

REVUE DE LITTÉRATURE SYSTÉMATIQUE SUR LE POTENTIEL
D'UTILISATION DES PAILLIS ORGANIQUES À AMÉLIORER LA QUALITÉ DES
SOLS ET DE LA DURABILITÉ DES VERGERS DE POMMES QUÉBÉCOIS

par
Lauréline Boyer

Département des sols et de génie agroalimentaire, Université Laval
15 avril 2021

Résumé

La gestion du sol et du couvre-sol des vergers reçoit relativement peu d'attention au Québec tout comme ailleurs dans le monde. Pourtant, comme dans toute production agricole, une gestion durable de cet aspect permet d'améliorer le bilan environnemental, la résilience face aux changements climatiques et les performances agronomiques. Aujourd'hui, la technique de gestion du sol et du couvre-sol la plus utilisée dans les vergers de pommiers hautement productifs en Amérique du Nord est l'utilisation d'herbicides de synthèse dans le rang d'arbres combinée à une couverture engazonnée tondue dans l'entre-rang. Cependant, cette méthode s'inscrit difficilement dans une démarche écologique, détériore le sol en le laissant à nu, et n'est pas accessible aux pomiculteurs biologiques. Une des alternatives les plus prometteuses à ce système de gestion du sol des vergers de pommiers est l'utilisation de paillis organiques dans le rang d'arbres. Le présent travail a pour but de passer systématiquement en revue les différents articles scientifiques publiés à ce sujet dans les dernières décennies en Amérique du Nord. Plus précisément, l'effet des paillis organiques sur l'amélioration de la qualité du sol, par les propriétés chimiques, physiques et biologiques, ainsi que des performances agronomiques des pommiers ont été analysées à l'aide de 30 publications. L'analyse des résultats de ces études révèlent que principalement quatre types de paillis organiques ont fait l'objet de recherches soit : les paillis de papier déchiqueté, les paillis de paille de foin et de luzerne, les paillis de compost et les paillis de copeaux de bois. Bien que de façon générale tous les types de paillis organiques permettaient de maintenir ou d'améliorer la qualité des sols des vergers par rapport à un témoin d'herbicide ou de sol nu, les paillis de copeaux de bois se démarquent par leurs effets bénéfiques plus significatifs, durables et constants sur la croissance des pommiers et sur plusieurs propriétés du sol. Ainsi, ce type de paillis pourrait être utilisé avantageusement pour remplacer l'utilisation d'herbicides dans les vergers de pommiers québécois, biologiques ou non, et ce, principalement dans les premières années de croissance des arbres fruitiers, afin d'améliorer le sol tout en contrôlant les mauvaises herbes.

TABLE DES MATIERES

Résumé.....	2
1. Introduction.....	4
1.1. La production pomicole du Québec en quête de durabilité	4
1.1.1. Amélioration des pratiques environnementales et durabilité.....	4
1.2. Le concept de qualité du sol	5
1.3. La gestion du sol et du couvre-sol des vergers	6
1.3.1. Le couvert végétal permanent et les cultures de couverture	7
1.3.2. Les paillis	12
1.3.3. Le travail superficiel du sol et la méthode du Système-Sandwich-Suisse	13
1.4. Les sols des vergers québécois	15
1.5. Objectifs	16
2. Méthodologie	17
2.1. Acquisition et présentation des données	17
2.2. Variables à considérer	17
2.2.1. Type de sol	17
2.2.2. Emplacement géographique et climat	18
2.2.3. Durée des études	18
2.2.4. Porte-greffes et cultivars.....	19
2.2.5. Types de paillis et leur méthode d'application.....	19
3. Résultats	21
3.1. Effets des paillis sur le rendement et la croissance des pommiers	21
3.2. Effets des paillis sur les propriétés chimiques du sol	26
3.3. Effets des paillis sur les propriétés physiques du sol	31
3.4. Effets des paillis sur la biologie du sol	36
4. Discussion.....	39
4.1. Paillis de papier.....	39
4.2. Paillis de paille de foin et de luzerne	41
4.3. Paillis de paille de compost	43
4.4. Paillis de paille de copeaux de bois	45
5. Conclusion	48
6. Bibliographie.....	50
7. Annexe.....	55

1. INTRODUCTION

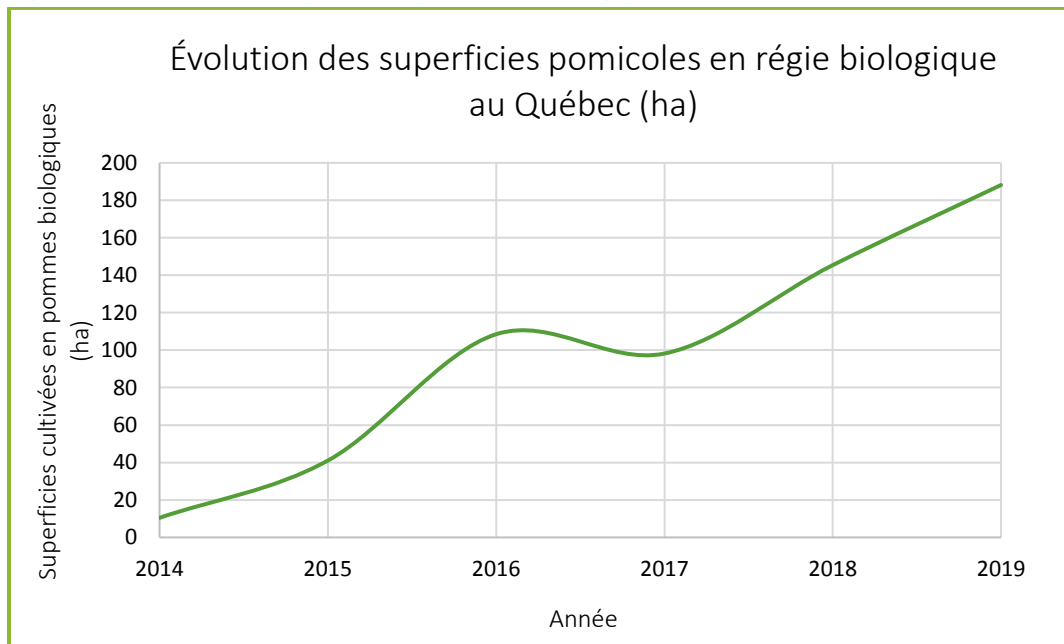
1.1. La production pomicole du Québec en quête de durabilité

La culture des pommiers est bien enracinée dans le paysage et l'économie agricole québécoise. En effet, la pomme est le fruit le plus cultivé au Québec et le 2^e le plus consommé frais après la banane (MAPAQ, 2015). Le Québec est d'ailleurs la deuxième province productrice de pommes au Canada après la Colombie-Britannique avec 30% du volume de production en 2019 (Gouvernement du Canada, 2020). En 2018, cette culture générait des ventes à la ferme de l'ordre de 59,31 M\$ dans la province et on comptait, sur le territoire du Québec, 433 entreprises pomicoles totalisant une superficie de 4 957 hectares de vergers (Institut de la statistique du Québec, 2018).

1.1.1. Amélioration des pratiques environnementales et durabilité

À l'ère du réchauffement climatique, la production de pommes n'échappe pas au vent de changement des pratiques culturales soufflant depuis quelques années sur la province et visant à diminuer l'impact environnemental tout en augmentant la durabilité de notre agriculture. Le secteur biologique en témoigne bien alors qu'on observe une augmentation marquée des superficies plantées de pommiers en régie biologique (voir figure 1).

Figure 1. Évolution des superficies pomicoles biologiques au Québec



(Source : Portail Bio Québec)

Toutefois, malgré cet intérêt marqué, la production de pommes biologiques reste très marginale au Québec. En effet, selon le Portail Bio Québec (www.portailbioquebec.info), en 2019, on ne recensait que 53 entreprises pomicoles en régie biologique pour un total de 188 ha, ce qui représente seulement environ 3,8% des superficies plantées en vergers de pommiers de la province (Institut de la statistique du Québec, 2018).

Il faut dire que les défis sont nombreux en pomiculture biologique, car la pression des maladies, spécialement de la tavelure, et le nombre d'insectes ravageurs sont particulièrement élevés dans les vergers québécois. De plus, les outils de lutte acceptés par la certification biologique sont souvent moins efficaces et ne permettent pas des rendements aussi élevés qu'en régie conventionnelle. C'est pourquoi plusieurs producteurs ont décidé d'adopter la production fruitière intégrée (PFI); une façon de produire plus respectueuse de l'environnement, de la santé et de la durabilité économique, basée sur la lutte intégrée, mais appliquée à tous les aspects de la production (Chouinard, 2020). Cette méthode alternative se veut comme un entre-deux entre le biologique et le conventionnel et se qualifie d'agriculture raisonnée.

Ainsi, que ce soit par l'adoption d'une régie biologique ou intégrée, de plus en plus d'efforts sont mis en place pour diminuer l'impact environnemental de la production pomicole.

1.2. Le concept de qualité du sol

Un des aspects primordiaux d'un agroécosystème durable est la gestion adéquate et la création d'un sol en santé ou encore de bonne qualité. Les termes *santé* et *qualité* du sol sont semblables, car ils sont influencés par les propriétés biologiques, chimiques et physiques du sol, mais la qualité d'un sol est aussi liée à sa productivité dans un contexte agronomique soit sa capacité à soutenir de bons rendements (Karlen et al., 1997). Dans un contexte de verger de pommiers, ce concept est aussi important et, aux États-Unis, un indice de qualité des sols a même été développé spécifiquement pour cette culture par Glover et al. (2000) afin de pouvoir comparer les différentes régies de production. Il est intéressant de noter que selon leurs résultats, le système intégré a obtenu le meilleur indice de qualité du sol, et le conventionnel, le moins élevé, alors que l'indice du système biologique ne différait pas significativement des deux autres systèmes. Toutefois, dans cette étude, les techniques de gestion du couvre-sol des vergers étaient bien différentes de celles qu'on retrouve au Québec. Cette étude illustre néanmoins que la régie de production, que ce soit en système intégré ou biologique, mais plus précisément la gestion du sol et du couvre-sol en verger ont un impact important sur la qualité d'un sol.

1.3. La gestion du sol et du couvre-sol des vergers

La gestion du sol et du couvre-sol des vergers, communément appelée *orchard floor management* ou encore *orchard groundcover management system (GMS)* en anglais, peut se définir comme l'ensemble des opérations ayant un impact sur les composantes du sol et du couvre-sol d'un verger. Dans une revue de littérature sur la gestion du sol des vergers biologiques, Granatstein et Sanchez (2009) ont défini les fonctions du sol et du couvre-sol des vergers comme étant : un support physique à la croissance des arbres et aux passages de machinerie, un réservoir et site de transfert d'eau, d'éléments minéraux nutritifs, de gaz et de chaleur, ainsi qu'un habitat pour les organismes du sol. De plus, de façon générale le sol d'un verger se divise en deux parties soit :

- 1- **L'entre-rang ou l'allée**: généralement une allée engazonnée (couvert végétal permanent) de 1 à 4 m de largeur (dépendant la densité de plantation), tondue fréquemment durant la saison et utilisée pour le passage des machineries ou des travailleurs.
- 2- **Le rang d'arbres** : une bande de 1 à 2 m de largeur dans laquelle les arbres sont plantés au centre et où la croissance de la végétation est contrôlée.

Photo 1. Verger avec système de rang d'arbres traités à l'herbicide



(Photo: Intermountain Tree Fruit Production Guide, Utah State University)

Dans les vergers conventionnels d'Amérique du Nord, depuis l'arrivée des herbicides à large spectre vers les années 1950, la technique la plus utilisée de gestion du sol se compose d'une bande de gazon tondu fréquemment dans l'entre-rang et d'une bande traitée aux herbicides dans le rang d'arbres (*herbicide strip*) afin d'empêcher la croissance des mauvaises herbes (Hogue and Neilsen, 1987). Coïncidant avec le développement des porte-greffes nains et l'augmentation de la densité de plantation des vergers (haute-densité), l'utilisation de ces herbicides de synthèse permet, entre autres, de limiter la compétition pour l'eau et les nutriments entre le couvert végétal et les pommiers tout en améliorant les rendements des premières récoltes (Granatstein and Sánchez, 2009; Hammermeister, 2016; Hogue and Neilsen, 1987; Merwin and Stiles, 1994). Toutefois, les herbicides de synthèse ne sont pas acceptés en régie biologique et leur utilisation en général dans les systèmes agricoles s'inscrit difficilement dans une démarche durable et plus écologique.

Malheureusement, la gestion durable du sol et du couvre-sol des vergers reçoit relativement peu d'attention en comparaison, par exemple, aux efforts mis dans la recherche d'alternatives écologiques aux pesticides. En effet, cet aspect est souvent négligé ou peu considéré dans les systèmes pomicoles et plusieurs revues de littérature ont déjà souligné son importance malgré le manque d'études scientifiques dans ce domaine (Carranca et al., 2018; Granatstein and Sánchez, 2009; Kalcsits et al., 2020). Le sol et le couvre-sol représentent pourtant une partie substantielle de l'agroécosystème d'un verger et plusieurs alternatives plus respectueuses de l'environnement existent. Une gestion améliorée du sol et du couvre-sol d'un verger peut aussi apporter plusieurs avantages tels une meilleure recirculation des éléments nutritifs, une restauration de la qualité du sol en général, une meilleure rétention de l'eau, un contrôle des mauvaises herbes et même de certains ravageurs ainsi qu'une résilience accrue aux épisodes climatiques extrêmes comme les fortes pluies ou les sécheresses (Granatstein and Sánchez, 2009; Kalcsits et al., 2020).

Il existe plusieurs techniques de gestion du couvre-sol en verger outre le système de bandes traitées à l'herbicide. Ces techniques ont toutes pour but de contrôler la croissance de la végétation compétitive dans le rang d'arbres. En effet, bien que certaines études se soient penchées sur les différents couvre-sol possibles dans l'entre-rang (Granatstein et al., 2013; Neilsen and Hogue, 2000), la plupart des effets sur les pommiers se font ressentir lorsqu'on modifie ou enrichit directement le rang d'arbres, soit dans un rayon de 0,5 à 1 m du tronc des arbres. Ce phénomène est directement lié au relativement faible système racinaire des arbres fruitiers cultivés. En effet, ceux-ci détiennent, entre autres, une densité de racines peu élevée en surface du sol soit d'environ 2 cm/cm³ contre plus de 100 cm/cm³ pour les espèces herbacées retrouvées dans les vergers (Kalcsits et al., 2020).

Ainsi, bien qu'il existe une panoplie de remplacements aux herbicides de synthèse, comme les herbicides biologiques ou le désherbage thermique par flamme ou encore par vapeur d'eau (Hammermeister, 2016), les techniques qui seront décrites ci-dessous sont celles les plus répandues ou ayant aussi un potentiel d'amélioration de la qualité du sol.

1.3.1. Le couvert végétal permanent et les cultures de couverture

Il y a quelques années, avant l'utilisation des herbicides, le couvert végétal permanent était le système de gestion du sol du verger le plus utilisé (Hogue and Neilsen, 1987). Beaucoup de vergers utilisent toujours cette technique qui consiste tout simplement à laisser la végétation s'implanter dans le rang d'arbres et à la tondre plus ou moins fréquemment afin de contrôler sa croissance. La version la plus simple de cette technique présente un verger entièrement engazonné, où on ne peut pas vraiment distinguer l'entre-rang du rang d'arbres. Souvent présent dans les vergers avec des pommiers standards (de grande taille) ou semi-nains, ce type de gestion du sol est l'image bucolique qu'on se fait d'un verger de pommiers.

Photo 2. Verger avec système de couverture végétale permanente



(Photo : L. Boyer)

Cette gestion du couvre-sol présente l'avantage d'être très peu coûteuse et de demander relativement peu d'entretien (Granatstein and Sánchez, 2009). De plus, elle contribue indéniablement à la qualité du sol en conservant un couvert végétal, ce qui contribue notamment à la structure du sol, au développement de la matière organique, à la

recirculation des éléments nutritifs et à la biodiversité tout en contrôlant l'érosion du sol, les pertes d'azote et d'autres minéraux, ainsi que certains ravageurs (Carranca et al., 2018; Chen et al., 2020; Hammermeister, 2016; Sofo et al., 2020). Dans une étude récente, des chercheurs de la Colombie-Britannique (Canada) ont déterminé que le sol des entre-rangs engazonnés des vergers permettait de stocker une quantité de carbone d'environ 75 Mg par hectare (Midwood et al., 2020). Cependant, le problème le plus important de cette technique de gestion du sol est la compétition pour l'eau et les minéraux entre les arbres et le couvre-sol qui impacte négativement la croissance des arbres et leur rendement les premières années (Atucha et al., 2011; Granatstein and Sánchez, 2009; TerAvest et al., 2011). Cet effet négatif sur les rendements et la croissance des pommiers a toutefois tendance à se dissiper avec les années, pour devenir négligeable après environ 6 ans selon une étude réalisée sur 16 ans dans l'État de New York aux États-Unis (Atucha et al., 2011). Ce phénomène est probablement le résultat de l'adaptation des racines des pommiers à la compétition du gazon. De ce fait, Yao et al. (2009) ont démontré que les pommiers ayant poussé dans un couvert de gazon avaient plus de racines profondes et celles-ci avaient un meilleur taux de survie que celles des arbres ayant reçu un traitement d'herbicide. Malheureusement, peu d'études ont été effectuées sur des périodes assez longues pour pouvoir confirmer cette tendance. De plus, les nouveaux porte-greffes nanissants utilisés en haute densité sont moins compétitifs que les porte-greffes standards et semi-nains utilisés traditionnellement.

Une variation de cette technique de gestion du couvre-sol est l'implantation de cultures de couverture spécifiques dans l'entre-rang et dans le rang d'arbres. Ne datant pas d'hier, l'implantation de cultures de couverture bénéficie des mêmes avantages pour le sol qu'une couverture de gazon tout en ayant pour but soit l'enrichissement en azote par la sélection de légumineuses (Granatstein et al., 2017; Mullinix and Granatstein, 2011), soit la sélection de plantes pouvant offrir un contrôle biologique de certains ravageurs (Fernández et al., 2008). Toutefois, cette technique, bien que très intéressante, présente son lot de défis. En effet, en plus d'être souvent difficiles à établir et maintenir dans le temps ainsi que de diminuer les rendements les premières années, les cultures de couvertures spécifiques peuvent résulter en un apport en azote trop important à un moment non désiré. Ce phénomène est surtout observé lorsqu'un couvert végétal de légumineuses est tondu à un moment où un apport en azote n'est pas optimal pour les pommiers. Par exemple, un apport en azote tard en saison peut nuire à l'aoûtement des arbres (Carranca et al., 2018). Une tonte fréquente, avec une tondeuse adaptée, durant la saison et l'incorporation d'une proportion de graminées peut cependant permettre de mitiger cet effet tout en comblant une partie significative des besoins en azote des pommiers (Carranca et al., 2018; Granatstein and Sánchez, 2009; Sánchez et al., 2007). Une méta-analyse réalisée par Chen et al. (2020) a d'ailleurs conclu que les cultures de couverture dans les vergers

permettaient d'augmenter significativement les ratios carbone/phosphore (C/P) et azote/phosphore (N/P) des sols. Ces résultats démontrent qu'il y avait un phénomène de séquestration du phosphore par les couvre-sol durant les premières années. Toutefois, cet effet disparaissait après 4 ans, probablement en raison de l'augmentation de la décomposition de la litière (résidus végétaux morts). Les auteurs ont aussi observé que les cultures de couverture n'avaient pas d'effet significatif sur le ratio C/N (carbone/azote) du sol, ce qui indiquerait que dans le sol d'un verger avec un couvert végétal permanent, la concentration en azote est proportionnelle à l'augmentation de carbone résultant de la décomposition des herbes. En bref, les cultures de couverture permettent d'augmenter à la fois l'azote et le carbone du sol, mais diminuent le phosphore durant les premières années. Dans cette même étude, les auteurs démontrent aussi que le pH du sol, les précipitations et l'âge des arbres sont des facteurs influençant ces ratios d'éléments nutritifs et ils soulignent l'importance de sélectionner les espèces végétales en fonction de ces conditions.

