



Université de Montpellier  
&  
Montpellier SupAgro

**Master** Sciences et Technologies  
**Mention** *Biodiversité Ecologie Evolution*  
**Parcours** « EcoSystèmeS »

Projet de Recherche :

**EFFETS DE LA SCARIFICATION SUR LA QUALITE  
PHYSIQUE ET BIOLOGIQUE DES SOLS EN VERGERS DE  
POMMIERS ET PECHERS**

Par

**CAPPEAU Benoit**

Stage de Master 2

Réalisé sous la direction de

**M. CAPOWIEZ Yvan**

Chargé de Recherche

INRA PACA

Unité EMMAH



## **Remerciements**

Je tiens tout particulièrement à remercier M. Yvan Capowiez pour son encadrement autant que pour sa bonne humeur, sa disponibilité et sa patience.

Je souhaiterais également remercier M<sup>me</sup> Line Capowiez et M<sup>me</sup> Magali Rault qui m'ont été d'une grande aide pour certaines expérimentations.

Enfin je souhaiterais également remercier mes collègues stagiaires notamment Cécile Serbource, Elodie Treillet et Adrien de Heaulme qui m'ont permis de clore ce stage dans la bonne humeur.

## Sommaire

<b>Remerciements .....</b>	<b>- 2 -</b>
<b>Sommaire .....</b>	<b>- 3 -</b>
<b>1. Introduction.....</b>	<b>- 4 -</b>
<b>2. Matériels et méthodes .....</b>	<b>- 6 -</b>
A) Sites d'étude et design expérimental.....	- 6 -
B) Mesures de l'effet de la scarification sur la qualité physique du sol : densité apparente et humidité.....	- 7 -
C) Mesures de l'abondance et de la biomasse en vers de terre.....	- 8 -
D) Mesures de l'activité microbienne globale et détermination de son profil catabolique .....	- 9 -
i) Préparation des plaques de détection .....	- 10 -
ii) Choix et préparation des substrats carbonés .....	- 10 -
E) Analyses statistiques.....	- 10 -
<b>3. Résultats.....</b>	<b>- 12 -</b>
<b>4. Discussion .....</b>	<b>- 14 -</b>
A) Effets supposés directs .....	- 16 -
<i>Humidité</i> .....	- 16 -
<i>Biomasse microbienne</i> .....	- 16 -
B) Effets supposés indirects.....	- 17 -
<b>5. Conclusion .....</b>	<b>- 17 -</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>- 21 -</b>

## **1. Introduction**

Pendant très longtemps, le sol n'a pas occupé une place importante en arboriculture : on le voyait comme un simple support de culture, en particulier les vergers de pommiers qui sont généralement implantés sur des sols riches et profonds. Avec le développement progressif de l'agro-écologie et de la vision holistique qui la sous-tend, cette situation évolue. L'observation dans certains sols de certaines conséquences négatives pour la croissance des arbres a également été des éléments importants ayant alimenté ce changement de vision en arboriculture.

Certains vergers de pommiers et de pêchers présentent des sols qui tendent à être de plus en plus tassés au sein de leurs inter-rangs, cela étant accentué par un nombre important de passages d'engins (Soane et van Ouwerkerk, 1994 ; Horn et al., 2000) souvent associé à des indices de fréquence de traitements (IFT) très importants pour ces cultures (entre 25 et 30) (Sauphanor et al., 2009; Marliac et al., 2015). Ce tassement est plus ou moins variable, dépendant notamment de la texture des sols, des conditions climatiques, de la fréquence de passage des engins (Hansen et Engelstad, 1999) ainsi que des propriétés de ces engins (poids, surface d'appui des roues, ...). Il affecte généralement les propriétés physiques du sol en augmentant sa densité et en modifiant la distribution, la proportion relative d'eau et d'air et la connectivité des pores (Richard et al., 2001 ; Pagliai et al., 2003, 2004 ; Schäffer et al., 2008). A ce tassement du sol s'ajoute d'autres pratiques éventuelles sur le rang (utilisation d'herbicides, labour, bâchage, ...) qui conduisent à des modifications variables des propriétés physiques du sol (densité, structure des horizons, ...). Ces modifications physiques peuvent avoir des conséquences sur la biologie du sol au sens large en affectant l'activité de la microflore, de la faune et de la flore (Chan, 2001 ; Chan & Barchia, 2007, Moos et al., 2016).

Face à ces différents problèmes liés aux sols tassés, certains producteurs ont adopté depuis peu une nouvelle technique de travail du sol des inter-rangs : la scarification. Celle-ci consiste en une perforation de l'horizon supérieur du sol sans retournement. Les producteurs l'ayant pratiqué ont relevé comme principal effet une meilleure infiltration d'eau dans le sol sans destruction du couvert végétal. Cela est notamment observable en sols très lourds dans lesquels l'eau s'infiltrait difficilement et stagne en surface. Le but est de rompre la « couche d'imperméabilité » et de permettre une meilleure infiltration vers les horizons les plus profonds. De plus elle pourrait permettre une meilleure aération du sol et un apport plus important d'oxygène aux organismes endogés.

Mais cette technique reste aujourd'hui peu utilisée, cette faible utilisation pouvant être expliquée par une connaissance peu approfondie des réels effets qu'elle peut avoir sur les propriétés physiques et biologiques du sol. Une étude en sol forestier a tout de même montré qu'une technique similaire permettait de régénérer jusqu'à 90% du couvert végétal et d'ainsi lever le blocage provoqué par la compétition interspécifique (Dassot et al., 2017).

Ces lacunes concernent le monde arboricole mais également le monde scientifique, peu de références étant aujourd'hui consultables concernant cette technique qui a été très peu étudiée depuis sa mise sur le marché. De plus, un frein potentiel à son expansion est que cette technique nécessite l'achat d'un scarificateur qui peut s'avérer couteux ainsi que l'utilisation supplémentaire d'énergie fossile et de temps.

Or de plus en plus d'études en grandes cultures tendent à montrer qu'un lien peut exister entre la modification des propriétés physiques des sols induite par leur tassement, la réduction observable de leur activité biologique voire plusieurs problèmes rencontrés tels que des diminutions de rendement ou de résistances des cultures. Certaines d'entre elles ont montré que la biomasse et l'abondance de la faune du sol étaient considérablement réduites en sols tassés (Schrader et Lingnau, 1997 ; Röhrig et al., 1998 ; Langmaack, 1999). Ces effets peuvent parfois être expliqués par la modification directe des habitats des organismes ainsi que par une modification indirecte de la disponibilité en ressources essentielles à leur activité tels que l'oxygène, l'eau, les matières organiques... Ils sont notamment observables chez les organismes fouisseurs tels que les vers de terre, qui ont la particularité de creuser des galeries et d'être ainsi très dépendants de la structure du sol. En effet, ces derniers voient le creusement de leurs galeries entravé par des sols trop tassés (Kretzschmar, 1991). Sochtig et Larink (1992) montrent ainsi une relation inverse entre le degré de tassement et la biomasse et l'activité des vers de terre *Aporrectodea caliginosa* et *A. rosea* dans des cultures de blé et d'orge, et un résultat similaire en laboratoire pour *A. caliginosa*. En outre, même si l'abondance en vers de terre reste la même, leur activité peut être réduite.

Pourtant, à l'inverse, des ingénieurs écologiques tels que les vers de terre sont capables, avec le temps, de compenser en partie les effets négatifs causés par le tassement du sol. Lorsque leur population s'accroît suffisamment, les vers de terre déclenchent des processus de régénération de la structure du sol par une augmentation de leur activité excavatrice, qui conduisent à la formation de nouveaux systèmes de macropores et d'agrégats de sols (Larink et Schrader, 2000). Récemment, Capowiez et al. (2009) ont travaillé sur les traces de roues et les semelles de labour et ont montré que les vers de terre peuvent significativement contribuer à la régénération de ces zones tassées. Ils permettent notamment une meilleure infiltration d'eau par leurs galeries (Bastardie et al., 2005), et ils sont bénéfiques pour les agro-écosystèmes par leur amélioration de la structure du sol et le cycle des nutriments (Edwards et Bohlen, 1996).

