglas étant une essence très utilisée dans beaucoup de régions françaises en plantation, les sites comportant du Douglas ont été échantillonnés en priorité. Ces deux sites font partis d'essais densité et éclaircie du FCBA dans le massif du Morvan.

1. Choix de l'espèce



Figure 2: Photo du sapin Douglas

Le sapin Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) est une espèce de la famille des Pinaceae, originaire de la côte ouest du continent nord-américain. C'est un arbre à croissance rapide, d'où son importante utilisation dans l'exploitation forestière et les reboisements. Il a aussi de bonnes qualités techniques (transformation du bois pour la charpente, construction extérieures, parquet,...) ce qui le rend intéressant au point de vue économique. Il est très résistant aux conditions climatiques rudes et humides et est donc très utilisé en Europe en Grande Bretagne, en Ardenne Belge ou encore dans le Morvan, le massif Central et les Vosges en France (Figure 1: Répartition française des productions de Douglas). La France possède 50% de la ressource européenne en Douglas, ce qui la place au premier rang européen dans la



Figure 1: Répartition française des productions de Douglas

hiérarchie des pays producteurs de Douglas (d'après l'IFN - campagne 2006 à 2010, la surface plantée est de 420 000 ha en 2004).

Dans le Morvan, 1 hectare de forêt Douglas produira en moyenne 1100m³ de bois :

- 550m³ de bois de bonne qualité utilisé pour les bardages et la menuiserie,
- 290m³ de bois de qualité moyenne utilisé pour les charpentes ou les palettes,
- 260m³ de bois de qualité faible utilisé pour la trituration (préparation de la pâte à papier).

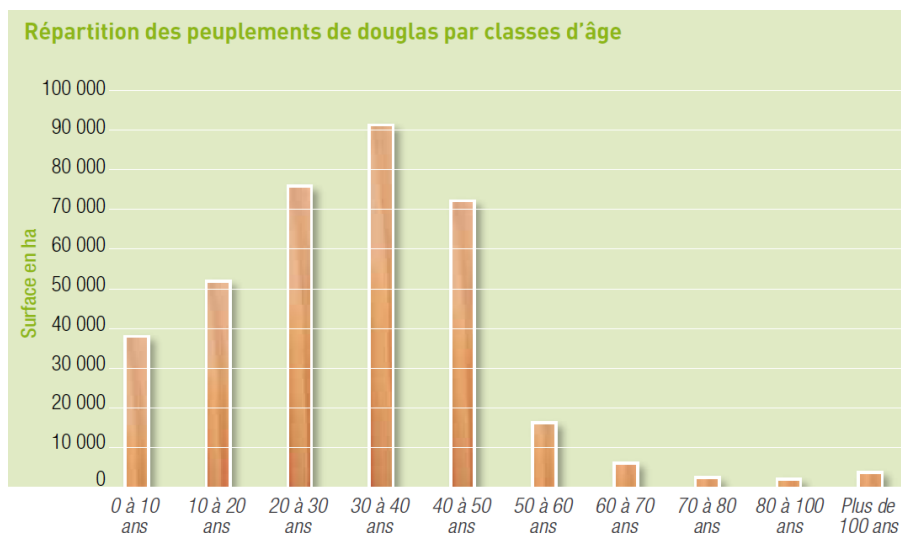


Figure 3: Répartition des peuplements de Douglas par classes d'âge

Le massif français de Douglas est encore jeune (l'âge médian des peuplements est compris entre 30 et 40 ans) et atteindra sa pleine maturité d'ici quelques années (Figure 3). Le sapin Douglas est exploitable à partir de 40 ans d'âge.

Depuis les années 1990, la production de Douglas français connaît un accroissement considérable. La récolte a doublé en l'espace de 10 ans. La production de sciages suit la même évolution, ce qui démontre les capacités d'adaptation de l'industrie française (Figure 4). Cette évolution se poursuivra jusqu'en 2030 et devrait se stabiliser autour de 2 500 000 m³ de sciages/an, conformément aux résultats de la dernière étude de l'Institut Technologique FCBA de 2012.

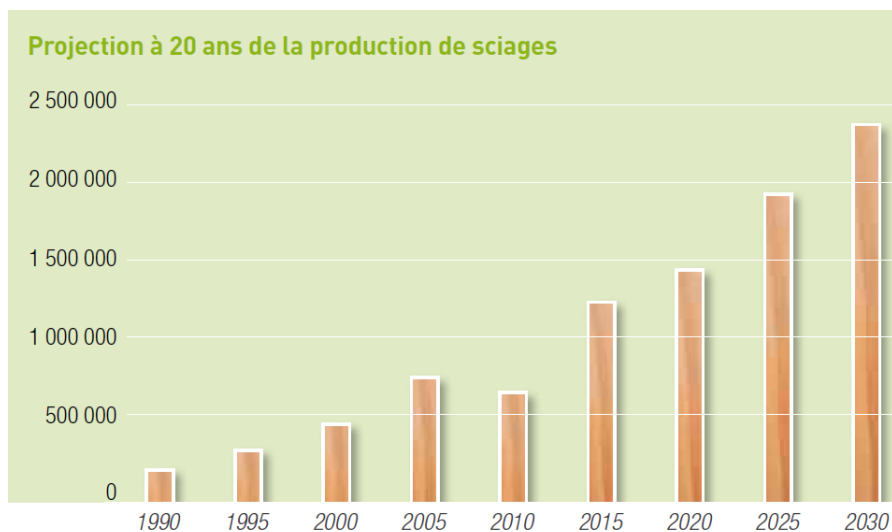


Figure 4: Evolution de la production de sciages en m³

2. Choix des sites d'études

2.1. Localisation des sites de Saint Brisson et de Chassennoix

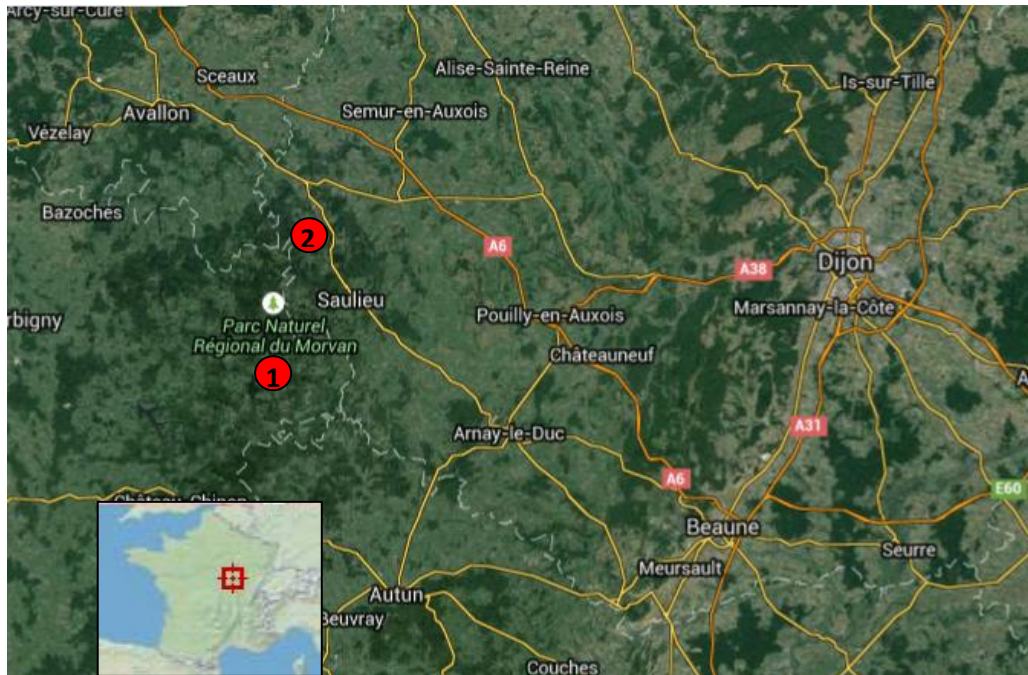


Figure 5: Localisation du site d'étude de Saint Brisson (1) et de Chassennoix (2)

Les sites d'étude se situent dans le parc naturel régional du Morvan dans le département de la Nièvre (Bourgogne). Le premier site d'étude se situe sur la commune de Saint Brisson et le second site (Chassennoix) sur la commune de la Croix de Molphey.

2.2. Géologie

Le Morvan, prolongement nord du Massif Central français, est un élément de la chaîne hercynienne (voir Annexe 2 : Historique de la géologie). Les terrains les plus anciens sont constitués de gneiss qui a été métamorphisé il y a plus de 400 millions d'années. Il se dépose ensuite des calcaires, argiles et grès entre 375 et 350 millions d'années puis à une sédimentation de plateforme (milieu marin peu profond) qui s'installe sur le socle métamorphique érodé (voir figure 1, Annexe 2 : Historique de la géologie). A partir de 350 millions d'années, se produit une phase de fracturation du terrain où se mettent en place des tufs anthracifères (roche tendre volcaniques) où l'on retrouve des débris de charbon et des dépôts terrigènes (apports fluviaux ou de ruissellement essentiellement) (voir figure 2, Annexe 2 : Historique de la géologie). Entre 345 et 300 millions d'années se développent des plutons granitiques en profondeur (voir figure 3, Annexe 2 : Historique de la géologie). Il en résulte 2 formes de granites :

- Le granite à biotite (granite de type Y3) qui est présent sur le site de Saint Brisson. La composition chimique de ces granites montre qu'ils proviennent de magmas mixtes issus du manteau et de la croûte continentale. Le granite à biotite se distingue par sa couleur grisâtre et ses gros grains.
- Le leucogranite (granite de type Y2) qui est présent sur le site de Chassennoix. Leur composition chimique indique qu'ils proviennent d'une fusion de la croûte continentale. Ce granite à deux grains est plus rosâtre et les grains sont plus fins que ceux du granite à biotite.

De 350 à 280 millions d'années, on retrouve des dépôts dans des bassins intra-montagneux où se développe une sédimentation lacustre argileuse et gréseuse avec de nombreux débris végétaux (voir figure 4, Annexe 2 : Historique de la géologie). Vers 295 millions d'années des schistes bitumineux vont être formés par certains niveaux riches en matière organique dans la région d'Autun. Vers 275 millions d'année d'importantes masses de tufs se mettent en place en surface ainsi que des microgranites en profondeur. Cela est dû à des mouvements tectoniques qui ont entraîné une forte activité volcanique. Il y a 235 millions d'années, le niveau de la mer monte et recouvre le Morvan (voir figure 6, Annexe 2 : Historique de la géologie). Les dépôts deviennent alors plus calcaires et riches en fossiles. Autour de 180 millions d'années, la sédimentation devient très argileuse. Au cours de l'ère tertiaire, le Morvan est surélevé pour former un horst alors que les autres régions sont abaissées. L'érosion va ensuite fortement attaquer les zones les plus hautes du Morvan pour finalement le décaper de sa couverture sédimentaire et mettre à nu les terrains cristallins.

Au Tertiaire et pendant tout le Quaternaire jusqu'à nos jours, les roches cristallines du Morvan, mises à l'affleurement par l'érosion, subissent l'action des agents météoriques (pluie, vent, gel, acides humiques...) (voir figure 7, Annexe 2 : Historique de la géologie). Par ces actions combinées, les granites sont attaqués et vont donner des arènes, un sable plus ou moins argileux, qui peut atteindre plusieurs mètres d'épaisseur.

Cet historique assez particulier est donc à l'origine de la géologie actuelle du Morvan (voir Annexe 1 : Géologie du Morvan).

2.3. Géomorphologie et climatologie

Le climat dans le Morvan est caractérisé par des automnes et des hivers rigoureux et longs (température minimale moyenne de -1°C en hiver) avec des températures dont l'amplitude annuelle est supérieure à 20°C. C'est une région très humide, les précipitations étant nombreuses et importantes (110 mm en moyenne par mois). Les sites d'études se situent à environ 500m d'altitude sur une pente de 10%.

2.4. Historique des placettes

La plantation de Douglas du site de Saint Brisson date de 1970. Celle du Site de Chassenois date de 1984. Avant ces essais, les parcelles étaient en taillis de chêne et de bouleaux pour Saint Brisson et taillis de chêne seulement pour Chassenois (Annexe 3 : Technique sylvicole). D'après des photos aériennes et la carte d'état-major, ces sites ont toujours été des forêts.

2.5. Description des essais

2.5.1. Saint Brisson

Le site de Saint Brisson représente un « essai éclairci » du FCBA sur du Douglas planté il y a 45 ans. Les arbres ont été plantés en 1970 avec une densité de 1111 tiges/ha. 4 traitements différents ont ensuite été appliqués avec 4 réplifications par traitement (voir figure ci-dessous):

- X0X1 : témoin, pas d'éclaircie jusqu'en 2000
- X0X2 et X0X3 : traitements d'éclaircies intermédiaires
- X0X4 : éclaircie systémique 1/3 en 1984 puis éclaircie sélective à partir de 2000

Seulement les traitements extrêmes seront étudiés de manière à obtenir des couples de placettes forte éclaircie / faible éclaircie (voir Annexe 4)

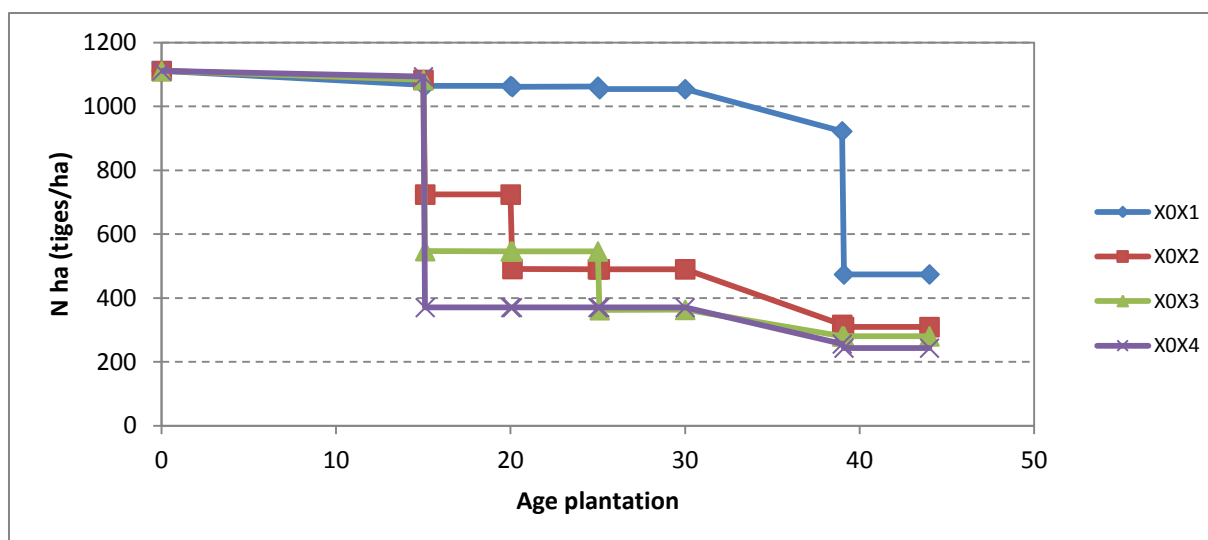


Figure 6: Traitements appliqués sur le site de Saint Brisson

2.5.2. Chassennoix

Le site de Chassennoix représente un « essai densité » du FCBA sur du Douglas planté il y a 31 ans. Les arbres ont été plantés en 1984 à 4 densités différentes (voir figure ci-dessous) avec 8 répliquas par densité :

- X0X1 : 549 tige/ha
- X0X2 : 817 tiges/ha
- X0X3 : 1089 tiges/ha
- X0X4 : 1325 tiges/ha