Photo 3. Tondeuse adaptée pour tondre la végétation entre les pommiers



(Photo: T. Bradshaw, www.growingproduce.com)

Une variante de l'implantation de cultures de couverture dans le rang d'arbres est la technique « tondu-et-soufflé » ou *mow-and-blow* en anglais. Cette méthode consiste à cultiver une culture de couverture dans l'entre-rang et d'utiliser une tondeuse spéciale permettant de souffler les rognures directement dans le rang d'arbre. Le chercheur américain David Granatstein dans l'État de Washington a mené plusieurs études sur cette technique qui allie les cultures de couverture et le paillage (application d'un paillis de gazon

tondu). Ainsi, dans un article paru en 2017, avec l'aide de deux autres chercheurs, ils ont déterminé qu'il était possible de semer directement et d'établir avec succès 4 espèces de légumineuses soit un type de luzerne, du lotier corniculé, du trèfle blanc et du trèfle Kura dans l'entre-rang d'un verger. Toutefois, une bande de l'entre-rang avait été traitée à l'herbicide pour supprimer la végétation existante avant d'être semée avec les différentes cultures de couverture au printemps. Cette opération a permis de ne pas travailler le sol et de recréer un système de semis-direct comme on le voit dans les grandes cultures. Selon leurs résultats, le trèfle blanc et la luzerne ont offert la meilleure couverture les deux premières années et pourraient être intéressants en mélange. Cependant, après la 3^e saison, les 4 espèces couvraient la même superficie de l'entre-rang. Les chercheurs ont aussi mesuré la quantité d'azote apportée par les résidus de tonte des légumineuses dans le rang d'arbres. La deuxième année, la luzerne a apporté le plus d'azote avec 43 kg/ha, ce qui est suffisant pour combler les besoins en azote d'un verger mature (Yelle, 2020). De plus, dans cette étude, seulement environ 1/3 de l'entre-rang avait été planté; l'apport en azote pourrait donc être beaucoup plus important si l'allée complète était couverte de luzerne. Selon une courte analyse économique, les auteurs évaluaient, en 2010, à environ 207 \$/ha l'implantation d'une culture de couverture de légumineuses sur un entre-rang de 1,3 m (incluant tous les coûts reliés, du traitement de glyphosate au semis) (Granatstein et al., 2017).

Photo 4. Tondeuse permettant de souffler les résidus dans le rang d'arbres



(Photo : D. Granatstein, USDA)

Finalement, il est important de mentionner qu'un des principaux obstacles au succès de l'adoption de cultures de couverture est la problématique des populations de petits

rongeurs, principalement des campagnols des champs, une espèce bien présente dans les vergers québécois (Cormier et al., 2020). Ces mammifères semblent affectionner particulièrement les environnements créés par cette technique de gestion du couvre-sol dans les vergers et peuvent causer des dommages considérables à la base des troncs des jeunes pommiers surtout durant les hivers avec une accumulation de neige abondante (Merwin et al., 1999; Wiman et al., 2009). Dans une expérience réalisée dans l'État de Washington, Wiman et al. (2009) ont démontré que les couverts de légumineuses dans le rang d'arbres attiraient plus de campagnols que des couverts herbacés. Dans une autre étude similaire réalisée en Colombie-Britannique, les dommages de campagnols dans les parcelles avec cultures de couverture ont résulté en un taux de mortalité chez de jeunes pommiers supérieur à 60% lors du premier hiver et du troisième été de l'étude alors que la parcelle contrôlée traitée à l'herbicide n'affichait pas de dommages. Les solutions à ce problème sont l'utilisation d'un grillage métallique de 50 cm de haut enroulé autour de la base des troncs et enfoncé d'au moins 5 cm dans le sol, de répulsifs dont on badigeonne les troncs ou encore de rodenticides (Cormier et al., 2020). Toutefois, ces 2 dernières techniques ne sont pas acceptées en régie biologique et doivent souvent être combinées à une tonte continue du verger et/ou du trappage massif à la fin de l'automne et/ou une conservation des zones d'habitat des prédateurs des campagnols (ex : renards et oiseaux de proie) (Merwin et al., 1999).

Ainsi, l'adoption des cultures de couverture peut s'avérer bénéfique pour la qualité du sol d'un verger et contribuer à l'augmentation en général de la biodiversité et de la durabilité d'un agroécosystème. Toutefois, la réussite de cette technique de gestion du sol d'un verger est dépendante de tant de facteurs inhérents à l'espèce végétale et au site choisi, qu'il peut être difficile de comparer les résultats des études réalisées. Ainsi, dans ce rapport, bien que représentant une part importante de la littérature scientifique disponible sur la gestion du sol et du couvre-sol des vergers, les cultures de couverture ne seront pas davantage discutées.

1.3.2. Les paillis

Une autre technique de gestion des sols mentionnée brièvement ci-dessus avec les couvre-sol «tondus-et-soufflés» est le paillage. Le paillage consiste à étendre un paillis sur le dessus du sol. Le paillis, ou *mulch* en anglais est un terme générique désignant à peu près n'importe quel matériau qu'on pose sur le sol pour en faire une couche plus ou moins épaisse. Autrefois désignant la paille étendue sur le sol des fraisières pour protéger les fruits, on en retrouve maintenant fait de papier déchiqueté, de copeaux de bois ou encore de pellicule de plastique noir.

Dans les vergers, cette méthode de gestion du sol consiste à recouvrir le rang d'arbres d'une couche de matériaux permettant de contrôler la croissance des mauvaises herbes, mais aussi d'améliorer la qualité du sol. Les effets bénéfiques pour le sol sont observés principalement si le paillis choisi est composé de matériaux d'origine organique comme de la paille, des copeaux de bois, du papier ou encore du compost et constituent ainsi une forme d'amendement organique en soi. De plus, l'utilisation de paillis organiques en verger permet généralement d'augmenter la croissance des arbres fruitiers et parfois leurs rendements tout en stimulant la biologie du sol (Granatstein and Sánchez, 2009; Hogue and Neilsen, 1987; Sofo et al., 2020). Cependant, le paillage peut s'avérer relativement coûteux, surtout lorsqu'il faut acheter et transporter les matériaux nécessaires, et des problématiques de rongeurs ont aussi été observées dans certains vergers utilisant cette technique (Granatstein and Sánchez, 2009; Hammermeister, 2016). Malgré tout, cette technique de gestion du sol des vergers présente indéniablement une capacité prometteuse d'amélioration de la qualité du sol tout en conservant de bons rendements. C'est donc celle qui a été sélectionnée pour être analysée en profondeur dans ce rapport.

Photo 5. Paillis de copeaux de bois dans un verger



(Photo: G. Peck, Cornell CALS)

1.3.3. Le travail superficiel du sol et la méthode du Système-Sandwich-Suisse

Une dernière technique de gestion du sol et du couvre-sol valant la peine d'être mentionnée est le travail superficiel de sol. En effet, comme il se faisait avant l'arrivée des herbicides, dans les vergers biologiques américains, principalement de l'État de Washington, le rang d'arbre est souvent rotoculté mécaniquement afin de contrôler les mauvaises herbes (Glover et al., 2000; Granatstein and Sánchez, 2009; Hammermeister, 2016; Hogue and Neilsen, 1987). Différentes machineries, principalement des rotoculteurs, ont été développées spécialement pour les vergers durant les dernières années afin de pouvoir opérer entre les arbres des rangs. Parmi celles-ci, le *Wonder Weeder* est probablement une des plus connues. Bien qu'étant assez efficace et relativement peu coûteux, le travail de sol perturbe celui-ci notamment en détruisant sa structure, en y réduisant la matière organique et en perturbant la micro et macrofaune du

sol sans compter qu'il laisse sa surface à nu ce qui augmente sa température et réduit sa teneur en eau (Liu et al., 2013; Mia et al., 2020; Miñarro et al., 2009; Sofo et al., 2020). Cette gestion du sol des vergers peut être considérée comme l'homologue biologique des bandes herbicides en conventionnel en termes d'efficacité et de rentabilité économique. De ce fait, elle est souvent utilisée comme traitement témoin dans les études comparant différentes techniques dans les vergers en régie biologique et c'est pourquoi elle est mentionnée brièvement dans cette section.

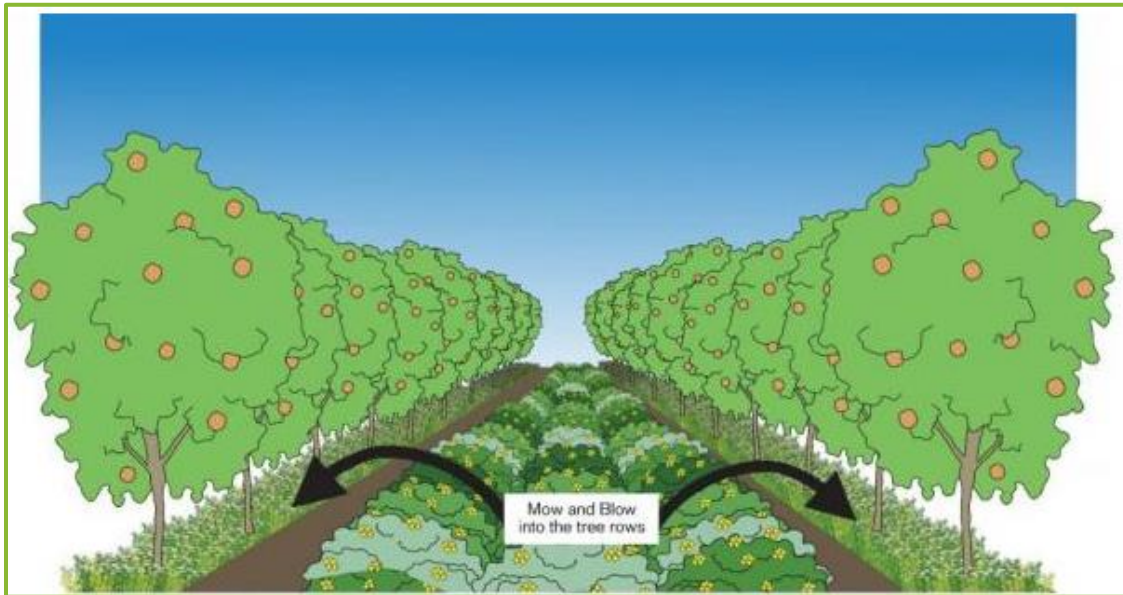
Photo 6. Wonder Weeder dés herbant un rang de verger.



(Photo: www.wonderweeder.com)

Au cours des dernières années, un système alliant le travail de sol et les cultures de couverture a été développé en Suisse, le Système-Sandwich-Suisse (SSS). Se voulant un compromis entre les deux techniques, cette gestion du sol consiste à laisser une culture de couverture pousser, sans la tondre, dans l'entre-rang, mais de travailler une bande étroite de sol de chaque côté des arbres afin de créer une zone sans compétition pour les racines des pommiers. Des essais dans l'État du Michigan, ont démontré que ce système, combiné à un porte-greffe adapté, était un système applicable en régie biologique permettant d'obtenir des rendements satisfaisants à moindres coûts (Stefanelli et al., 2009). Toutefois, bien que moins néfaste pour le sol que le travail mécanique du sol seul, cette technique perturbe tout de même la structure du sol et est relativement peu documentée en Amérique du Nord. De plus, tout comme le travail de sol, cette gestion du sol des vergers est aussi peu applicable au Québec en raison de l'importante pierrosité des sols de la province. Ainsi, elle ne sera pas détaillée davantage dans ce rapport.

Figure 1. Régie de gestion du sol de verger complexe alliant le Système-Sandwich-Suisse et des cultures de couverture dans l'entre-rang tondues-et-soufflées pour en faire un paillis dans le rang d'arbres.



Source : Lexi Koyle, Utah State University

Tableau 1. Principaux avantages et inconvénients de trois gestions du sol des vergers

	Avantages	Inconvénients
Cultures de couverture	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Protège contre l'érosion des sols ✓ Risques minimes de lessivage des engrais ✓ Possible apport en nutriments (légumineuses, azote) 	<ul style="list-style-type: none"> × Compétition avec les pommiers pour l'eau et les nutriments × Besoin machinerie spécialisée × Dommages de rongeurs
Paillis	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Contrôle les mauvaises herbes ✓ Possible apport en nutriments ✓ Améliore la qualité du sol ✓ Réduit les besoins en irrigation 	<ul style="list-style-type: none"> × Possibilité d'immobilisation des nutriments × Dispendieux \$ × Dommages de rongeurs
Travail de sol	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Contrôle des mauvaises herbes ✓ Élimine la compétition avec les pommiers ✓ Économique \$ 	<ul style="list-style-type: none"> × Sol à nu × Destruction de la structure du sol × Perte de matière organique × Besoin machinerie spécialisée

1.4. Les sols des vergers québécois

La gestion du sol et du couvre-sol est d'autant plus importante qu'au Québec, comme ailleurs dans le monde, les terres agricoles utilisées pour la culture d'arbres fruitiers sont souvent relativement pauvres et rocailleuses. En effet, les arbres fruitiers s'accommodent bien de ces sols en comparaison aux grandes cultures ou aux cultures maraîchères par exemple. Dans la province, les pommiers sont cultivés dans plusieurs régions, mais la principale région productrice est la Montérégie avec 56 % des superficies en vergers (Institut de la statistique du Québec, 2018). Les sols des vergers de cette région sont assez variés. Cependant une importante partie d'entre eux présentent comme caractéristique commune d'être issus d'anciennes moraines glaciaires. Conséquemment, ces sols présentent une topographie variable faite de buttes et de vallées. Ils sont souvent bien drainés et contiennent une proportion importante de graviers, de roches et de pierres. Ces sols graveleux, dont les graviers auraient été en partie triés par la mer de Champlain, présentent une grande uniformité, une bonne porosité et originellement un bon équilibre des éléments nutritifs. Le plus commun de ces sols se nomme le Gravier de terrasse Champlain et on le retrouve dans la région de la municipalité de Franklin et le long des pentes de cinq collines Montérégiennes soit le mont Saint-Hilaire, le mont Rougemont, le mont Saint-Grégoire, le mont Saint-Bruno et le mont Yamaska (Stobbe et McKibbin, 1938).

Bien que ces sols soient en théorie de bons candidats pour la culture des pommiers, il faut souligner que dans un rapport pédologique réalisé sur les sols des vergers du Québec en 1935 et 1936, Stobbe et McKibbin (1938) recommandent l'emploi de paillis pour ces sols pauvres en chaux des collines Montérégiennes et du secteur ouest Franklin afin d'amender ceux-ci en azote et en potassium. Depuis la publication de ce rapport, l'intensification des pratiques culturales en verger avec l'adoption de la haute-densité et des herbicides de synthèse a probablement contribué à dégrader la qualité de ces sols. Cette hypothèse est d'autant plus plausible que cet aspect est souvent tenu pour acquis ou négligé dans les vergers.

1.5. Objectifs

Le but de ce rapport est donc d'évaluer l'utilisation de paillis organiques comme gestion durable et profitable du sol et du couvre-sol dans les vergers québécois.

Plus précisément, les objectifs de cette revue de littérature sont :

- 1- Recenser la littérature scientifique publiée sur l'utilisation des paillis organiques dans les vergers de pommier en Amérique du Nord

- 2- Évaluer les impacts de paillis sur la qualité du sol des vergers, les rendements et la croissance des pommiers
- 3- Analyser la faisabilité et les conditions optimales d'utilisation des paillis en vergers de pommier pour le Québec
- 4- Élaborer un document de transfert accessible aux agronomes et aux producteurs

2. MÉTHODOLOGIE

2.1. Acquisition et présentation des données

Afin d'atteindre ces objectifs, une revue extensive de la littérature scientifique a été effectuée à l'aide des bases de données *Web of Science* et *Google Scholar*. Cette recherche préliminaire a permis de répertorier une centaine d'études portant sur les techniques d'amélioration du sol et du couvre-sol des vergers. Les articles ont, par la suite, été choisis en fonction de leur robustesse et de leur pertinence et des cinq critères de sélection suivants :

- 1- Les articles ont été publiés dans des journaux scientifiques.
- 2- Les expériences ont été réalisées en Amérique du Nord.
- 3- Les arbres fruitiers à l'étude étaient des pommiers.
- 4- Les expériences étudiaient soit l'effet des paillis organiques sur les propriétés du sol ou les paramètres de rendement et de croissance.
- 5- Les dispositifs expérimentaux des expériences devaient contenir un témoin de bande herbicide, de travail de sol ou de gazon tondu (espèces graminées retrouvées fréquemment en verger) et au minimum 3 répétitions de chaque traitement.

Après ce tri, les résultats des 30 articles restants ont été analysés et synthétisés dans les sections Résultats et Discussion de ce rapport. En parallèle, ils ont aussi été intégrés dans un tableau (Tableau A1 en annexe) résumant la méthodologie des expériences et l'effet de chaque paillis étudié sur les paramètres de rendement et de croissance des pommiers et sur les propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol.

De plus, une attention particulière a été accordée dans la section Discussion aux implications des résultats des études sur la régie de culture et les aspects plus techniques de production. Ceci a pour but de faire le pont entre les conclusions des expériences scientifiques et leur application dans un contexte de production commerciale au Québec.

2.2. Variables à considérer

2.2.1. Type de sol

Tout travail aspirant à comparer plusieurs expériences scientifiques en agronomie dont les emplacements géographiques diffèrent doit accorder une attention particulière aux différences des types de sol. En effet, bien que possédant généralement une texture grossière (loam sablonneux ou graveleux), les sols sur lesquels les vergers sont cultivés en Amérique du Nord présentent une certaine variabilité. Par exemple, des expériences réalisées dans un verger expérimental de l'État de New York prenaient place sur un sol à texture fine (argile loameuse). La texture d'un sol, dépendante de sa géologie régionale, est probablement sa caractéristique la plus déterminante, car elle aura un impact direct sur ses propriétés chimiques, physiques et biologiques. De ce fait, ce facteur devra être pris en compte lors de l'analyse des impacts des paillis organiques sur la qualité du sol.

2.2.2. Emplacement géographique et climat

Plusieurs études présentées dans ce rapport ont été réalisées dans l'État de Washington (É.-U) et dans la vallée de l'Okanagan (C.-B., Canada). Ces deux régions produisent en effet la majorité des pommes dans leur pays respectif et sont des pionniers de la pomiculture biologique (Gouvernement du Canada, 2020; USDA, 2020). Il faut dire que le climat semi-aride de ces régions favorise la culture d'arbres fruitiers biologiques, car la pression des maladies, comme la tavelure, y est basse. En comparaison, au Québec et dans l'État de New York (2^e régions productrices de pommes dans leur pays) où le climat est tempéré et les précipitations bien plus abondantes, les dommages causés par les agents pathogènes (tavelure) représentent un véritable casse-tête pour les pomiculteurs biologiques.

Le sol et les processus qu'il abrite étant intimement liés non seulement à l'emplacement géographique et à son type, mais aussi au climat, il est important de garder en tête ces différences lors de la lecture des résultats des expériences réalisées en Amérique du Nord. Ainsi, bien qu'il soit tentant d'accorder une plus grande attention aux études canadiennes, celles conduites dans l'État de New York sont probablement plus représentatives des conditions climatiques et des processus édaphiques des vergers québécois que celles effectuées dans la vallée de l'Okanagan.