L'objectif de la présente étude est d'obtenir des données quantitative concernant l'effet de la scarification à court-terme sur la qualité physique et biologique des sols en vergers de pommiers et de pêchers afin de pouvoir compléter les résultats agronomiques, non publiés, obtenus précédemment par le GRCETA de Basse Durance. Elle pose la question de savoir si la scarification du sol permet de restaurer les communautés d'organismes présents dans le sol et les fonctions écosystémiques associées, et d'établir un lien entre les observations faites et la qualité physique du sol.

L'hypothèse principale est que la scarification peut avoir des effets directs et indirects sur la qualité physique et biologique du sol. Afin de tester cette hypothèse plusieurs indicateurs ont été utilisés, qui concernent autant la qualité physique du sol (densité apparente, humidité) que sa qualité biologique (abondance et activité des vers de terre, activité microbienne). Ceux-ci permettront de tester les effets directs, mais également les effets indirects. Les effets directs pourraient concerner le profil d'humidité, la scarification pouvant permettre une meilleure infiltration d'eau dès sa mise en pratique. L'activité microbienne du sol pourrait également être rapidement affectée, celle-ci étant généralement très réactive aux perturbations et étant un bon indicateur de la qualité physique des sols (Bérard et al., 2014). Les effets indirects pourraient concerner la composition spécifique en vers de terre, leur abondance et leur activité, de même que la densité apparente. En effet la scarification ne constitue probablement pas une perturbation suffisante pour directement affecter

l'abondance en vers de terre comme cela peut être le cas pour du labour par exemple (Chan, 2004 ; Low, 1972 ; Moos et al., 2016). Nous pouvons cependant supposer qu'à plus long terme, après des cycles de dessiccation-rehumectation par exemple, celle-ci pourra être améliorée, les conditions d'habitat du sol devenant plus favorables (gradient d'humidité moins important, densité plus faible). Quant à la densité apparente, elle pourrait être indirectement impactée par une infiltration d'eau et d'air plus importante, mais surtout par une abondance et une activité des vers de terre plus importante.

Le but étant dans un premiers temps d'étudier les effets à court-terme (quelques mois) de la technique, nous avons commencé par établir un plan expérimental, définissant des zones scarifiées (2) et non scarifiées (2), dans 3 vergers chez des producteurs partenaires qui ne l'avaient encore jamais utilisée. Plusieurs mesures ont ensuite été réalisées avant le passage du scarificateur, permettant d'obtenir un second type de données témoin (temporel) : les vers de terre ont été échantillonnés, identifiés et pesés ; les densités apparentes du sol ont été mesurées ; et l'activité microbienne a été évaluée par méthode Microresp™. Peu de temps après le passage du scarificateur toutes ces mesures ont été de nouveau effectuées et nous avons également établi des profils d'humidité. Les quatre « traitements » étudiés pour l'ensemble des paramètres à l'exception des profils d'humidité sont ainsi : avant la scarification ; après la scarification ; avant la « non-scarification » ; après la « non-scarification ». L'ensemble de ces mesures nous permet ainsi d'étudier l'effet immédiat de la technique sur la qualité physique et biologique du sol et d'interroger son rôle dans le recouvrement des communautés d'organismes et des fonctions écosystémiques associées.

## **2. Matériels et méthodes**

### **A) Sites d'étude et design expérimental**

Les expérimentations ont été faites en partenariat avec le GRCETA de Basse Durance. Celle-ci nous a mis en relation avec deux producteurs, un producteur de pommes et de pêches et un producteur de pommes, qui viennent tous deux d'acquérir un scarificateur.

Le scarificateur fonctionne par perforation de l'horizon supérieur du sol à l'aide de couteaux biseautés positionnés hélicoïdalement et disposés en quinconce sur des entretoises séparées de 18 cm (dans le cas d'Actiflore d'Actisol™). Ceux-ci créent ainsi des points (environ 12 points au m<sup>2</sup>) d'environ 12 cm de profondeur, 10 cm de longueur, et 2 cm de largeur, et produisent un léger soulèvement du sol creusé.

Le premier producteur se situe dans la commune de Rognonas, dans les Bouches-du-Rhône. Sa parcelle de pommes s'étend sur une surface d'un peu moins d'un hectare (0,9 Ha). L'arrosage y est effectué par microjet et par gravité. Sa parcelle de pêches s'étend sur une surface d'environ 0,8 Ha et l'irrigation y est effectuée par microjet. Le scarificateur utilisé par ce producteur a été conçu artisanalement d'après le modèle Actiflore d'Actisol™. Il fait 2,5 mètres de largeur totale (2,3 mètres de largeur de travail), il possède 4 dents par

rouleau, chaque rouleau étant séparé de 15 cm. Chaque dent a une profondeur de travail (longueur entrant dans le sol) de 12 cm.

Le second producteur se situe dans la commune de Saint-Rémy-de-Provence, également dans les Bouches-du-Rhône. Sa parcelle de pommes s'étend sur une surface d'environ 1 hectare et l'irrigation y est effectuée goutte à goutte. Ce producteur utilise un scarificateur Actiflore d'Actisol™, qui possède 16 rouleaux de 3 dents, et dont la largeur totale est de 3 mètres. Chaque dent possède également une profondeur de travail d'environ 12 cm.

Après avoir discuté avec les producteurs nous avons pu établir un plan de scarification et d'expérimentation pour chaque verger. Celui-ci comprend des zones à scarifier (2) et des zones à ne pas scarifier (2) en alternance, permettant d'avoir des données concernant la scarification et des données témoin.

Les différents facteurs utilisés dans le traitement des données concernent ainsi : la modalité de scarification (scarifié/non-scarifié), la période d'échantillonnage (avant/après scarification) et la date d'échantillonnage (dates allant de d1 à d3). L'effet bloc (les deux répétitions pour chaque traitement) est également étudié afin de détecter des tendances éventuelles.

Les premiers échantillonnages (avant la scarification), toutes expérimentations confondues et pour les trois vergers, se sont étalés du 24 Janvier 2018 au 12 février 2018.

La scarification a été effectuée le 22 février et le 6 Mars 2018.

Les échantillonnages après scarification ont été effectués du 03 Avril 2018 au 31 Avril 2018, soit environ un à deux mois après la scarification.

#### B) Mesures de l'effet de la scarification sur la qualité physique du sol : densité apparente et humidité

L'objectif est tout d'abord d'observer si la scarification peut avoir un effet sur la qualité physique du sol par l'évaluation de sa densité apparente et de profils d'humidité (les mesures d'infiltrométrie, initialement prévues, n'ont pu être menées à bien à cause d'un printemps particulièrement humide). Pour y répondre nous avons tout d'abord prélevé des cylindres de densité, nous permettant d'évaluer la densité et le taux d'humidité en fonction de la modalité de scarification. Un plan d'échantillonnage a ainsi été réalisé pour chaque verger à partir du plan de scarification. Dans le cas du verger de pommiers de Rognonas, 4 blocs de 3 inter-rangs ont été dessinés, avec une alternance d'un bloc scarifié et d'un bloc non-scarifié. Chaque inter-rang comprend 3 zones d'échantillonnage séparées de 20m. Chaque bloc est séparé d'un inter-rang dans lequel aucune mesure n'est effectuée. Nous avons ainsi prélevé un total de 36 échantillons pour ce verger. Dans le cas du verger de pêchers de Rognonas, 4 inter-rangs de 4 échantillons ont été sélectionnés, avec une alternance d'un inter-rang scarifié et d'un inter-rang non-scarifié. Cela nous fait un total de 16 échantillons pour ce verger. Enfin, dans le cas du verger de pommiers de Saint-Rémy-de-Provence, 4 blocs de 3 échantillons ont été dessinés de la même manière que dans le verger de pommiers de Rognonas, les échantillons étant également espacés de 20 mètres au sein de chaque inter-rang. Sur l'ensemble des trois vergers nous avons ainsi prélevés 88 échantillons.

La méthode utilisée, la méthode au cylindre (Blake & Hartge, 1986), consiste à placer un cylindre de volume connu (100 cm<sup>3</sup>) dans un porte-cylindre et à l'enfoncer à l'aide d'un marteau dans les 5 à 10 premiers centimètres du sol, soit juste en-dessous de son horizon supérieur. Le volume de sol ainsi prélevé est ensuite pesé, permettant d'obtenir sa pesée humide, puis placé à l'étuve à 110°C pendant 48h afin d'obtenir sa pesée sèche. Ces deux jeux de données, ajoutés au volume du cylindre, nous permettent d'obtenir le taux d'humidité du sol ainsi que la densité apparente du sol par les formules :

- $Taux\ humidité\ (\%) = \frac{Pesée\ humide\ (g) - Pesée\ sèche\ (g)}{Pesée\ sèche\ (g)} \times 100$
- $Densité\ apparente\ (g.\ cm^{-3}) = \frac{Pesée\ sèche\ (g)}{Volume\ de\ sol\ (cm^3)}$

La mesure du taux d'humidité dans les 5 à 10 premiers centimètres du sol nous permet de nous intéresser à l'horizon supérieur du sol soit à l'horizon qui touche le plus la stagnation d'eau observée en surface et liée au tassement.