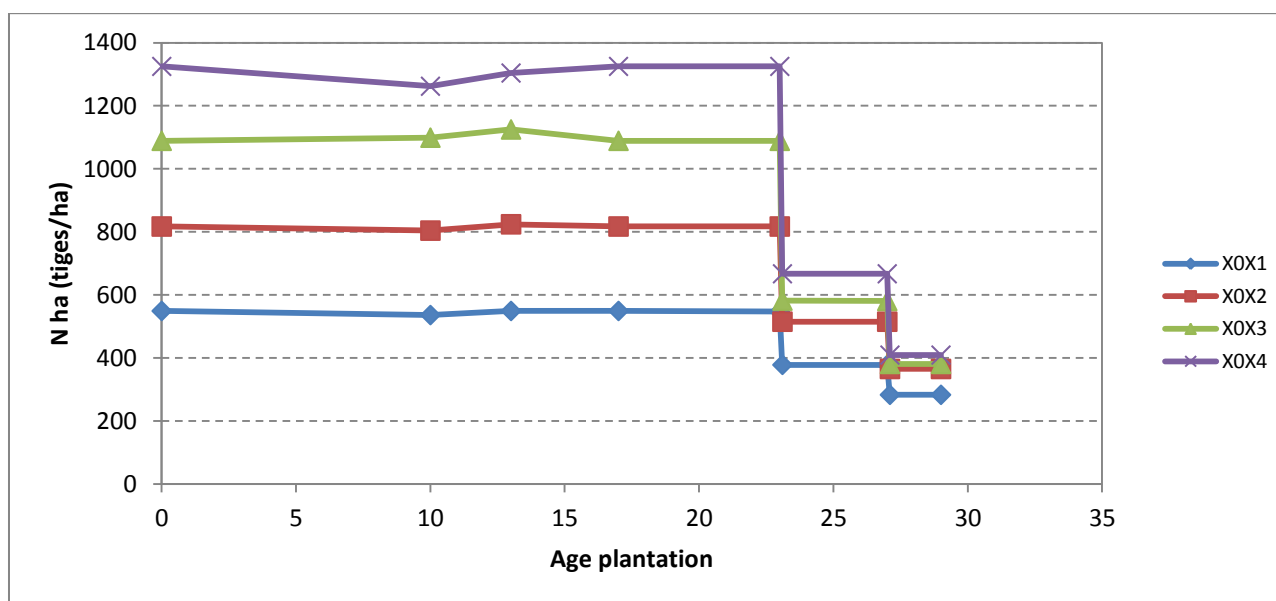


Figure 7: Traitements appliqués sur le site de Chassennoix

Seulement les traitements extrêmes seront étudiés de manière à obtenir des couples de placettes forte densité/faible densité (voir Annexe 5: Plan du site de Chassennoix). Du a une forte hétérogénéité du site, 4 répliquas par traitement seront étudiés (humidité très élevée sur certaines placettes, proximité avec le chemin forestier, bas de versant,...).

3. Protocole

Les sols des sites de Saint Brisson et de Chassenoix ont été étudiés. Au sein de chacun des sites, une sélection de 8 placettes a été réalisée parmi les placettes existantes de l'essai du FCBA. Pour chaque site, 4 placettes à forte densité (ou faible éclaircie) et 4 placettes à faible densité (ou fort éclaircie) ont été sélectionnées. De plus, pour chacun des sites, une placette hors essai a été sélectionnée. Il s'agit d'une forêt ancienne de chêne ou de hêtre non loin de l'essai ayant les mêmes conditions pédoclimatiques que celui-ci, constituant donc une placette « contrôle ». Un total de 18 placettes forestières a donc été prospecté pour ces 2 sites.

Le protocole prévoit par placette :

- la réalisation et description d'une fosse pédologique,
- la détermination des densités apparentes des horizons de profondeur (30-40 et 40-50cm) par la méthode des cylindres,
- la détermination de la densité apparente de la couche superficielle du sol (0-30cm) par la méthode à l'eau,
- le prélèvement de deux échantillons composites de sol (0-30 et 30-50cm) afin d'étudier la chimie du sol.

3.1. Fosse pédologique

3.1.1.a. Objectif

L'objectif est de réaliser une description suffisamment complète par placette pour permettre l'identification et la différenciation des sols de chacun des essais du FCBA. Ainsi la vérification de l'homogénéité des sols au sein d'un même site pourra être effectuée. Cela implique :

- De creuser une fosse pédologique suffisamment profonde (minimum 60cm)
- De compléter une fiche de description du sol (détail en Annexe 6 :).

3.1.1.b. Choix de l'emplacement

Une fosse pédologique est creusée au centre de chaque parcelle (voir figure ci-dessous pour le site de Saint Brisson). De manière à faciliter notre repérage, les centres ont été marqués au préalable par un agent du FCBA.

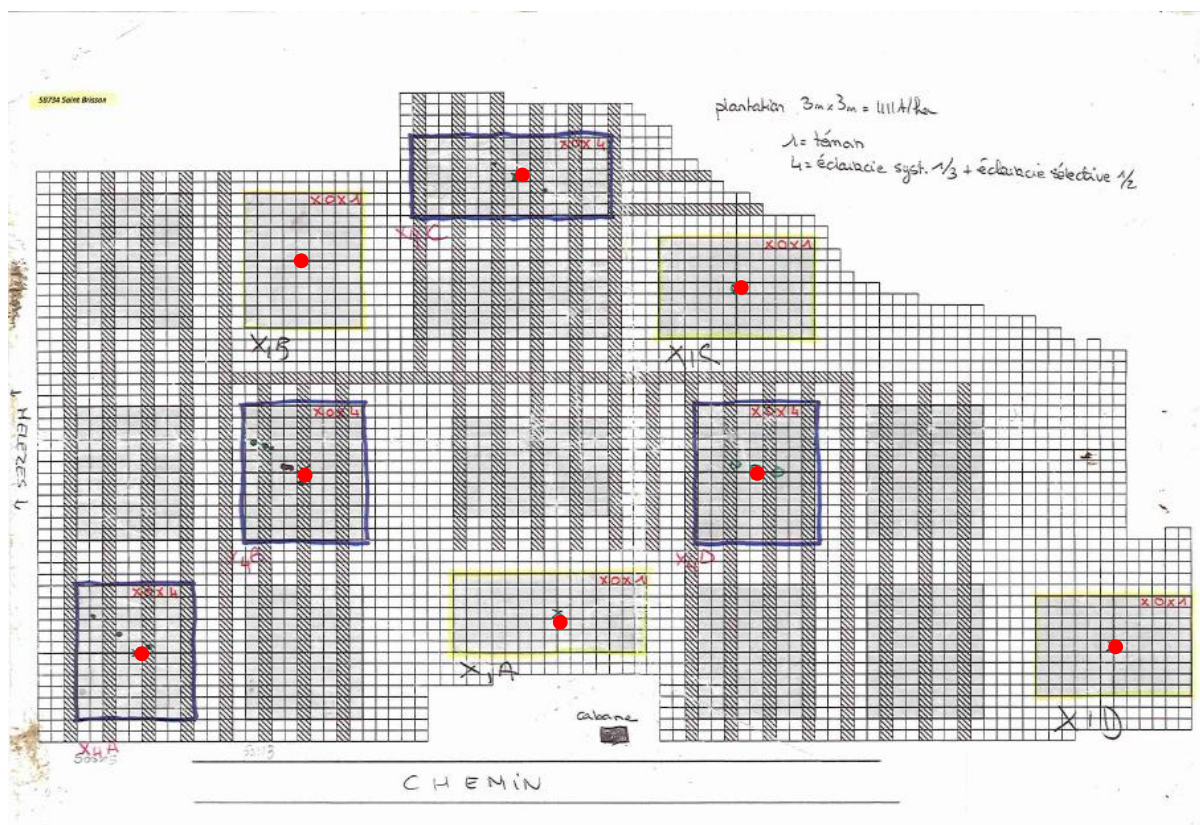


Figure 8: Localisation des 8 fosses pédologiques sur le site de Saint Brisson

3.1.1.c. Réalisation des fosses

Disposition et dimension

La dimension minimale de la fosse permettant une bonne description du solum est 0.80x0.60m avec une profondeur de minimum 60cm. Une des faces servira à la description et devra donc être bien nette et verticale. Sur les stations en pente, la face de description sera située vers l'amont. La terre sortie de la fosse sera placée sur une bâche en prenant soin de séparer les horizons organo-minéraux de surface de manière à reboucher la fosse horizon par horizon après l'étude.

Préparation et description de la face de description



Figure 9: Fosse pédologique prête à être décrite

Une fosse même fraîchement creusée n'est jamais « propre » pour la description. Il est donc nécessaire de rafraîchir le profil avec la pelle ou tout autre outil. Il faut ensuite écorcher le profil avec la pointe d'un couteau de manière à mettre en évidence les caractères de chaque niveau.

Une photo du profil par fosse est prise avant d'entamer la description. Cette photo est faite en lumière naturelle et sans flash et doit comporter obligatoirement un étalon de longueur (Figure 9). La fosse est ensuite prête pour la description. Pour chaque profil de sol, les horizons sont décrits (code couleur Munsell, texture, structure, pierrosité, racines, effervescence au HCl) afin de déterminer le type de sol et la forme d'humus grâce au référentiel pédologique 2008.

3.2. Densités apparentes des horizons de profondeur

3.2.1. Objectif

Les mesures des densités apparentes de profondeur ont été estimées par la méthode des cylindres. C'est une méthode de terrain qui consiste à prélever des échantillons de sol non perturbés à l'aide d'un cylindre métallique, ouvert aux deux extrémités, dont on connaît le volume (250cm³). La densité apparente de l'échantillon est ensuite calculée au laboratoire à l'aide du rapport entre le poids sec de l'échantillon et son volume. Quatre prélèvements sont effectués :

- Deux prélèvements à une profondeur de 30 à 40 cm
- Deux prélèvements à une profondeur de 40 à 50 cm.

3.2.2. Prélèvement

Les prélèvements des différents échantillons se fait dans la fosse pédologique creusé au préalable. La fosse doit être creusée en marches d'escaliers de manière à ce que lorsque la profondeur souhaitée (30 à 40 cm de profondeur) est atteinte, il est possible de placer le cylindre sur un espace horizontal. On enfonce ensuite le cylindre dans le sol à l'aide d'un marteau et une pièce de bois pour faciliter la tâche. Le cylindre est dégagé à l'aide d'un couteau en prenant soin de ne pas altérer l'échantillon. Celui-ci est placé et conservé dans un sac en plastique étiqueté jusqu'à son traitement au laboratoire (Figure 10: Densité apparente grâce à la méthode des cylindres).

Cette manipulation est répétée à une profondeur de 40 à 50 cm.



Figure 10: Densité apparente grâce à la méthode des cylindres

3.3. Densité apparente des horizons superficiels

3.3.1. Objectif

La mesure de densité apparente des horizons superficiels a été estimée par la méthode à l'eau. Cette méthode de terrain permet de prélever une masse de sol dont on connaît le volume. La densité apparente peut ensuite être calculée grâce au rapport entre le poids sec de l'échantillon et son volume.

3.3.2. Réalisation de la mesure



Figure 11: Densité apparente à l'eau

Les densités apparentes de la couche superficielle des sols (0-30 cm) ont été déterminées par la méthode à l'eau, en trois points de chaque placette : au centre, à 10 m au nord et 10 m au sud.

Un disque posé au sol permet de creuser un trou de 30 cm de profondeur avec un diamètre précis de 15 cm (Figure 11).

L'échantillon est placé dans un sachet plastique et conservé jusqu'au traitement en laboratoire. Une fois l'échantillon prélevé, le volume exact est déterminé en mesurant le volume d'eau nécessaire pour remplir un sac étanche positionné dans la cavité creusée.

3.4. Echantillons composites

Enfin, deux échantillons composites de sol (0-30 et 30-50 cm) ont été prélevés (issus de 9 coups de tarière au centre de la placette et à 5 et 10 m dans les 4 directions cardinales) afin d'étudier la chimie des sols.

4. Analyse en laboratoire

4.1. Echantillons composites

Lors du retour au laboratoire les échantillons composites ont été séchés à l'air libre pour éliminer l'humidité des sols, ce qui permet de limiter la décomposition de la matière organique des échantillons. Ils ont ensuite été tamisés à 2 mm pour enlever les racines et éléments grossiers et obtenir un échantillon homogène. Une fraction d'environ 150g de chaque échantillon composite a été envoyé au laboratoire INRA d'Arras pour une analyse granulométrique et chimique (pH, texture, CEC, cations échangeables, taux de calcaire, C organique, N total ; résultats non disponibles). Une autre fraction représentative de ces échantillons tamisés (quelques grammes) a été broyée finement (250 µm ; broyeur Retsch ZM 200) afin de réaliser des mesures à l'aide d'un analyseur CHN. Cette analyse permet de déterminer la concentration totale de carbone organique du sol pour chaque échantillon en g/kg de sol.

4.2. Densités apparentes

De retour au laboratoire, les échantillons de densité apparente (de profondeur et de surface) prélevés sur le terrain sont pesés pour obtenir le poids frais. Ils sont ensuite mis à l'étuve à 105°C pendant 48h de manière à obtenir leur poids sec. Un tamisage à 2mm permet d'éliminer la terre fine pour ne garder que les racines et les cailloux supérieurs à 2mm. Ces derniers sont ensuite pesés et volumés séparément.

La densité apparente du sol peut être calculée avec la formule ci-dessous :

$$Da = \frac{Pf - Pc - Pr}{Vt}$$

Avec Da= Densité apparente corrigée (en g/cm³); Pf = Poids frais (en g) ; Pc= Poids des cailloux secs >2mm (en g) ; Pr= Poids des racines sèches > 2mm (en g) ; Vt = Volume total d'eau correspondant au poids frais prélevé sur le terrain (en mL)

4.3. Stock de carbone

Les stocks de carbone du sol peuvent être calculés avec la formule ci-dessous :

$$Stocks\ COS = \frac{[Corg] \times Da \times p}{10}$$

Avec Stocks COS= Stocks de carbone organique du sol (en t/ha sur une profondeur p) ; [Corg]=Concentration en carbone organique (en g/kg) ; Da= Densité apparente corrigée cailloux (g / cm³) ; p= profondeur (en cm) ; 10= constante

5. Méthode de traitement

Les données récoltés sur le terrain et au laboratoire sont retranscrites sous Excel Microsoft Office pour faciliter les analyses. De ces analyses, des statistiques descriptives (box plots et ACP) sont réalisées dans un premier temps suivi de statistiques inférentielles grâce au logiciel libre R.

Pour tester l'effet du traitement (forte densité/faible densité pour le site de Chassenois et forte éclaircie/faible éclaircie pour Saint Brisson) sur la densité apparente, la concentration totale en carbone et les stocks de carbone organique du sol en fonction de la profondeur, des tests paramétriques de Student ont été réalisés après vérification de la normalité des valeurs (test de Shapiro-Wilk) et de l'égalité des variances (test F).

Pour tester l'effet de la gestion sylvicole (chênaie/faible densité/forte densité pour Chassenois et hêtraie/faible éclaircie/forte éclaircie pour Saint Brisson) des Anovas ont été réalisées pour comparer les moyennes après vérification de la normalité des valeurs (test de Shapiro-Wilk) et de l'égalité des variances (test de Levene).

Néanmoins, étant donné le peu de valeurs, les statistiques inférentielles ne peuvent être exploitées et se trouvent donc en Annexe 6.

