



**HAL**  
open science

## Gestion des sols de vergers : panorama des outils et travaux, pistes pour la recherche

Sylvie Colleu, Caroline Goutines, Pascale Guillermin, Maud Delavaud, Laetitia Fourrié, Yann Gilles, Anne Guerin, Xavier Leclanche, Claude Eric Parveaud, Pierre Varlet, et al.

### ► To cite this version:

Sylvie Colleu, Caroline Goutines, Pascale Guillermin, Maud Delavaud, Laetitia Fourrié, et al.. Gestion des sols de vergers : panorama des outils et travaux, pistes pour la recherche. [Rapport Technique] 2019. hal-02789711

**HAL Id: hal-02789711**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02789711v1>**

Submitted on 5 Jun 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



## **Gestion des sols de vergers : panorama des outils et travaux, pistes pour la recherche**



2019

Rapport de la mission pilotée par Caroline Goutines  
dans le cadre d'une action portée par le GIS Fruits, sur ressources Inra et IFPC.

**Composition du groupe de travail :**

Pascale Guillermin Coordinatrice (AgrocampusOuest Angers), Caroline Goutines cheffe de projet (Inra-IFPC), Claude Coureau (CTIFL), Maud Delavaud (BIP), Laetitia Fourrié (ITAB), Yann Gilles (IFPC), Anne Guérin (IFPC), Xavier Leclanche (ANPP), Claude-Eric Parveaud (ITAB), Pierre Varlet (ANPP), Marie-Cécile Vergneaud (IFPC).

**Pour citer ce document :**

C. Goutines, P. Guillermin, C. Coureau, L. Fourrié, Y. Gilles, A. Guérin, X. Leclanche, C-E Parveaud, P. Varlet, M-C Vergneaud, S. Colleu, Gestion des sols de vergers : panorama des outils et travaux, pistes pour la recherche, 2019, Inra, 48 pages.

**Disponible sur :** <https://www.gis-fruits.org/Groupes-thematiques/Approche-systeme/Rapport-Gestion-des-sols-de-vergers-panorama-des-outils-et-travaux-pistes-pour-la-recherche>

**DOI :** <https://doi.org/10.15454/jisruh>

**Photo de couverture :** © Inra

**Licence CC :** BY NC ND

## Table des matières

|  |    |
|--|----|
| Introduction.....  | 4  |
| 1. Données disponibles et premiers enseignements de la recherche sur les outils .....  | 6  |
| 1.1. Description du contenu de la table recensant 251 ‘outils’ .....   | 6  |
| 1.2. Analyse de la table par catégories.....   | 6  |
| 1.3. Avis des utilisateurs interrogés sur les outils de pilotage et de diagnostic.....   | 11 |
| 2. Recensement des 63 travaux expérimentaux récents conduits sur les sols de vergers :<br>données disponibles et possibilités d’utilisation..... | 17 |
| 2.1. Description du contenu de la base sur la partie ‘travaux’ .....   | 17 |
| 2.2. Nombreuses possibilités d’utilisation de la base ‘travaux’ .....  | 19 |
| 3. Identification des problématiques les plus cruciales et perspectives d’action.....  | 23 |
| 3.1. Hiérarchisation des problématiques soulevées sur les outils .....   | 23 |
| 3.2. Hiérarchisation des problématiques soulevées sur les leviers d’action .....   | 24 |
| 3.3. A l’issue du séminaire 4 problématiques prioritaires émergent.....  | 26 |
| 3.4. La proposition du GISFruits pour 2019-2020 .....  | 28 |
| Références.....  | 29 |
| Références citées dans le rapport.....   | 29 |
| Webographie.....   | 29 |
| Références citées dans le tableau ‘Outils’ .....   | 30 |
| Liste des abréviations.....  | 34 |
| Table des figures.....   | 35 |
| Table des tableaux.....  | 35 |
| Annexes .....  | 35 |



## Introduction

Cette étude a été initiée par le groupe de travail sur les sols du GIS Fruits, composé de partenaires du GIS Fruits (AgroCampus Ouest - Angers, ANPP, BIP, CTIFL, IFPC, ITAB, Inra) suite à l'enquête « sols en vergers » menée en 2017 auprès des producteurs et conseillers (Guillermin *et al.*, 2017). Elle montrait trois points importants :

- plus de 50% des praticiens de terrain déclaraient rencontrer des difficultés assez préoccupantes à préoccupantes prioritairement en terme de maîtrise de la vigueur et du rendement (Figure 1b1) ;
- 14% d'entre eux déclaraient des difficultés très préoccupantes plutôt d'ordre pathologique et à la plantation (Figure 1b2) et enfin
- les attentes majeures concernaient d'une part les outils et d'autre part une meilleure connaissance de l'effet de certaines pratiques liées au sol (Figure 1a).