En outre, nous avons également étudié le profil d'humidité des sols après la scarification afin d'observer les effets éventuels de la technique sur les gradients d'humidité dans les sols. Pour cela des transects ont été effectués au sein de quatre inter-rangs, à 10 m et 70 m pour le verger de pommiers de Rognonas, à 10 m et 90 m pour le verger de pêchers et à 5 m et 45 m pour le verger de pommiers de Saint-Rémy-de-Provence. Chaque transect mesure 50 cm de largeur et 10 échantillons sont prélevés par transect : 5 échantillons à la profondeur 5-10 cm et 5 échantillons à la profondeur 15-20 cm. Les 5 paires d'échantillons sont séparées entre elles d'environ 3 cm. Dans le cas des inter-rangs scarifiés 3 des 5 paires d'échantillons ont été réalisés en dehors des dents de scarification (entre les dents) et les deux paires restantes ont été effectuées sous la dent. Les taux d'humidité des échantillons ainsi prélevés ont été évalués de la même manière qu'avec les cylindres de densité. Les modalités étudiées concernent ainsi : le passage ou non du scarificateur ; les profondeurs ; et au sein des inter-rangs scarifiés : la présence ou non d'une dent de scarification en surface.

### C) Mesures de l'abondance et de la biomasse en vers de terre

L'objectif principal étant d'étudier les effets de la scarification sur la qualité biologique du sol et les relations que peuvent avoir ces effets avec sa qualité physique, nous avons échantillonné des organismes dont l'activité et la dynamique des populations sont très dépendants de la teneur en eau du sol et de sa structure : les vers de terre. Pour cela au niveau de chaque zone de prélèvement des cylindres de densité les vers de terre présents ont été échantillonnés. 88 zones d'échantillonnage ont ainsi été réalisées au total sur les 3 vergers. Les données ainsi récoltées concernent l'abondance et la biomasse en vers de terre.

L'échantillonnage réalisé consiste à effectuer une mini-fosse de 40 cm de largeur et 25 cm de profondeur (soit un volume d'environ 40 L), à placer ce volume dans un bac et à trier manuellement les vers de terre présents. Le tri nécessite une attention particulière dans le chevelu racinaire dans lequel un grand nombre de vers peut se cacher. Les vers sont ensuite disposés dans de l'eau froide, permettant de les conserver avant leur identification et leur pesée. Celles-ci sont réalisées en laboratoire, l'identification étant effectuée à l'aide de

la clé de Bouché (1972). Les données ainsi obtenues nous ont permis d'établir un tableur comportant les poids mesurés de chaque ver classés par espèce.

#### D) Mesures de l'activité microbienne globale et détermination de son profil catabolique

Une autre partie de l'étude concerne l'activité microbienne globale du sol ainsi que son profil catabolique, quantifiés indirectement par la quantité de CO<sub>2</sub> dégagée par les micro-organismes. L'objectif est de pouvoir étudier un indicateur biologique certainement plus réactif aux perturbations. Cette activité a été évaluée à l'aide du procédé MicroResp™ (Campbell et al., 2003) dont on a adapté le protocole. Le principe est d'introduire les échantillons étudiés dans des plaques à puits profonds en présence d'un gel de détection indicateur de pH et de différents substrats carbonés. Le carbone dégagé par respiration par les micro-organismes est alors capté par le gel et quantifié par spectrophotométrie. Cela nous permet d'évaluer la respiration basale ainsi que les profils cataboliques des différentes communautés microbiennes présentes dans le sol.

Dans un premier temps 16 échantillons de sol (correspondant à la profondeur 5-10 cm) ont été prélevés dans les vergers de pommiers de Rognonas et de Saint-Rémy-de-Provence au sein des inter-rangs latéraux des blocs définis précédemment (4 échantillons par bloc), respectivement aux distances 20 et 60 mètres et 20 et 40 mètres ; 8 échantillons ont été prélevés aux extrémités des inter-rangs du verger de pêchers de Rognonas (distances de 20 et 80 mètres). Ces échantillons ont ensuite été tamisés et leur taux d'humidité évalué.

Dans des plaques comprenant 96 puits (24 puits par échantillon dont 3 puits par substrat ; 4 échantillons par plaque), 0,45 g de sol ont été placés dans chaque puits à l'aide d'un procédé de remplissage volumétrique. Les plaques ainsi remplies ont été incubées pendant une semaine à température ambiante (environ 21°C), permettant de laisser consommer tous les substrats présents dans les échantillons. Passée cette incubation, 25 µL de différents substrats carbonés (sucres) sélectionnés ont été introduits au sein de chaque puits profonds (un substrat pour une colonne de puits) et des joints étanches ont été ajoutés, suivis d'une microplaque comportant un gel de détection. Les joints étanches, ajoutés à des presses enserrant le système, permettent d'individualiser les puits et d'étanchéifier le système. Une mesure de spectrophotométrie a été effectuée à t=0 et ce système a incubé durant 6h à l'obscurité et à température ambiante. A t=6h une nouvelle mesure de spectrophotométrie a été effectuée, permettant d'avoir les densités optiques (D.O.) initiale et finale.

L'activité microbienne a ensuite été évaluée à partir de trois sous-indicateurs : la respiration basale *i.e.* la respiration observée avec l'eau à la place du substrat, elle s'exprime en  $\mu\text{gC}_{\text{CO}_2} \cdot \text{g}_{\text{solsec}}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  ; la biomasse microbienne, qui est évaluée par la respiration induite par le glucose et est également exprimée en  $\mu\text{gC}_{\text{CO}_2} \cdot \text{g}_{\text{solsec}}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  (Anderson et Domsch, 1978) ; et le quotient métabolique microbien ou  $q_{\text{CO}_2}$  qui correspond au rapport de la respiration basale sur la biomasse microbienne et est exprimée en  $\text{mgC} \cdot \text{gC}_{\text{mic.biomass}}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  (Anderson et Domsch, 1985).

i) *Préparation des plaques de détection*

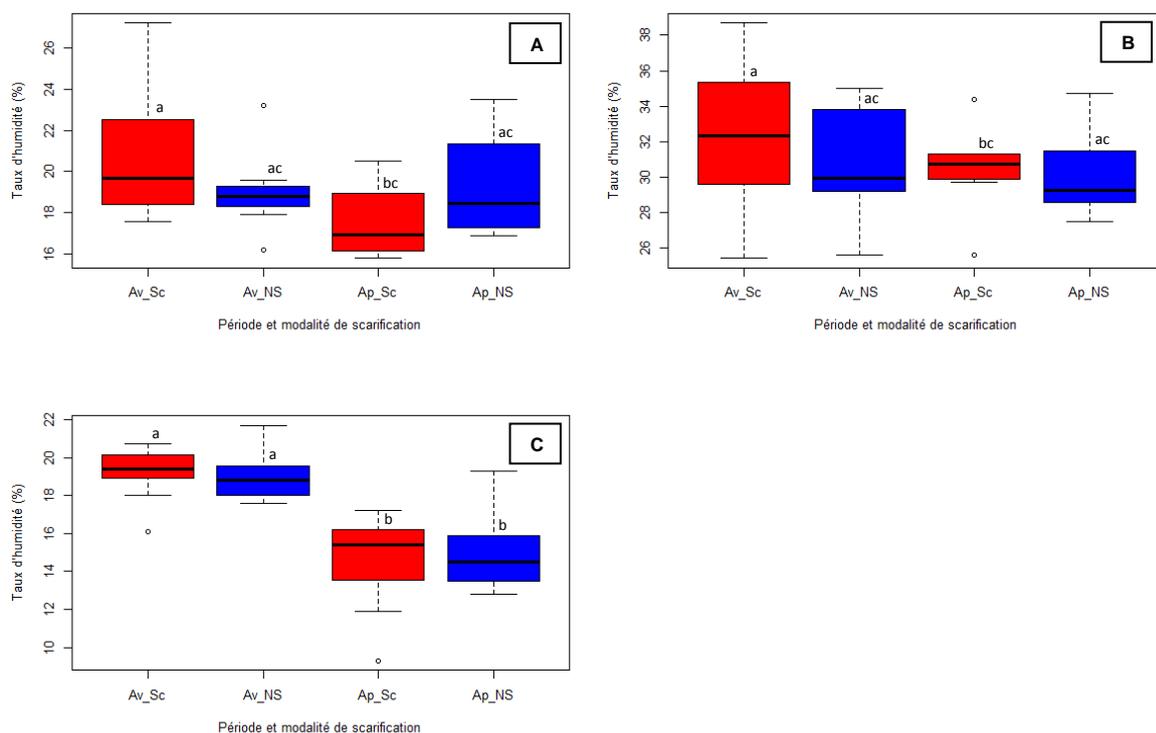
Le CO<sub>2</sub> dégagé par les micro-organismes du sol est capté par un gel de détection contenant un indicateur de pH. Ainsi, lorsque la concentration en CO<sub>2</sub> augmente le gel vire progressivement de la couleur violette à la couleur jaune et la valeur de D.O. lue au spectrophotomètre augmente. Cette réaction est basée sur l'équation  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{HCO}_3^- \rightleftharpoons 2\text{CO}_3^{2-} + 3\text{H}^+$ . Le gel utilisé est constitué d'Agar à 1%, de NaHCO<sub>3</sub> à 2,5 mM, de KCl à 150 mM et de rouge de Crésol à 12,5 µg.mL<sup>-1</sup>. Les microplaques ainsi préparées ont été conservées une semaine avec de la chaux sodée afin d'éliminer tout le CO<sub>2</sub> atmosphérique.