Résultats

Dans cette partie, la troisième hypothèse du projet PiCaSo va être testée : les stocks de carbone organique du sol sont plus faibles en plantation qu'en forêt mature. Différentes sous hypothèses sont posées pour répondre à la première :

- La concentration de carbone du sol augmente avec le nombre d'arbres
- La densité apparente du sol est plus élevée en éclaircie forte (traitement important)
- Les stocks de carbone organique du sol augmentent avec le nombre d'arbres.

N'ayant qu'un seul échantillon de contrôle, il sera utilisé à titre indicatif car il n'y a aucune réplication. Les deux traitements seront donc comparés entre eux.

1. Saint Brisson

1.1. Densité apparente

Densité apparente du sol en fonction du traitement et de la profondeur pour le site de Saint Brisson

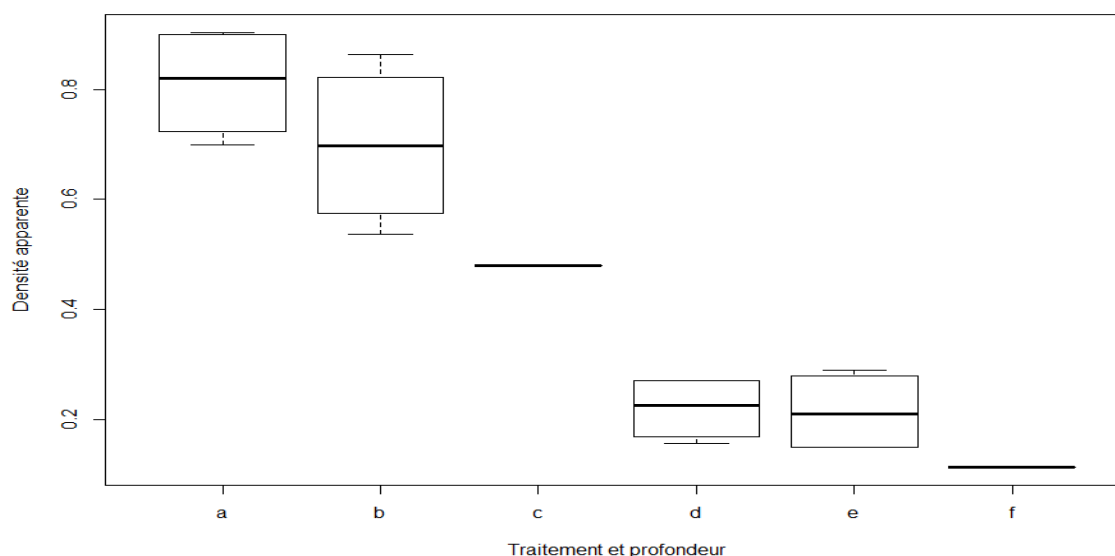


Figure 12: Densité apparente du sol en fonction du traitement et de la profondeur / a: éclaircie forte_0-30cm / b: éclaircie faible_0-30cm / c: contrôle (hêtraie)_0-30cm / d: éclaircie forte_30-50cm / e: éclaircie faible_30-50cm / f: contrôle (hêtraie)_30-50cm

D'après la Figure 12 et le Tableau 1, il semble y avoir une différence de densité apparente en fonction de la profondeur (nette différence entre a, b, c et d, e, f). Les échantillons de profondeur semblent avoir une densité apparente plus faible que ceux de surface. En revanche, au sein d'une même profondeur il ne semble pas y avoir de différence significative de densité apparente du sol en fonction du traitement. Une tendance peut néanmoins être mise en avant : à une profondeur de 0 à 30 cm, la densité apparente du sol semble plus importante en éclaircie forte (moyenne de 0,811) qu'en éclaircie faible (moyenne de 0,699). La gestion sylvicole (éclaircie faible ou forte confondu) semble influencer sur la densité apparente : la densité apparente du contrôle (hêtraie), avec une valeur de 0,479, semble plus faible que celle des parcelles éclaircies.

Des tests statistiques sont utilisés pour confirmer ces observations.

Tableau 1: Indicateurs statistiques de la Da en fonction du traitement et de la profondeur

	moyenne	ecart type	IQR	min	25%	50%	75%	max	data:n
Eclaircie forte_0-30cm	0,811	0,104	0,163	0,699	0,734	0,821	0,898	0,904	4
Eclaircie forte_30-50cm	0,220	0,059	0,095	0,157	0,175	0,226	0,270	0,271	4
Contrôle (hêtraie) _ 30-50cm	0,113	NA	0,000	0,113	0,113	0,113	0,113	0,113	1
Contrôle (hêtraie)_0-30cm	0,479	NA	0,000	0,479	0,479	0,479	0,479	0,479	1
Eclaircie faible_30-50cm	0,215	0,075	0,124	0,149	0,150	0,210	0,275	0,289	4
Eclaircie faible_0-3cm	0,699	0,150	0,206	0,536	0,595	0,697	0,801	0,864	4

1.2. Concentration de carbone

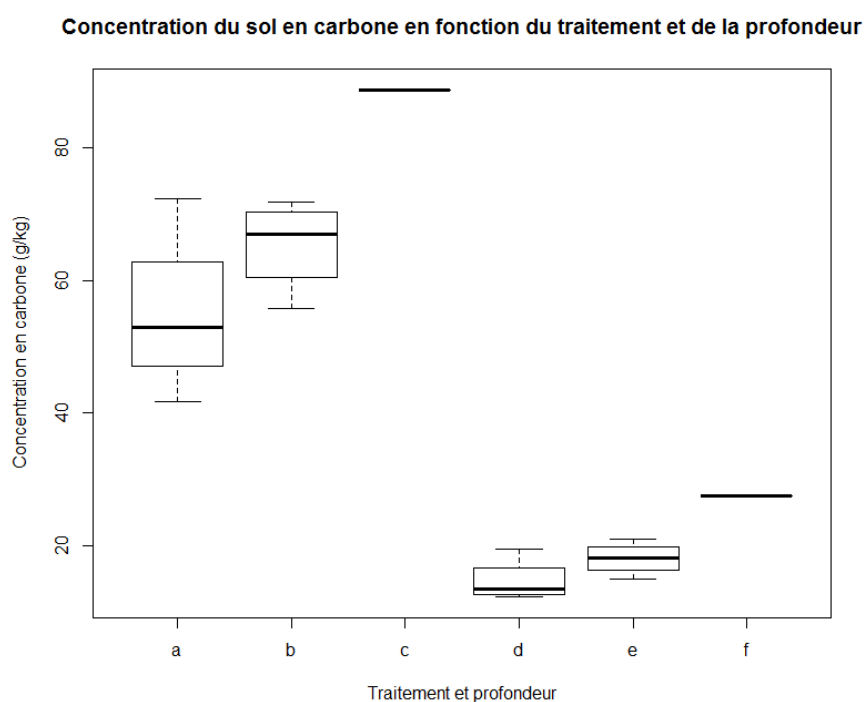


Figure 13: Concentration de carbone en fonction du traitement et de la profondeur / a: éclaircie forte_0-30cm / b: éclaircie faible_0-30cm / c: contrôle (hêtraie)_0-30cm / d: éclaircie forte_30-50cm / e: éclaircie faible_30-50cm / f: contrôle (hêtraie)_30-50cm

D'après la Figure 13 et le Tableau 2 Tableau 1, il semble y avoir une différence de concentration de carbone du sol en fonction de la profondeur (nette différence entre a, b, c et d, e, f). Les échantillons en profondeur semblent avoir une concentration plus faible que ceux de surface.

Une tendance peut être mise en avant : à une profondeur de 0 à 30 cm, la concentration de carbone semble plus faible en éclaircie forte (moyenne de 54,945 g/kg) qu'en éclaircie faible (moyenne de 65,418g/kg). La gestion sylvicole (éclaircie faible ou forte confondues) semble influencer aussi : la concentration en carbone du contrôle (hêtraie), avec une valeur de 88,860g/kg, semble plus élevée que celle des parcelles éclaircies.

A une profondeur de 30 à 50 cm, les mêmes tendances peuvent être mises en avant : la concentration de carbone semble plus faible en éclaircie forte (moyenne de 14,563 g/kg) qu'en éclaircie faible (moyenne de 17,973g/kg). La gestion sylvicole (éclaircie faible ou forte confondues) semble influencer aussi : la concentration en carbone du contrôle (hêtraie), avec une valeur de 27,400g/kg, semble plus élevée que celle des parcelles éclaircies.

Des tests statistiques sont utilisés pour confirmer ces observations.

Tableau 2: Indicateurs statistiques de la concentration de carbone en fonction du traitement et de la profondeur

	moyenne	ecart type	IQR	min	25%	50%	75%	max	data:n
Contrôle (Hêtraie)_0-30cm	88,860	NA	0,000	88,860	88,860	88,860	88,860	88,860	1
Contrôle (Hêtraie)_30-50cm	27,400	NA	0,000	27,400	27,400	27,400	27,400	27,400	1
Eclaircie faible_0-30cm	65,418	7,008	6,703	55,740	62,858	67,000	69,560	71,930	4
Eclaircie faible_30-50cm	17,973	2,516	2,063	14,870	16,963	18,015	19,025	20,990	4
Eclaircie forte_0-30cm	54,945	12,763	8,250	41,690	49,775	52,855	58,025	72,380	4
Eclaircie forte_30-50cm	14,563	3,333	2,558	12,170	12,658	13,310	15,215	19,460	4

1.3. Stocks de carbone

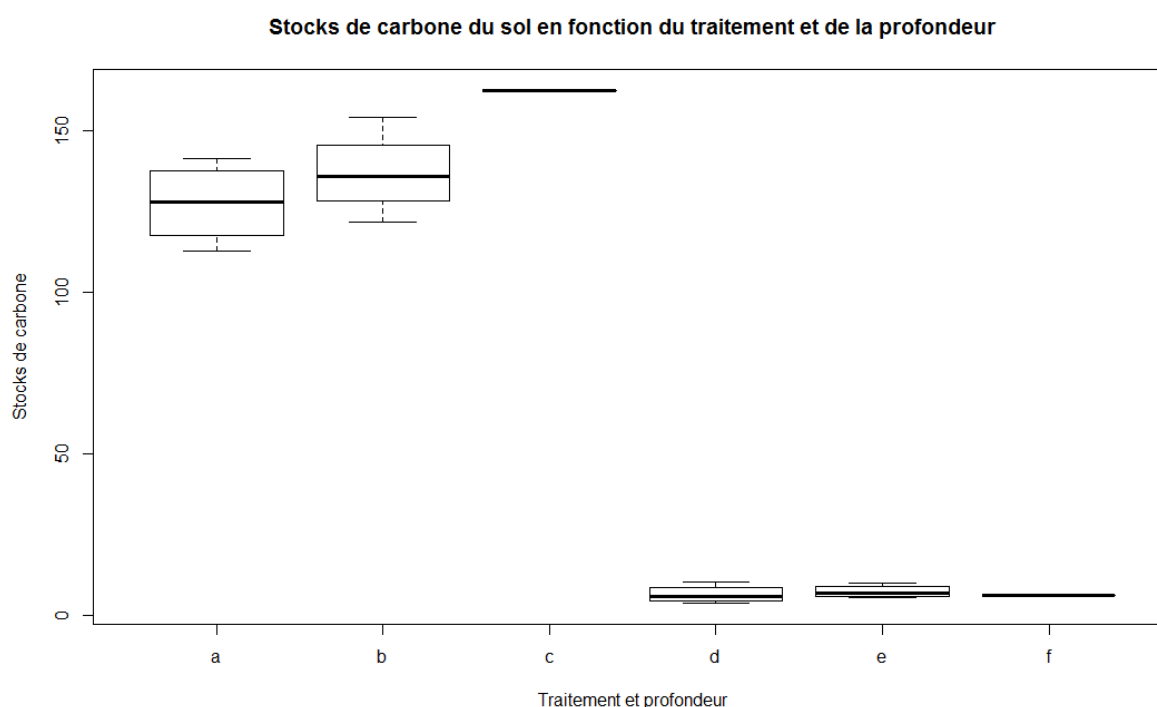


Figure 14: Stocks de carbone du sol en fonction du traitement et de la profondeur / a: éclaircie forte_0-30cm / b: éclaircie faible_0-30cm / c: contrôle (hêtraie)_0-30cm / d: éclaircie forte_30-50cm / e: éclaircie faible_30-50cm / f: contrôle (hêtraie)_30-50cm

D'après la Figure 14: Stocks de carbone du sol en fonction du traitement et de la profondeur / a: éclaircie forte_0-30cm / b: éclaircie faible_0-30cm / c: contrôle (hêtraie)_0-30cm / d: éclaircie forte_30-50cm / e: éclaircie faible_30-50cm / f: contrôle (hêtraie)_30-50cm et le

Tableau 3: Indicateurs statistiques des stocks de carbones en fonction du traitement et de la profondeur, il semble y avoir une différence de stocks de carbone du sol en fonction de la profondeur (nette différence entre a, b, c et d, e, f). Les échantillons en profondeur semblent avoir des stocks de carbone plus faible que ceux de surface.

Au sein d'une même profondeur, il ne semble pas y avoir de différence de stocks de carbone en fonction du traitement. Des tests statistiques sont utilisés pour confirmer ces observations.

Tableau 3: Indicateurs statistiques des stocks de carbones en fonction du traitement et de la profondeur

	moyenne	ecart type	IQR	min	0,250	0,500	0,750	max	data:n
Contrôle (Hêtraie)_0-30cm	127,785	NA	0	127,785	127,785	127,785	127,785	127,785	1,000
Contrôle (Hêtraie)_30-50cm	15,483	NA	0	15,483	15,483	15,483	15,483	15,483	1,000
Elaircie faible_0-30cm	121,917	21,247	26,652	99,574	107,760	120,254	134,411	147,585	4,000
Elaircie faible_30-50cm	18,774	5,207	6,223	13,845	15,205	17,859	21,428	25,533	4,000
Elaircie forte_0-30cm	120,320	8,296	9,322	113,047	114,669	118,340	123,991	131,551	4,000
Elaircie forte_30-50cm	16,419	7,303	7,823	9,529	11,776	14,955	19,598	26,238	4,000

2. Chassenoix

L'analyse des données du site de Chassenoix a pu être faite uniquement sur les données de surface. En effet, les densités de profondeurs n'ont pas pu être réalisées sur le terrain du a une très forte pierrosité : un seul échantillon a pu être prélevé sur l'ensemble des parcelles à faible densité (CNX1D_30-50) ne permettant pas l'analyse statistique.

2.1. Densité apparente du sol

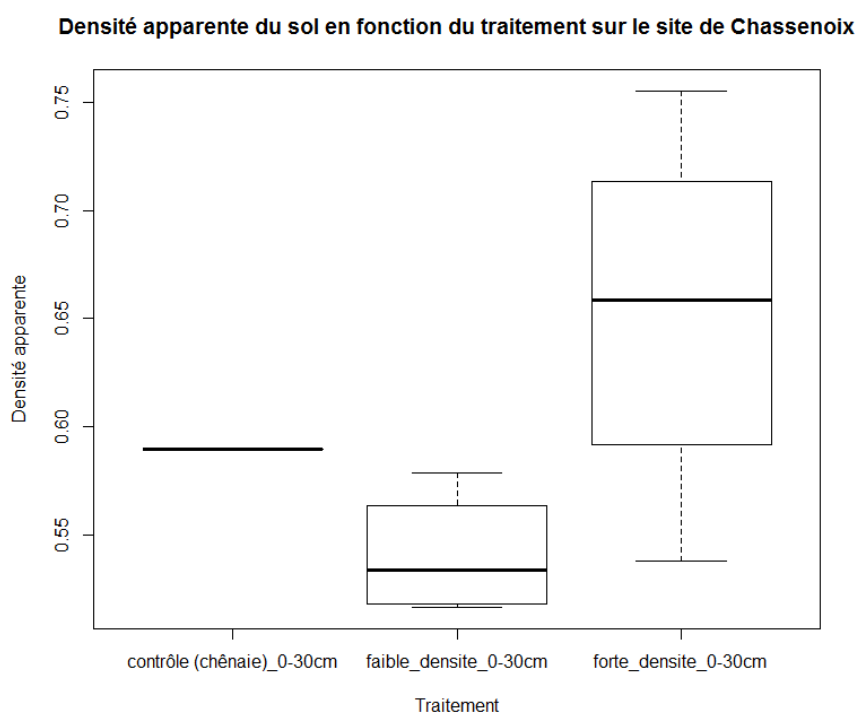


Figure 15: Densité apparente du sol en fonction du traitement en surface pour le site de Chassenoix

D'après la Figure 15 et le Tableau 4 , il semble y avoir une faible différence de densité apparente en fonction du traitement. La chênaie présente une densité apparente moyenne de 0,59 contre 0.541 pour les parcelles de faible densité et 0.653 pour les parcelles de forte densité. Des tests statistiques sont utilisés pour confirmer ces observations.