2.2.3. Durée des études

La durée des expériences est aussi un facteur primordial dans l'analyse des vergers d'arbres fruitiers et de tous systèmes arboricoles d'ailleurs. En effet, les pommiers prennent entre 3 et 5 ans avant d'atteindre une production fruitière maximale et ils sont

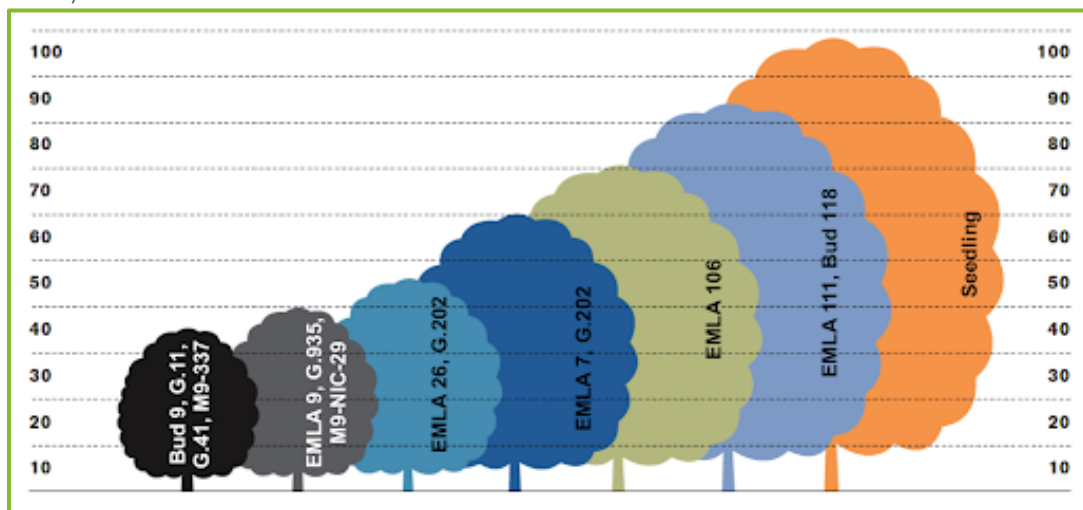
généralement mis en place dans le même sol pour les 15 à 40 années suivantes dépendant des arbres et du contexte agricole. De plus, le même est vrai pour l'analyse d'effets sur les propriétés du sol, car celles-ci prennent du temps à se modifier. Ainsi, afin de vérifier l'effet d'un paillis sur la qualité du sol d'un verger et sur les rendements des pommiers, plus l'étude est effectuée sur une longue période, plus celle-ci révèle des observations pertinentes et représentatives du contexte pomicole commercial.

La majorité des études retenues pour analyse débutaient avec la plantation de jeunes pommiers, ainsi les durées des études indiquées dans le tableau A1 en annexe représentent l'âge des pommiers à la dernière année d'observations.

2.2.4. Porte-greffes et cultivars

Bien que les études sélectionnées portent uniquement sur des vergers de pommiers, ceux-ci diffèrent entre eux par leur cultivar et surtout par leur porte-greffe. Le porte-greffe du pommier étant responsable de la partie racinaire de l'arbre, il dépend et influence la gestion du sol des vergers. En effet, un porte-greffe nanissant comme le M9, produira un système racinaire bien moins important qu'un porte-greffe standard comme le MM11 et sera donc plus sensible à la qualité du sol, aux ravageurs, aux variations de température et d'humidité ou à la compétition avec les mauvaises herbes. Ainsi, il est important de considérer ce facteur lors de la comparaison des conclusions des expériences. D'ailleurs, la plupart des études sont réalisées sur des pommiers nains plantés en haute-densité, de façon à refléter les vergers commerciaux les plus productifs.

Figure 2. Différents porte-greffes pour pommiers en fonction de leur taille (EMLA sont les versions sans virus des séries M et MM). Les chiffres sur les côtés de la figure représentent le pourcentage de grandeur atteint par rapport à un pommier sans porte-greffe (seedling = 100%).



Source : Washington State University

2.2.5. Types de paillis et leur méthode d'application

Les types de paillis organiques varient d'une étude à l'autre en fonction de la disponibilité locale des matériaux et des dispositifs expérimentaux. Cependant, on retrouve principalement des paillis de papier, de copeaux de bois, de paille et de compost. Bien que tous organiques, ces matériaux présentent des propriétés assez différentes. Le tableau 2 présente, à titre indicatif, ces propriétés générales et a été élaboré en fonction des données des différents articles étudiés. Cependant, seule une analyse en laboratoire du paillis utilisé permet de déterminer ses propriétés exactes, car celles-ci peuvent être très variables d'une source à l'autre.

Tableau 2. Principales caractéristiques chimiques de paillis organiques utilisés en verger

Types de paillis	C/N	N (g/kg)	P (g/kg)	K (g/kg)	Ca (g/kg)	Mg (g/kg)
Paille de foin	15,8	11-22	1-3	15	3,1	1,2
Paille de luzerne	-	25,5	2,5	22,0	8,0	2,0
Compost	13,5	13,5	2	5	-	-
Papier déchiqueté	205	2-2,4	0-0,03	0-0,2	57,0	1,0
Copeaux de bois	39,2	7	1	3	-	-

Sources : Jones et al., 2017, Walsh et al., 1996a et Neilsen et al., 2003b

De façon générale, la méthode d'application des paillis dans les expériences présentées est similaire. Les matériaux sont habituellement épandus dans le rang d'arbres sur une largeur de 1,5 à 2 m, pour former une couche d'environ 10 cm d'épaisseur. Les paillis doivent par ailleurs être réappliqués fréquemment, à chaque 1 à 3 ans, car ils finissent tous par se décomposer plus ou moins rapidement dépendamment du matériau utilisé et de leur rapport C/N entre autres. Ainsi, un paillis de compost aura du mal à persister plus d'une année, alors qu'un paillis de copeaux de bois, peut durer plusieurs années. Dans les études présentées, une attention devra donc aussi accordée aux taux et aux méthodes d'application des différents paillis.

3. RÉSULTATS

Cette section fait état des résultats obtenus par les 30 différents articles scientifiques analysés dans cette revue. De nature peu littéraire, elle s'apprécie mieux en ayant les tableaux de l'annexe sous les yeux.

3.1. Effets des paillis sur le rendement et la croissance des pommiers

Une mesure de rendement et de croissance est un paramètre essentiel dans une étude agronomique. La majorité des expériences répertoriées dans ce travail présente ces données sous forme de poids en pommes par une superficie ou par arbre (ex : kg/ha). D'autres facteurs sont parfois pris en compte comme la grosseur ou la couleur des fruits afin de juger de la qualité des rendements. Ces paramètres seront discutés si jugés pertinents, mais ne sont pas inclus dans les tableaux A2, A3, A4 et A5 présentés en annexe.

De son côté, la croissance végétative des pommiers est principalement mesurée en fonction du diamètre des troncs, 20 à 30 cm au-dessus du point de greffe, par une donnée appelée la section transversale du tronc (*trunk cross-sectional area*, *TCA* ou *TCSA*). Toutefois, dans certaines études la biomasse totale de l'arbre est pesée. Cette méthode permet, entre autres, d'avoir une mesure complète de différentes sections des pommiers comme la biomasse racinaire et celle aérienne, mais elle implique la destruction des arbres mesurés et est donc plus coûteuse et moins utilisée.

Les premières expériences répertoriées dans cette revue de littérature datent des années 90 et ont été effectuées par Merwin and Stiles (1994) de l'Université de Cornell dans l'État de New York. Dans leur verger expérimental de pommiers standards (porte-greffe MM11), ils ont comparé, pendant 6 ans, un traitement de paillis de paille de foin à un traitement contrôle au glyphosate. Leurs résultats démontrent qu'à la 6^e saison de croissance, la croissance des arbres (*TCSA*) dans le paillis était significativement supérieure à celle du témoin (glyphosate). Les rendements en fruit, pour leur part, ont aussi été significativement plus élevés dans la paille à la 2^e saison de production, mais pas à la 3^e ni à la 4^e. Les auteurs ont observé toutefois une mortalité beaucoup plus élevée des pommiers (38%) dans les paillis de paille que dans le contrôle en raison de dommages causés par des campagnols des champs et de maladies de racines (*Phytophthora*). De plus, le paillis de paille était quasi totalement recouvert de mauvaises herbes à la fin de l'étude.

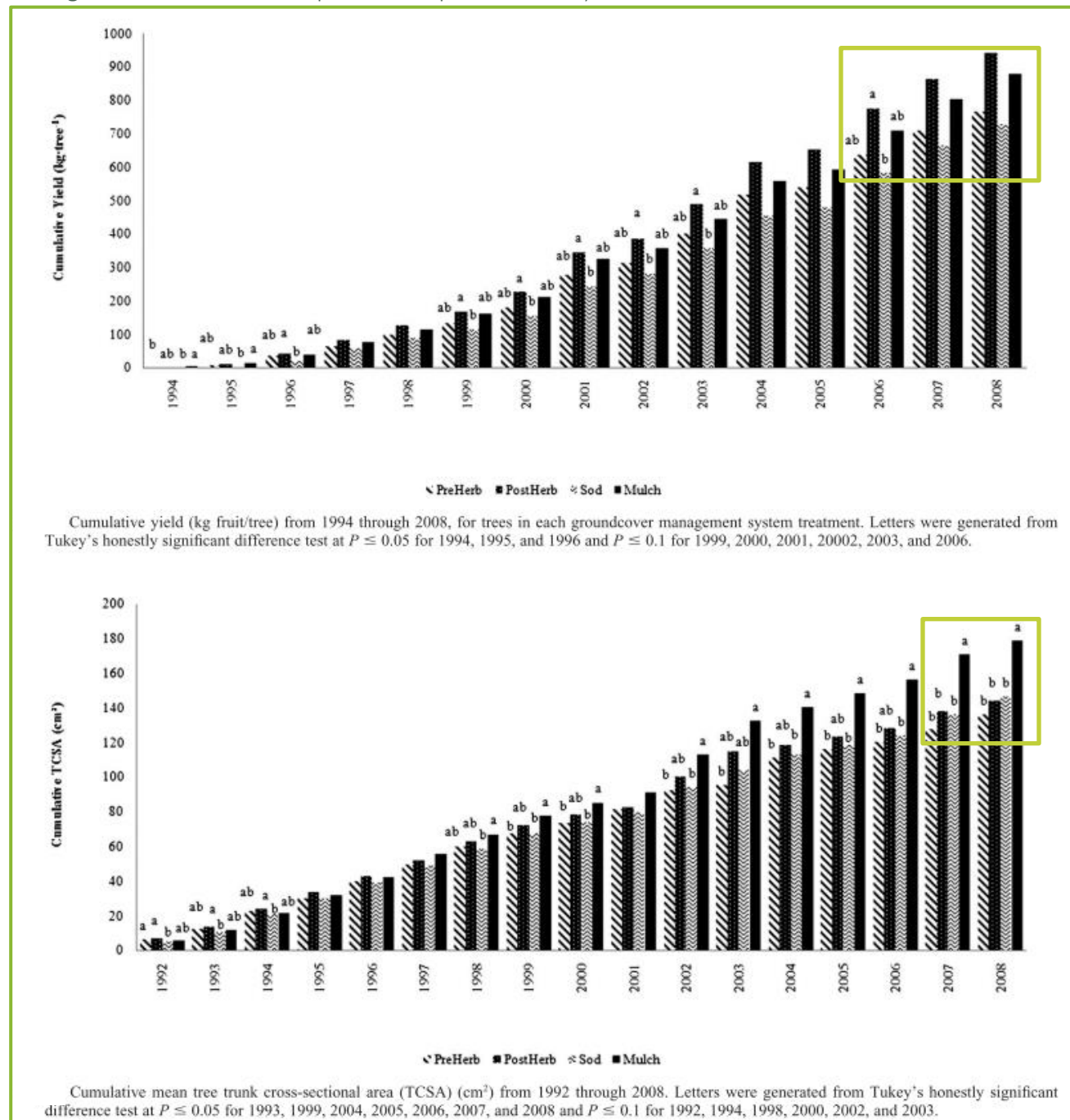
Durant les mêmes années, Walsh et al. (1996b), de l'Université McGill au Québec, ont aussi étudié l'impact des paillis de paille en verger. D'après la recherche bibliographique effectuée, c'est d'ailleurs la seule étude québécoise sur la gestion du sol des vergers ayant été publiée dans un journal scientifique. En plus de la paille, du fumier composté a aussi été testé comme paillis dans le rang d'arbres de deux vergers expérimentaux de pommiers

semi-nains (M26) et nains (M9). Selon leurs observations, au bout de 3 ans, la croissance des arbres avec paillis de paille et de fumier composté ne différait pas significativement de ceux du traitement témoin de travail de sol (rotoculté à une profondeur de 5 à 10 cm).

À peu près au même moment, une étude allant se poursuivre sur plusieurs années se mettait en place, en 1992, dans un verger expérimental de l'Université de Cornell dans l'État de New York (Atucha et al., 2011). Cette expérience comparant les paillis de bois à un traitement de glyphosate (appliqué en post-émergence des mauvaises herbes) et à un couvre-sol de gazon tondu a été menée sur des pommiers Empire semi-nains (M9/MM 111) et a duré 16 ans. C'est la plus longue étude publiée sur la gestion du sol des vergers en Amérique du Nord. Les rendements cumulatifs au bout des 15 années de production ne différaient pas significativement entre les traitements. La croissance (*TCSA*) des pommiers ayant poussé dans le paillis de bois était significativement plus grande que celle du contrôle (glyphosate). Cependant, cet effet n'a été observé qu'à partir de la 14^e année (voir figure 3). Ainsi, excavées à la 10^e année, les biomasses des parties aériennes et racinaires des pommiers des différents traitements étaient similaires statistiquement. De plus, il est intéressant de noter que les rendements en fruits n'étaient jamais statistiquement différents entre le traitement d'herbicide et celui de paillis de bois, et ce pour toutes les années de l'étude. Ce résultat démontre que cette technique de gestion du sol pourrait remplacer sans désavantage la populaire bande d'herbicide. Cependant, cette étude porte sur des pommiers semi-nains plantés en moyenne densité (3 x 6 m) et les résultats pourraient différer pour un verger de pommiers nains en haute-densité.

Un peu plus tard, au début des années 2000, Neilsen et al. (2003a) du centre de recherche d'Agriculture Canada dans la vallée de l'Okanagan (Colombie-Britannique) ont, pour leur part, testé l'effet de 7 ans de paillis de paille de luzerne et de papier déchiqueté sur des pommiers nains (Empire, M9). Les paillis étaient réappliqués annuellement de façon à empêcher la croissance des mauvaises herbes. À la sixième année d'observations, seuls les pommiers ayant poussé dans un paillis de papier affichaient une croissance (*TCSA*) significativement supérieure à celle du témoin traité au glyphosate. Cet effet a aussi été observé toutes les années précédentes pour ce paillis, mais uniquement à la 3^e et 5^e année pour le paillis de paille de luzerne. Cependant, les deux paillis organiques ont résulté en de meilleurs rendements en fruits considérant le cumul de 5 années de fructification. Les pommiers ayant poussé dans paillis de papier ont été les plus productifs avec un rendement cumulatif maximal 80% plus élevé que ceux du témoin de glyphosate. D'autre part, les fruits produits par le traitement de paille de luzerne étaient significativement plus gros que ceux des autres traitements, et ce, de façon constante sur les 3 années pour lesquelles ce paramètre a été mesuré.

Figure 3. Rendements (kg/arbre) et sections transversales des troncs (TCSA, cm²) cumulatifs de pommiers pour différentes techniques de gestion du couvre-sol, tiré de Atucha et al.,2011. (PreHerb : herbicides appliqués en pré-émergence, PostHerb : glyphosate appliqué en post-émergence/témoin, Sod : gazon tondu et Mulch : paillis de copeaux de bois).



Considérant ces résultats encourageants, ces chercheurs ont poursuivi leurs expérimentations sur les paillis de papier dans une autre parcelle de pommiers nains (M9) d'un cultivar différent (Golden Delicious) (Nielsen et al., 2007). Leur étude, d'une durée

respectable de 6 ans, a permis de constater que la croissance des arbres (*TCSA*) était, une fois de plus, significativement plus élevée dans le paillis de papier que dans le témoin (herbicide). Similairement à leur première étude, des rendements en fruits significativement supérieurs par rapport au témoin ont été enregistrés pour les 3 premières années et après 6 saisons cumulatives (16 % plus que le témoin).

Parallèlement, dans l'État de Washington, des études semblables ont été menées par Granatstein and Mullinix (2008) sur des pommiers nains (M26). Dans leur expérience, des paillis de papier déchiqueté, de paille de luzerne et de copeaux de bois ont été comparés à un témoin de sol nu. Leurs résultats démontrent que les paillis de bois et de paille de luzerne ont permis un contrôle adéquat des mauvaises herbes. Le papier se détériorait toutefois à la fin de chaque saison et nécessitait d'être réappliqué chaque printemps. Le paillis de paille de luzerne présentait cependant plus de mauvaises herbes probablement en raison de la quantité de semences qu'il contenait. La croissance des arbres après 4 ans (*TCSA*) a été significativement augmentée par les 3 types de paillis. Le paillis de luzerne est celui ayant eu l'impact le plus important sur la croissance des arbres probablement en raison de sa charge importante en azote (entre 300 et 400 kg/ha). En ce qui concerne les rendements cumulatifs sur les 3 années d'étude, les paillis de bois et de papier ne différaient pas significativement du contrôle, mais celui de paille de luzerne a produit significativement plus de pommes. Toutefois, ce dernier traitement semblait induire un effet d'alternance biennale (production plus importante une année sur deux) plus prononcé. De plus, l'apport important en azote de ce paillis a eu des effets négatifs sur la qualité des fruits et sur l'aoûtement des arbres à l'automne. Dans cette étude, il est par ailleurs important de remarquer que le traitement contrôle est seulement décrit par l'appellation sol nu (*bare ground*) et semble désigner un rang d'arbre recevant originellement des traitements d'herbicide qu'on aurait arrêtés au début de l'expérience. Ainsi, les parcelles contrôles, ne recevant aucune modification, se retrouvent recouvertes à 46, 16 et 61 % de mauvaises herbes les 3 années d'observations, alors que généralement le traitement contrôle ou témoin fait plutôt référence à un rang exempt de mauvaises herbes.

Au cours de la même période, dans l'État du Michigan (É.-U.), Stefanelli et al. (2009) ont, eux aussi, étudié les paillis de pailles de luzerne, mais sur une durée de 6 ans. Ils ont observé que, bien que durant les 3 premières années d'établissement les jeunes pommiers du traitement de paillis de luzerne montraient une croissance significativement supérieure au contrôle thermique (pyrodés herbage), au bout de 6 ans, ni les rendements cumulatifs ni la croissance des arbres (*TCSA*) ne différaient statistiquement entre les traitements.

Plus récemment, une dernière étude a étudié l'effet des paillis de paille de luzerne sur le sol d'un verger de pommiers nains (M9) dans la vallée de l'Okanagan. Dans cette expérience, un paillis de luzerne ainsi qu'un paillis de compost de fumier de bovin laitier ont été comparés à un traitement contrôle sans amendement ni paillis (pas de méthode

de contrôle des mauvaises herbes mentionnée) durant 5 ans (Forge et al., 2013). Les résultats démontrent qu'à chacune des 5 années mesurées, le paillis de luzerne a permis d'augmenter significativement la croissance des pommiers (*TCSA*). De plus, le rendement en fruits cumulatifs des 4 saisons de production et la grosseur moyenne des pommes étaient aussi supérieurs pour ce traitement en comparaison au témoin sans paillis. De son côté, le compost de fumier vaches laitières n'a pas eu d'effet significatif sur les rendements ou la croissance des arbres. Toutefois, une des faiblesses de cette étude est l'absence d'un traitement témoin contrôlant les mauvaises herbes comme un travail de sol ou une application d'herbicide.

Dans une autre expérience réalisée par Granatstein et al. (2010) en régie biologique, les chercheurs ont de nouveau testé les paillis de bois dans un verger de pommiers nains Gala (M26) âgés de 8 ans (Granatstein et al., 2010). Les résultats de cette étude relativement courte (3 ans) démontrent que le paillis de bois a contrôlé adéquatement les mauvaises herbes (couverture de moins de 20%). Ce traitement a aussi augmenté significativement la croissance des arbres (*TCSA*). Bien que la même tendance ait été observée pour les rendements, les différences entre traitements n'étaient pas significatives. Toutefois, les pommes étaient significativement plus grosses dans les parcelles avec paillis de bois que dans le contrôle de travail de sol (rotoculté avec un Wonder Weeder) ainsi que dans les parcelles de gazon tondu.