ii) *Choix et préparation des substrats carbonés*

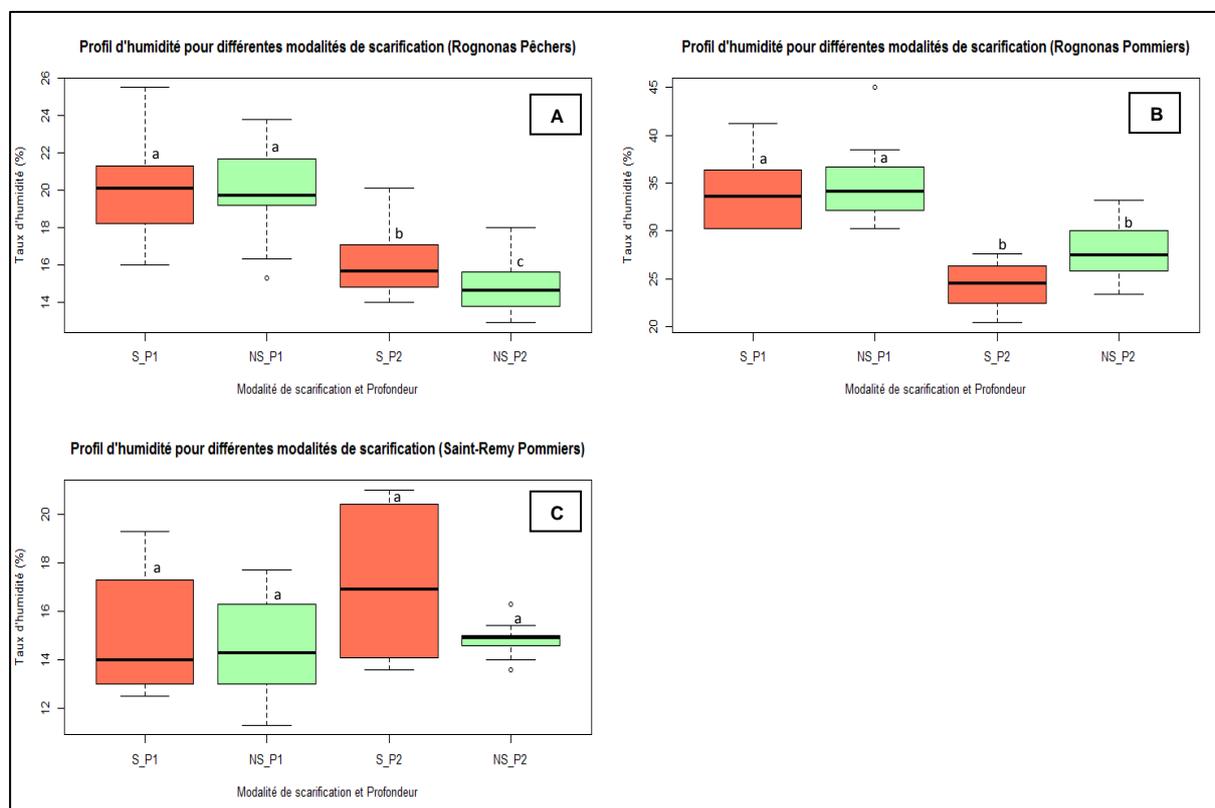
Divers éléments ont été pris en compte dans le choix des substrats carbonés, notamment leur représentativité des sucres généralement disponibles au sein des parcelles arboricoles (résidus de fruits et racines, exsudats, ...) et leur vitesse de dégradation. Le glucose étant dégradé rapidement par les micro-organismes et sa solubilité étant très élevée en milieu aqueux il est utilisé comme substrat de référence. Les autres substrats sélectionnés sont le tréhalose, le D-cellobiose, la D-glucosamine, l'Alanine, la Glycine et l'acide malique. Le tréhalose a notamment été sélectionné car il entre dans la composition de beaucoup de plantes et champignons que l'on peut trouver en verger, de même que la glucosamine qui est également présente dans la cuticule de nombreux insectes. Le choix de l'alanine et de la glycine permet de fait d'étudier également la digestion des acides aminés, constituants protéiques, par les communautés microbiennes. Enfin, l'acide malique est présent dans de nombreux organes végétaux, notamment dans les fruits. L'ensemble de ces substrats permet ainsi de couvrir un large panel de produits organiques pouvant être trouvés au sein des vergers.

E) Analyses statistiques

L'objectif étant d'étudier l'effet de la scarification sur différents indicateurs de la qualité biologique et physique du sol, nous avons effectué des Analyses en Composante Principale (ACP) afin de voir des effets sur la composition des communautés de vers de terre. Nous avons également réalisé des analyses de variances (ANOVA) avec prise en compte d'un effet bloc afin d'étudier l'effet des quatre modalités (scarifié/non scarifié, avant/après la scarification) sur l'abondance en vers de terre. Des tests Student ou Wilcoxon ont été réalisés pour l'ensemble des mesures afin de comparer les moyennes des différentes modalités étudiées, notamment les moyennes avant scarification et après scarification dans les zones scarifiées et non-scarifiées (des transformations logarithmique ont parfois été utilisées). L'effet de la scarification sera donc à apprécier en analysant les évolutions significatives avant et après scarification (en zone scarifiée) mais également en les comparant à l'évolution temporelle observée dans la zone non scarifiée (témoin). Pour les profils d'humidité, nous avons effectué les mêmes comparaisons mais en incluant le facteur profondeur. Notons que nous avons préféré utiliser des tests non appariés car les prélèvements n'ont pas été prélevés exactement au même endroit dans tous les vergers avant et après scarification.



**Figure 1 :** Taux d'humidité dans les trois vergers pour différentes modalités et périodes de scarification : A) Verger de pêchers de Rognonas ; B) Verger de pommiers de Rognonas ; C) Verger de pommiers de Saint-Rémy-de-Provence. Av\_Sc, avant la scarification en zones scarifiées ; Ap\_Sc, après la scarification en zones scarifiées ; Av\_NS, avant la scarification en zones non-scarifiées ; Ap\_NS, après la scarification. NS=témoin. Les différentes lettres dénotent des différences significatives entre les moyennes.



**Figure 2 :** Profil d'humidité pour différentes modalités de scarification. : A) Verger de pêchers de Rognonas ; B) Verger de pommiers de Rognonas ; C) Verger de pommiers de Saint-Rémy-de-Provence. S\_P1, en zones scarifiées à la profondeur 1 (5-10cm) ; NS\_P1, en zones non-scarifiées à la profondeur 1 (5-10cm) ; S\_P2, en zones scarifiées à la profondeur 2 (15-20cm); NS\_P2, en zones non-scarifiées à la profondeur 2 (15-20cm). NS=témoin. Les différentes lettres dénotent des différences significatives entre les moyennes.