En fonction de ces résultats, et en faisant l'hypothèse que les pertes de vigueur et de rendement observées pouvaient être dues à une maîtrise insuffisante de l'alimentation hydrominérale des arbres, en particulier au regard des nouvelles pratiques de gestion du sol (enherbement v/s travail du sol v/s désherbage chimique) ou de type d'apports fertilisants (organique v/s minéral), le groupe de travail a choisi d'orienter sa réflexion sur les conditions du maintien de la fertilité des sols de vergers. Toujours en s'appuyant sur l'enquête, **deux axes** de travail ont été retenus :

- l'un centré sur les **outils** disponibles, toutes filières confondues, pour faire des diagnostics de la qualité du sol ou de l'état nutritionnel de l'arbre ou pour piloter les pratiques culturales;
- l'autre centré sur les **dispositifs expérimentaux** récents concernant l'effet des pratiques liées au sol et les mécanismes biophysiques en jeu dans ces réponses agronomiques.

Dans cette étude, le terme fertilité est considéré dans ses 3 dimensions, chimique, physique et biologique telles que définies dans Abbott & Murphy (2007). Cette acceptation dépasse donc la vision plus restrictive et classique de la fertilité comme propriétés physiques et chimiques impliquées dans la fourniture de nutriments et d'eau (Bünemann *et al.*, 2018). Elle rejoint plutôt la définition de la FAO : « La fertilité est la capacité du sol à fournir de l'eau et des nutriments essentiels aux plantes en quantité et proportion adéquates et en l'absence de substances toxiques pouvant inhiber leur croissance et reproduction ». **Ainsi, les deux termes 'qualité du sol' et fertilité' seront employés de façon assez similaire et les investigations incluent tous les facteurs influant la fertilité des sols et l'état nutritionnel des arbres.**

Cette étude menée dans le cadre d'un CDD de six mois a pour objectifs de :

- i) dresser un inventaire le plus exhaustif possible des outils mobilisables et mobilisés sur ces questions de fertilité des sols et nutrition des arbres,
- ii) faire un état des lieux, non exhaustif des principales problématiques posées sur la gestion des sols soit dans le cadre des travaux expérimentaux menés par les instituts de recherche et d'expérimentation principalement français, soit par les producteurs eux-mêmes.

Le résultat de ces investigations a été compilé dans une base de données partiellement disponible sous format 'Excel', dont le contenu et les possibilités d'utilisation seront présentés en chapitre II et III respectivement pour les outils et les travaux. A partir de ces données et des ateliers de co-construction du séminaire organisé le 19 février 2019 (annexe 4), une première analyse tentera de répondre aux problématiques suivantes (chapitre IV) :

- Les outils disponibles sont-ils suffisants, fiables et bien adaptés aux cultures fruitières et sont-ils correctement utilisés ?
- Les travaux expérimentaux menés répondent-ils à l'ensemble des besoins en nouvelles connaissances exprimés dans l'enquête ? Quelles thématiques faut-il approfondir ?
- Quels sont les actions de recherche prioritaires et quels sont les moyens techniques et organisationnels à mettre en œuvre pour les lancer.