Toujours dans ce verger expérimental de l'Université de l'État de Washington, une étude semblable a parallèlement débuté dans les mêmes années, mais sur des pommiers semi-nains (M7) fraîchement plantés. Dans cette étude d'une durée de 3 ans, TerAvest et al. (2011) ont comparé un paillis de copeaux de bois à un travail de sol effectué entre 8 et 10 cm de profondeur avec un Wonder Weeder 4 fois par saison. Similairement aux autres études, à la 3^e année, les auteurs ont observé une croissance (*TCSA*) significativement plus importante chez les jeunes pommiers ayant poussé dans les paillis de bois que dans le sol nu, mais pas de différence de rendements en fruits. Dans un autre volet de la même étude, TerAvest et al. (2010) ont excavé les pommiers à la fin de leur 3^e année de croissance et leurs parties aérienne et racinaire ont été pesées, séchées et analysées. Selon leurs résultats, les pommiers ayant reçu le paillis de bois détenaient la plus grande masse sèche totale et le plus haut ratio pousse/racine. Étant donné la croissance importante des arbres dans le paillis de bois, les auteurs soulignent qu'il serait important de jumeler cette technique à une qui permet de réduire leur vigueur comme réduire l'irrigation ou l'apport en azote ou établir des cultures de couverture.

Quelques autres études ont par la suite été réalisées sur les paillis de copeaux de bois. C'est le cas, entre autres, d'une étude récente conduite par Eissenstat et al. (2018) dans la vallée de l'Okanagan. Le but premier de cette expérience était de comparer des parcelles avec et sans paillis de bois (bande herbicide) recevant soit une irrigation complète, soit la moitié de cette irrigation (pour 45 jours à partir du 85^e jour suivant la floraison). Les

résultats indiquaient que les pommiers ayant poussé dans un paillis bois et ayant reçu une irrigation réduite ont donné des rendements similaires à ceux irrigués, alors que les pommiers sans paillis dont l'irrigation avait été réduite, ont produit significativement moins de fruits.

Une étude réalisée aussi dans la vallée de l'Okanagan, par Nielsen et al. (2014), a permis d'évaluer différentes techniques de gestion du sol des vergers pouvant être acceptés en régie biologique. Pendant 5 saisons de croissance, les chercheurs ont ainsi testé, sur des pommiers nains (B9), l'effet d'un paillis de luzerne tondue-et-soufflée 3 fois durant la saison depuis l'entre-rang, d'un paillis de copeaux de bois combiné avec les résidus de tonte de l'entre-rang (composé de 65% de fétuque élevée, 25% de seigle et 10% de luzerne) et d'un paillis de plastique noir. Au bout de la 6^e année, leurs résultats ne montraient pas de différences significatives de rendement et de croissance des arbres (*TCSA*) entre les traitements. Toutefois, les pommiers du traitement de paillis de bois possédaient un diamètre du tronc significativement supérieur à celui des pommiers du traitement de paillis de plastique de la 3^e à la 5^e année de croissance. Bien que cette étude ait eu pour but de comparer différentes méthodes biologiques entre elles, il aurait été intéressant d'avoir comme référence un témoin plus conventionnel comme une bande d'herbicide ou encore un travail de sol.

Finalement, une expérience aux allures récapitulatives a pris place en Arkansas (É.-U.), au début des années 2000, avec pour but de comparer quatre méthodes biologiques de gestion du sol et du couvre-sol dans un verger de pommiers nains (M26). Les quatre traitements étaient tous des paillis ayant déjà été étudiés soit: un paillis de compost, de copeaux de bois, de papier et de paille de gazon (fétuque) tondu-et soufflé (*mow-and-blow*). Les chercheurs considèrent ce dernier traitement comme un témoin informel puisqu'il se rapproche du gazon tondu, toutefois, il semble difficile d'utiliser à titre comparatif une pratique si peu courante comme traitement témoin. Somme toute, Choi et Rom (2011) notent qu'après 2 saisons, la croissance (*TCSA*) la plus importante a été observée dans les traitements de paillis de bois et de compost (significativement plus élevée que les 2 autres traitements). Cet effet s'est d'ailleurs traduit par une mise à fruits à la 3^e année pour ces 2 mêmes traitements, alors que les pommiers avec paillis de papier et de gazon tondu-et-soufflé n'ont pas fructifié cette année-là.

3.2. Effets des paillis sur les propriétés chimiques du sol

Les propriétés chimiques du sol sont probablement les plus faciles à mesurer. En effet, un simple échantillon de sol bien prélevé permet d'obtenir en laboratoire plusieurs caractéristiques telles que les concentrations en éléments nutritifs primaires et secondaires, le pH, la capacité d'échange cationique et le taux de matière organique. Les méthodes d'analyses utilisées pour acquérir ces résultats sont souvent similaires, mais varient d'une région à l'autre en fonction des types de sols et évoluent dans le temps en

fonction des avancées scientifiques. Ainsi, bien qu'il soit tentant d'attribuer aux résultats de ces analyses un statut d'évidence, ceux-ci sont en fait la meilleure estimation possible à la lumière des connaissances actuelles et doivent être utilisés à titre indicatif ou comparatif avec les bons outils et une bonne dose de prudence.

L'azote (N) représente bien la précarité de ces tests, car il existe de multiples façons de mesurer cet élément dans le sol, mais aucune d'entre elle ne fait vraiment l'unanimité auprès de la communauté scientifique. En effet, la majorité des tests effectués dans les études présentées mesure la concentration de nitrate (NO_3^-) d'ammonium (NH_4^+) et d'azote inorganique disponible dans le sol. Cependant, certains vont aussi jusqu'à mesurer la quantité d'azote potentiellement minéralisable, soit l'azote qu'un sol peut libérer durant un certain temps. Bien qu'il soit toujours question d'azote, ce dernier paramètre varie en fonction de la biologie du sol, elle-même fonction d'une panoplie de facteurs (température, humidité, etc.). Il est donc difficile de l'évaluer avec justesse même en plaçant l'échantillon sous des conditions environnementales optimales et constantes. Ces tests sont souvent plus longs et dispendieux, si bien qu'ils sont peu utilisés en comparaison aux tests chimiques, alors qu'ils mesurent une partie importante de ce nutriment du sol (Ros et al., 2011).

Par ailleurs, plusieurs études mettent en relation les concentrations en éléments nutritifs du sol à celles contenues dans les feuilles des pommiers. Les résultats de ces analyses foliaires sont utiles afin de déceler les carences chez les arbres fruitiers. Cependant, par souci de concision, les concentrations foliaires en minéraux ne sont pas présentées dans les tableaux récapitulatifs (voir en annexe), mais seront mentionnées lorsque pertinentes.

Dans leur étude avant-gardiste, Merwin et Stiles (1994) notent que, bien que plus élevée que celle du traitement témoin de glyphosate, la différence de concentration en nitrates (NO_3^-) du sol sous un paillis de paille n'était pas significative. Toutefois, après 5 années, les 20 premiers centimètres de sol sous la paille présentaient un taux de matière organique plus élevé (Merwin et al., 1994) en plus de contenir significativement plus de phosphore (P) et de potassium (K) par rapport au témoin d'herbicide. Pour leur part, les concentrations en magnésium (Mg) et en calcium (Ca), ainsi que le pH du sol n'ont pas été affectées par l'application du paillis de paille de foin. Les chercheurs ont aussi observé que les concentrations foliaires en K étaient généralement les plus élevées pour les arbres dans le paillis de paille, et ce, même lors de récoltes importantes, alors que les pommiers poussant dans le sol traité au glyphosate affichaient des carences (en K) dès le début de la mise à fruit.

Dans leur expérience sur les paillis de paille de foin et de fumier composté, Walsh et al. (1996a) ont aussi échantillonné (en juillet et en septembre des deux dernières années) le sol des traitements pour déterminer l'effet des paillis sur sa teneur en éléments minéraux. Lors de la première année, le paillis compost de fumier a permis d'augmenter

significativement la concentration de $\text{NO}_3\text{-N}$ du sol en surface (0-10 cm), confirmant son utilisation comme source directe de nutriments. Toutefois, l'année suivante le même effet n'a pu être observé, peut-être en raison de lessivage dans le profil de sol en début de saison : le traitement de fumier avait aussi la plus haute concentration en azote dans le sol à une profondeur de 30 cm. De plus, les auteurs ont noté une croissance importante de mauvaises herbes dans ce traitement et confirmé l'absence de teneur résiduelle en minéraux du compost justifiant ainsi son application chaque printemps pour bénéficier de son effet fertilisant. Pour sa part, la concentration en $\text{NO}_3\text{-N}$ du sol sous les paillis de paille se comparait à celle du témoin rotoculté, et atteignait des niveaux satisfaisants. Aussi, les auteurs considèrent que ce traitement permet une meilleure gestion de l'azote dans les vergers, car les concentrations de N en fin de saison (septembre) étaient moins élevées que celles du témoin avec travail de sol superficiel, ce qui diminue le risque de lessivage et coïncide plus adéquatement avec les besoins azotés des arbres fruitiers (trop d'azote en fin de saison nuit à l'aoûtement). Pour ce qui est des autres éléments nutritifs, le paillis de fumier a permis d'augmenter significativement la concentration en P et en K par rapport au témoin cultivé. Alors que cet effet positif était également parfois observé pour le K sous la paille, il était moins constant que pour le fumier. Finalement, les paillis n'ont pas influencé le Ca et le Mg du sol probablement en raison de la courte durée de l'étude et de la fertilité élevée initiale du site.

Dans la vallée de l'Okanagan, Neilsen et al. (2003b) ont, pour leur part, remarqué qu'après 6 ans, la fertilité du sol avait été affectée par les paillis de paille de luzerne et de papier. Plus précisément, le papier a augmenté la teneur du sol en Ca et le pH du sol par rapport au témoin de glyphosate. La paille de luzerne a résulté en une concentration du sol plus élevée en N et en carbone (C) (déterminées par analyse de combustion) et en K. L'augmentation en K du paillis de luzerne est d'ailleurs la seule à s'être traduite par une augmentation constante de la concentration foliaire de cet élément, souvent peu abondant dans les sols à texture grossière. Les paillis n'ont pas eu d'effet sur la capacité d'échange cationique du sol (CEC), mais ont, tous deux, augmenté la conductivité électrique (CE) (reliée, entre autres, à la salinité du sol). Cependant, cette dernière augmentation était loin d'être suffisante pour avoir un impact négatif sur les pommiers.

Toujours dans la même région en Colombie-Britannique, Forge et al. (2013) ont observé qu'en raison de leur charge fertilisante initiale importante, les deux paillis testés (paille de luzerne et compost de fumier) ont eu des effets significatifs sur les propriétés chimiques du sol. En effet, la paille de luzerne et le fumier composté ont significativement augmenté la quantité d'azote ammoniacal ($\text{NH}_4\text{-N}$), de P et de K mesurée dans les sols à la 5^e année de l'expérience. En plus, le compost a aussi augmenté significativement le pH et la quantité extractible de Ca et de Mg. Les deux traitements ont aussi permis d'augmenter semblablement le taux de matière organique et la CE. En analysant les concentrations foliaires de pommiers, les chercheurs y ont aussi remarqué une augmentation plus

importante de l'azote pour le traitement de paillis de luzerne, suggérant qu'il serait possible de réduire la quantité de fertilisants si ce genre de paillis est utilisé.

Peu après, des chercheurs du même centre de recherche ont observé, dans une expérience semblable, qu'à la sixième année après la plantation, le sol contenait un taux de matière organique 3 fois plus élevé sous les copeaux de bois et 1,5 fois sous la paille de luzerne que sous un paillis de plastique noir (Neilsen et al., 2014). Toutefois, la concentration de C du sol était significativement plus élevée seulement dans le traitement de paillis de copeaux de bois à la fin de l'expérience, probablement en raison de leur ratio C/N plus élevé. La quantité de N du sol était aussi supérieure sous les paillis de luzerne et de copeaux de bois que sous celui de plastique à la fin de l'expérience. Après 6 années, le P-extractible du sol était plus élevé sous le paillis de plastique que sous les autres traitements. Toutefois, les paillis organiques (bois et luzerne) ont eu un effet significatif sur l'activité de l'enzyme phosphatase (responsable de minéraliser le phosphore organique dans le sol, le rendant ainsi disponible pour les plantes) puisque la concentration de celle-ci était plus élevée dans ces traitements que sous les paillis de plastique noir. La concentration en K-échangeable dans les 10 premiers cm de sol était aussi plus importante sous les paillis de luzerne et de bois, et ce, à chacune des 3 années d'échantillonnage. La quantité de K suivait cependant une tendance décroissante significative au fil des années, et ce, dans tous les traitements. Néanmoins, les analyses foliaires ont révélé des valeurs adéquates pour tous les traitements, à tous les ans, mais moins de N pour les paillis de bois, possiblement en raison d'une immobilisation partielle.

Parallèlement, dans les mêmes années, des scientifiques de l'Université de Cornell (NY, É.-U.) compilaient les résultats de leur longue étude et observaient qu'après 12 ans, le paillis de bois a permis d'augmenter significativement la concentration de N, de P et de Ca dans le sol ainsi que le pH et la CEC par rapport au témoin d'herbicide. De plus, le taux de matière organique était 80% plus élevé sous ce paillis que dans le contrôle au glyphosate (Yao et al., 2005). Ces mesures ont été également prises 14 ans après de début de l'expérience par St. Laurent et al. (2008). Ces derniers ont remarqué qu'en plus d'augmenter significativement les concentrations de P, de K et de Ca du sol, les paillis de bois ont aussi permis de presque doubler le taux de matière organique du sol par rapport au traitement d'herbicide (9,72% au lieu de 4,94%). Finalement, à la seizième année de l'étude, Atucha et al. (2011) notent que les concentrations totales de N et de C du sol étaient significativement plus élevées sous le traitement du paillis de bois que sous le témoin (glyphosate) de la 8^e à la 16^e année. Au bout de 16 ans, le taux de matière organique était toujours le plus élevé sous les paillis de bois, mais ne différait plus significativement du traitement témoin, comme c'était le cas les 3 années précédentes. Les auteurs observent aussi que plusieurs éléments essentiels (NO_3^- , P, Ca et Mn) sont plus abondants sous le paillis de bois que dans le contrôle, alors que les autres éléments mesurés (K et Mg) sont

similaires entre les traitements. De plus, le pH du sol sous les paillis de bois était significativement supérieur à celui traité à l'herbicide.

Dans l'État de Washington, Granatstein and Mullinix (2008) n'ont, pour leur part, pas pu démontrer, après 3 ans, de différences dans le taux de matière organique entre un traitement de paillis de copeaux de bois, de papier ou de paille de luzerne et un sol nu. Toutefois, le paillis de luzerne a permis d'augmenter significativement la concentration en N foliaire des pommiers par rapport au témoin. L'absence d'effets sur le carbone actif du sol (lié à la matière organique) a aussi été observée pour un paillis de bois en comparaison à un traitement de gazon tondu dans une autre étude par les mêmes chercheurs (Granatstein et al., 2010) et est probablement due à la courte durée des observations.

Toujours dans les vergers expérimentaux de l'État de Washington, TerAvest et al. (2010) se sont intéressés à l'effet d'un paillis de bois sur la distribution de l'azote dans les jeunes pommiers. Selon leurs résultats, les pommiers ayant reçu le paillis de bois ont accumulé plus de N que le traitement témoin de travail de sol. La concentration de N des feuilles était cependant semblable entre les traitements et adéquate. Dans un autre volet de l'étude, les auteurs se sont aussi intéressés à la distribution et à l'apport en N des amendements de compost effectués en avril, mai et juin chaque année. Ils ont observé que l'utilisation de l'azote dérivé du compost était aussi efficace pour les arbres du traitement rotoculté que ceux du paillis de bois. Toutefois, dans les pommiers du traitement de paillis de copeaux de bois, une portion significative de l'azote ne provenait pas des amendements de compost, mais possiblement de leurs réserves de l'année précédente ou de la décomposition des copeaux de bois. Les mêmes chercheurs ont aussi analysé le sol sous les paillis de bois et remarqué qu'à la fin de leur étude, la concentration de C total et lent était supérieure dans le traitement de paillis de bois, mais ne différait pas du traitement témoin pour le N total (évalué comme étant la somme du N inorganique et du N minéralisé).

D'autres chercheurs en Arkansas (É.-U.) ont aussi évalué l'impact de divers paillis organiques sur les propriétés chimiques du sol (Choi et al., 2011). Leurs résultats démontrent, qu'au cours de la 3^e saison de croissance, le taux de matière organique dans les premiers 10 cm de sol et la concentration de NO_3^- du sol à 30 cm de profondeur étaient significativement plus élevés pour le traitement de paillis de compost que pour les 3 autres traitements. De façon générale, en raison de sa grande charge fertilisante initiale, les concentrations en macroéléments du sol étaient les plus élevées dans le traitement de compost, parfois suivies de celui du paillis de bois (pour le K et le Mg). Toutefois, les concentrations les plus élevées en Ca se trouvaient dans le sol sous le papier déchiqueté, probablement à cause du traitement industriel au carbonate de calcium effectué au papier pour empêcher son acidification. Les arbres ayant reçu les paillis de bois et de compost étaient aussi ceux ayant les plus grandes concentrations foliaires en éléments nutritifs. Les auteurs concluent que les paillis de bois représenteraient la meilleure alternative

biologique, car les concentrations foliaires ne différaient pas de celles des pommiers du traitement de compost, mais les concentrations de nitrates dans la solution du sol étaient inférieures; limitant ainsi le risque de lessivage de l'azote dans l'environnement et optimisant l'utilisation du N. De plus, ce traitement permettait aussi un meilleur contrôle de la croissance végétative des arbres. Cependant, les résultats de cette étude sont à prendre avec un grain de sel, car ils sont présentés d'une façon relativement difficile à lire et les traitements sont comparés entre eux ou à un «témoin» de gazon tondu-et-soufflé.

Trois ans plus tard, Mays et al. (2014) ont répété certaines analyses chimiques de cette même expérience. Ils ont observé que le taux de matière organique et la concentration en C total du sol avaient augmenté dans tous les traitements après 6 ans de paillis, mais qu'ils étaient plus élevés sous les copeaux de bois et le compost que sous le papier et le gazon tondu-et-soufflé. La concentration en N total du sol, bien qu'ayant été elle aussi augmentée après 6 ans de paillis pour tous les traitements, n'était significativement supérieure que dans le paillis de compost à la fin de l'étude.

Le sol du même verger a été analysé chimiquement plus récemment par Jones et al. (2017). Les chercheurs ont observé qu'à court terme, les effets des paillis sur les propriétés chimiques du sol étaient aussi généralement les plus marqués dans le paillis de compost, mais qu'à long terme, le traitement de copeaux de bois se démarquait aussi. En effet, le taux de matière organique, la concentration en NO_3^- et la CE du sol après 7 ans, étaient les plus élevés sous le paillis de compost, suivi par le paillis de bois, alors que le paillis de papier ne différait pas de celui de gazon tondu-et-soufflé. Toutefois, tous les traitements, y compris celui du paillis de gazon, ont résulté en une augmentation de la matière organique après 7 ans. À la fin de l'étude, le pH du sol sous le paillis de papier était supérieur à celui des 3 autres paillis (compost, bois et gazon). De plus, la concentration de C organique dissous (DOC) était la plus élevée dans le sol sous le compost, suivi par les copeaux de bois et le papier. Finalement, les auteurs concluent que les paillis de compost et de copeaux de bois ont eu le plus grand impact sur les propriétés du sol et ce, peu importe le type de fertilisant organique amendé, ce qui indique que les paillis permettent une modification des propriétés du sol ne pouvant être répliquée uniquement par une fertilisation organique.

3.3. Effets des paillis sur les propriétés physiques du sol

Les propriétés physiques du sol jouent un rôle tout aussi important que les propriétés chimiques sur la qualité d'un sol. L'amélioration de ces propriétés requiert plusieurs années et parmi celles-ci les plus souvent mesurées sont en lien direct avec la structure du sol comme la masse volumique, la porosité, la stabilité des agrégats, le taux d'infiltration ou l'eau dans le sol comme la conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}), la capacité de rétention d'eau à saturation, l'humidité du sol et sa température.