### **3. Résultats**

#### *Humidité*

Les résultats obtenus concernant l'humidité montrent que l'humidité diminue significativement dans les trois vergers entre les deux dates de prélèvement, à hauteur de 15% ( $p=0.02$ ) dans le cas du verger de pêchers, à hauteur de 5% ( $p=0.005$ ) dans le cas du verger de pommiers de Rognonas, et à hauteur de 24% ( $p=0.003$ ) dans le cas du verger de pommiers de Saint-Rémy-de-Provence (Fig. 1). Cependant dans ce dernier cas le contrôle en inter-rangs non-scarifiés nous montre une diminution similaire ( $p=0.61$  entre les inter-rangs non-scarifiés et scarifiés avant la scarification et  $p=0.68$  entre les inter-rangs non-scarifiés et scarifiés après la scarification).

En s'intéressant aux profils d'humidité nous pouvons constater un gradient d'humidité plus important entre les deux profondeurs étudiées dans les inter-rangs scarifiés du verger de pêchers de Rognonas que dans ses inter-rangs non-scarifiés (Fig. 2A). En effet dans le premier cas l'humidité diminue d'environ 27% ( $p = 9.6e-06$ ) et dans le second cas l'humidité diminue d'environ 19% ( $p = 0.0007$ ).

Ce résultat n'est cependant pas observable dans les deux autres vergers (Fig. 2B, 2C). En effet, dans le cas du verger de pommiers de Rognonas les différences d'humidité entre la première et la deuxième profondeur sont similaires pour les deux modalités de scarification, et vont de 18% à 23% de diminution avec la profondeur ( $p=0.0009$  dans les inter-rangs scarifiés et  $p=0.0001$  dans les inter-rangs non-scarifiés, Fig. 2B). Ainsi la scarification n'a pas d'effet dans ce verger. Dans le cas du verger de Saint-Rémy-de-Provence aucune différence n'est observée entre les deux profondeurs que ce soit en inter-rangs scarifiés ou en inter-rangs non-scarifiés ( $p=0.07$  et  $p=0.75$  respectivement, Fig. 2C).

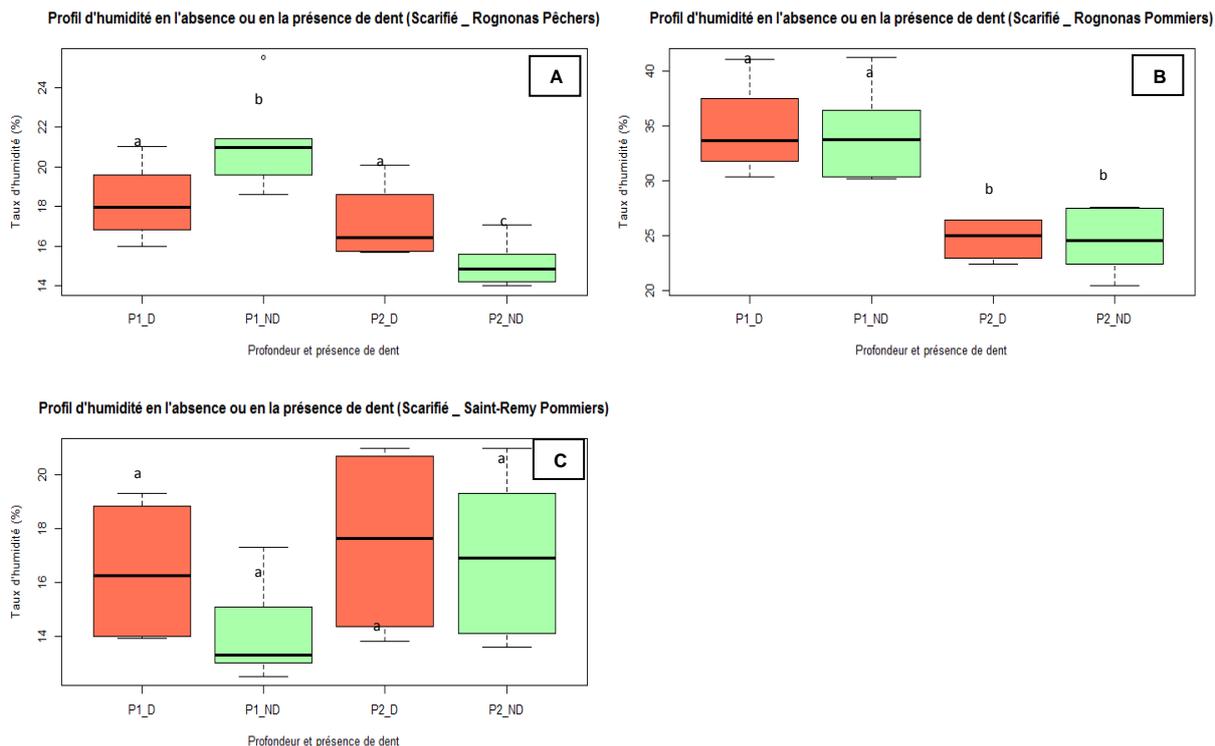
Si l'on s'attarde aux profils sous dent au sein des inter-rangs scarifiés (Fig. 3) nous pouvons constater dans le cas du verger de pêchers (Fig. 3A) qu'aucune différence n'est observée entre les deux profondeurs sous les dents alors que le taux d'humidité diminue d'environ 28% ( $p=0.0007$ ) entre ces deux mêmes profondeurs en dehors des dents. Le contrôle sans scarification montre une variation similaire sous dent et en dehors des dents lorsqu'on compare les différences ( $p=0.93$ ). Ce résultat n'est pas observé dans les deux autres vergers (Fig. 3B et 3C). Dans le cas du verger de pêchers de Saint-Rémy-de-Provence aucune différence n'est observée entre les deux profondeurs que ce soit sous les dents ou en dehors des dents ( $p=0.65$  et  $p=0.08$  respectivement).

#### *Densité apparente*

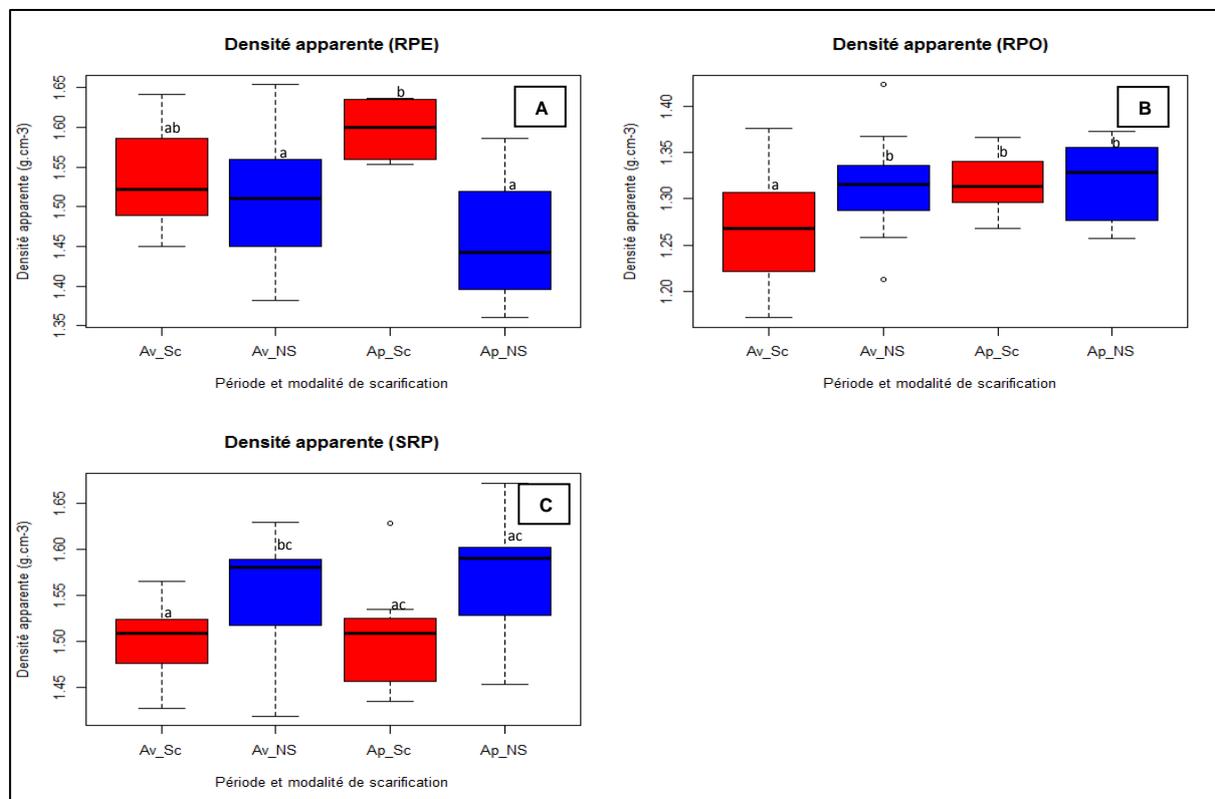
La densité apparente connaît une augmentation significative d'environ 3,4% après la scarification ( $p=0.005$ ) dans le cas du verger de pommiers de Rognonas lorsqu'on la compare au contrôle non-scarifié dont la densité apparente ne varie pas ( $p=0.79$ ), mais ce résultat n'est pas observé dans les deux autres vergers (Fig. 4).