Tableau 4: Indicateurs statistiques de la Da en fonction du traitement en surface

	moyenne	ecart type	IQR	min	25%	50%	75%	max	data:n
contrôle (chênaie)_0-30cm	0,590	NA	0	0,590	0,590	0,590	0,590	0,590	1
faible_densite_0-30cm	0,541	0,029	0,037	0,516	0,519	0,534	0,556	0,579	4
forte_densite_0-30cm	0,653	0,090	0,074	0,538	0,618	0,659	0,693	0,755	4

2.2. Concentration de carbone

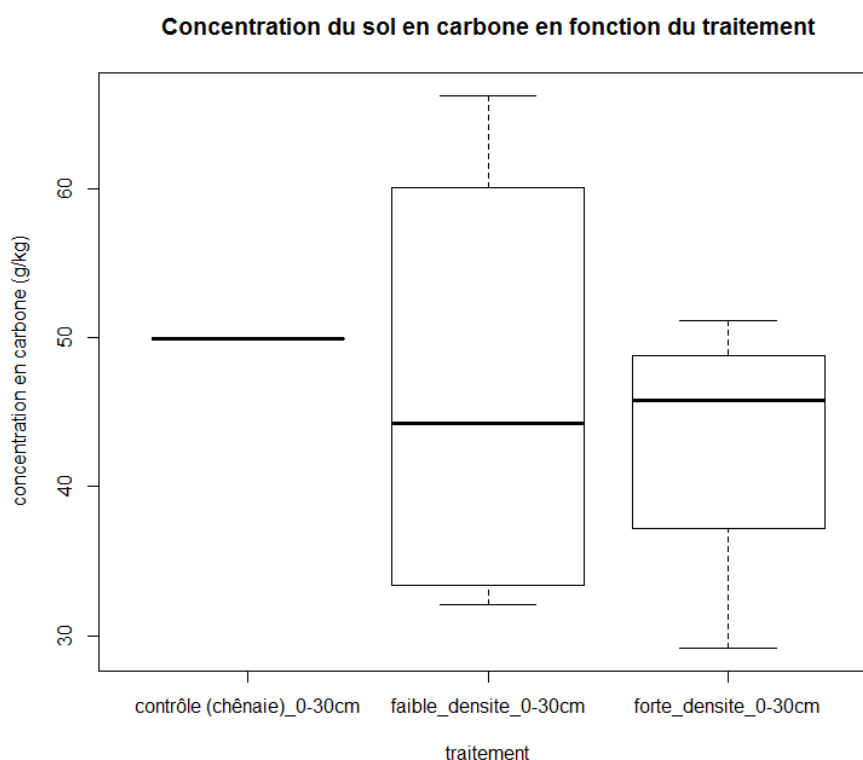


Figure 16: Concentration en carbone en fonction du traitement en surface

D'après la Figure 16 et le Tableau 5, il ne semble pas y avoir de différence de concentration de carbone en fonction du traitement en surface à Chassennoix. Néanmoins, une petite tendance peut être mise en évidence : il semblerait que la chênaie (parcelle contrôle) ait une concentration en carbone plus élevée que les parcelles traitées (moyenne de 49.96g/kg contre 46.733g/kg pour les parcelles de faible densité et 42.990g/kg pour les parcelles de forte densité)

Des tests statistiques sont utilisés pour confirmer ou non cette observation.

Tableau 5: Indicateurs statistiques de la concentration en carbone en fonction du traitement en surface

	moyenne	ecart type	IQR	min	25%	50%	75%	max	data:n
contrôle (chênaie)_0-30cm	49,960	49,960	NA	0	49,960	49,960	49,960	49,960	1
faible_densite_0-30cm	46,733	16,248	22,928	32,110	34,038	44,270	56,965	66,280	4
forte_densite_0-30cm	42,990	9,583	6,305	29,140	41,253	45,820	47,558	51,180	4

2.3. Stocks de carbone

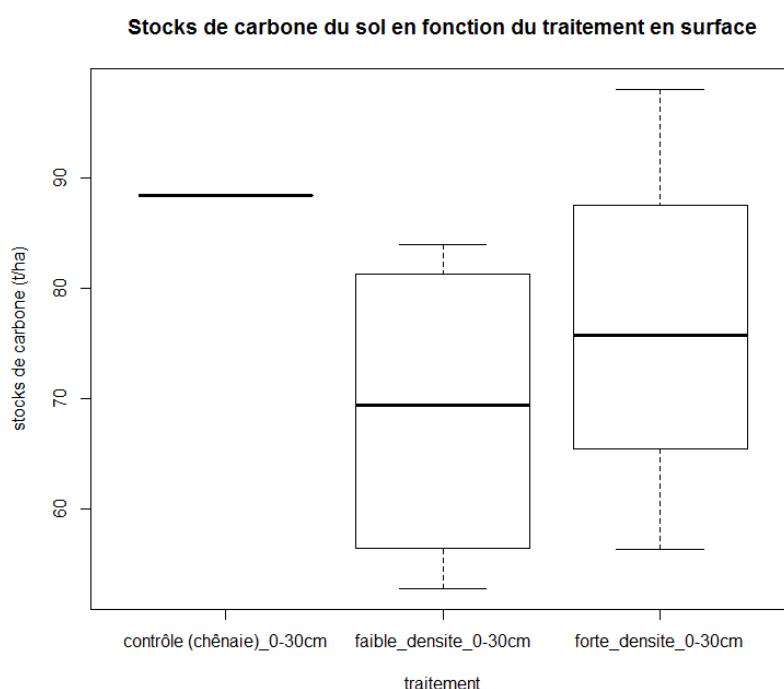


Figure 17: Stocks de carbone du sol en fonction du traitement en surface

Apriori il n'y a pas de différence de stocks de carbone en fonction du traitement densité (Figure 17 et Tableau 6: Indicateurs statistiques des stocks de carbone en fonction du traitement en surface). Par contre, il semblerait que la chênaie (contrôle) comporte des stocks de carbone plus élevés que les parcelles traitées (moyenne de 88.383t/ha contre 68.909t/ha pour les parcelles à faible densité et 76.511t/ha pour les parcelles à forte densité).

Tableau 6: Indicateurs statistiques des stocks de carbone en fonction du traitement en surface

	moyenne	ecart type	IQR	min	25%	50%	75%	max	data:n
contrôle (chênaie)_0-30cm	88,383	NA	0	88,383	88,383	88,383	88,383	88,383	1
faible_densite_0-30cm	68,909	14,782	21,633	52,810	58,367	69,457	79,999	83,911	4
forte_densite_0-30cm	76,511	17,039	12,279	56,427	70,011	75,790	82,290	98,037	4

3. Saint Brisson et Chassenois

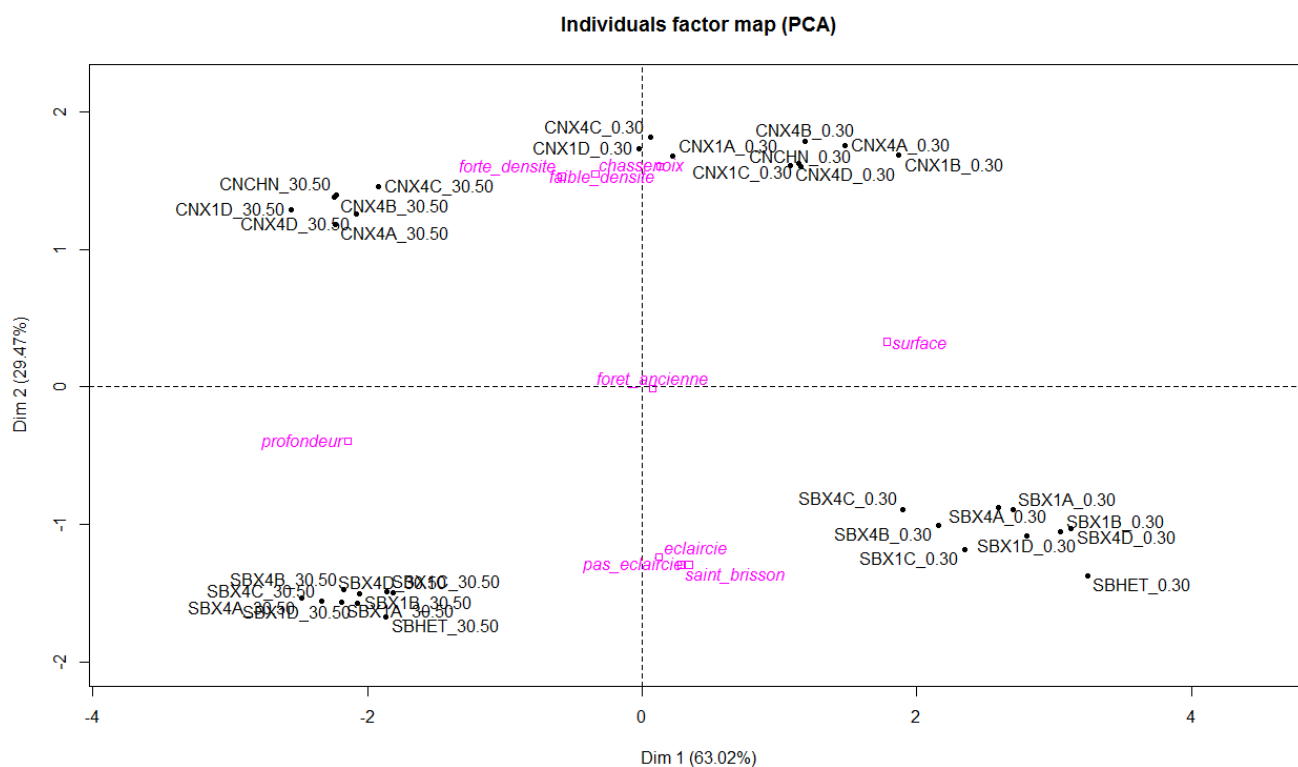


Figure 18: Effet site, profondeur et traitement (ACP)

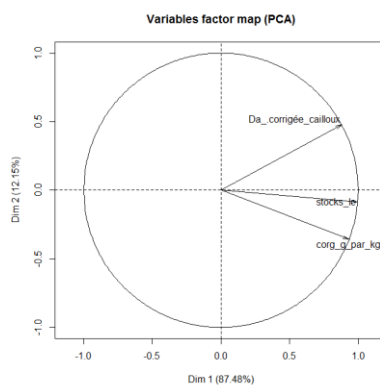


Figure 19: Cercle des corrélations

Une ACP à été effectuée pour mettre en avant l'effet site, profondeur et traitement sur les stocks de carbone organique du sol. Le cercle des corrélations montre bien que les stocks sont liés à la densité apparente et à la concentration de carbone du sol.

D'après la Figure 18, la profondeur à un effet important sur les stocks de carbone du sol (63%). Le site est le deuxième effet observable sur cette ACP (29%). Ces deux effet créent donc 4 ensemble sur ce nuage de point. Au sein d'un ensemble, aucun effet traitement n'est observable (les deux traitements X1 et X4 sont mélangés au sein d'un ensemble.)

4. Interprétation des résultats

La densité apparente du sol est légèrement plus importante pour les placettes ayant subi une éclaircie forte. Cette différence n'est néanmoins pas significative. L'éclaircie consistant à retirer des arbres à l'aide d'engins motorisés, cela a pu avoir un effet de compaction sur le sol au bout de 15 ans d'exploitation sur le site de Saint Brisson, ce qui modifie donc la densité apparente du sol. Cette compaction est visible en surface (0-30cm) mais ne l'est pas en profondeur, ce qui signifie que l'éclaircie a un effet de compaction indirect seulement en surface. L'éclaircie forte est plus ancienne que l'éclaircie faible, il peut donc y avoir un effet de décompaction progressif. Pour le site de Chassenois, les placettes ayant une densité forte ont subi une intervention importante d'éclaircie au bout de 22 ans d'exploitation. Cette intervention a pu avoir des effets sur la compaction du sol, ce qui modifie la densité apparente en surface : elle est plus importante sur les parcelles de fortes densités.

La concentration de carbone du sol semble plus importante en éclaircie faible pour le site de Saint Brisson. Cette tendance peut s'expliquer par le nombre d'arbre plus important en éclaircie faible qu'en éclaircie forte. Plus il y a d'arbres sur la placette, plus la concentration de carbone augmente dans l'horizon de surface du à l'apport de matière organique plus important. Le traitement semble avoir un effet négatif sur la concentration de carbone, étant donné que le contrôle (qui ne subit aucun traitement) a une concentration bien plus élevée. La même tendance est observée sur le site de Chassenois : plus le nombre d'arbres sur la placette est important, plus la concentration de carbone est élevée.

Les stocks de carbone prenant en compte la densité apparente du sol et la concentration de carbone, ils sont en liens direct avec ceux-ci. Les stocks de carbone semblent augmenter avec le nombre d'arbre présents sur la placette. Cette tendance s'observe surtout en surface sur les deux sites.

L'ACP réalisée nous montre un effet profondeur important ainsi qu'un effet site. Néanmoins aucun effet du traitement n'a pu être mis en avant.

Ces résultats ne sont pas significatifs. Seulement des tendances ont pu être mises en avant, étant donné le faible nombre de répliques.

Ce rapport représente une étude préliminaire pour le projet PiCaSo (pilotage sylvicole et contrôle pédologique des stocks de carbone des sols forestiers) de l'IRSTEA de Grenoble, et par conséquent, comporte encore très peu de données. Le nombre de répliques étant très faible ($n=4$ pour chaque traitement et $n=1$ pour les contrôles), les résultats des tests statistiques figurant en annexes ne sont pas significatifs et seulement les tendances résultantes des statistiques descriptives ont été interprétées. Ce projet vise à mieux connaître l'effet de la sylviculture sur les stocks de carbone organique des sols. Un référentiel national de l'effet de plusieurs modes de gestion sylvicole (forêt non exploitée, gérée, plantation, TCR, TCCR) sur les stocks de carbone organique du sol dans différentes situations pédoclimatiques sera créé et permettra de mesurer les stocks de carbone organique du sol au sein de peuplements (plantation/semis/régénération naturelle) de Douglas (*Pseudotsuga menziesii*), Pin maritime (*Pinus pinaster*), Chêne (*Quercus petraea*) et Peuplier (*Populus*) avec des densités de peuplement contrastées.

D'après ces résultats, différentes tendances ressortent. Tout d'abord, la densité apparente du sol est plus élevée lorsque le sol a été compacté (Richter et al., 1999). Ensuite, la concentration de carbone totale du sol varie en fonction du nombre d'arbres : plus la forêt est dense, plus la concentration de carbone est élevée (Dupouey et al., 2000). Pour finir, les stocks de carbone organique du sol semblent également varier en fonction du nombre d'arbres (Jandl et al., 2007).