Ces paramètres mesurés varient souvent d'une étude à l'autre, mais sont généralement reliés. Ainsi, plus un sol est en santé, meilleure est sa structure et plus il aura une masse volumique basse, une grande proportion d'agrégats stables ainsi qu'une porosité et un taux d'infiltration élevés. De plus, un sol de bonne qualité possède généralement une meilleure capacité à retenir l'eau et l'humidité sans pour autant être difficile à drainer. Le drainage n'étant pas une problématique dans les sols à texture grossière sur lesquels se retrouvent fréquemment les vergers de pommiers, une amélioration de la capacité de ces sols à retenir l'eau est souhaitable et permet généralement de diminuer leur vulnérabilité à la sécheresse tout en diminuant leurs besoins en irrigation et leur température.

Un volet complet de l'expérience de Merwin et al. (1994) était dédiée à l'étude des effets des différentes techniques de gestion du sol sur les propriétés physiques. Pour ce faire, les auteurs ont pris plusieurs mesures sur la disponibilité de l'eau dans le sol. De façon générale, en comparaison au témoin d'herbicide, le potentiel matriciel (kPa) du sol était plus bas sous le paillis de paille, et ce, particulièrement lors des événements de sécheresses de début d'été (juin). Ce résultat indique que la paille a permis de conserver plus d'humidité dans le sol et de retarder son dessèchement. Étonnamment, l'infiltration cumulative ainsi que la conductivité hydraulique saturée étaient plus basses dans les parcelles ayant reçu de la paille que dans celle à nu. Toutefois, les auteurs notent que chaque année, de grosses fissures se formaient à la surface des parcelles témoins et ont pu fausser ces résultats. De plus, le paillis a aussi permis de diminuer les températures du sol en début et fin de saison par rapport aux parcelles témoins. Dans leurs conclusions, les auteurs notent que l'effet des différentes techniques de gestion du sol sur les propriétés physiques du sol était moins prononcé qu'anticipé et estiment que cette tendance est probablement due à la grande fertilité initiale du site (haut taux de matière organique et couvert herbacé maintenu depuis plusieurs décennies).

Dans leur étude de 3 ans, Walsh et al. (1996b) remarquent, pour leur part, que bien que les paillis de fumier et de paille n'aient pas modifié significativement la masse volumique ou encore la stabilité des agrégats, probablement en raison de la relativement courte durée de l'étude, la paille a généralement permis d'augmenter la teneur en eau du sol au cours de la saison. Le même effet n'a cependant pas été observé pour le paillis de fumier, sans doute en raison de la croissance soutenue de mauvaises herbes observée. De plus, pour les 2 années mesurées et entre les mois de mai et août, les températures du sol sous les deux paillis étaient plus basses que celles des parcelles dont le sol avait été travaillé (témoin). Ce résultat est favorable à la croissance des arbres et présente un intérêt supplémentaire dans le contexte actuel de réchauffement climatique alors qu'on observe de plus en plus d'étés chauds et secs au Québec.

L'expérience de Neilsen et al. (2003b), réalisée sur les paillis de paille et de papier dans la vallée de l'Okanagan, a démontré qu'après 7 ans, seul le paillis de paille de luzerne a eu un impact sur les propriétés physiques en augmentant significativement le taux d'infiltration

de l'eau du sol en surface. En effet, les tests statistiques n'ont démontré aucune différence significative entre les paillis et le traitement témoin de glyphosate pour la masse volumique, la stabilité des agrégats ou le taux d'infiltration.

À la même période, dans l'État de New York, Oliveira and Merwin (2001) ont observé qu'après 8 ans, un paillis de bois a permis d'améliorer significativement les propriétés physiques du sol par rapport au traitement de glyphosate en diminuant la masse volumique et en augmentant la porosité ainsi que la conductivité hydraulique saturée du sol. L'augmentation du taux d'infiltration saturé observée dans les traitements de paillis de bois n'était cependant pas significative et ne différait pas du témoin, de même que la teneur en eau du sol à capacité au champ. Plus tard, St. Laurent et al. (2008) ont mesuré, dans la même étude, l'humidité du sol, et ils ont dénoté qu'elle était significativement plus élevée dans le sol ayant reçu des copeaux de bois durant 14 ans.

Pour leur part, Granatstein et Mullinix (2008), dans l'État de Washington, ont aussi relevé quelques propriétés physiques du sol de leur verger expérimental après 4 ans d'application de copeaux de bois, de papier et de paille de luzerne. Selon leurs résultats, aucun des paillis n'a permis d'augmenter la masse volumique par rapport au témoin (sol nu). Le paillis de papier a cependant augmenté significativement le taux d'infiltration du sol. Les températures du sol mesurées au printemps étaient significativement plus basses pour tous les paillis, sans avoir d'impact sur la floraison des pommiers. Ces paramètres ont cependant été mesurés durant la 2^e année de l'expérience, ce qui laisse peu de temps pour modifier ces propriétés du sol. Un autre volet de cette expérience a été réalisé dans un autre verger pour tenter de déterminer s'il était possible de diminuer l'irrigation des pommiers avec un paillis de copeaux de bois. Les chercheurs ont observé la première année qu'à la fin de chaque irrigation, le sol sous les copeaux contenait 15 à 20% plus d'eau que le témoin. L'année suivante, ils ont calculé que les parcelles paillées avaient nécessité 20 à 30% moins d'irrigation durant l'été que le témoin d'herbicide.

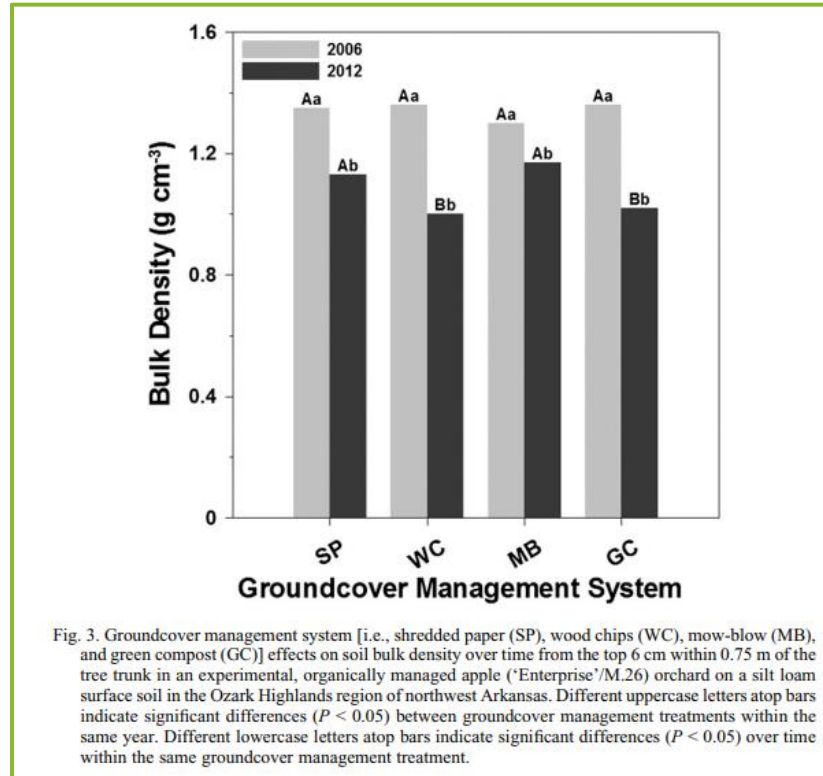
Un essai similaire sur l'irrigation de parcelle de pommiers avec paillis de copeaux de bois a été effectué dans la vallée de l'Okanagan par Eisenstat et al. (2018). Dans cette étude, les parcelles recevaient soit une irrigation complète, soit la moitié de cette irrigation pour 45 jours à partir du 85^e jour suivant la floraison. Leurs résultats indiquent que le sol des parcelles avec paillis de bois contenait généralement plus d'eau de celui des parcelles traitées au glyphosate. Les 40 premiers cm du sol sous les paillis recevant seulement 50% d'irrigation démontraient toujours au moins 2 à 3% plus d'humidité que le témoin recevant 100% de ses besoins en eau.

Dans une autre étude réalisée dans l'État de Washington, Granatstein et al. (2010) ont mesuré, la 2^e et 3^e année de l'expérience, le taux d'infiltration des parcelles. Celui-ci était inférieur dans le sol sous un paillis de copeaux de bois que dans celui du traitement de gazon tondu, mais comparable à celui des parcelles avec travail de sol.

Des chercheurs de l'Arkansas (É.-U.) ont testé l'effet sur le sol de différents types de paillis organiques (copeaux de bois, papier, paille et compost) et ont observé que les températures du sol étaient les plus élevées sous le paillis de gazon tondu-et-soufflé et les plus basses, sous le papier déchiqueté. Les températures du sol sous les copeaux de bois et le compost se situaient à mi-chemin. Suivant la même tendance, l'humidité du sol, mesurée à l'aide de tensiomètres durant les 2 premières saisons, était la plus élevée sous le papier et la plus basse sous le témoin de gazon tondu-et-soufflé, avec les paillis de bois et de compost comme valeurs médianes (Rom et al., 2010). Les auteurs notent aussi que les parcelles de paillis de papier semblaient très mouillées et sentaient la décomposition anaérobie. Cependant, ces résultats sont présentés dans un très court rapport après seulement 3 ans d'observations et ne semblent pas avoir fait l'objet de tests statistiques.

Trois ans plus tard, des chercheurs de la même équipe ont effectué un examen plus sérieux de l'effet de ces paillis organiques sur les propriétés du sol pour la même expérience et leurs résultats démontrent qu'après 6 ans, la masse volumique du sol (0-6 cm sous le paillis) était plus basse pour les traitements de paillis de bois et de compost que pour ceux de papier et de luzerne, mais qu'elle avait tout de même diminué dans le temps pour tous les traitements (figure 4) (Mays et al., 2014). Les chercheurs estiment que cet effet est probablement dû à la dilution du sol minéral par les résidus organiques et à l'agrégation. La conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) et l'humidité mesurée selon la capacité au champ des 10 premiers cm de sol étaient aussi plus élevées dans le traitement de compost que dans les 3 autres, indiquant une meilleure infiltration et une plus grande capacité de rétention de l'eau du sol. La concentration d'agrégats stables à l'eau des 7,5 premiers cm de sol, était, pour sa part, significativement plus élevée dans les traitements de paillis de papier et de compost que dans le traitement de gazon tondu-et-soufflé. Ce résultat peut être attribué à la décomposition plus rapide du papier déchiqueté, apportant plus de carbone dans le sol et contribuant ainsi à la formation d'agrégats de sol. Le taux d'infiltration spécifique, déterminé en fonction du temps nécessaire à une quantité d'eau initiale pour s'infiltrer dans le sol, était aussi le plus élevé dans le paillis de papier sans différer statistiquement du paillis de compost qui lui, ne différait pas des deux autres paillis (bois et gazon). Il est aussi important de noter que le paillis de papier semble avoir favorisé les populations de rongeurs et des dommages ont été observés dans ces parcelles. Finalement, en comparant leurs traitements avec un verger conventionnel, les chercheurs observent que tous les paillis avaient une masse volumique plus basse (Mays et al., 2015).

Figure 4. Masse volumique apparente du sol (g/cm^3) sous 4 différents paillis organiques après 6 ans, tiré de Mays et al., 2014 (SP= papier déchiqueté, WC= copeaux de bois, MB= gazon tondu-et-soufflé et GC= Compost municipal de feuilles, résidus de tonte et de jardin)



L'année d'après, Jones et al. (2017) observent qu'au bout de 7 ans, les températures du sol (0-10 cm) sont significativement plus basses dans les traitements de paillis de bois, papier et compost que dans celui du contrôle de gazon tondu-et-soufflé. La teneur en eau du sol (0-10 cm) ne différerait pas, quant à elle, entre les traitements (Jones et al., 2020).

Dans une étude se déroulant dans l'État du Michigan, Stefanelli et al. (2009) ont comparé un paillis de paille de luzerne à un traitement de pyrodésherbage et ont remarqué que lorsque des différences étaient observées dans l'humidité du sol, c'est sous le paillis de luzerne qu'elle était la plus élevée.

Finalement, Mathew et al (2002), dans leur très courte expérience ont observé que l'humidité du sol était aussi plus élevée sous le paillis de compost sans être significativement différente du témoin d'herbicide, mais les températures du sol y étaient significativement plus basses.

3.4. Effets des paillis sur la biologie du sol

Un sol en santé étant un sol vivant, il est important de mesurer l'effet des paillis organiques sur la biologie du sol. Bien que cet aspect soit présenté en dernier, il est sans doute un des plus essentiels, car c'est la macrofaune, la mésofaune, la microfaune et les microorganismes qui sont responsables d'une bonne partie, si ce n'est de la majorité, de la décomposition des matières organiques et de leur incorporation dans le sol des vergers. Ainsi, la gestion du sol et du couvre-sol des vergers a un impact direct sur les populations d'organismes du sol qui, par exemple, seront diminuées par certaines pratiques comme le travail de sol ou l'absence de litière sur le sol (sol nu). Plusieurs études démontrent, par exemple, qu'un passage d'une régie conventionnelle à une régie biologique en verger a généralement un effet positif sur les populations de vers de terre (Sofa et al., 2020). L'utilisation de paillis comme technique de gestion du sol du verger peut donc s'avérer bénéfique pour le biote du sol, car les copeaux de bois, le papier, la paille ou encore le compost représentent une source de nourriture de choix pour ces organismes et leur apport en quantité importante devrait stimuler la croissance de leurs populations et peut-être modifier leur composition. De plus, les modifications de l'environnement du sol (humidité et température) auront aussi un impact sur leurs populations (Kader et al., 2017). C'est pourquoi, bien que plusieurs indices et paramètres soient mesurés, ils se rapportent tous généralement à une mesure d'abondance ou de diversité des populations d'organismes du sol.

Cependant, principalement en raison de leur complexité, peu d'études effectuent les tests adéquats ou complets pour mesurer l'abondance et/ou la diversité des organismes du sol. Une revue de littérature sur les paillis et leurs effets sur les sols identifiait d'ailleurs récemment le manque de recherches sur l'aspect biologique du sol (Kader et al., 2017).

Forge et al. (2003) sont les premiers à avoir observé l'effet de paillis organiques (papier et paille de luzerne) sur les microorganismes de sol de vergers de pommiers nord-américains. Leurs résultats démontrent que l'abondance de microorganismes du sol mesurée par l'indice d'enrichissement (*EI*) était plus grande sous les paillis de paille de luzerne et de papier déchiqueté que celle sous le témoin (herbicide). En ce qui concerne la diversité structurelle des microorganismes du sol, évaluée selon l'indice de structure (*SI*), elle était supérieure dans les paillis de papier par rapport aux autres traitements et celle du sol sous la paille de luzerne était moins élevée que le témoin. De plus, les auteurs ont aussi évalué l'abondance de nématodes parasites des racines (*Pratylenchus penetrans*), associées à la maladie de la replantation du pommier, et ils ont observé qu'elle était significativement et considérablement réduite dans le sol sous les deux types de paillis organiques en comparaison aux parcelles traitées à l'herbicide.

Dans une étude similaire, les mêmes chercheurs ont observé que différemment à leur première expérience, l'indice d'enrichissement (*EI*) n'était pas plus élevé dans le sol sous

les paillis de papier que dans le traitement témoin indiquant que ce traitement n'a pas eu d'effet sur l'abondance de microorganismes. Similairement, le papier n'a pas non plus permis d'augmenter significativement l'indice de structure (*SI*) utilisé pour calculer la diversité des microorganismes dans les sols. Cependant, une fois de plus, les populations de *P. penetrans* ont été significativement réduites par le paillis de papier, résultant en une augmentation d'environ 100% de la densité des racines de pommier dans les 15 premiers cm de sol (Forge et al., 2008). De plus, les paillis de papier ont permis d'augmenter significativement l'abondance des nématodes fongivores, omnivores et prédateurs.

Une autre expérience comparant cette fois-ci un paillis de paille de luzerne et de compost de fumier par Forge et al. (2013) a révélé que le sol sous les paillis de luzerne contenait des populations de nématodes microbivores et de protozoaires significativement plus élevées et ce, de façon plus constante, que dans le témoin. Ces populations sont généralement de bons indicateurs de l'activité microbienne et de la minéralisation des minéraux du sol. De plus, les paillis de luzerne ont aussi eu un effet répressif significatif sur les populations de nématodes des racines. Les indices de diversité des microorganismes n'ont cependant pas démontré de corrélation à l'application de paillis.

Durant les mêmes années, Neilsen et al. (2014), du même centre de recherche, ont aussi évalué quelques paramètres biologiques du sol dans leurs études comparant un paillis de paille de luzerne tondu-et-soufflé et de copeaux de bois à un paillis de plastique noir. Ils ont remarqué que le carbone associé à la biomasse microbienne du sol était plus élevé sous ces deux paillis organiques que sous celui de plastique. L'abondance de nématodes a aussi été évaluée et ceux-ci étaient plus nombreux sous les paillis de luzerne et de bois. Le sol sous les paillis de luzerne contenait significativement plus de nématodes bactérivores, prédateurs et omnivores que les autres paillis, alors que le sol sous les paillis de bois était significativement plus riche en nématodes fongivores, probablement en raison du haut rapport C/N du bois favorisant la décomposition fongique.

Granatstein et Mullinix (2008), des chercheurs de l'État de Washington, ont aussi remarqué la première année de leur étude que le sol sous les paillis de bois et de paille de luzerne contenait significativement plus de nématodes bactérivores que le témoin (travail de sol). Une augmentation de ces nématodes reflète une plus grande abondance microbienne dans le sol ainsi qu'une minéralisation accrue de l'azote (principalement effectuée par les bactéries du sol).

Toujours dans le même État, TerAvest et al. (2011) ont évalué que les paillis de bois avaient le plus haut taux de minéralisation du carbone organique. Possiblement responsable en partie de ce dernier résultat, la densité de vers de terre était aussi significativement, environ 4 fois, plus élevée dans ce traitement que dans le témoin.

Des chercheurs de l'État de New York ont pour leur part observé, après 12 ans, que les taux de respiration microbienne (CO₂ respiré) étaient significativement plus élevés dans le sol sous les paillis de bois dans le témoin, et ce, de façon constante durant les 6 semaines d'incubation en laboratoire (Yao et al., 2005). Les chercheurs ont aussi effectué des comptes de colonies de bactéries et de champignons et ont remarqué que le sol sous le paillis de bois ne différait pas de celui du témoin au glyphosate. Bien qu'il soit difficile d'évaluer si le paillis de bois a augmenté la diversité microbiologique du sol, les chercheurs notent une composition distincte de la communauté de champignons dans le sol de ce paillis. En effet, les résidus de bois ont une haute teneur en lignine et polyphénols qui sont des sources de carbone difficiles à dégrader que les champignons apprécient particulièrement. Ainsi, la grande disponibilité de ce matériel organique a vraisemblablement augmenté l'activité et la biomasse microbienne sans pour autant augmenter significativement sa diversité. Cette observation est d'ailleurs réitérée 2 ans plus tard par St. Laurent et al. (2008) qui remarquent eux aussi une différence marquée dans la composition des populations bactériennes, mais surtout fongiques, dans le sol ayant été amendé avec des copeaux de bois durant 14 ans.

En Arkansas, des équipes de chercheurs ont étudié de près l'impact de différents paillis organiques sur différentes populations microbiennes associées à l'azote du sol. Selon les résultats de Jones et al. (2017), bien que tous les paillis (copeaux de bois, papier et compost) aient modifié les communautés dénitrifiantes du sol, le compost est le traitement ayant permis d'augmenter le plus rapidement leur abondance (*richness*) et leur diversité (*Shannon Weaver index*). De son côté, le paillis de bois semble avoir un effet à plus long terme, alors qu'après 7 ans de traitement, ses communautés dénitrifiantes gagnaient en abondance et en diversité au même titre que celles dans le sol du traitement de compost. Ces deux paillis représentent donc une façon potentielle d'augmenter le processus de dénitrification du sol des vergers. Le paillis de papier, pour sa part, ne différait pas statistiquement du témoin de gazon tondu-et-soufflé.