#### *Composition spécifique des communautés de vers de terre*

Les ACPs réalisées à partir de l'abondance relative de chaque espèce montrent une variation des compositions spécifiques en vers de terre selon le facteur « période de



**Figure 3 : Profil d'humidité en l'absence ou en la présence de dent à l'aplomb (inter-rangs scarifiés).** A) Verger de pêchers de Rognonas ; B) Verger de pomiers de Rognonas ; C) Verger de pomiers de Saint-Rémy-de-Provence. P1\_D, profondeur 1 (5-10cm) avec dent à l'aplomb ; P1\_ND, profondeur 1 (5-10cm) sans dent à l'aplomb ; P2\_D, profondeur 2 (15-20cm) avec dent à l'aplomb ; P2\_ND, profondeur 2 (15-20cm) avec dent à l'aplomb. Les différentes lettres dénotent des différences significatives entre les moyennes.



**Figure 4 : Densité apparente dans les trois vergers pour différentes modalités et périodes de scarification.** A) Verger de pêchers de Rognonas ; B) Verger de pomiers de Rognonas ; C) Verger de pomiers de Saint-Rémy-de-Provence. Av\_Sc, avant la scarification en zones scarifiées ; Ap\_Sc, après la scarification en zones scarifiées ; Av\_NS, avant la scarification en zones non-scarifiées ; Ap\_NS, après la scarification. NS=témoins. Les différentes lettres dénotent des différences significatives entre les moyennes.

scarification » mais aucune tendance ne semble apparaître concernant le facteur «modalité de scarification » (Fig. 5).

#### *Abondance et biomasse en vers de terre*

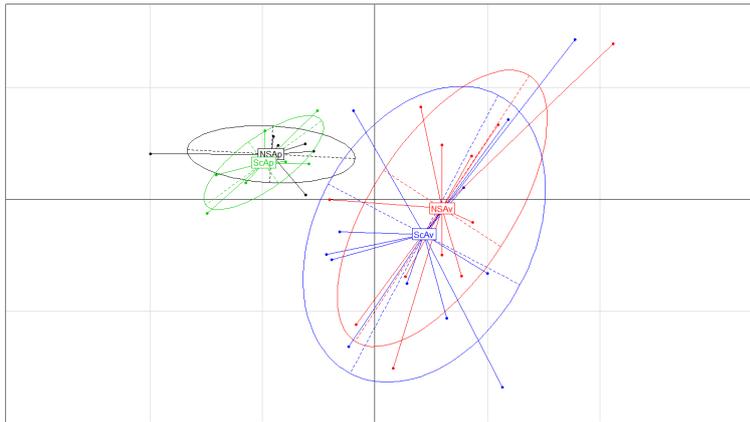
Les ANOVA réalisées sur les abondances totales en vers de terre (Tab. 1, 2, 3) montrent que le facteur scarification n'a pas d'influence sur les abondances en vers de terre, que ce soit dans le verger de pêcheurs ( $p=0.34$ ), dans le verger de pommiers de Rognonas ( $p=0.69$ ) ou dans le verger de pommiers de Saint-Rémy-de-Provence ( $p=0.86$ ). Cependant si l'on s'intéresse aux abondances moyennes nous pouvons constater dans le cas des pêcheurs que l'abondance moyenne reste constante en inter-rangs scarifiés ( $p=0.29$ ) alors qu'elle augmente en inter-rangs non-scarifiés d'environ 82% ( $p=0.00044$ ). Dans le cas du verger de pommiers de Saint-Rémy-de-Provence l'effet inverse est observé : les inter-rangs scarifiés ne présentent pas d'évolution ( $p=0.17$ ) alors que les inter-rangs non-scarifiés présentent une diminution d'environ 40% ( $p=0.001$ ). La richesse spécifique, l'indice de Shannon et l'indice d'équitabilité ne connaissent quant à eux pas de variation significative, et cela pour les trois vergers. Lorsqu'on s'attarde aux abondances par catégorie écologique (anéciques, épigés, endogés), nous pouvons constater dans le cas du verger de pêcheurs que l'abondance moyenne en endogés, catégorie largement majoritaire, diminue d'environ 68% dans les inter-rangs non-scarifiés ( $p=0.001$ ) alors que les inter-rangs scarifiés ne présentent pas d'évolution significative ( $p=0.22$ ). Les autres catégories écologiques ne présentent pas de variation significative.

#### *Activité microbienne*

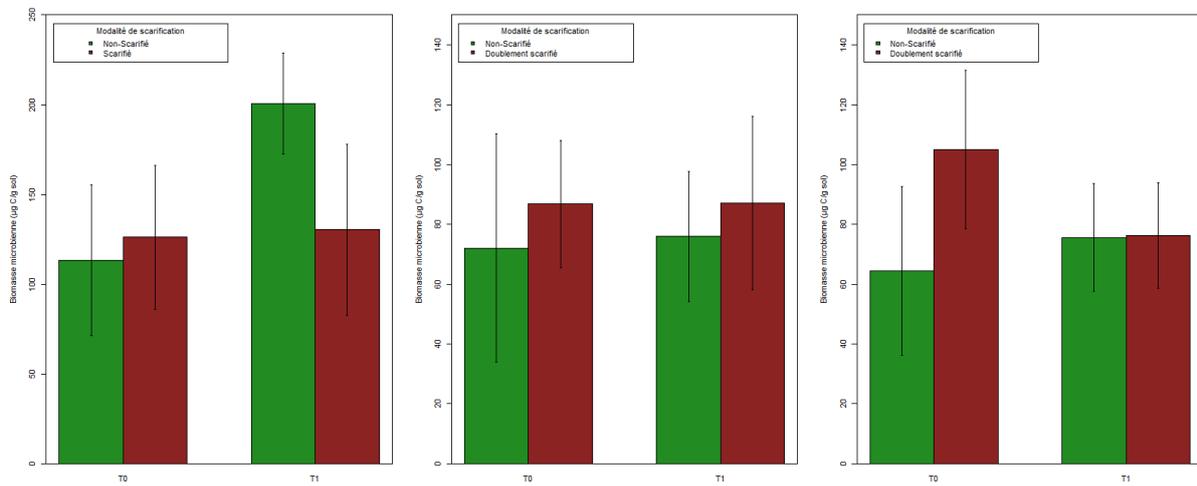
Si l'on s'intéresse à la biomasse microbienne nous pouvons constater dans le verger de pommiers de Rognonas que celle-ci connaît une augmentation d'environ 91% ( $p=0.008$ ) en zones non-scarifiées alors qu'aucune augmentation est observable en zones scarifiées. Dans le cas du verger de pommier de Saint-Rémy-de-Provence aucune évolution n'est observable en zones témoin alors qu'une diminution est observée en zones scarifiées, d'environ 25% ( $p=1.67e-06$ ). Aucun résultat n'est cependant observé dans le verger de pêcheurs. Le  $qCO_2$ , quant à lui, connaît une augmentation dans la partie scarifiée du verger de pêcheurs, qui n'est pas observable dans sa partie non-scarifiée. Ce résultat n'est pas observé au sein des deux autres vergers. La respiration basale ne connaît quant à elle aucune tendance liée à la scarification, et cela dans les trois vergers.