En profondeur, ces tendances sont nettement moins visibles étant donné que la compaction du sol s'effectue surtout en surface et que la concentration de carbone totale est beaucoup plus importante sur les 30 premiers centimètres (Mikha et al., 2013). Néanmoins, on note un effet très important de la profondeur sur les stocks de carbone organique du sol (Conen et al., 2004) : l'apport de matière organique étant plus important en surface (densité de racine plus importante et présence de litière à la surface du solum) (Prieur et al., 2004).

Ces tendances se révèlent intéressantes et montrent qu'il est très important de mener ce projet à terme dans l'espoir de pouvoir piloter les stocks de carbone organique du sol par la gestion sylvicole en vue d'atténuer les émissions de gaz à effet de serre.

Bibliographie

- Bolin B., Sukumar R., Ciais P., Cramer W., Jarvis P., Kheshgi H., Nobre C., Semonov S., Steffen W., 2000. Global perspective. In: Watson, R., Noble, I., Bolin, B., Ravindranath, N., D.J., V., Dokken, D. (Eds.), *Land Use, Land-Use Change, and Forestry*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 23–52.
- Conen F., Zerva A., Arrouays D., Jolivet C., Jarvis P., Grace J., Mencuccini M., 2004. The carbon balance of forest soils: detectability of changes in soil carbon stocks in temperate and boreal forests. In: Griffiths, H., Jarvis, P. (Eds.), *The Carbon Balance of Forest Biomes*, vol. 9. Garland Science/BIOS Scientific Publishers, Southampton, UK, pp. 233–247. chap. 11.
- Corsi S., Friedrich T., Kassam A., Pisante M., Morges J., 2012. *Soil Organic Carbon Accumulation and Greenhouse Gas Emission Reductions from Conservation Agriculture: Integrated Crop Management*, Plant production and protection division food and agriculture organization of the united nations, Rome. Vol.16-2012.
- Dupouey J.L., Pignard G., Badeau V., Thimonier A., Duôte J.F., Nepveu G., Bergès L., Augusto L., Belkacem S., Nys C., 2000. Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, vol. 85, n° 6, 1999, pp. 301–318 ; *Revue forestière française*, vol. LII, n° spécial "Conséquences des changements climatiques pour la forêt et la sylviculture", pp. 139–154.
- Erb K.H., 2004. Land-use related changes in aboveground carbon stocks of Austrias terrestrial ecosystems. *Ecosystems* 7, 563–572.
- Giardina C.P., Coleman M.D., Hancock J.E., King J.S., Lilleskov E.A., Loya W.M., Pregitzer K.S., Ryan M.G., Trettin C.C., 2005. The response of belowground carbon allocation in forests to global change. In: Binkley D., Menyailo O. (Eds.), *Tree Species Effects on Soils: Implications for Global Change*. Springer, New York, pp. 119–154. NATO Science Series. Guo L.B., Gifford R.M., 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology* 8, 345–360.
- Jandl R., Lindner M., Vesterdal L., 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma* 137 253–268.
- Jarvis P., Linder S., 2000. Constraints to growth of boreal forests. *Nature* 405, 904–905.
- Kaiser K., Guggenberger G., 2003. Mineral surfaces and soil organic matter. *European Journal of Soil Science* 54, 219–236.
- Lal R., 2004. Soil carbon sequestration impacts on climate change and food security. *Science* 304, 1623–1627
- Liski J., Perruchoud D., Karjalainen T., 2002. Increasing carbon stocks in the forest soils of western Europe. *Forest Ecology and Management* 169, 159–175.
- Martin J.P., Haider K., 1986. Influence of mineral colloids on turnover rates of soil organic carbon. *Interactions of Soil Minerals with Natural Organics and Microbes*. Soil Science Society of America, pp. 283–304. chap. 9.

Mayer L.M., 1994. Relationships between mineral surfaces and organic carbon concentrations in soils and sediments. *Chemical Geology* 114, 347–363.

Melillo J., Steudler P., Aber J., Newkirk K., Lux H., Bowles F., Catricala C., Magill A., Ahrens T., Morrisseau S., 2002. Soil warming and carbon cycle. Feedbacks to the climate system. *Science* 298, 2173–2176.

Mikha M.M., Benjamin J.G., Halvorson A.D., Nielsen D.C., 2013. Soil carbon changes influenced by soil management and calculation method. *Open journal of soil science*, 3, 123-131.

Post W., Kwon K., 2000. Soil carbon sequestration and land-use change : processes and potential. *Global Change Biology* 6, 317–328.

Prieur A., Bonnet J.F., et Combarous M., 2004. Les surfaces boisées à l'échelle de la planète : usages conjoints pour la séquestration du carbone et la production d'énergie. *Compte Rendu de Géoscience* 336, 1323-1335.

Richter D.D., Markewitz D., Trumbore S.E., Wells C.G., 1999. Rapid accumulation and turnover of soil carbon in a re-establishing forest. *Nature* 400, 56-58.

Schlesinger W.H., Palmer Winkler J., Megonigal J.P., 2000. Soils and the global carbon cycle. In: Wigley, T., Schimel, D. (Eds.), *The Carbon Cycle*. Ecological Studies, vol. 142. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 93–101. chap. 6.

Six J., Callewaert P., Lenders S., Gryze S.D., Morris S.J., Gregorich E.G., Paul E.A., Paustian K., 2002a. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil Science Society America Journal* 66, 1981–1987.

Torn M.S., Lapenis A.G., Timofeev A., Fischer M.L., Babikov B.V., Harden J.W., 2002. Organic carbon and carbon isotopes in modern and 100-year-old soil archives of the Russian steppe. *Global Change Biology* 8, 941–953.

Vesterdal L., Raulund-Rasmussen K., 1998. Forest floor chemistry under seven tree species along a soil fertility gradient. *Canadian Journal of Forest Research* 28, 1636–1647.

Annexe 1 : Géologie du Morvan

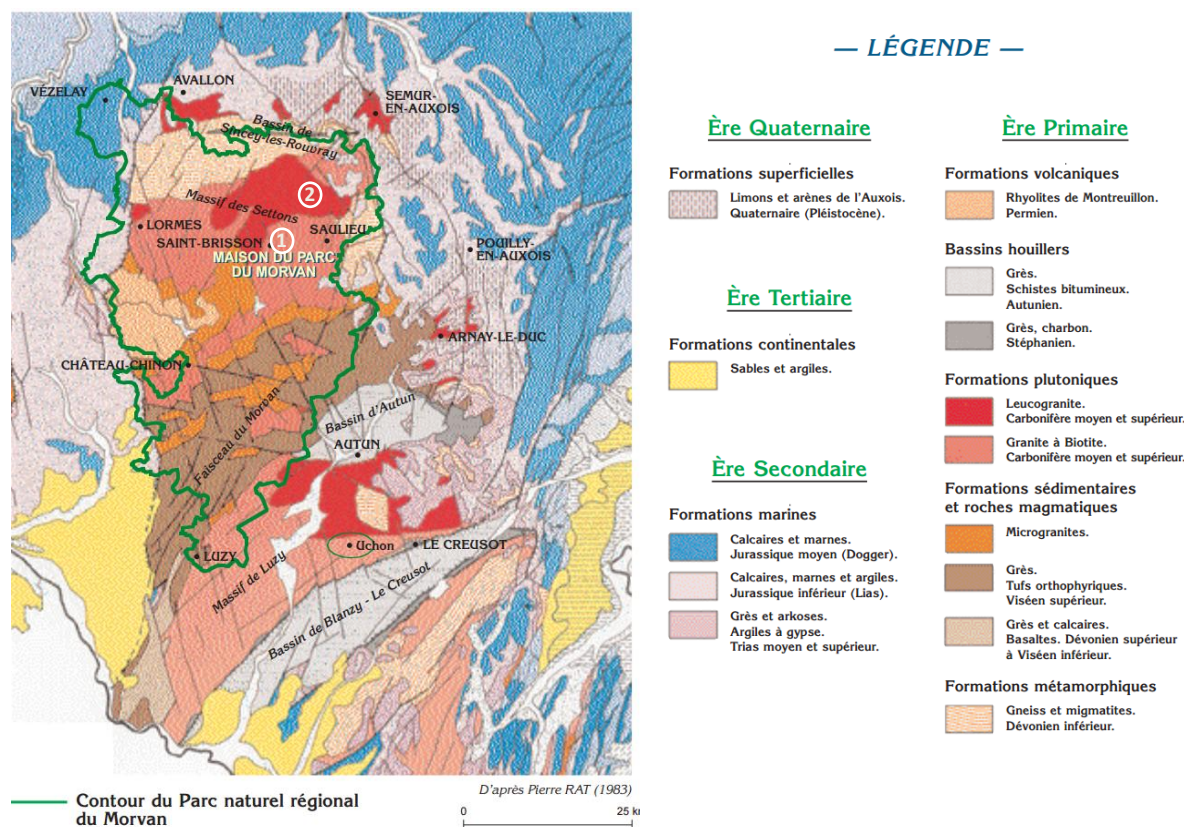


Figure 20: Géologie de Saint Brisson (1) et Chassenois (2)

Annexe 2 : Historique de la géologie

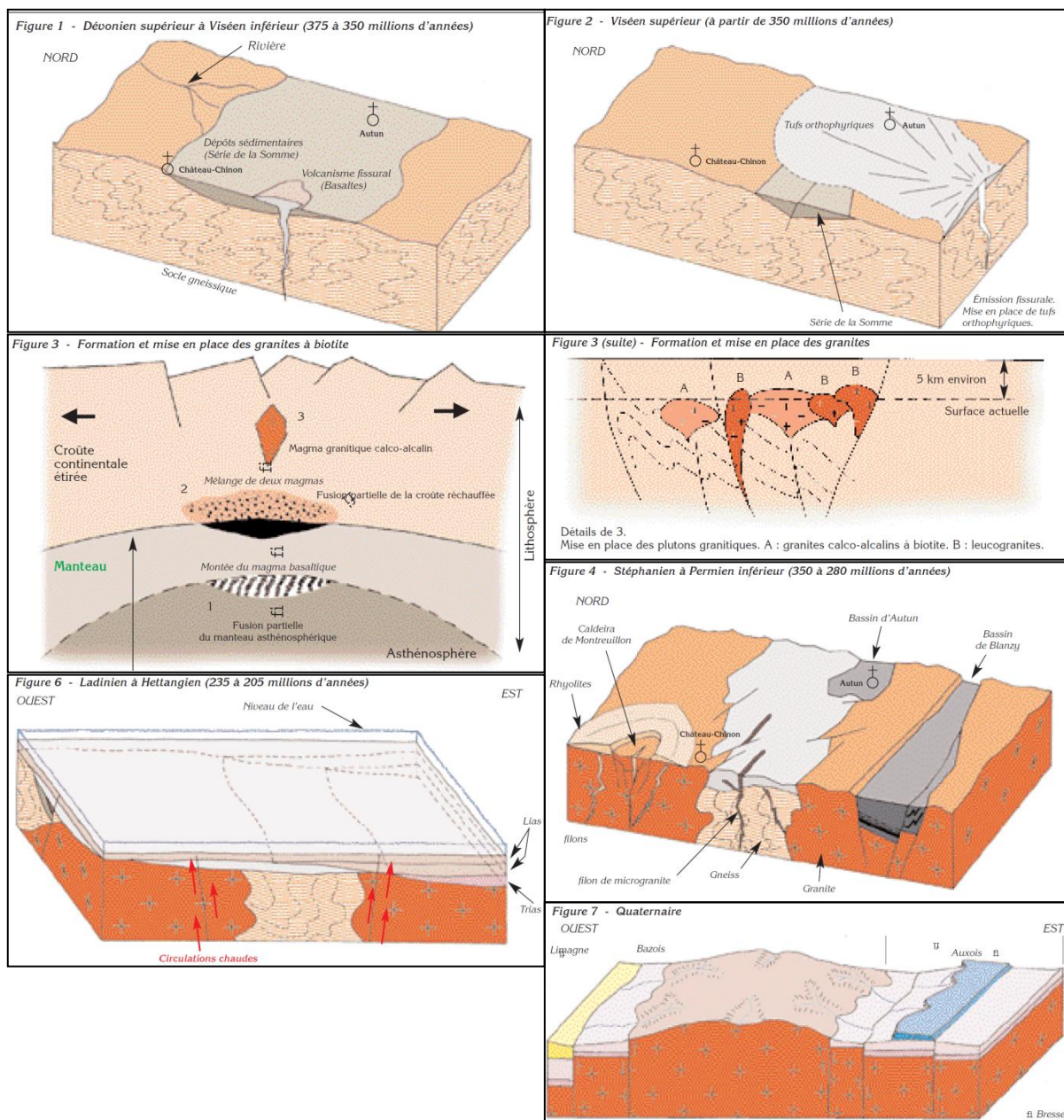
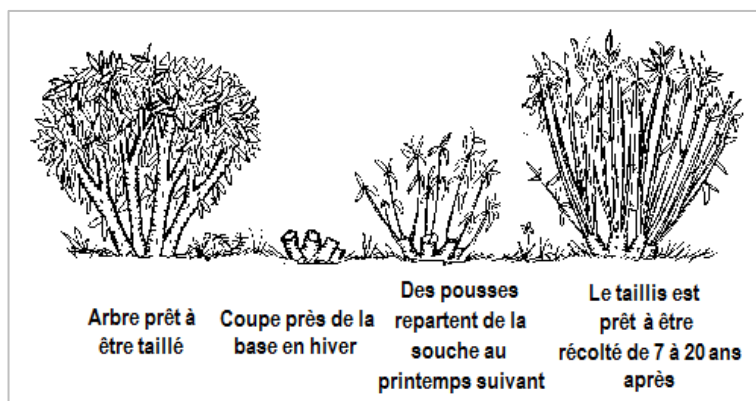


Figure 21: Historique de la géologie du Morvan

Annexe 3 : Technique sylvicole

1. Taillis



Le taillis est un peuplement dont les arbres sont de petits diamètres et coupés périodiquement. Ces arbres sont issus de rejets des anciennes souches. Cette technique est principalement utilisée pour la production de bois d'industrie (papeterie, piquets,...) ou pour le bois de feu.

Figure 22: Régime de taillis

2. Eclaircie

a. Définition

Une éclaircie forestière consiste à aérer un peuplement pour obtenir des arbres de bonne forme et diamètre au moment de l'exploitation finale. C'est une « réduction de la densité d'un peuplement forestier non arrivé à maturité en vue d'améliorer la croissance, l'aspect et la santé des arbres restants ». La densité initiale lors de la création d'un peuplement est généralement forte (2 à 3 m entre les arbres). Lorsque les arbres grandissent, leurs racines et leurs branches se rejoignent et ils se gênent et entre eux. Cela affecte la croissance des arbres : ils peuvent encore grandir mais ne grossissent plus ; mais aussi leur santé : ils sont plus fragiles aux accidents climatiques et peuvent être brisés par le vent.