Jones et al. (2020), du même projet, ont pour leur part observé que la biomasse microbienne de carbone et la respiration aérobie en fonction des enzymes déshydrogénase et B-glucosaminidase étaient supérieures la première année sous la luzerne tondue, mais après 7 ans, peu de différences étaient observables entre les traitements. Au fil des années, les auteurs ont toutefois noté que ces facteurs augmentaient jusqu'à l'année 4 dans tous les traitements, pour ensuite diminuer, et ce, malgré l'ajout constant de nouveaux matériaux organiques. Cet effet pourrait être dû à un renouvellement des communautés microbiennes engendré par la modification des propriétés du sol au fil du temps. Ainsi, ces indicateurs ne semblent pas adaptés pour mesurer l'activité microbienne sous les paillis après une période prolongée.

Finalement, dans leur courte étude, Mathews et al. (2002) ont évalué la quantité d'arthropodes du sol sous les paillis et celui sous le compost contenait significativement

plus de prédateurs et de détrivores que le témoin (herbicide). De plus, ce paillis n'a pas eu d'impact significatif sur les populations arthropodes herbivores (ravageurs). Les auteurs notent même une augmentation significative de larves de *Aphidoletes aphidimyza*, un prédateur important des pucerons, dans les parcelles avec paillis de compost. Ce qui indique que le compost pourrait engendrer un certain contrôle biologique des ravageurs des pommiers

4. DISCUSSION

4.1. Paillis de papier

Des quatre études ayant évalué les paillis de papier déchiqueté, deux d'entre elles ont démontré un effet positif sur le rendement et la croissance des pommiers en comparaison à un traitement d'herbicide (Neilsen et al., 2003a; Neilsen et al., 2007). Celle de Granatstein et Mullinix (2008) a seulement observé une amélioration de la croissance, mais n'avait pas le même témoin et a été conduite sur seulement 4 ans. La dernière étude, par Choi et Rom (2011), n'a, pour sa part, pas observé d'amélioration du rendement ou de la croissance par le paillis de papier, mais celui-ci était comparé à un paillis de gazon tondu-et-soufflé et non un traitement témoin d'herbicide. De plus, la courte durée de cette étude (3 ans) rend le résultat moins intéressant par rapport aux études réalisées sur 5 et 6 ans dans la vallée de l'Okanagan par Neilsen et al. (2003; 2007) Ainsi, les paillis de papier déchiqueté semblent promouvoir la vigueur des pommiers et leur fructification à moyen terme (5-6 ans) et pourraient s'avérer un type de paillis intéressant.

En ce qui concerne leurs effets sur le sol, pailler avec du papier déchiqueté ne semble pas beaucoup modifier les propriétés chimiques du sol, excepté la concentration en Ca et le pH. Ce qui est sensé, car ce matériau possède une charge fertilisante relativement pauvre. Toutefois, le papier déchiqueté est souvent riche en Ca en raison d'un traitement industriel au carbonate de calcium (Choi et al., 2011). Cet effet est souhaitable, car le calcium est un élément important pour la nutrition des pommiers et un ratio élevé de K + Mg/Ca du sol peut causer le point amer et diminuer la qualité des fruits (Kalcsits et al., 2020). Il est aussi important de remarquer que malgré sa composition de carbone, le paillis de papier n'a pas permis d'augmenter le taux de matière organique dans les trois études ayant mesuré ce paramètre (Choi et Rom, 2011; Granatstein et Mullinix, 2008; Jones et al., 2017). Ainsi, ces résultats suggèrent que l'amélioration de la performance agronomique des arbres (croissance et rendement) par les paillis de papier ne soit pas due à leur impact sur les propriétés chimiques du sol. C'est d'ailleurs ce que concluaient Neilsen et al. (2007) qui attribuaient plutôt cet effet à la modification des propriétés physiques du sol par les paillis de papier.

Cependant, peu d'études démontrent une modification marquée de la physique du sol par les paillis de papier déchiqueté. Mis à part des températures plus basses observées dans

toutes les expériences ayant mesuré ce paramètre, il est difficile de tracer une tendance générale de l'effet de ce type de paillis sur les propriétés physiques du sol, car la plupart ne diffèrent pas significativement des traitements témoins. Il est possible que ces paillis bénéficient d'être combinés à un apport fertilisant, car Neilsen et al. (2003b) observaient que des applications de papier déchiqueté jumelées à des biosolides municipaux permettaient d'améliorer toutes les propriétés physiques mesurées (masse volumique, stabilité des agrégats, taux d'infiltration et capacité en rétention d'eau à saturation). D'autre part, dans Mays et al. (2014), bien que la masse volumique du sol sous les paillis de papier ne diffère pas de celle du sol sous paillis de gazon tondu-et-soufflé, elle avait quand même significativement diminuée au bout de 6 ans, ce qui indique une amélioration de la structure du sol. Toutefois, cette observation n'a pas été répétée par les autres études ayant comparé les paillis de papier à des témoins de sols nus (Granatstein and Mullinix, 2008; Neilsen et al., 2003b). Par ailleurs, deux études sur trois ont démontré une augmentation du taux d'infiltration du sol sous les paillis de papier. Cette propriété est attribuée par Mays et al. (2015) à l'augmentation du nombre de vers de terre et de l'activité de la macrofaune qui apprécie particulièrement ce genre de matériaux organiques et qui sont les principaux acteurs de l'amélioration de la structure du sol (Sofa et al., 2020).

Ainsi, on pourrait être tenté d'avancer que les paillis de papier augmentent l'abondance des microorganismes du sol. Cependant, seule l'étude de Forge et al. (2003) a démontré cet effet. Les autres études analysées dans ce rapport n'ont pas démontré de différences significatives entre l'ajout de papier déchiqueté et les traitements témoins. D'autre part, bien que n'ayant pas détecté de changement significatif dans les indices d'enrichissement et de diversité des populations microbiennes dans leur 2^e étude, Forge et al. (2008) observent de façon constante une diminution des populations de nématodes parasites de racines du pommier dans le sol sous les paillis de papier. Ainsi en stimulant la biologie du sol, ces paillis permettent probablement une meilleure structure du sol, mais surtout, une meilleure régulation des espèces phytophages du sol que les traitements d'herbicides et bénéficient ainsi aux pommiers, comme le démontre l'amélioration de la croissance et des rendements observés dans certaines études.

Ainsi, les paillis de papier semblent avoir des résultats de moindre envergure sur les propriétés du sol, principalement en raison de leur composition moins riche, excepté en carbone. Toutefois, plusieurs études ont observé qu'ils permettaient d'augmenter le pH et l'infiltration de l'eau dans le sol, mais surtout d'améliorer la performance des pommiers. Quelques études associent ce résultat à la diminution de la pression des nématodes des racines engendrée par l'augmentation des populations microbiennes du sol en général sous ces paillis. De ce fait, ce type de paillis pourrait être envisagé si de grandes quantités de papier déchiqueté sont disponibles localement. De plus, ils offrent aussi généralement un bon contrôle des mauvaises herbes s'ils sont réappliqués annuellement. L'utilisation de

ces paillis requiert habituellement un système d'irrigation composé de microasperseurs qui permettent de maintenir le paillis humide et en place, ce qui est essentiel pour créer une couche hermétique aux mauvaises herbes lorsqu'elle sèche et pour éviter que le papier ne s'envole au vent.

4.2. Paillis de paille de foin et de luzerne

Les effets des paillis de paille de foin et de luzerne sur les rendements et la croissance des pommiers sont mitigés à travers les études. En général, les paillis de paille de foin et de couvre-sol tondu-et-soufflé (*mow-and-blow*) n'ont pas généré de rendement ni de croissance supérieure aux traitements pour lesquels les mauvaises herbes étaient contrôlées ou aux autres paillis (Choi and Rom, 2011; Merwin and Stiles, 1994; Walsh et al., 1996b). Cependant, ils n'ont pas non plus engendré de diminution de ces paramètres et pourraient donc tout de même être considérés comme alternatives aux traitements conventionnels de travail de sol ou d'herbicide. Les paillis de paille de luzerne ont connu une certaine popularité auprès des chercheurs en raison de leur potentiel d'apport en azote. Conséquemment, ils ont permis d'augmenter les rendements en fruits dans trois études sur 4 ayant mesuré ce paramètre et dans 2 études sur 4 pour ce qui est de la croissance des arbres (Forge et al., 2013; Granatstein et al., 2010; Neilsen et al., 2003a; Stefanelli et al., 2009). Les paillis de paille de luzerne pourraient donc s'avérer une alternative profitable aux techniques de gestion du sol conventionnelles si les gains de rendements justifient le prix de production ou d'importation de cette paille.

À l'instar de ses effets sur le rendement et la croissance des arbres, pailler avec de la paille de foin a relativement peu d'impact sur les propriétés chimiques du sol. Ainsi dans les deux études ayant mesuré ces paramètres (Merwin and Stiles, 1994; Walsh et al., 1996a), seules la concentration du sol en potassium (K) et la quantité de matière organique ou de carbone (C) ont augmenté. Ces résultats sont somme toute intéressants, car une augmentation de la matière organique représente une amélioration notable de la qualité du sol d'un verger dont découle souvent une panoplie d'autres avantages (amélioration de la rétention de l'eau, des minéraux, stimulation de la vie microbienne du sol, séquestration du carbone, etc.) (Kalcsits et al., 2020). De plus, le potassium est un élément important de la fertilisation des pommiers et selon Merwin et Stiles (1994), la paille a permis aux pommiers de conserver des concentrations foliaires de cet élément dans des intervalles optimaux, même lors de récoltes importantes, alors que les pommiers poussant dans les parcelles traitées au glyphosate affichaient des carences. Toutefois, le foin étant un terme générique pour désigner un ensemble de graminées et de légumineuses, sa composition peut être très variable d'une étude à l'autre, ce qui explique peut-être pourquoi Merwin et Stiles (1994) ont observé une augmentation de la concentration du phosphore et de l'azote dans le sol après l'utilisation de paillis de paille de foin, alors que ce n'est pas le cas pour Walsh et al. (1996a). Les paillis de paille de luzerne, pour leur part, désignent un type de paille bien particulier composé d'une légumineuse et donc riche en azote. Ces paillis ont

plusieurs effets positifs sur les propriétés chimiques du sol comme l'augmentation de la concentration en N et de la matière organique ou du C (dans 3 études sur 3). De plus, comme pour la paille de foin, la paille de luzerne appliquée sur le sol des vergers résulte systématiquement en une augmentation du K du sol (Forge et al., 2013; Neilsen et al., 2014; Neilsen et al., 2003b). L'utilisation de paillis pour corriger les carences en potassium des pommiers avait d'ailleurs déjà été identifiée dans les années 80 par Hogue et Neilsen (1987) dans leur revue de littérature sur la gestion du couvre-sol des vergers. D'autre part, les augmentations en N et en K du sol se traduisent souvent par une augmentation des concentrations foliaires de ces éléments (Forge et al., 2013; Neilsen et al., 2003a) et pourraient permettre de combler une partie des besoins en N des pommiers et ainsi réduire les fertilisants amendés, surtout lors des années durant lesquelles les paillis sont appliqués en doses importantes. Ces effets expliquent en partie pourquoi les paillis de luzerne permettent d'augmenter les rendements des pommiers dans certaines études.

Les paillis de paille semblent avoir peu d'impact sur les propriétés physiques du sol. En effet, les paramètres physiques mesurés dans les études ne démontrent généralement pas de différence significative entre le sol sous les paillis de paille (luzerne ou foin) et les sols témoins. Toutefois, ce type de paillis a permis d'augmenter l'humidité du sol et de diminuer sa température dans les trois études ayant mesuré ces paramètres (Granatstein et al., 2010; Merwin et al., 1994; Walsh et al., 1996b). Cet effet est d'ailleurs observé pour la plupart des paillis alors que les couches de paille, de copeaux ou encore de morceaux de papier agissent comme une barrière qui retient l'humidité et limite l'évapotranspiration en protégeant la surface du sol du rayonnement solaire et ainsi, diminue le réchauffement du sol (Kader et al., 2017).

En revanche, l'effet de la paille de luzerne est systématiquement positif sur l'abondance des microorganismes du sol (4 études sur 4). De plus, plusieurs études démontrent aussi la capacité de ce type de paillis à contrôler les populations de nématodes des racines du pommier et à stimuler celles bactériovores (Forge et al., 2013; Forge et al., 2003; Granatstein et Mullinix, 2008; Neilsen et al., 2014). Ce dernier résultat concorde avec la concentration importante en N du sol qui, comme le démontrent Jones et al. (2017), accroît la quantité de bactéries responsables de la minéralisation de cet élément et ainsi, augmente par le fait même leur prédation (par les nématodes bactériovores entre autres). Il est aussi possible que le plus faible rapport C/N de la paille (par rapport au papier et aux copeaux de bois) permette plus rapidement sa décomposition et ainsi l'augmentation de l'abondance des microorganismes du sol (Jones et al., 2020).

Ainsi, les paillis de paille semblent améliorer les rendements et la croissance des pommiers ainsi que la qualité du sol principalement lorsqu'ils se composent d'une proportion élevée de légumineuses (ex: luzerne). En effet, leur contenu élevé en N et leur effet stimulant relativement rapide sur la vie microbienne du sol leur permettent de modifier de façon bénéfique plusieurs propriétés pédologiques. Cet apport d'azote doit néanmoins être géré

avec une attention particulière afin d'assurer un bon fractionnement en début de saison et de limiter les amendements de fin de saison pouvant nuire à l'aoûtement des pommiers. Par ailleurs, il est important de mentionner que ces paillis n'offrent pas un très bon contrôle des mauvaises herbes, sont assez chers (voir tableau 3) et sont des habitats propices aux campagnols (Merwin and Stiles, 1994). La meilleure option réside probablement en leur production sur place ou en variante tondue-et-soufflée. Dans ce dernier cas, il serait donc intéressant de les combiner à une culture de couverture de légumineuses dans l'entre-rang. L'achat de machinerie spécialisée sera cependant nécessaire.

4.3. Paillis de compost

Le compost est un amendement aux bénéfices nombreux et bien documentés surtout dans les systèmes agricoles biologiques. Cependant, son utilisation comme paillis semble offrir des résultats moins intéressants qu'anticipés. En effet, sur les quatre études retenues dans cette revue de littérature, seulement la moitié d'entre elles ont démontré une augmentation de la croissance des pommiers ayant poussé dans les paillis de compost. De plus, la seule étude ayant été menée suffisamment longtemps pour mesurer les rendements n'a pas dénoté de différences significatives avec un témoin d'herbicide (Choi and Rom, 2011; Mathews et al., 2002; Neilsen et al., 2014; Walsh et al., 1996b).

Lorsque l'effet des paillis de compost sur les propriétés chimiques du sol est comparé à celui d'un traitement d'herbicide ou d'un travail de sol, on observe, comme on pourrait s'y attendre d'un amendement à grande valeur fertilisante, que la plupart des concentrations en nutriments du sol sont augmentées. En effet, toutes les études ayant mesuré ces paramètres démontrent que le compost appliqué en paillis résulte en un sol plus riche en N, P et K en plus d'augmenter systématiquement le taux de matière organique (Choi et al., 2011; Forge et al., 2013; Jones et al., 2017; Walsh et al., 1996a; Walsh et al., 1996b). De plus, 2 études sur 3 ont observé une augmentation du pH ainsi que des concentrations en Mg et en Ca du sol sous les paillis de compost. Toutefois, un trop grand apport d'azote n'est pas souhaitable pour les pommiers et peut résulter en un lessivage dans l'environnement. Ceci est d'autant plus vrai pour les sols à texture grossière des vergers qui permettent un écoulement rapide de la solution du sol (Kalcsits et al., 2020). D'ailleurs, dans leurs études, Choi et al. (2011), Merwin et al. (1996) et Walsh et al. (1996a) ont observé que la concentration en nitrates de la solution du sol restait élevée tout au long de la saison (même à l'automne quand les pommiers en assimilent peu) dans le traitement de paillis de compost, indiquant un risque de lessivage relativement élevé ainsi qu'un risque pour l'aoûtement des arbres.

Évidemment, il existe autant de sortes de compost que de combinaisons de matériaux pouvant se composter et leur composition initiale variable est probablement à l'origine des résultats différents obtenus entre les expériences. Cependant, on peut affirmer que,

de façon générale, pailler les rangs de pommiers avec du compost a pour effet d'améliorer les propriétés chimiques du sol, même si cet effet n'est pas toujours reflété sur la performance des arbres. En raison de la décomposition rapide du compost, ces effets sont principalement observés pour l'année même d'application du compost et ces paillis doivent donc être réappliqués annuellement pour en bénéficier.

En ce qui concerne l'impact du compost sur les propriétés physiques du sol, peu d'études se sont penchées sur la question. Celles qui l'ont fait, ont principalement observé une diminution de la température du sol (3 études sur 4) (Brown et Tworkoski, 2004; Jones et al., 2020; Walsh et al., 1996b). Sinon, Mays et al. (2014) observent, après 6 ans, une diminution de la masse volumique du sol sous un paillis de compost, ainsi qu'une augmentation de l'agrégation, ce qui concorde avec l'augmentation de la matière organique systématiquement observée dans les études. En effet, l'ajout de matériaux organiques, riches en carbone, élève habituellement la quantité de matière organique d'un sol, ce qui résulte en une augmentation de l'agrégation du sol et de sa porosité; faisant ainsi décroître sa masse volumique et améliorant sa structure (Kader et al., 2017). Toutefois, cette amélioration de la masse volumique du sol n'a pas été observée par Walsh et al. (1996b), mais leur étude n'a été menée que sur 3 ans. La modification des propriétés physiques du sol s'effectuant à long terme, une bonne partie des expériences analysées ont souvent un échéancier trop court pour pouvoir observer cet effet du paillage.

D'autre part, seulement 3 études ont analysé l'effet de ce type de paillis sur la biologie du sol et leurs résultats sont difficiles à comparer. Ainsi Forge et al. (2013) ont observé que le paillis de fumier de bovins composté n'a pas augmenté de façon constante les populations de nématodes se nourrissant des microorganismes du sol ni diminué celles parasites des racines. Ce dernier résultat est curieux, car dans une revue de littérature, les mêmes auteurs avançaient que le compost était une solution prometteuse pour diminuer la pression de la maladie de la replantation chez les pommiers, engendrée en partie par les nématodes parasites des racines (Forge et al., 2016). Toutefois, d'autres études ont démontré que l'abondance et la diversité des populations de bactéries dénitrifiantes du sol étaient supérieures sous un paillis de compost qu'un paillis de paille ou de papier (Jones et al., 2017). De plus, le compost semble stimuler rapidement la biologie du sol, comme il se décompose/minéralise rapidement (Jones et al., 2020). D'ailleurs, son effet fertilisant rapide sur les propriétés chimiques le démontre bien. Finalement, Mathews et al. (2002) associent les paillis de compost à un certain contrôle biologique. Ce phénomène est d'ailleurs bien documenté dans d'autres systèmes agricoles (De Corato, 2020).

Ainsi, utiliser le compost comme paillis permet d'augmenter rapidement la fertilité chimique du sol, car il est vite décomposé par les microorganismes, mais n'est peut-être pas la meilleure option, car son apport en azote peut être trop important et nuire à l'aoûtement des pommiers en plus d'augmenter les risques de lessivage dans l'environnement. Toutefois, le compost pourrait être utilisé les premières années, durant

lesquelles les besoins des pommiers en azote sont plus importants, à condition de l'appliquer relativement tôt en saison et à une dose permettant sa minéralisation complète avant la fin de l'été. Aussi, cet amendement pourrait aussi être envisagé dans les vergers aux prises avec la maladie de la replantation du pommier, car bien que l'étude présentée dans ce travail n'ait pas observé cet effet, il permet généralement de stimuler la biologie du sol et de rétablir la balance entre les prédateurs et les ravageurs du sol (De Corato, 2020; Forge et al., 2016). De plus, il bénéficierait aussi d'être combiné à un autre paillis dont la charge fertilisante est moins élevée et le ratio C/N plus élevé. Enfin, il est important de noter que ce paillis n'offre pas un contrôle adéquat des mauvaises herbes (Walsh et al., 1996a).