## **4. Discussion**

L'objectif principal de l'étude était de quantifier les effets directs et indirects de la technique de scarification sur la qualité physique et biologique du sol. Il a été supposé que les effets directs pouvaient concerner l'activité microbienne et l'humidité du sol alors que les effets indirects pouvaient concerner la composition spécifique en vers de terre et leur abondance ainsi que la densité du sol. Notre étude s'établit quant à elle dans l'étude de ses effets directs.



**Figure 5 : Analyse en Composantes Principales - Pommiers de Saint-Rémy-de-Provence.** ScAv, en zones scarifiées avant le passage du scarificateur ; NSA, en zones non-scarifiées avant le passage du scarificateur ; ScAp, en zones scarifiées après le passage du scarificateur ; NSAp, en zones non-scarifiées après le passage du scarificateur



**Figure 6 : Biomasse microbienne pour les deux modalités de scarification. T0, avant scarification ; T1, après scarification**

## A) Effets supposés directs

### *Humidité*

Concernant les effets que l'on supposait directs, l'humidité présente une diminution dans les inter-rangs non-scarifiés alors qu'elle reste stable dans les inter-rangs scarifiés, et cela dans deux vergers. Ces résultats peuvent être expliqués par le fait que les échantillons, qui proviennent des 5 à 10 premiers centimètres du sol, ont été prélevés au-dessus de la profondeur de travail des dents. Ils concernaient ainsi l'eau qui stagne en surface et s'infiltré mal à cause d'un tassement trop important, ce qui peut expliquer une humidité réduite après la scarification, l'eau s'étant infiltrée plus en profondeur. Cependant les profils d'humidité effectués par la suite ne montrent pas un gradient d'humidité plus faible grâce à la scarification. Ils montrent même l'inverse dans le cas du verger de pêchers, pour lequel la chute du taux d'humidité apparaît plus importante en inter-rangs scarifiés qu'en inter-rangs non-scarifiés. Cela peut éventuellement être expliqué par le fait que la scarification, en augmentant l'aération du sol, a induit une évaporation plus importante de l'eau à l'origine d'une diminution du taux d'humidité. Il aurait été intéressant d'étudier également ce profil d'humidité à une profondeur plus importante, étude qu'il a été difficile de réaliser étant donnée la dureté du sol. De même, les vers de terre ayant une réactivité moins importante que les micro-organismes notamment, il serait intéressant d'effectuer des mesures d'humidité à plus long terme. En effet la modification éventuelle de leur abondance et de leur activité, en particulier les anéciques, pourraient indirectement impacter le profil d'humidité, notamment par la création de galeries (Ehlers, 1975 ; Shipitalo et Butt, 1999). De même, le profil d'humidité peut être indirectement impacté par des cycles de dessiccation/rehumectation ayant pour impact une fissuration des points créés par la scarification.

### *Biomasse microbienne*

La biomasse microbienne, indicatrice de l'activité microbienne du sol, semble être altérée lorsque le sol est scarifié. En effet dans deux des trois vergers son évolution va à l'encontre de la biomasse microbienne en zone non-scarifiée, en restant constante lorsque la biomasse en zone non-scarifiée augmente, et en diminuant lorsque la biomasse microbienne en zone non-scarifiée reste constante. Cela pourrait être expliqué par une perturbation liée au passage du scarificateur, et peut éventuellement être liée à la diminution de l'humidité observée dans les 5 à 10 premiers centimètres du sol. Une étude à différentes profondeurs pourrait permettre de tester cette hypothèse. De même une étude à plus long terme serait intéressante pour voir si la tendance se confirme ou évolue différemment.

## B) Effets supposés indirects

Si on s'intéresse aux effets que l'on supposait indirects nous pouvons constater que cela se confirme pour la densité apparente qui ne semble pas, à court terme, connaître de variation très importante à cause du passage du scarificateur. La légère augmentation observée au sein des inter-rangs scarifiés dans le verger de pommiers de Rognonas ne connaît pas d'explication probante mais peut éventuellement être expliquée par le poids du scarificateur ajouté à celui du tracteur, qui a éventuellement pu tasser légèrement le sol. Une étude à plus long terme pourrait être intéressante pour observer l'évolution de cet indicateur physique, dont on suppose qu'il peut être indirectement impacté par une meilleure infiltration d'eau voire par une fissuration des points de scarification liée aux cycles de dessiccation/rehumectation, ainsi que par une abondance et une activité en vers de terre modifiée. En effet ces dernières sont étroitement liées à la densité apparente, étant donné qu'un sol plus meuble permet une plus grande mobilité des vers, et qu'à l'inverse le creusement de galeries peut avoir un effet direct par modification de la structure du sol et un effet indirect par modification de son humidité.

Concernant les vers de terre nous avons pu constater que leur composition spécifique n'était pas affectée par la scarification. Leur abondance a quant à elle été peu affectée par la technique, et les seuls effets observés sont contradictoires. Il semblait difficile, au vu de la technique, d'imaginer qu'elle puisse avoir un effet important à court-terme. A plus long terme de possibles effets plus marqués pourraient être observés, qui seraient indirectement liés à une humidité plus importante en profondeur, une meilleure aération voire à une densité plus faible. La perturbation physique générée par le scarificateur semble très faible, l'intensité de travail étant minime.

## **5. Conclusion**

La scarification est une technique nouvellement adoptée en arboriculture ayant pour origine le constat de sols de plus en plus tassés ayant parfois des conséquences négatives pour la croissance des arbres. Elle s'inscrit dans une recherche d'amélioration de la qualité de la parcelle qui pourrait mener à un accroissement du rendement voire de la qualité en fruits, ainsi que de la vigueur des fruitiers. Elle souhaite également s'inscrire dans une arboriculture qui se veut de conservation par un travail très faible du sol et une conservation du couvert végétal.

Cette technique, qui consiste à perforer le sol sur une dizaine de centimètres, aurait montré des effets en agronomie mais aucune donnée quantitative n'avait encore été publiée. Notre étude a permis d'en avoir un premier regard scientifique en apportant des données concernant ses effets sur la qualité physique et biologique du sol à court-terme. Elle permet ainsi de montrer qu'à court-terme l'humidité du sol peut diminuer en surface et mieux s'infiltrer en profondeur, et que sa densité ne varie pas ou peu. De plus, les effets à court-terme sur les vers de terre sont mitigés, ne montrant pas d'effet important sur leur composition spécifique et pouvant montrer des effets négatifs, positifs ou nuls sur leur abondance. Enfin les mesures concernant la biomasse microbienne semblent montrer un effet négatif à court-terme de la scarification.

Cette étude donne la perspective d'une étude plus globale de la technique, notamment concernant ses effets à long-terme sur les indicateurs que nous avons étudiés ici, mais également concernant ses effets sur le rendement en fruits ou la vigueur des fruitiers. Une étude plus large et plus approfondie pourrait permettre de donner aux arboriculteurs les arguments nécessaires à son adoption ou non.

## Annexe

**Evolution du taux d'humidité entre la profondeur 1 et la profondeur 2 des profils d'humidité.** Sc, zones scarifiées ; NS, zones non-scarifiées ; RPE, vergers de pêchers de Rognonas ; RPO, verger de pommiers de Rognonas ; SRP, verger de pommier de Saint-Rémy-de-Provence. +, augmentation du taux d'humidité ; -, diminution du taux d'humidité

Trois vergers		
P1 - P2	Sc	NS
RPE	18%*	23%*
RPO	27%*	19%*
SRP	-15%*	-3%

**Evolution du taux d'humidité entre les profondeurs 1 et 2 des profils d'humidité en fonction de la modalité de scarification et de la présence/absence de dents de scarification à l'aplomb.** Sc, zones scarifiées ; NS, zones non-scarifiées. D, présence de dent à l'aplomb ; ND, absence de dent à l'aplomb. +, augmentation du taux d'humidité ; -, diminution du taux d'humidité

P1-P2	Pêchers Rognonas		Pommiers Rognonas		Pommiers Saint-Rémy-de-Provence	
	Sc	NS	Sc	NS	Sc	NS
D	4%	23%*	27%*	24%*	-9%	-4%
ND	28%*	23%*	27%*	16%*	-20%*	-2%