L'éclaircie consiste donc à couper certains arbres pour laisser de la place aux autres. Il existe différents types d'éclaircies selon les peuplements, la rotation (période) entre chaque éclaircie et le rôle de la forêt ainsi que son évolution.

b. Différents types d'éclaircies

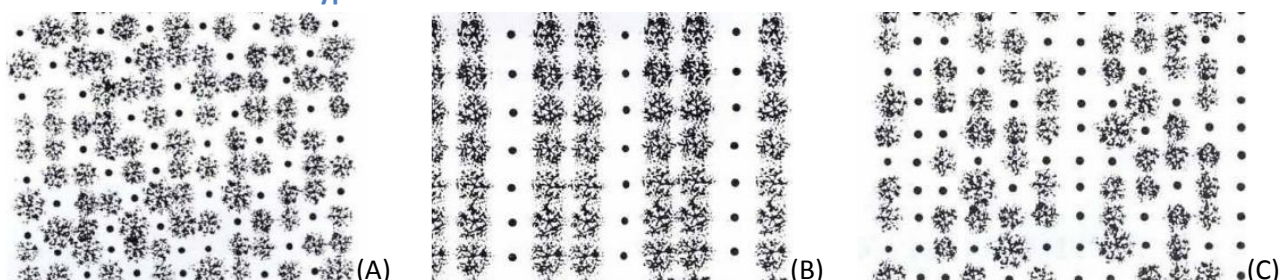


Figure 23: 3 grands types d'éclaircies : éclaircie sélective (A), éclaircie systématique en ligne (B) et éclaircie combinée (C)

Il existe 3 types d'éclaircies :

- Éclaircie sélective : elle consiste à sélectionner les arbres à garder jusqu'à l'exploitation finale. Le nombre d'arbre à garder (appelé « arbres en place ») correspond à la densité optimale au moment de l'exploitation finale. Il faut sélectionner les arbres les plus sains,

vigoureux et droits ; mais aussi faire attention à ce qu'ils soient bien répartis sur le terrain. Ils doivent avoir suffisamment d'espace pour développer leurs racines et leurs branches sans qu'ils soient trop éloignés les uns des autres (il faut rester dans une atmosphère de « forêt » pour éviter les accidents climatiques).

- Éclaircie systématique en ligne : cela consiste à couper des lignes entières du boisement à intervalle réguliers et à ne rien couper dans les autres lignes. Par exemple une éclaircie systématique 1/3 consiste à couper une ligne sur trois du peuplement.
- Éclaircie combinée : En général, on considère qu'il faut faire au minimum trois éclaircies au cours de la vie d'une plantation. A l'occasion d'au moins une de ces éclaircies, il faut choisir les arbres d'élite qui resteront jusqu'à l'exploitation finale. Le choix des arbres d'élite peut être fait en première, deuxième ou troisième éclaircie.

Annexe 4 : Plan du site de Saint Brisson

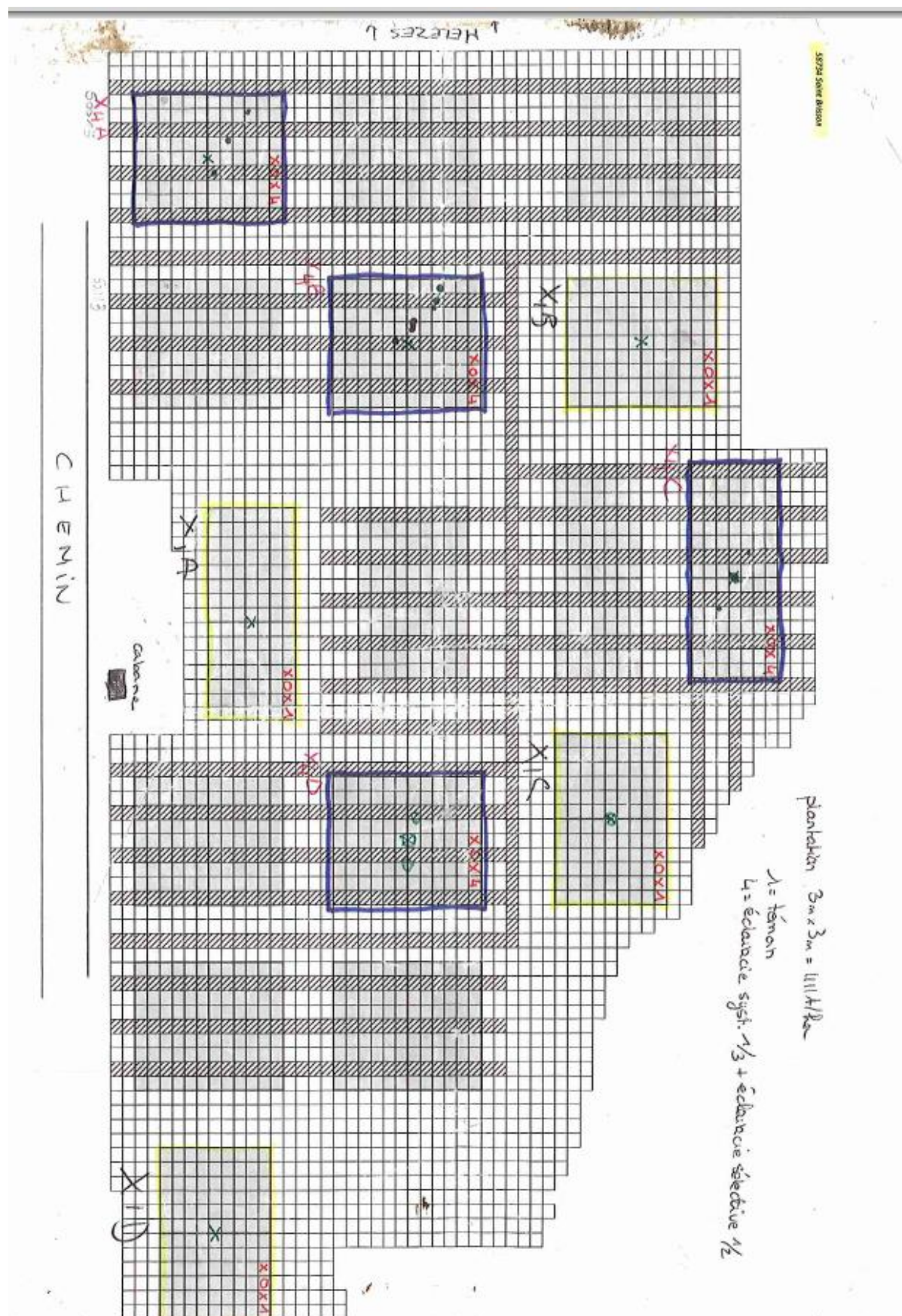


Figure 24: Plan du site d'étude de Saint Brisson

Figure 25: Plan du site d'étude de Chassenois



Annexe 6 : Statistiques inférentielles

Saint Brisson

Densité apparente

Effet du traitement sur la densité apparente du sol pour une profondeur de 0 à 30cm

Le test utilisé pour étudier le lien entre le traitement et la densité apparente du sol est le test paramétrique de comparaison de moyenne de Student car les conditions de normalité et d'égalité des variances ont été vérifiées (cf. Annexe 7 : Effet du traitement sur la densité apparente du sol pour une profondeur de 0 à 30cm : $t = -1.2331$, $df = 5.344$, $p\text{-value} = 0.269$).

Les deux moyennes sont égales (éclaircie faible et éclaircie forte) et par conséquent il n'y a pas d'effet significatif du traitement sur la densité apparente du sol en surface pour le site de Saint Brisson.

Effet du traitement sur la densité apparente du sol pour une profondeur de 30 à 50cm

Le test utilisé est le test paramétrique de comparaison de moyenne de Student car les conditions de normalité et d'égalité des variances ont été vérifiées (cf. Annexe 8 : Effet du traitement sur la densité apparente du sol pour une profondeur de 30 à 50cm) : $t = 0.1048$, $df = 5.695$, $p\text{-value} = 0.9201$.

Les deux moyennes sont égales (éclaircie faible et éclaircie forte) et par conséquent il n'y a pas d'effet significatif du traitement sur la densité apparente du sol en profondeur pour le site de Saint Brisson.

Concentration de carbone totale

Effet du traitement sur la concentration de carbone à une profondeur de 0-30cm

Le test utilisé pour étudier le lien entre le traitement et la concentration de carbone du sol est le test paramétrique de comparaison de moyenne de Student car les conditions de normalité et d'égalité des variances ont été vérifiées (cf. Annexe 9 : Effet du traitement sur la concentration de carbone du sol pour une profondeur de 0 à 30cm) : $t = 1.4385$, $df = 6$, $p\text{-value} = 0.2004$.

Les deux moyennes sont égales (éclaircie faible et éclaircie forte) et par conséquent il n'y a pas d'effet significatif du traitement sur la concentration de carbone du sol en surface pour le site de Saint Brisson.

Effet du traitement sur la concentration de carbone à une profondeur de 30-50cm

Le test utilisé est le test paramétrique de comparaison de moyenne de Student car les conditions de normalité et d'égalité des variances ont été vérifiées (cf. Annexe 10 : Effet du traitement sur la concentration de carbone du sol pour une profondeur de 30 à 50cm) : $t = 1.6332$, $df = 6$, $p\text{-value} = 0.1535$.

Les deux moyennes sont égales (éclaircie faible et éclaircie forte) et par conséquent il n'y a pas d'effet significatif du traitement sur la concentration de carbone du sol en profondeur pour le site de Saint Brisson.

Effet de la gestion sylvicole sur la concentration de carbone à 0-50cm

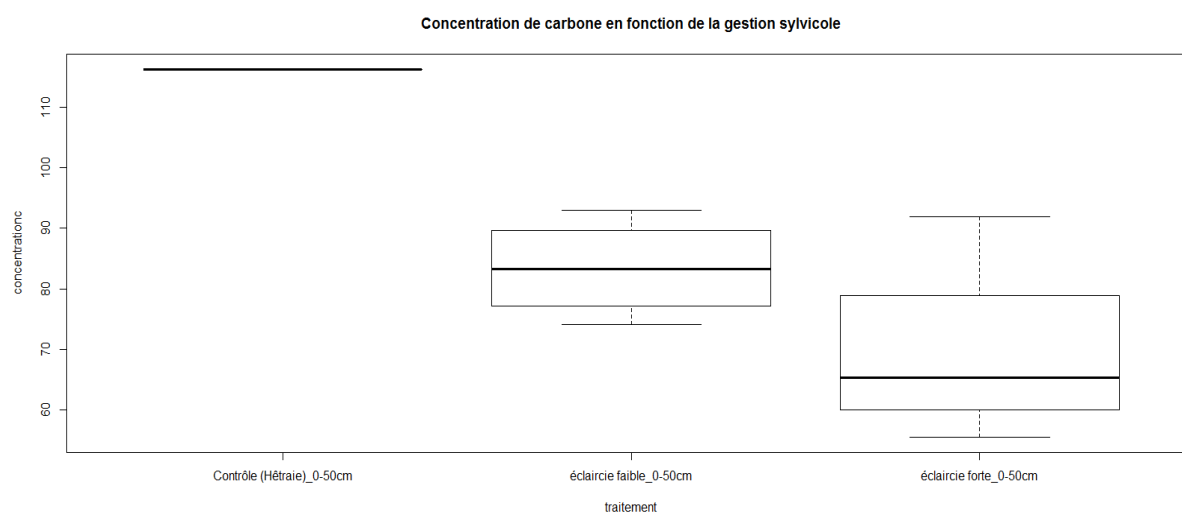


Figure 26: Concentration de carbone en fonction du traitement

D'après la Figure 3 et le Tableau 7, il semble y avoir une différence de concentration de carbone en fonction de la gestion sylvicole : le contrôle à une concentration plus élevée (116.260 g/kg) que les parcelles avec une faible éclaircie (83.390g/kg) et une forte éclaircie (69.508g/kg). Le traitement d'éclaircie semble avoir un faible effet sur la concentration de carbone, plus la parcelle est éclaircie, moins elle comporte de carbone dans le sol.

Des tests statistiques sont utilisés pour confirmer ces observations.

Tableau 7: Indicateur statistiques de la concentration de carbone en fonction de la gestion sylvicole

	moyenne	ecart type	IQR	min	25%	50%	75%	max	data:n
Contrôle (Hêtraie)_0-50cm	116,260	NA	0,000	116,260	116,260	116,260	116,260	116,260	1
Eclaircie faible_0-30cm	83,390	8,104	9,450	74,110	78,603	83,265	88,053	92,920	4
Eclaircie forte_0-50cm	69,508	15,608	10,153	55,490	62,353	65,350	72,505	91,840	4

Effet de l'éclaircie sur la concentration de carbone du sol pour une profondeur de 0 à 50 cm

Le test utilisé est le test paramétrique de comparaison de moyenne de Student car les conditions de normalité et d'égalité des variances ont été vérifiées (cf. Annexe 11 : Effet de l'éclaircie sur la concentration en carbone du sol) : $t = 1.5788$, $df = 6$, $p\text{-value} = 0.1655$.

Les deux moyennes sont égales (éclaircie faible et éclaircie forte) et par conséquent il n'y a pas d'effet significatif du traitement sur la concentration de carbone du sol pour le site de Saint Brisson.

Effet de la gestion sylvicole sur la concentration de carbone du sol sur une profondeur de 0 à 50 cm

Une anova a été réalisée pour comparer les moyennes en fonction du traitement (éclaircie forte, faible, contrôle) après avoir vérifié les conditions de normalité et d'égalité des variances (cf. Annexe

12 : Effet de la gestion sylvicole sur la concentration de carbone du sol à une profondeur de 0-50cm) : $\Pr(>F) = 0.0396$.

Les moyennes sont donc différentes, la concentration de carbone du sol de la parcelle contrôle est plus élevée que celle des parcelles éclaircies.

Stocks de carbone

Effet du traitement/gestion sylvicole sur les stocks à une profondeur de 0-30cm

Le test utilisé pour étudier le lien entre le traitement et les stocks de carbone est le test paramétrique de comparaison de moyenne de Student car les conditions de normalité et d'égalité des variances ont été vérifiées (cf. Annexe 13 : Effet du traitement sur les stocks de carbone en surface) : $t = 0.1401$, $df = 6$, $p\text{-value} = 0.8932$

Les deux moyennes sont égales (éclaircie faible et éclaircie forte) et par conséquent il n'y a pas d'effet significatif du traitement sur les stocks de carbone en surface pour le site de Saint Brisson.

Effet du traitement/gestion sylvicole sur les stocks à une profondeur de 30-50cm

Le test utilisé est le test paramétrique de comparaison de moyenne de Student car les conditions de normalité et d'égalité des variances ont été vérifiées (cf. Annexe 14 : Effet du traitement sur les stocks de carbone en profondeur) : $t = 0.5251$, $df = 6$, $p\text{-value} = 0.6183$.

Les deux moyennes sont égales (éclaircie faible et éclaircie forte) et par conséquent il n'y a pas d'effet significatif du traitement sur les stocks de carbone en profondeur pour le site de Saint Brisson.

Effet de la gestion sylvicole sur les stocks à une profondeur de 0-50cm

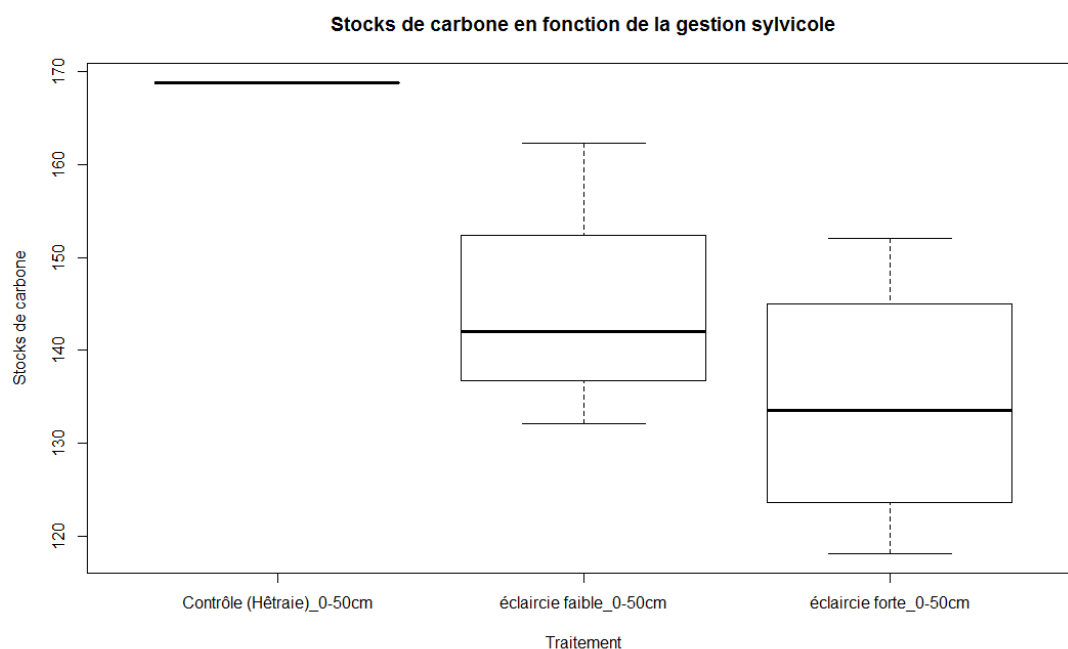


Figure 27: Stocks de carbone du sol en fonction du traitement pour le site de Saint Brisson

D'après la Figure 27 et le Tableau 8, il ne semble pas y avoir de différence de stocks de carbone en fonction du traitement.