4.4. Paillis de copeaux de bois

Les paillis de copeaux de bois sont définitivement le type de paillis ayant été le plus étudiés en Amérique du Nord. Ce résultat est le reflet d'un ensemble d'effets positifs découlant de cette technique de gestion du sol en verger. En effet, la majorité des expériences révèlent que les pommiers ayant poussé dans les paillis de copeaux de bois ont une croissance supérieure (dans 6 des 8 études analysées dans ce rapport) et ce, dès les premières années après la plantation. Toutefois, ce résultat ne se traduit généralement pas par une augmentation de rendement, alors que la production de fruits des pommiers dans le paillis de bois ne diffère pas de ceux dont le rang est traité aux herbicides ou recevant un travail de sol.

Pailler les rangs des vergers avec des copeaux de bois a aussi plusieurs répercussions souhaitables sur les propriétés chimiques du sol. En effet, la majorité des études démontre que la concentration en N (4 études sur 6), en P, en K (3 études sur 5) et en Ca (3 études sur 4) ainsi que le pH sont augmentés dans le sol des rangs de pommiers par l'application de copeaux de bois. Malgré le risque d'immobilisation de l'azote par les paillis de bois, ce phénomène n'a pas été relevé dans les études, alors que les pommiers ayant poussé dans ce type de paillis affichaient généralement des concentrations foliaires en N acceptables (Choi et al., 2011; TerAvest et al., 2011). D'ailleurs, TerAvest et al. (2010) ont observé que les racines des pommiers ayant poussé dans un paillis de bois contenaient plus de N (comparativement à ceux du traitement avec travail de sol), sûrement en raison d'une croissance foliaire supérieure, ce qui suggère qu'à la fin de la saison, les arbres avaient emmagasiné plus d'azote permettant ainsi, au printemps suivant, de fournir l'azote nécessaire à leur croissance par relocalisation sans avoir besoin du sol. Les auteurs avancent que ce phénomène permet probablement de pallier l'immobilisation de l'azote par les paillis de copeaux de bois, alors que ceux-ci agissent comme un puits d'azote en début de saison, puis comme une source, au fur et à mesure que la saison avance et que leur décomposition s'accroît.

D'autre part, dans la plupart des études (6 sur 8), le taux de matière organique, ou la concentration de carbone étaient plus élevés dans le sol sous les paillis de copeaux de bois (Atucha et al., 2011; Jones et al., 2017; Neilsen et al., 2014; St. Laurent et al., 2008; Yao et al., 2005). L'absence de l'observation de cet effet par Granatstein et Mullinix (2008) et par Choi et al. (2011) est probablement due à la courte durée des études (4 et 3 ans). Les copeaux de bois ayant un ratio C/N assez élevé, leur décomposition est plutôt lente et leurs impacts sur le sol se révèlent à plus long terme. D'ailleurs, la matière organique est aussi un paramètre du sol ne pouvant s'augmenter rapidement. Il est logique que les copeaux de bois mènent à une formation accrue de matière organique au fil des ans, car plusieurs études soutiennent maintenant qu'une partie notable de celle-ci se forme à partir de matériaux ligneux, comme le bois, en empruntant les voies de décomposition physique (par fragmentation) (Cotrufo et al., 2015) et de décomposition fongique (Khatami et al., 2019).

L'effet de l'augmentation de la matière organique dans le sol par les paillis de bois se traduit aussi par une amélioration de certaines propriétés physiques. En effet, les études à long terme, comme celle de Oliveira and Merwin (2001) (8 ans) et de Mays et al. (2015) (6 ans) ont attesté d'une diminution de la masse volumique du sol sous les paillis de bois. De plus, une augmentation de l'humidité du sol et une diminution de la température sont aussi observées presque systématiquement dans les études comparant les paillis de copeaux de bois au témoin de sol nu ou traité aux herbicides (Eissenstat et al., 2018; Granatstein and Mullinix, 2008; Granatstein and Sánchez, 2009; St. Laurent et al., 2008). Deux études ont même prouvé que ces paillis pourraient permettre de diminuer les besoins en irrigation des pommiers (Eissenstat et al., 2018; Granatstein and Mullinix, 2008).

Cette modification progressive des propriétés du sol sous les paillis de copeaux de bois s'effectue vraisemblablement par une augmentation de l'activité des microorganismes du sol. En effet, les six études ayant mesuré des paramètres liés à l'abondance des populations microbiennes du sol observent une augmentation significative par rapport aux parcelles témoins (Granatstein and Mullinix, 2008; Jones et al., 2017, 2020; Neilsen et al., 2014; St. Laurent et al., 2008; TerAvest et al., 2011; Yao et al., 2005). Cette hausse s'effectue souvent de pair avec une modification de la composition des populations édaphiques alors que les champignons, principaux décomposeurs de la lignine contenue dans le bois, deviennent de plus en plus importants (St. Laurent et al., 2008). Ce renouvellement des populations du sol explique d'ailleurs pourquoi la diversité n'augmente pas sous les paillis de bois dans les études présentées.

Ainsi, les paillis de copeaux de bois, en améliorant différentes propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol, permettent d'améliorer la croissance des arbres, et ce, autant durant les premières années qu'à long terme. Leurs principaux avantages résident probablement dans leur nature durable, due à leur rapport C/N élevé, qui permet de

lentement, mais significativement, optimiser les conditions de croissance des pommiers. De plus, ces paillis offrent généralement un bon contrôle des mauvaises herbes les premières années, bien que certaines mauvaises herbes à enracinement profond parviennent inévitablement à s’y établir à mesure que les paillis se décomposent (Atucha et al., 2011). Une attention particulière doit aussi être portée aux rongeurs qui semblent apprécier particulièrement ce type de paillis et peuvent causer d’importants dommages aux arbres. Il est donc important de protéger les troncs des arbres par un grillage métallique combiné ou non à d’autres stratégies comme le trappage mentionnées en introduction. Finalement, un des inconvénients majeurs des paillis de copeaux de bois réside dans leurs coûts élevés. En effet, selon un comparatif économique effectué par Granatstein et al. (2010) le coût notablement de l’utilisation de paillis de bois s’élèverait à environ 864\$US/ha/an vs 296\$ et 257\$ pour le travail de sol et le glyphosate (voir tableau 3). Toutefois, ces auteurs argumentaient dans cette étude que l’augmentation de la taille des pommes avait permis de rentabiliser cette technique de gestion du couvre-sol. Il faut souligner que cette évaluation des coûts ne tient pas compte des économies d’engrais et d’irrigation pouvant être réalisées avec les paillis de copeaux de bois. La meilleure option pour mitiger ces coûts serait d’avoir accès à une source de copeaux de bois locale et peu dispendieuse (comme les résidus d’égamage municipaux) ou encore de pouvoir les produire directement sur la ferme, en déchiquetant les résidus de taille des pommiers ou autres branches.

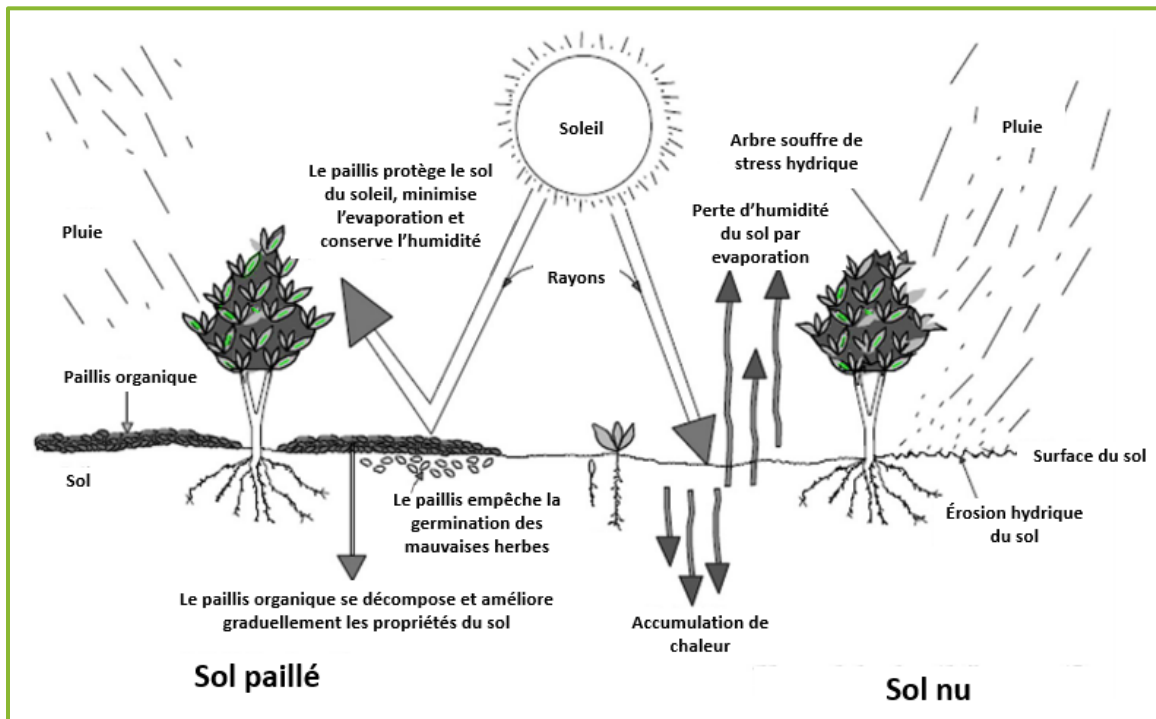
Tableau 3. Coûts (en dollars américains) de différentes gestions du couvre-sol en verger, tiré de Granatstein et al., 2010

Method	Rate (ha ⁻¹)	Frequency	Cost ha ⁻¹ yr ⁻¹ (\$)		
			Material	Application	Total
Tillage ¹	0.62 h	3 per yr		296	296
Wood chip mulch	100 m ³	1 per 3 yr	494	370	864
Alfalfa hay mulch	19.1 Mg	1 per 2 yr	788	222	1010
Spray on paper	7.6 Mg	1 per 1.5 yr	578	521	1099
Flaming	54 kg	3 per year	89	222	311
Weed fabric	1.5 m x 1143 m	1 per 6 yr	706	126	832
Glyphosate	1.24 L	4 per yr	59	198	257

¹Tillage with Wonder Weeder at 122 m min⁻¹ per side of tree row.

Finalement, le schéma suivant résume les principaux avantages d’un sol paillé en comparaison à un sol nu.

Figure 4. Principaux avantages d'un sol paillé en comparaison à un sol nu, adapté de Kader et al., 2017



5. CONCLUSION

Après l'analyse des études présentées, on peut tirer les conclusions suivantes :

1. L'utilisation de paillis dans l'entre-rang comme gestion du sol des vergers de pommiers est souvent supérieure, et, au pire, équivalente, aux herbicides en ce qui concerne les performances (croissance, rendement en fruits) des arbres.
2. Le paillage avec des matériaux organiques améliore généralement la qualité du sol en comparaison aux traitements laissant le sol à nu (herbicides ou travail de sol).
3. L'utilisation de paillis devra être jumelée à une technique de contrôle des dommages de rongeurs comme des grillages métalliques autour des troncs.
4. Les paillis de papier semblent présenter moins d'avantages pour le sol que les autres, ainsi ils ne seraient peut-être qu'à préconiser si cette ressource est la moins dispendieuse et la plus accessible.
5. Le compost amendé sous forme de paillis permet d'enrichir notablement le sol, mais représente un apport fertilisant trop important. Il serait préférable de

l'appliquer comme fertilisant organique à des taux et des moments précis plutôt que comme paillis tout au long de la saison.

6. Les paillis de paille de luzerne constituent eux aussi une source intéressante de nutriments pour les pommiers, mais ont le désavantage de ne pas contrôler les mauvaises herbes. Ainsi leur usage idéal serait probablement dans les vergers matures, où la compétition avec le couvert herbacé n'est plus une problématique, jumelés à un système d'entre-rang semé en luzerne (ou autres légumineuses) et tondu-et-soufflé sur le rang d'arbre. Ceci permettrait ainsi d'amortir les coûts de ce matériau.
7. Les paillis de bois représentent probablement le type de paillis le plus prometteur pour les vergers de pommiers québécois. En effet, leur utilisation dans les premières années après la plantation permettrait d'améliorer les performances agronomiques des pommiers et la qualité du sol tout en concurrençant adéquatement les mauvaises herbes. Toutefois, en raison de leurs coûts élevés, la meilleure solution serait de pouvoir les produire directement sur place et de les appliquer durant les 5 à 7 premières années de croissance des pommiers. Par la suite, une technique moins dispendieuse comme l'utilisation de culture de couverture ou d'un paillis tondu-et-soufflé serait souhaitable.

En conclusion, les paillis organiques semblent être une technique de gestion du sol et du couvre-sol des vergers permettant d'améliorer les propriétés chimiques, physiques et biologiques tout en préservant et même promouvant les performances agronomiques des pommiers. Ainsi, le paillage s'inscrit indéniablement dans la quête de durabilité que tous les secteurs agricoles, conventionnels, intégrés ou biologiques, se doivent dorénavant de poursuivre. En plus, les paillis organiques permettront aussi aux vergers québécois de se positionner comme des acteurs proactifs de la lutte aux changements climatiques, en stockant du carbone dans leur sol, en diminuant leurs besoins en irrigation, leur utilisation d'engrais, et surtout, d'herbicides de synthèse. D'autre part, l'utilisation prolongée de cette technique permettra aussi d'augmenter la résilience des sols et ainsi, de la production pomicole face aux changements climatiques.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Atucha, A., Merwin, I. A., and Brown, M. G. (2011). Long-term Effects of Four Groundcover Management Systems in an Apple Orchard. *Hortscience* 46, 1176-1183.
- Brown, M. W., and Tworkoski, T. (2004). Pest management benefits of compost mulch in apple orchards. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 103, 465-472.
- Carranca, C., Brunetto, G., and Tagliavini, M. (2018). Nitrogen Nutrition of Fruit Trees to Reconcile Productivity and Environmental Concerns. *Plants (Basel)* 7.
- Chen, G., Liu, S., Xiang, Y., Tang, X., Liu, H., Yao, B., and Luo, X. (2020). Impact of living mulch on soil C:N:P stoichiometry in orchards across China: A meta-analysis examining climatic, edaphic, and biotic dependency. *Pedosphere* 30, 181-189.
- Choi, H.-S., Rom, C. R., and Gu, M. (2011). Effects of different organic apple production systems on seasonal nutrient variations of soil and leaf. *Scientia Horticulturae* 129, 9-17.
- Choi, H. S., and Rom, C. R. (2011). Estimated nitrogen use efficiency, surplus, and partitioning in young apple trees grown in varied organic production systems. *Scientia Horticulturae* 129, 674-679.
- Chouinard, G. 2020. Introduction à la production fruitière intégrée. Fiche 6. Guide de référence en production fruitière intégrée 2020. Disponible depuis : <https://reseauappommier.irda.qc.ca/?p=10051> (consulté le 8 mars 2020)
- Cotrufo, M. F., Soong, J. L., Horton, A. J., Campbell, E. E., Haddix, M. L., Wall, D. H., and Parton, A. J. (2015). Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. *Nature Geoscience* 8, 776-+.
- Cormier, D., Maheux, R., Morin, Y. et Chouinard, G. (2020). Le campagnol des champs. Fiche 113. Guide de référence en production fruitière intégrée 2020. Disponible depuis : <https://reseauappommier.irda.qc.ca/?p=6961> (consulté le 13 mars 2020)
- De Corato, U. (2020). Disease-suppressive compost enhances natural soil suppressiveness against soil-borne plant pathogens: A critical review. *Rhizosphere* 13, 15.
- Eissenstat, D. M., Neilsen, D., Neilsen, G. H., and Adams, T. S. (2018). Above- and Belowground Responses to Shifts in Soil Moisture in Bearing Apple Trees. *HortScience* 53, 1500-1506.
- Fernández, D. E., Cichón, L. I., Sánchez, E. E., Garrido, S. A., and Gittins, C. (2008). Effect of Different Cover Crops on the Presence of Arthropods in an Organic Apple (*Malus domestica*Borkh) Orchard. *Journal of Sustainable Agriculture* 32, 197-211.
- Forge, T., Neilsen, G., and Neilsen, D. (2016). Organically acceptable practices to improve replant success of temperate tree-fruit crops. *Scientia Horticulturae* 200, 205-214.
- Forge, T., Neilsen, G., Neilsen, D., Hogue, E., and Faubion, D. (2013). Composted Dairy Manure and Alfalfa Hay Mulch Affect Soil Ecology and Early Production of 'Braeburn' Apple on M.9 Rootstock. *Hortscience* 48, 645-651.
- Forge, T. A., Hogue, E., Neilsen, G., and Neilsen, D. (2003). Effects of organic mulches on soil microfauna in the root zone of apple: implications for nutrient fluxes and functional diversity of the soil food web. *Applied Soil Ecology* 22, 39-54.
- Forge, T. A., Hogue, E. J., Neilsen, G., and Neilsen, D. (2008). Organic mulches alter nematode communities, root growth and fluxes of phosphorus in the root zone of apple. *Applied Soil Ecology* 39, 15-22.
- Glover, J. D., Reganold, J. P., and Andrews, P. K. (2000). Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. *Agriculture Ecosystems & Environment* 80, 29-45.

- Gouvernement du Canada. 2020. Statistical Overview of the Canadian Fruit Industry 2019. Available from : https://multimedia.agr.gc.ca/pack/pdf/fruit_report_2019-eng.pdf (accessed 8 March, 2021)
- Granatstein, D., Davenport, J. R., and Kirby, E. (2017). Growing Legumes in Orchard Alleys as an Internal Nitrogen Source. *HortScience* 52, 1283-1287.
- Granatstein, D., Kirby, E., and Davenport, J. (2013). Direct Seeding Legumes into Orchard Alleys for Nitrogen Production. In "11th International Organic Fruit Symposium" (D. Granatstein, P. K. Andrews, S. D. Bishop and W. Janisiewicz, eds.), Vol. 1001, pp. 329-334.
- Granatstein, D., and Mullinix, K. (2008). Mulching options for northwest organic and conventional orchards. *Hortscience* 43, 45-50.
- Granatstein, D., and Sánchez, E. (2009). Research Knowledge and Needs for Orchard Floor Management in Organic Tree Fruit Systems. *International Journal of Fruit Science* 9, 257-281.
- Granatstein, D., Wiman, M., Kirby, E., and Mullinix, K. (2010). Sustainability Trade-Offs in Organic Orchard Floor Management. In "Organic Fruit Conference" (R. K. Prange and S. D. Bishop, eds.), Vol. 873, pp. 115-121.
- Hammermeister, A. M. (2016). Organic weed management in perennial fruits. *Scientia Horticulturae* 208, 28-42.
- Hogue, E., and Neilsen, D. (1987). Orchard floor vegetation management. *Horticultural Reviews* 9, 377-430.
- Institut de la Statistique du Québec. 2018. Production et mise en marché de la pomme, Québec, récolte 2018. Disponible depuis : <https://statistique.quebec.ca/fr/document/production-et-mise-en-marche-de-la-pomme-par-region-pomicole-quebec/tableau/production-et-mise-en-marche-de-la-pomme-par-region-pomicole-quebec-recolte-2018> (consulté le 8 mars 2021)
- Jones, J., Savin, M. C., Rom, C. R., and Gbur, E. (2017). Denitrifier community response to seven years of ground cover and nutrient management in an organic fruit tree orchard soil. *Applied Soil Ecology* 112, 60-70.
- Jones, J., Savin, M. C., Rom, C. R., and Gbur, E. (2020). Soil microbial and nutrient responses over seven years of organic apple orchard maturation. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 118, 23-38.
- Kader, M. A., Senge, M., Mojid, M. A., and Ito, K. (2017). Recent advances in mulching materials and methods for modifying soil environment. *Soil & Tillage Research* 168, 155-166.
- Kalcsits, L., Lotze, E., Tagliavini, M., Hannam, K. D., Mimmo, T., Neilsen, D., Neilsen, G., Atkinson, D., Casagrande Biasuz, E., Borruso, L., Cesco, S., Fallahi, E., Pii, Y., and Valverdi, N. A. (2020). Recent Achievements and New Research Opportunities for Optimizing Macronutrient Availability, Acquisition, and Distribution for Perennial Fruit Crops. *Agronomy* 10, 1738.
- Karlen, D.L., M.J. Mausbach, J.W. Doran, R.G. Cline, R.F. Harris and G.E. Schuman. (1997). Soil quality: A concept, definition and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal* 61: 4-10.
- Khatami, S., Deng, Y., Tien, M., and Hatcher, P. G. (2019). Lignin Contribution to Aliphatic Constituents of Humic Acids through Fungal Degradation. *Journal of Environmental Quality* 48, 1565-1570.
- Liu, Y., Gao, M., Wu, W., Tanveer, S. K., Wen, X., and Liao, Y. (2013). The effects of conservation tillage practices on the soil water-holding capacity of a non-irrigated apple orchard in the Loess Plateau, China. *Soil and Tillage Research* 130, 7-12.