**Evolution de l'abondance totale en vers de terre entre avant le passage du scarificateur et après le passage du scarificateur.** RPE, vergers de pêchers de Rognonas ; RPO, verger de pommiers de Rognonas ; SRP, verger de pommier de Saint-Rémy-de-Provence. \*, p=0.00044 ; \*\*, p=0.001

Verger	Evolution zone scarifiée (%)	Evolution zone non-scarifiée (%)
RPE	-16%	+82%*
RPO	+28%	+26%
SRP	-38%	-40%**

**Analyse de variance du verger de pêchers de Rognonas (RPE) avec pour facteurs la modalité de scarification (scarifié/non-scarifié) et la période de scarification (avant/après scarification)**

Source de variation	Df	Somme des carrés	Moyenne	F value	Pr(>F)
Scarification	1	64.65385	64.65385	0.9311395	0.3473533419
Période	1	332.44615	332.44615	4.7878630	0.0420925537
Scarification : Période	1	1551.25149	1551.25149	22.3410002	0.0001683424
Résidus	18	1249.83333	69.43519	NA	NA

**Analyse de variance du verger de pommiers de Rognonas (RPO) avec pour facteurs la modalité de scarification (scarifié/non-scarifié) et la période de scarification (avant/après scarification)**

Source de variation	Df	Somme des carrés	Moyenne	F value	Pr(>F)
Scarification	1	6.4000000	6.4000000	0.16196837	0.690912884
Période	1	416.0666667	416.0666667	10.52963093	0.003444070
Scarification : Période	1	0.9344444	0.9344444	0.02364851	0.879068423

<b>Résidus</b>	24	948.3333333	39.5138889	NA	NA
----------------	----	-------------	------------	----	----

**Analyse de variance du verger de pommiers de Saint-Rémy-de-Provence (SRP) avec pour facteurs la modalité de scarification (scarifié/non-scarifiée) et la période de scarification (avant/après scarification)**

<b>Source de variation</b>	<b>Df</b>	<b>Somme des carrés</b>	<b>Moyenne</b>	<b>F value</b>	<b>Pr(&gt;F)</b>
<b>Scarification</b>	1	6.464043	6.464043	0.02875038	0.868181532
<b>Période</b>	1	2154.666813	2154.666813	9.58339576	0.009263604
<b>Scarification : Période</b>	1	18.000000	18.000000	0.08005930	0.782038758
<b>Résidus</b>	12	2698.00000	224.833333	NA	NA

## **Références bibliographiques**

- Bastardie, F., Ruy, S., Cluzeau, D.**, 2005. Assessment of earthworm contribution to soil hydrology: a laboratory method to measure water diffusion through burrow walls. *Biol. Fertil. Soils* 41, 124–128.
- Bérard, A., Mazzia, C., Sappin-Didier, V., Capowiez, L., Capowiez, Y.** (2014). Use of the MicroResp (TM) method to assess pollution-induced community tolerance in the context of metal soil contamination. *Ecological Indicators*, 40, 27-33.
- Blake, G.R. and Hartge, K.H. (1986)**. Bulk density. In: Klute, A., Ed., *Methods of Soil Analysis, Part 1—Physical and Mineralogical Methods*, 2nd Edition, Agronomy Monograph 9, American Society of Agronomy—Soil Science Society of America, Madison, 363-382.
- Campbell, C. D., Chapman, S. J., Cameron, C. M., Davidson, M. S., & Potts, J. M.** (2003). A rapid microtiter plate method to measure carbon dioxide evolved from carbon substrate amendments so as to determine the physiological profiles of soil microbial communities by using whole soil. *Applied and environmental microbiology*, 69(6), 3593-3599.
- Capowiez, Y., Cadoux, S., Bouchand, P., Roger-Estrade, J., Richard, G., & Boizard, H.** (2009). Experimental evidence for the role of earthworms in compacted soil regeneration based on field observations and results from a semi-field experiment. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(4), 711-717.
- Capowiez, Y., Cadoux, S., Bouchant, P., Ruy, S., Roger-Estrade, J., Richard, G., & Boizard, H.** (2009). The effect of tillage type and cropping system on earthworm communities, macroporosity and water infiltration. *Soil and Tillage Research*, 105(2), 209-216.
- Chan, K. Y.** (2001). An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity—implications for functioning in soils. *Soil and tillage research*, 57(4), 179-191.
- Chan, K. Y.** (2004). Impact of tillage practices and burrows of a native Australian anecic earthworm on soil hydrology. *Applied Soil Ecology*, 27(1), 89-96.
- Chan, K. Y., & Barchia, I.** (2007). Soil compaction controls the abundance, biomass and distribution of earthworms in a single dairy farm in south-eastern Australia. *Soil and Tillage Research*, 94(1), 75-82.
- Clapperton, J., Chan, K.Y., Larney, F.J.** (2004). Managing the soil habitat for enhanced biological fertility. In : Abbott, L., Murphy, D. (Eds.), *Soil Biological Fertility—A Key to Sustainable Land Use in Agriculture*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 203–224.
- Dassot, M., Frauenfelder, A., Wehrle, L., & Collet, C.** (2017). La scarification du sol et le dosage du couvert forestier permettent de lever des blocages de régénération naturelle. *Rendez-vous Techniques ONF*, (54), 3-8.

**Edwards, C.A., Bohlen, P.J.** (1996). *Biology and Ecology of Earthworms*. Chapman & Hall, London, UK, pp. 142–145.

**Ehlers, W.** (1975). Observations on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soil. *Soil Science*, 119(3), 242-249.

**Horn, R., van den Akker, J.J.H., Arvidson, J.** (Eds.). (2000). *Subsoil Compaction – Distribution, Processes and Consequences*. *Advances in GeoEcology* 32. Catena Verlag, Reiskirchen, 462 pp.

**Langmaack, M.,** (1999). Earthworm communities in arable land influenced by tillage, compaction, and soil. *Zeitschrift für ökologie und Naturschutz* 8, 11–21.

**Low, A. J.** (1972). The effect of cultivation on the structure and other physical characteristics of grassland and arable soils (194–970). *European Journal of Soil Science*, 23(4), 363-380.

**Marliac, G., Penvern, S., Barbier, J.-M., Lescourret, F., Capowiez, Y.,** (2015). Impacts of crop protection strategies in organic apple production. *Agron. Sustain. Dev.* 35, 803–813.

**Moos, J. H., Schrader, S., Paulsen, H. M., & Rahmann, G.** (2016). Occasional reduced tillage in organic farming can promote earthworm performance and resource efficiency. *Applied soil ecology*, 103, 22-30.

**Pagliai, M., Vignozzi, N., & Pellegrini, S.** (2004). Soil structure and the effect of management practices. *Soil and Tillage Research*, 79(2), 131-143

**Richard, G., Cousin, I., Sillon, J. F., Bruand, A., & Guérif, J.** (2001). Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. *European Journal of Soil Science*, 52(1), 49-58.

**Rohrig, R., Langmaack, M., Schrader, S., Larink, O.,** (1998). Tillage systems and soil compaction - their impact on abundance and vertical distribution of Enchytraeidae. *Soil and Tillage Research* 46, 117–127.

**Sauphanor B., Dirwimmer C., Boutin S., Chaussabel A., Dupont N., Fauriel J., Gallia V., Lambert N., Navarro E., Parisi L., Plénet D., Ricaud V., Sagnes J.-L., Sauvaitre D., Simon S., Speich P., Zavagli F.,** (2009). Analyse comparative de différents systèmes en arboriculture fruitière. INRA (Ed.) *Ecophyto R&D: vers des systèmes de culture économes en produits phytosanitaires*. Rapport d'Expertise Collective INRA. Tome I.

**Schäffer, B., Stauber, M., Mueller, T. L., Müller, R., & Schulin, R.** (2008). Soil and macropores under uniaxial compression. I. Mechanical stability of repacked soil and deformation of different types of macro-pores. *Geoderma*, 146(1-2), 183-191..

**Schrader, S., Lingnau, M.,** (1997). Influence of soil tillage and soil compaction on microarthropods of agricultural land. *Pedobiologia* 41, 202–209.

**Shipitalo, M. J., & Butt, K. R.** (1999). Occupancy and geometrical properties of *Lumbricus terrestris* L. burrows affecting infiltration. *Pedobiologia*, 43(6), 782-794.

**Soane, B. D., & van Ouwerkerk, C.** (Eds.). (2013). *Soil compaction in crop production* (Vol. 11). Elsevier.