Des tests statistiques vont être utilisés pour confirmer cette observation.

Tableau 8: Indicateurs statistiques des stocks de carbones en fonction de la gestion sylvicole

	moyenne	ecart type	IQR	min	25%	50%	75%	max	data:n
Contrôle (Hêraie)_0-50cm	143,268	NA	0,000	143,268	143,268	143,268	143,268	143,268	1
Eclaircie faible_0-50cm	140,691	19,924	23,922	125,108	125,887	135,006	149,810	167,645	4
Eclaircie forte_0-50cm	136,739	9,679	11,899	125,572	130,839	136,838	142,738	147,708	4

Effet de l'éclaircie sur les stocks de carbone à une profondeur de 0-50cm

Le test utilisé est le test paramétrique de comparaison de moyenne de Student car les conditions de normalité et d'égalité des variances ont été vérifiées (cf. Annexe 15 : Effet de l'éclaircie sur les stocks de carbone à une profondeur de 0-50cm) $t = 0.3568$, $df = 4.341$, $p\text{-value} = 0.7379$.

Les deux moyennes sont égales (éclaircie faible et éclaircie forte) et par conséquent il n'y a pas d'effet significatif du traitement sur les stocks de carbone pour le site de Saint Brisson.

Effet de la gestion sylvicole sur les stocks de carbone à une profondeur de 0-50cm

Une anova a été réalisée pour comparer les moyennes en fonction du traitement (éclaircie forte, faible, contrôle) après avoir vérifié les conditions de normalité et d'égalité des variances (cf. Annexe 16 : Effet de la gestion sylvicole sur les stocks de carbone pour une profondeur de 0-50cm) : $Pr(>F) = 0.905$.

Les moyennes sont égales, il n'y a donc pas d'effet significatif de la gestion sylvicole sur les stocks de carbone à Saint Brisson.

Chassenoix

Densité apparente du sol

Effet de la densité d'arbre sur la densité apparente du sol

Le test utilisé pour étudier le lien entre le traitement et la densité apparente du sol est le test paramétrique de comparaison de moyenne de Student car les conditions de normalité et d'égalité des variances ont été vérifiées (cf. Annexe 17 : Effet du traitement densité sur la densité apparente de surface du site de Chassenoix) : $t = -2.3693$, $df = 6$, $p\text{-value} = 0.08557$.

Les deux moyennes sont égales (densité faible et densité forte) et par conséquent il n'y a pas d'effet significatif du traitement sur la densité apparente du sol en surface pour le site de Chassenoix.

Effet de la gestion sylvicole sur la densité apparente du sol

Une anova a été réalisée pour comparer les moyennes en fonction du traitement (densité forte, faible, contrôle) après avoir vérifié les conditions de normalité et d'égalité des variances (cf. Annexe 18 : Effet du traitement sur la densité apparente du site de Chassenoix) : $Pr(>F) = 0.138$.

Les moyennes sont égales, il n'y a donc pas d'effet significatif de la gestion sylvicole sur la densité apparente pour le site de Chassenoix

Concentration de carbone totale

Effet de la densité d'arbre sur la concentration de carbone du sol

Le test utilisé pour étudier le lien entre le traitement et la densité apparente du sol est le test paramétrique de comparaison de moyenne de Student car les conditions de normalité et d'égalité des variances ont été vérifiées (cf. Annexe 19: Effet de la densité d'arbre sur la concentration en carbone à Chassenoix) : $t = 0.3968$, $df = 6$, $p\text{-value} = 0.7052$.

Les deux moyennes sont égales (forte densité et faible densité) et par conséquent il n'y a pas d'effet significatif du traitement sur la concentration de carbone en surface pour le site de Chassenoix.

Effet de la gestion sylvicole sur la concentration de carbone du sol

Une anova a été réalisée pour comparer les moyennes en fonction du traitement (densité forte, faible, contrôle) après avoir vérifié les conditions de normalité et d'égalité des variances (cf. Annexe 20 : Effet de la gestion sylvicole sur la concentration de carbone à Chassenoix) : $Pr(>F) = 0.869$.

Les moyennes sont égales, il n'y a donc pas d'effet significatif de la gestion sylvicole sur la concentration de carbone pour le site de Chassenoix

Stocks de carbone organique

Effet de la densité d'arbre sur les stocks de carbone du sol

Le test utilisé pour étudier le lien entre le traitement et la densité apparente du sol est le test paramétrique de comparaison de moyenne de Student car les conditions de normalité et d'égalité des variances ont été vérifiées (cf. Annexe 21 : Effet de la densité d'arbre sur les stocks de carbone à Chassenoix) : $t = -0.674$, $df = 6$, $p\text{-value} = 0.5254$.

Les deux moyennes sont égales (forte densité et faible densité) et par conséquent il n'y a pas d'effet significatif du traitement sur les stocks de carbone en surface pour le site de Chassenoix.

Effet de la gestion sylvicole sur les stocks de carbone du sol

Une anova a été réalisée pour comparer les moyennes en fonction du traitement (densité forte, faible, contrôle) après avoir vérifié les conditions de normalité et d'égalité des variances (cf.) : $Pr(>F) = 0.552$.

Les moyennes sont égales, il n'y a donc pas d'effet significatif de la gestion sylvicole sur les stocks de carbone pour le site de Chassenoix

Annexe 7 : Effet du traitement sur la densité apparente du sol pour une profondeur de 0 à 30cm

1- Normalité

a. Eclaircie faible

Shapiro-Wilk normality test

data: Da_.corrigée_cailloux

W = 0.9475, p-value = 0.7007

b. Eclaircie forte

Shapiro-Wilk normality test

data: Da_.corrigée_cailloux

W = 0.8438, p-value = 0.2068

2- Egalité des variances

F test to compare two variances

data: Da_.corrigée_cailloux by traitement

F = 2.0788, num df = 3, denom df = 3, p-value = 0.5632

alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1

95 percent confidence interval:

0.1346422 32.0944435

sample estimates:

ratio of variances

2.078766

Annexe 8 : Effet du traitement sur la densité apparente du sol pour une profondeur de 30 à 50cm

1- Normalité :

- Eclaircie forte

Shapiro-Wilk normality test

data: Da_.corrigée_cailloux

W = 0.8244, p-value = 0.1536

- Eclaircie faible

Shapiro-Wilk normality test

data: Da_.corrigée_cailloux

W = 0.7932, p-value = 0.09056

2- Egalité des variances

F test to compare two variances

data: Da_.corrigée_cailloux by traitement

F = 0.6243, num df = 3, denom df = 3, p-value = 0.7081

alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1

95 percent confidence interval:

0.04043475 9.63836490

sample estimates:

ratio of variances

0.6242795

Annexe 9 : Effet du traitement sur la concentration de carbone du sol pour une profondeur de 0 à 30cm

1- Normalité

a. Faible éclaircie

Shapiro-Wilk normality test

data: corg_g_par_kg

W = 0.9316, p-value = 0.6036

b. Forte éclaircie

Shapiro-Wilk normality test

data: corg_g_par_kg

W = 0.9214, p-value = 0.5449

2- Variances

F test to compare two variances

data: corg_g_par_kg by traitement

F = 0.3015, num df = 3, denom df = 3, p-value = 0.351

alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1

95 percent confidence interval:

0.0195277 4.6547854

sample estimates:

ratio of variances

0.3014917

Annexe 10 : Effet du traitement sur la concentration de carbone du sol pour une profondeur de 30 à 50cm

1- Normalité

a. Faible éclaircie

Shapiro-Wilk normality test

data: corg_g_par_kg

W = 0.9848, p-value = 0.9297

b. Forte éclaircie

Shapiro-Wilk normality test

data: corg_g_par_kg

W = 0.803, p-value = 0.1077

2- Variances

F test to compare two variances

data: corg_g_par_kg by traitement

F = 0.5697, num df = 3, denom df = 3, p-value = 0.6554

alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1

95 percent confidence interval:

0.03689948 8.79566812

sample estimates:

ratio of variances

0.5696978

Annexe 11 : Effet de l'éclaircie sur la concentration en carbone du sol

1- Normalité

a. Faible éclaircie

Shapiro-Wilk normality test

data: concentrationc

W = 0.9921, p-value = 0.968

b. Forte éclaircie

Shapiro-Wilk normality test

data: concentrationc

W = 0.8702, p-value = 0.2985

2- Variances

F test to compare two variances

data: concentrationc by traitement

F = 0.2696, num df = 3, denom df = 3, p-value = 0.3102

alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1

95 percent confidence interval:

0.0174602 4.1619595

sample estimates:

ratio of variances

0.2695712

Annexe 12 : Effet de la gestion sylvicole sur la concentration de carbone du sol à une profondeur de 0-50cm

1- Normalité

Shapiro-Wilk normality test

data: 42oncentration

W = 0.9639, p-value = 0.8385

2- Variances

Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = "median")

Df F value Pr(>F)

group 2 0.4659 0.6485

6

3- Anova

```
> summary(AnovaModel.1)
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
--	----	--------	---------	---------	--------

traitement	2	1794.3	897.1	5.802	0.0396 *
------------	---	--------	-------	-------	----------

Residuals	6	927.8	154.6		
-----------	---	-------	-------	--	--

Signif. Codes : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```
> with(Dataset, numSummary(42oncentration, groups=traitement,
```

```
+ statistics=c("mean", "sd")))
```

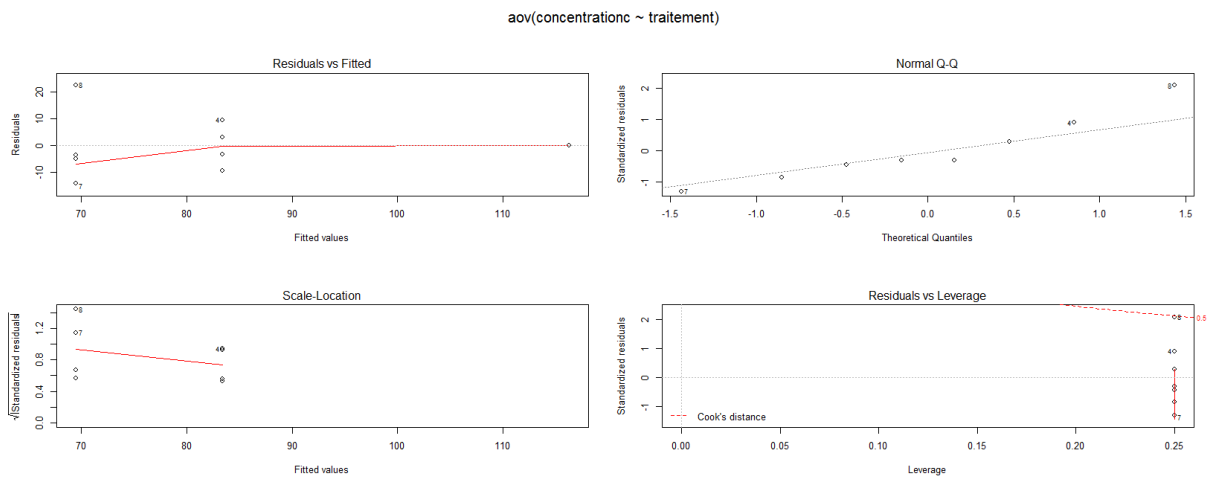
	mean	sd	data:n
--	------	----	--------

Contrôle (Hêtraie)_0-50cm	116.2600	NA	1
---------------------------	----------	----	---

éclaircie faible_0-50cm	83.3900	8.10360	4
-------------------------	---------	---------	---

éclaircie forte_0-50cm	69.5075	15.60778	4
------------------------	---------	----------	---

4- Residus



Shapiro-Wilk normality test

data: AnovaModel.1\$residuals

W = 0.9311, p-value = 0.4923

Annexe 13 : Effet du traitement sur les stocks de carbone en surface

1- Normalité

a. Eclaircie faible

Shapiro-Wilk normality test

data: stocks_cos

W = 0.97, p-value = 0.8415

b. Eclaircie forte

Shapiro-Wilk normality test

data: stocks_cos

W = 0.9168, p-value = 0.5192

2- Egalité des variances

F test to compare two variances

data: stocks_cos by traitement

F = 6.5592, num df = 3, denom df = 3, p-value = 0.1567

alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1

95 percent confidence interval:

0.4248429 101.2691013

sample estimates:

ratio of variances

6.559227

Annexe 14 : Effet du traitement sur les stocks de carbone en profondeur

1- Normalité

a. Eclaircie faible

Shapiro-Wilk normality test

data: stocks_cos

W = 0.9445, p-value = 0.682

b. Eclaircie forte

Shapiro-Wilk normality test

data: stocks_cos

W = 0.9444, p-value = 0.6814

2- Egalité des variances

F test to compare two variances

data: stocks_cos by traitement

F = 0.5085, num df = 3, denom df = 3, p-value = 0.5926

alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1

95 percent confidence interval:

0.03293263 7.85009582

sample estimates:

ratio of variances

0.5084528

Annexe 15 : Effet de l'éclaircie sur les stocks de carbone à une profondeur de 0-50cm

1- Normalité

a. Faible éclaircie

Shapiro-Wilk normality test

data: stocks_cos

W = 0.8696, p-value = 0.2961

b. Forte éclaircie

Shapiro-Wilk normality test

data: stocks_cos

W = 0.9834, p-value = 0.9217

2- Variance

F test to compare two variances

data: stocks_cos by traitement

F = 4.2373, num df = 3, denom df = 3, p-value = 0.2665

alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1

95 percent confidence interval:

0.2744491 65.4199709

sample estimates:

ratio of variances

4.237269

Annexe 16 : Effet de la gestion sylvicole sur les stocks de carbone pour une profondeur de 0-50cm

1- Normalité

Shapiro-Wilk normality test

data: stocks_cos

W = 0.8873, p-value = 0.1871

2- Variances

Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = "median")

Df F value Pr(>F)
group 2 1.4663 0.3031

3- Anova

```
> summary(AnovaModel.1)
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
traitement	2	49.7	24.83	0.101	0.905
Residuals	6	1472.0	245.34		

```
> with(essaitotal, numSummary(stocks_cos, groups=traitement,  
+ statistics=c("mean", "sd")))
```

	mean	sd	data:n
Contrôle (Hêtraie)_0-50cm	143.2675	NA	1
éclaircie faible_0-50cm	140.6911	19.924429	4
éclaircie forte_0-50cm	136.7389	9.679276	4

4- Residus