- Mathews, C. R., Bottrell, D. G., and Brown, M. W. (2002). A comparison of conventional and alternative understory management practices for apple production: multi-trophic effects. *Applied Soil Ecology* 21, 221-231.
- Mays, N., Brye, K. R., Rom, C. R., Savin, M., and Garcia, M. E. (2014). Groundcover Management and Nutrient Source Effects on Soil Carbon and Nitrogen Sequestration in an Organically Managed Apple Orchard in the Ozark Highlands. *Hortscience* 49, 637-644.
- Mays, N., Rom, C. R., Brye, K. R., Savin, M. C., and Garcia, M. E. (2015). Groundcover Management System and Nutrient Source Impacts on Soil Quality Indicators in an Organically Managed Apple (*Malus X domestica* Borkh.) Orchard in the Ozark Highlands. *Hortscience* 50, 295-303.
- Merwin, I. A., Ray, J. A., and Curtis, P. D. (1999). Orchard groundcover management systems affect meadow vole populations and damage to apple trees. *Hortscience* 34, 271-274.
- Merwin, I. A., Ray, J. A., Steenhuis, T. S., and Boll, J. (1996). Groundcover management systems influence fungicide and nitrate-N concentrations in leachate and runoff from a New York apple orchard. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 121, 249-257.
- Merwin, I. A., and Stiles, W. C. (1994). ORCHARD GROUNDCOVER MANAGEMENT IMPACTS ON APPLE TREE GROWTH AND YIELD, AND NUTRIENT AVAILABILITY AND UPTAKE. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 119, 209-215.
- Merwin, I. A., Stiles, W. C., and Vanes, H. M. (1994). ORCHARD GROUNDCOVER MANAGEMENT IMPACTS ON SOIL PHYSICAL-PROPERTIES. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 119, 216-222.
- Mia, M. J., Massetani, F., Murri, G., and Neri, D. (2020). Sustainable alternatives to chemicals for weed control in the orchard – a Review *Horticultural Science* 47, 1-12.
- Midwood, A. J., Hannam, K. D., Forge, T. A., Neilsen, D., Emde, D., and Jones, M. D. (2020). Importance of drive-row vegetation for soil carbon storage in woody perennial crops: A regional study. *Geoderma* 377, 114591.
- Miñarro, M., Espadaler, X., Melero, V. X., and Suárez-Álvarez, V. (2009). Organic versus conventional management in an apple orchard: effects of fertilization and tree-row management on ground-dwelling predaceous arthropods. *Agricultural and Forest Entomology* 11, 133-142.
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). (2015). Monographie de l'industrie de la pomme au Québec. MAPAQ, Québec, QC. Disponible depuis : <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/pommemonographie.pdf> (consulté le 31 mars 2020)
- Mullinix, K., and Granatstein, D. (2011). Potential Nitrogen Contributions from Legumes in Pacific Northwest Apple Orchards. *International Journal of Fruit Science* 11, 74-87.
- Neilsen, G., Forge, T., Angers, D., Neilsen, D., and Hogue, E. (2014). Suitable orchard floor management strategies in organic apple orchards that augment soil organic matter and maintain tree performance. *Plant and Soil* 378, 325-335.
- Neilsen, G. H., and Hogue, E. J. (2000). Comparison of white clover and mixed sodgrass as orchard floor vegetation. *Canadian Journal of Plant Science* 80, 617-622.
- Neilsen, G. H., Hogue, E. J., Forge, T., and Neilsen, D. (2003a). Mulches and biosolids affect vigor, yield and leaf nutrition of fertigated high density apple. *Hortscience* 38, 41-45.
- Neilsen, G. H., Hogue, E. J., Forge, T., and Neilsen, D. (2003b). Surface application of mulches and biosolids affect orchard soil properties after 7 years. *Canadian Journal of Soil Science* 83, 131-137.

- Neilsen, G. H., Hogue, E. J., Forge, T., Neilsen, D., and Kuchta, S. (2007). Nutritional implications of biosolids and paper mulch applications in high density apple orchards. *Canadian Journal of Plant Science* 87, 551-558.
- Oliveira, M. T., and Merwin, I. A. (2001). Soil physical conditions in a New York orchard after eight years under different groundcover management systems. *Plant and Soil* 234, 233-237.
- Rom, C. R., Garcia, M. E., McAfee, J., Friedrich, H., Choi, H. S., Johnson, D. T., Popp, J., and Savin, M. (2010). The Effects of Groundcover Management and Nutrient Source during Organic Orchard Establishment. In "Organic Fruit Conference" (R. K. Prange and S. D. Bishop, eds.), Vol. 873, pp. 105-113.
- Ros, G. H., Temminghoff, E. J. M., and Hoffland, E. (2011). Nitrogen mineralization: a review and meta-analysis of the predictive value of soil tests. *European Journal of Soil Science* 62, 162-173.
- Sánchez, E. E., Giayetto, A., Cichón, L., Fernández, D., Aruani, M. C., and Curetti, M. (2007). Cover crops influence soil properties and tree performance in an organic apple (*Malus domestica* Borkh) orchard in northern Patagonia. *Plant and Soil* 292, 193-203.
- Sofo, A., Mininni, A. N., and Ricciuti, P. (2020). Soil Macrofauna: A key Factor for Increasing Soil Fertility and Promoting Sustainable Soil Use in Fruit Orchard Agrosystems. *Agronomy* 10, 456.
- St. Laurent, A., Merwin, I. A., and Thies, J. E. (2008). Long-term orchard groundcover management systems affect soil microbial communities and apple replant disease severity. *Plant and Soil* 304, 209-225.
- Stefanelli, D., Zoppolo, R. J., Perry, R. L., and Weibel, F. (2009). Organic Orchard Floor Management Systems for Apple Effect on Rootstock Performance in the Midwestern United States. *Hortscience* 44, 263-267.
- Stobbe, P.C. et McKibbin, R.R. (1938). Les sols à verger de la province de Québec. Deuxième rapport du Comité d'enquête sur les sols du Québec. Gouvernement du Canada, Ottawa, Canada. Disponible depuis : <https://sis.agr.gc.ca/siscan/publications/surveys/pq/pq62/index.html> (consulté le 17 mars 2021)
- TerAvest, D., Smith, J. L., Carpenter-Boggs, L., Granatstein, D., Hoagland, L., and Reganold, J. P. (2011). Soil Carbon Pools, Nitrogen Supply, and Tree Performance under Several Groundcovers and Compost Rates in a Newly Planted Apple Orchard. *Hortscience* 46, 1687-1694.
- TerAvest, D., Smith, J. L., Carpenter-Boggs, L., Hoagland, L., Granatstein, D., and Reganold, J. P. (2010). Influence of Orchard Floor Management and Compost Application Timing on Nitrogen Partitioning in Apple Trees. *Hortscience* 45, 637-642.
- USDA. (2020). Noncitrus Fruits and Nuts 2019 Summary. Unites States Departement of Agriculture, National Agricultural Statistics Service, WA, USA. Available from : <https://downloads.usda.library.cornell.edu/usda-esmis/files/zs25x846c/0g3551329/qj72pt50f/ncit0520.pdf> (accessed march 31, 2021)
- Walsh, B. D., MacKenzie, A. F., and Buszard, D. J. (1996a). Soil nitrate levels as influenced by apple orchard floor management systems. *Canadian Journal of Soil Science* 76, 343-349.
- Walsh, B. D., Salmins, S., Buszard, D. J., and MacKenzie, A. F. (1996b). Impact of soil management systems on organic dwarf apple orchards and soil aggregate stability, bulk density, temperature and water content. *Canadian Journal of Soil Science* 76, 203-209.
- Wiman, M. R., Kirby, E. M., Granatstein, D. M., and Sullivan, T. P. (2009). Cover Crops Influence Meadow Vole Presence in Organic Orchards. *Horttechnology* 19, 558-562.

- Yao, S., Merwin, I. A., Bird, G. W., Abawi, G. S., and Thies, J. E. (2005). Orchard floor management practices that maintain vegetative or biomass groundcover stimulate soil microbial activity and alter soil microbial community composition. *Plant and Soil* 271, 377-389.
- Yao, S. R., Merwin, I. A., and Brown, M. G. (2009). Apple Root Growth, Turnover, and Distribution Under Different Orchard Groundcover Management Systems. *Hortscience* 44, 168-175.
- Yelle, P.E. (2020). Apports en éléments nutritifs. Fiche 37. Guide de référence en production fruitière intégrée 2020. Disponible depuis : <https://reseauommier.irda.qc.ca/?p=5941> (consulté le 13 mars 2020)

7. ANNEXE

Tableau A1. Résumé de la méthodologie des différentes études analysées

Auteurs, date	Pays	Durée (ans)	Pommier	Type de sol	Témoin	Traitements	Taux d'application
Neilsen et al., 2003; Neilsen et al, 2003b; Forge et al., 2003	Canada (B.-C.)	7	spartan (M9)	Loam sablo-graveleux	herbicide (glyphosate)	Paillis de papier déchiqueté	12 t/ha initial et 4t/ha/années additionnels
						Paillis de paille de luzerne	24 t/ha initial et 12/ha/années additionnels
Neilsen et al., 2007; Forge et al., 2008	Canada (B.-C.)	6	Golden Delicious (M9)	Loam sablo-graveleux	herbicide (glyphosate)	Paillis de papier déchiqueté	15 kg/parcelle initial et 5kg/parcelle/ an
Neilsen et al., 2014	Canada (B.-C.)	6	Ambrosia (B9)	Loam limoneux	paillis de plastique noir	Paillis de luzerne (tondu-et soufflé)	luzerne coupée 3x durant la saison
						Paillis de bois (conifères) et résidus de tonte de couvre sol	10 cm d'épaisseur, couvre-sol tondu 3x/saison
Eissenstat et al., 2018	Canada (B.-C.)	3	Gala (M9)	Sable loameux	herbicide	Paillis de copeaux de bois (résidus forestiers non spécifiés)	10 cm d'épaisseur, renouvelé annuellement
Forge et al., 2013	Canada (B.-C.)	5	Braeburn (M9)	Sable loameux très fin	pas paillis ni amendement	Paillis de paille de luzerne	50 t/ha
						Paillis de fumier de bovin laitier composté	45 t/ha/3 ans
Walsh et al., 1996; Walsh, 1996b	Canada (Qc)	3	différents cultivars (M26 et M9)	Loam et loam argileux	rotoculté (5 à 10 cm) et désherbé à la main	Paillis de fumier composté	An 1: entre 35 et 70 m ³ /ha An 2 : entre 30 et 60 m ³ /ha
						Paillis de paille	10 à 15 cm d'épaisseur (2,5 kg/m ²)
Granatstein and Mullinix, 2008	É.-U. (WA)	4 *	Red Delicious (M26)	Loam sableux fin	sol nu	Paillis de copeaux de bois (résidus de jardin, essence mixtes)	10 cm d'épaisseur (88,2 kg/m ²), renouvelé la 3 ^e année
						Paillis de papier déchiqueté	10 cm d'épaisseur, renouvelé annuellement
		3 **	Gala (M26)	N/A	herbicide (glyphosate)	Paillis de copeaux de bois	10 cm d'épaisseur
Granatstein et al., 2010	É.-U. (WA)	3	Gala (M26) de 8 ans	Loam sableux fin	Rotoculté (WonderWeeder 3x/saison)	Paillis de copeaux de bois	15 cm d'épaisseur, réappliqué tous les 2 ans

TerAvest et al., 2010; TerAvest 2011	É.-U. (WA)	3	Pinata (M7)	Loam sableux	Rotoculté (WonderWeeder 4x/saison)	Paillis de copeaux de bois (mix conifères et feuillus)	15 cm d'épaisseur, renouvelé chaque printemps
Merwin and Stiles, 1994; Merwin et al., 1994	É.-U. (NY)	6	Empire et Jonagold (MM111)	loam limono- argileux	herbicide (glyphosate)	Paillis de paille de foin	15 cm d'épaisseur (30kg/arbre) renouvelé chaque printemps
Oliveira and Merwin, 2001	É.-U. (NY)	8	Empire (M9/MM111)	loam limono- argileux	herbicide (glyphosate)	Paillis de copeaux de bois (écorces de feuillus compostés)	10 cm d'épaisseur appliqué à tous les 2 à 3 ans. (162 kg/m ²)
Yao et al., 2005		12					
St. Laurent et al., 2008		14					
Atucha et al., 2011		16					
Rom et al., 2010; Choi and Rom, 2011; Choi et al, 2011	É.-U. (AR)	3	Enterprise (M26)	Loam loameux	Gazon tondu-et soufflé	Paillis de copeaux de bois (résidus de feuillus d'égagage municipal)	8 à 12 cm d'épaisseur appliqué en avril annuellement
						Paillis de compost municipal	8 à 12 cm d'épaisseur appliqué en avril annuellement
						Paillis de papier déchiqueté	8 à 12 cm d'épaisseur appliqué en avril annuellement
Mays et al., 2014; Mays et al., 2015	É.-U. (AR)	6	Enterprise (M26)	Loam loameux	Gazon tondu-et soufflé	Paillis de copeaux de bois (résidus de feuillus d'égagage municipal)	environ 10 cm d'épaisseur appliqué en avril annuellement
						Paillis de compost municipal	environ 10 cm d'épaisseur appliqué en avril annuellement
						Paillis de papier déchiqueté	environ 10 cm d'épaisseur appliqué en avril annuellement
Jones et al., 2017; Jones et al., 2020	É.-U. (AR)	7	Enterprise (M26)	Loam loameux	Gazon tondu-et soufflé	Paillis de copeaux de bois (résidus de feuillus d'égagage municipal)	environ 10 cm d'épaisseur appliqué en avril annuellement
						Paillis de compost municipal	environ 10 cm d'épaisseur appliqué en avril annuellement
						Paillis de papier déchiqueté	environ 10 cm d'épaisseur appliqué en avril annuellement
Stefanelli et al., 2009	É.-U. (MI)	6	Pacific Gala (M9, M9RN29, Supporter4)	Loam sabro- argileux	Pyrodés herbage (<i>flaming</i>)	Paillis de paille de luzerne (ratio 15:1)	15 à 20 cm d'épaisseur (environ 115 bales rondes/ha/année)
Mathew et al., 2002	É.-U. (WV)	1	Golen Supreme (M9)	N/A	herbicide (paraquat)	Paillis de compost (fumier de poulet et copeaux de bois)	8 cm

*arbres âgés de 4 ans au début de l'étude **arbres âgés de 3 ans au début de l'étude

Tableau A2. Effets des paillis de **papier** sur les performances agronomiques des pommiers ainsi que les propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol

Auteurs, date	Variables mesurées et résultats																					
	Rendement	Croissance	M.O.	C	N	P	K	Mg	Ca	pH	CEC	CE	M/V	Porosité	Stabilité des agrégats	Taux d'infiltration	Ksat	Capacité de rétention en eau (θ max)	Humidité	Température	Abondance	Biodiversité
Neilsen et al., 2003; Neilsen et al, 2003b; Forge et al., 2003	↑	↑	-	-	-	-	-	-	↑	↑	-	↑	-	-	-	-	-	-	-	-	↑	↑
Neilsen et al., 2007; Forge et al., 2009	↑	↑	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Granatstein and Mullinix, 2008	-	↑	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	↑	-	-	-	↓	-	-
Rom et al., 2010; Choi and Rom, 2011; Choi et al, 2011	-	-	-	-	-	-	-	-	↑	-	-	-	-	-	-	-	-	-	↑	↓	-	-
Mays et al., 2014; Mays et al., 2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	↑	↑	-	-	-	-	-	-
Jones et al., 2017; Jones et al., 2020	-	-	-	↑	-	-	-	-	-	↑	-	-	-	-	-	-	-	-	-	↓	-	-

Tableau A3. Effets des paillis de **paille** sur les performances agronomiques des pommiers ainsi que les propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol

Auteurs, date	Variables mesurées et résultats																						
	Rendement	Croissance	M.O.	C	N	P	K	Mg	Ca	pH	CEC	CE	M/V	Porosité	Stabilité des agrégats	Taux d'infiltration	Ksat	Capacité de rétention en eau (θ max)	Humidité	Température	Abondance	Diversité	
Neilsen et al., 2003; Neilsen et al, 2003b; Forge et al., 2003	↑	-		↑	↑	-	↑	-	-	-	-	↑	-		-	↑		-			↑	↓	
Neilsen et al., 2014	-	-	↑	-	↑	-	↑														↑		
Forge et al., 2013	↑	↑	↑		↑	↑	↑	-	-	-											↑	-	
Walsh et al., 1996; Walsh, 1996b		-			-	-	↑	-	-				-		-					↑	↓		
Granatstein and Mullinix, 2008	↑	↑	-										-			-					↓	↑	
Merwin and Stiles, 1994; Merwin et al., 1994	-	↑	↑		-	↑	↑	-	-	-			-	-			↓	↓		↑	↓		
Stefanelli et al.	-	-																		↑			

Tableau A4. Effets des paillis de **compost** sur les performances agronomiques des pommiers ainsi que les propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol

Auteurs, date	Variables mesurées et résultats																						
	Rendement	Croissance	M.O.	C	N	P	K	Mg	Ca	pH	CEC	CE	M/V	Porosité	Stabilité des agrégats	Taux d'infiltration	Ksat	Capacité de rétention en eau (θ max)	Humidité	Température	Abondance	Diversité	
Forge et al., 2013	-	-	↑		↑	↑	↑	↑	↑	↑		↑										-	-
Walsh et al., 1996; Walsh, 1996b		-			↑	↑	↑	-	-				-		-					-	↓		
Rom et al., 2010; Choi and Rom, 2011; Choi et al, 2011		↑	↑		↑	↑	↑	↑	↑	-										-	-		
Mays et al., 2014; Mays et al., 2015			↑	↑	↑								↓		↑	-	↑			↑			
Jones et al., 2017; Jones et al., 2020			↑	↑	↑					-		↑								-	↓	↑	↑
Mathew et al.		↑																		-	↓	↑	↑

Tableau A5. Effets des paillis de copeaux de bois sur les performances agronomiques des pommiers ainsi que les propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol

Auteurs, date	Variables mesurées et résultats																					
	rendement	croissance	OM%	C	N	P	K	Mg	Ca	pH	CEC	CE	M/V	Porosité	Stabilité des agrégats (%)	Taux d'infiltration	Ksat	Capacité de rétention en eau (θ max)	Humidité	Température	Abondance	Diversité
Neilsen et al., 2014	-	↑	↑	↑	↑	-	↑														↑	
Eissenstat et al., 2018	↑	-																		↑		
Granatstein and Mullinix, 2008	-	↑	-										-			-			↑	↓	↑	
Granatstein et al., 2010	-	↑		-																		
TerAvest et al., 2010; TerAvest 2011	-	↑		↑	-																↑	
Oliveira and Merwin, 2001													↓	↑		-	↑					
Yao et al., 2005	-	-	↑		↑	↑	-	-	↑	↑	↑										↑	-
St. Laurent et al., 2008			↑			↑	↑	↓	↑	-									↑		↑	-
Atucha et al., 2011	-	↑	↑	↑	↑	↑	-	-	↑	↑												
Rom et al., 2010; Choi and Rom, 2011; Choi et al, 2011		↑	-		-	-	↑	↑	-	-									-	-		
Mays et al., 2014; Mays et al., 2015			↑	-	↑								↓		-	-	-		-			
Jones et al., 2017; Jones et al., 2020			↑	↑	↑					-		↑							-	↓	↑	↑