```
aov(stocks_cos ~ traitement)
```

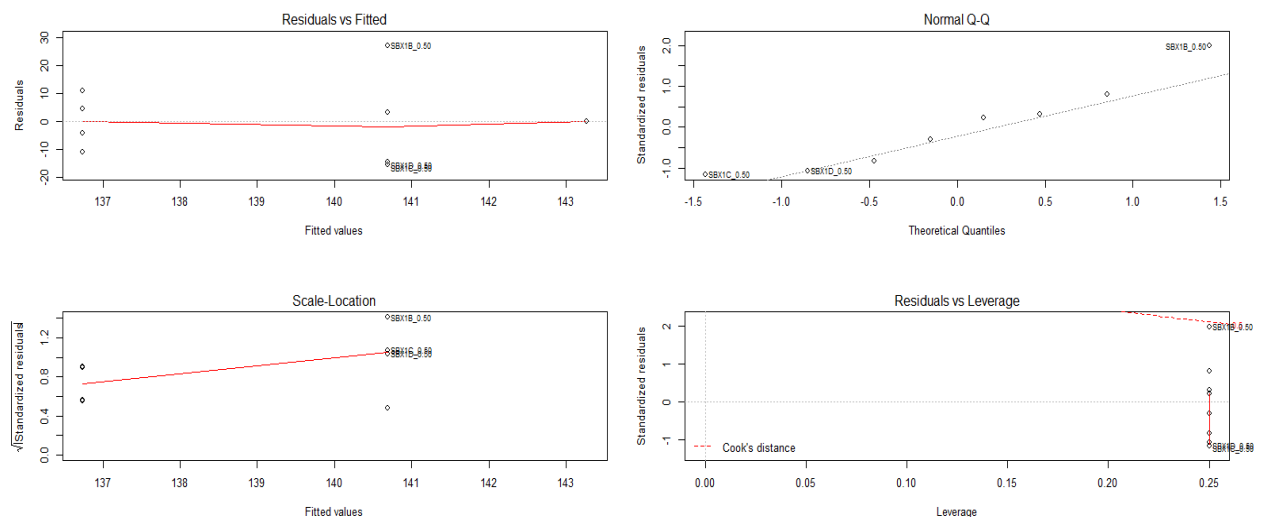


Figure 28: Résidus de l'Anova

Normalité des résidus :

Shapiro-Wilk normality test

data: AnovaModel.1\$residuals

W = 0.9342, p-value = 0.5224

Annexe 17 : Effet du traitement densité sur la densité apparente de surface du site de Chassenoix

1- Normalité

a. Faible densité

Shapiro-Wilk normality test

data: Da_.corrigée_cailloux

W = 0.8915, p-value = 0.3899

b. Forte densité

Shapiro-Wilk normality test

data: Da_.corrigée_cailloux

W = 0.9803, p-value = 0.904

2- Variances

F test to compare two variances

data: Da_.corrigée_cailloux by traitement

F = 0.1059, num df = 3, denom df = 3, p-value = 0.0977 variances égales

alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1

95 percent confidence interval:

0.006860714 1.635376989

sample estimates:

ratio of variances

0.1059238

Annexe 18 : Effet du traitement sur la densité apparente du site de Chassenoix

1- Normalité

Shapiro-Wilk normality test

data: Da_.corrigée_cailloux

W = 0.8957, p-value = 0.2283

2- Variances

Test de Levene , p-value=0.3334

3- Moyennes : Anova

```
> summary(AnovaModel.1)
```

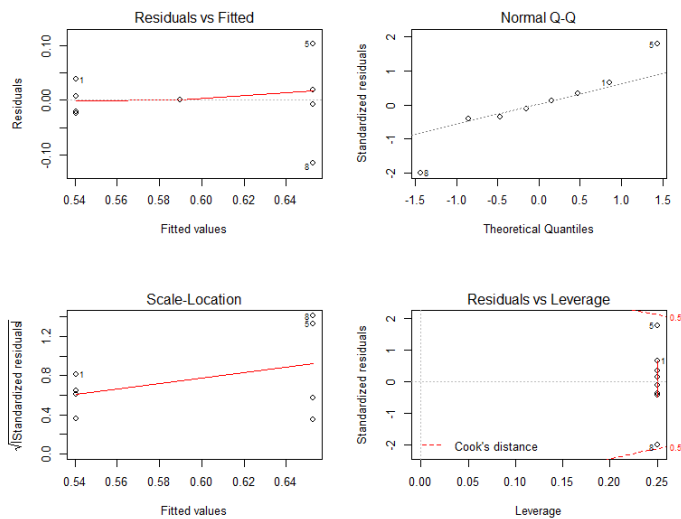
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
traitement	2	0.02509	0.012547	2.812	0.138
Residuals	6	0.02678	0.004463		

```
> with(complet, numSummary(Da_.corrigée_cailloux, groups=traitement,  
+ statistics=c("mean", "sd")))
```

	mean	sd	data:n
contrôle (chêneie)_0-30cm	0.5896891	NA	1
faible_densite_0-30cm	0.5406408	0.0292381	4
forte_densite_0-30cm	0.6525599	0.0898364	4

4- Résidus

aov(Da_corrignée_cailloux ~ traitement)



Shapiro-Wilk normality test

data: AnovaModel.1\$residuals

W = 0.9315, p-value = 0.496

Annexe 19: Effet de la densité d'arbre sur la concentration en carbone à Chassenois

1- Normalité

a. Densité faible

Shapiro-Wilk normality test

data: corg_g_par_kg

W = 0.8984, p-value = 0.4231

b. Densité forte

Shapiro-Wilk normality test

data: corg_g_par_kg

W = 0.8524, p-value = 0.234

2- Variances

F test to compare two variances

data: corg_g_par_kg by traitement

F = 2.875, num df = 3, denom df = 3, p-value = 0.4089

alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1

95 percent confidence interval:

0.1862113 44.3868899

sample estimates:

ratio of variances

2.874951

Annexe 20 : Effet de la gestion sylvicole sur la concentration de carbone à Chassenoix

1- Normalité

Shapiro-Wilk normality test

data: corg_g_par_kg

W = 0.9518, p-value = 0.7103

2- Variances (test de Levene)

p-value= 0.203

3- Moyennes (Anova)

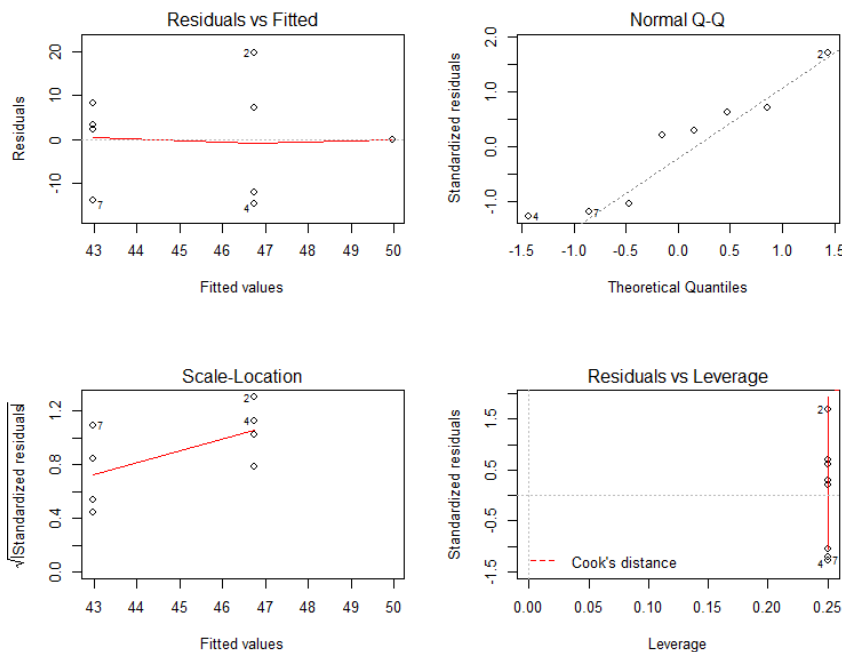
```
> summary(AnovaModel.2)
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
traitement	2	51.1	25.56	0.144	0.869
Residuals	6	1067.5	177.91		

```
> with(complet, numSummary(corg_g_par_kg, groups=traitement,  
+ statistics=c("mean", "sd")))  
      mean      sd data:n  
contrôle (chênaie)_0-30cm 49.9600    NA    1  
faible_densite_0-30cm    46.7325 16.247936    4  
forte_densite_0-30cm     42.9900  9.582592    4
```

4- Résidus

```
aov(corg_g_par_kg ~ traitement)
```



Shapiro-Wilk normality test

data: AnovaModel.2\$residuals

W = 0.9226, p-value = 0.4142

Annexe 21 : Effet de la densité d'arbre sur les stocks de carbone à Chassenois

1- Normalité

a. Faible densité

Shapiro-Wilk normality test

data: stocks_cos

W = 0.9118, p-value = 0.4919

b. Forte densité

Shapiro-Wilk normality test

data: stocks_cos

W = 0.9665, p-value = 0.82

2- Variance

F test to compare two variances

data: stocks_cos by traitement

F = 0.7527, num df = 3, denom df = 3, p-value = 0.821

alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1

95 percent confidence interval:

0.04875305 11.62118422

sample estimates:

ratio of variances

0.7527072

Annexe 22 : Effet de la gestion sylvicole sur les stocks de carbone en surface à Chassenois

1- Normalité

Shapiro-Wilk normality test

data: stocks_cos

W = 0.9517, p-value = 0.7082

2- Variances (test de Levene)

p-value= 0.4626

3- Moyennne (Anova)

> summary(AnovaModel.3)

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
--	----	--------	---------	---------	--------

traitement	2	333.9	167.0	0.656	0.552
------------	---	-------	-------	-------	-------

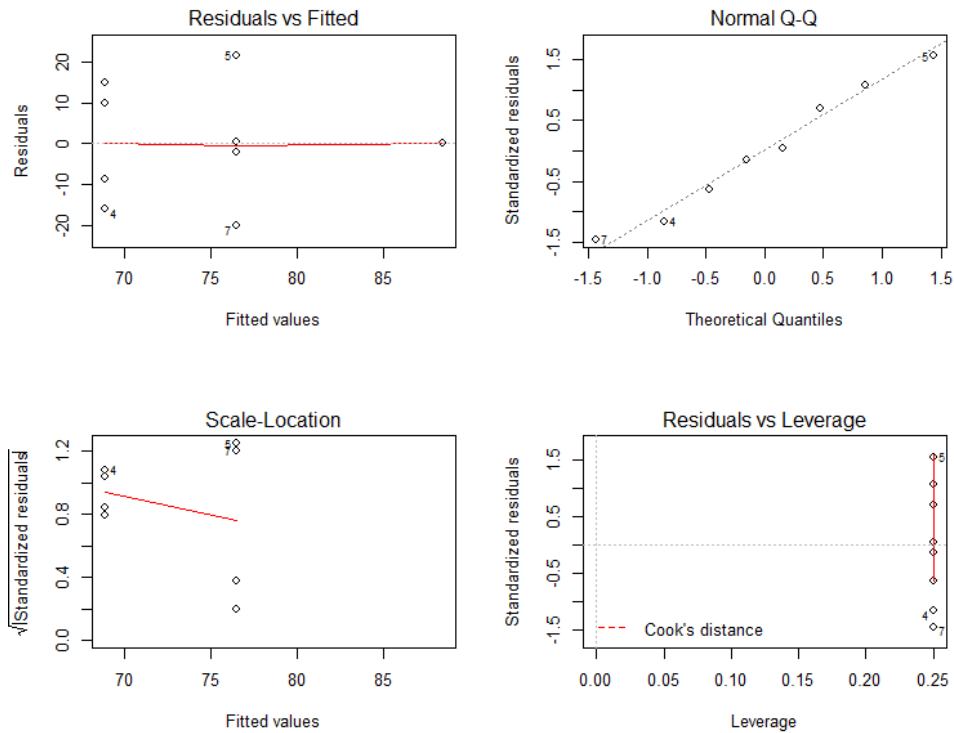
Residuals	6	1526.5	254.4		
-----------	---	--------	-------	--	--

```
> with(complet, numSummary(stocks_cos, groups=traitement, statistics=c("mean",  
+ "sd")))
```

	mean	sd	data:n
contrôle (chênaie)_0-30cm	88.38261	NA	1
faible_densite_0-30cm	68.90882	14.78239	4
forte_densite_0-30cm	76.51085	17.03851	4

4- Résidus

aov(stocks_cos ~ traitement)



Shapiro-Wilk normality test
 data: AnovaModel.3\$residuals
 W = 0.97, p-value = 0.8948

Annexe 23 : Tableau des tâches et calendrier du stage

Tableau 9: Tableau des tâches avec X: intervenant principal, x: intervenant secondaire

	Bibliographie	Visite de sites	Logistique (déplacement, hôtel,...)	Terrain	Laboratoire	Statistiques	Rédaction
EA	X	x	X	X	X	X	X
LC	x	X	x	X			

EA : Elise Albertin / LC : Lauric Cécillon

Tableau 10: Calendrier des taches

	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet
Bibliographie					
Visite de sites					
Terrain					
Laboratoire					
Statistiques					
Rédaction					

Résumé

Le projet PiCaSo de l'IRSTEA de Grenoble ambitionne d'offrir un levier concret d'atténuation des émissions nationales de gaz à effet de serre grâce à un pilotage des stocks de carbone organiques des sols de forêts, via l'implémentation de pratiques sylvicoles adaptées aux spécificités pédoclimatiques des principales régions forestières françaises.

Les forêts constituent les stocks de carbone le plus important en France métropolitaines, dont la majeure partie se situe dans les sols. Ainsi, la gestion des stocks de carbone des sols forestiers constitue un levier possible d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre.

En forêt, le stockage de carbone organique du sol dépend d'une multitude de facteurs (climat, type de sol, gestion sylvicole,...) dont les effets sont mal connus. L'apparition de modes de gestion sylvicole plus intensifs avec le développement de la filière bois énergie renforce l'incertitude quand à la durabilité du stockage du carbone dans les sols forestiers.

Le projet PiCaSo propose donc de créer un référentiel national de l'effet de plusieurs modes de gestion sylvicoles sur les stocks de carbone organique du sol dans différentes situations pédoclimatiques (228 placette réparties dans 30 massifs forestiers en France) ; et de développer une méthode capable de fournir une estimation robuste de la durabilité du stockages du carbone organique du sol.

Pour y parvenir, la méthodologie retenue utilise une stratégie d'échantillonnage stratifiée avec quantification des stocks de carbones organiques du sol superficiels (0-30cm) et profonds (30-50cm). La durabilité du carbone est estimée par une méthode multicritère. La stabilité du carbone est mesurée par des incubations en laboratoire, un fractionnement physique et thermique du carbone, la quantification de charbons et une étude fine de la minéralogie des sols.

Ce rapport présente les tout premiers résultats obtenus pour ce projet PiCaSo sur le sapin Douglas dans le massif du Morvan. Les résultats ne sont pas significatifs, n'ayant pas un nombre de répliques suffisant, mais suivent tout de même la tendance prévue lors de la mise en place des hypothèses.

Mots clefs

Stock de carbone du sol : le sol joue le rôle de puits de carbone ; réservoir naturel de carbone qui absorbe le carbone de l'atmosphère et donc contribue à diminuer la quantité de CO₂ atmosphérique.

Placette forestière : surface délimitée et localisée avec précision, dans laquelle différents essais de gestions forestières seront réalisés.

Densité apparente du sol : Poids de l'unité de volume en comprenant les vides qui permet de rendre compte de la masse de sol contenue dans un volume donné, comprenant le volume d'air. La densité apparente peut varier en fonction de la compaction ou l'aération du sol.

Gestion sylvicole : gestion utilisée pour une gestion durable des forêts.