La démarche générale de travail est détaillée en annexe 1

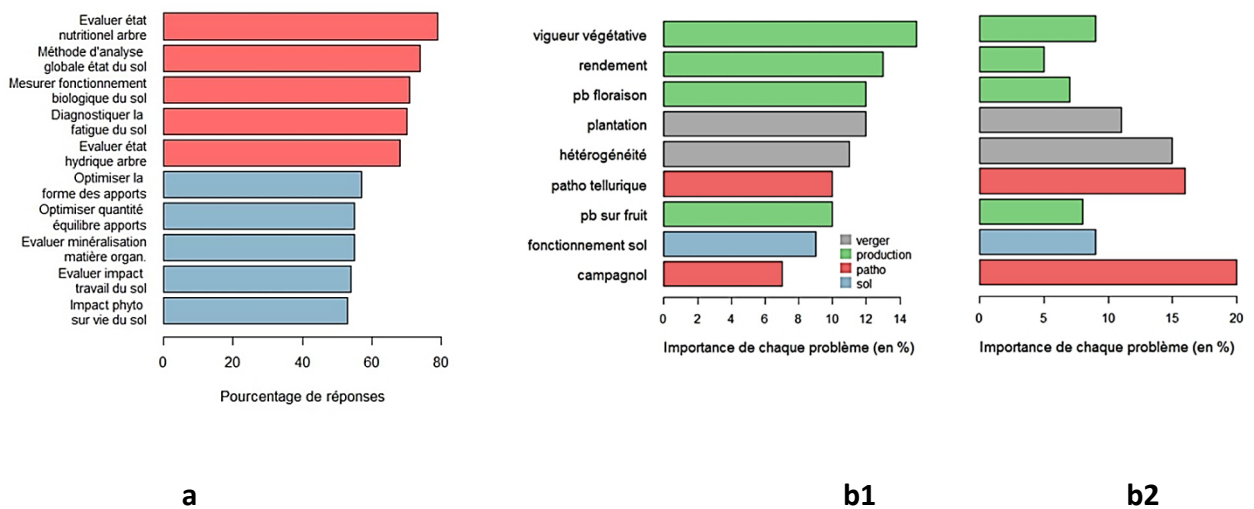


Figure 1: Résultats de l'enquête 'Sols en vergers' (Guillermin et al., 2017) : attentes prioritaires (a) et classement des principaux problèmes rencontrés au sein de ceux classés « assez préoccupants à préoccupants » (b1) ou de ceux classés « très préoccupants » (b2) .

# 1. Données disponibles et premiers enseignements de la recherche sur les outils

## 1.1. Description du contenu de la table recensant 251 'outils'

Au total 251 outils, indicateurs ou méthodes d'évaluation, utilisés en recherche ou par les producteurs et dédiés à l'observation du sol et au suivi de sa fertilité et de ses conséquences sur la production des plantes (pérennes ou non), sont compilés dans la base de données.

Cette partie de la base est disponible sous la forme d'un tableau Excel ([fichier 'OUTILS'](#)) librement accessible sur le site web du GIS Fruits. Chaque outil est nommé et son principe général est décrit. Trois colonnes permettent d'apporter de façon non exhaustive des informations complémentaires : précisions sur le fonctionnement, limites d'utilisations et première évaluation pointant les avantages et inconvénients de l'outil les plus régulièrement mentionnés dans la littérature. Les avis exprimés lors des entretiens ne figurent pas dans la base de données et seront présentés indépendamment au paragraphe 3-3. Enfin, les références et normes éventuelles associées à chaque outil sont également fournies.

Quatre colonnes (en couleur sur le fichier 'OUTILS') permettent par ailleurs de catégoriser les outils sur différents critères. Elles pourront être mobilisées par les utilisateurs, via la fonction tri d'Excel pour extraire les outils correspondant à l'objectif ou à l'usage visé. Ainsi :

- L'objet analysé (sol, plante productive = végétal, couvert ou parcelle) et la finalité de l'analyse sont catégorisés dans la colonne 'Echelle spatiale et objectif visés' ;
- La colonne 'Cultures testées' précise si l'outil est spécifique à une ou plusieurs cultures (ce champ est vide pour les outils d'analyse du sol non spécifiques à une culture) ;
- La colonne 'Type d'outils' permet de différencier les outils sur leur modalité de mise en œuvre (dont outils et méthodes, analyses de laboratoire et mesures de terrain...)
- La thématique biologique ou agronomique associée à l'outil (nutrition hydrominérale, vie du sol, matière organique, croissance des plantes...) est enfin catégorisée dans la colonne 'Thématique'.

## 1.2. Analyse de la table par catégories

Parmi les 251 outils et méthodes compilés dans la base de données, 142 soit 57% sont mobilisés sur le compartiment sol. Les autres concernent le compartiment aérien à l'échelle de la plante cultivée (14%), des couverts végétaux (2%) ou du système de culture (27%). Ils concernent toutes les approches visant à appréhender le fonctionnement du sol via les réactions observées au niveau des végétaux dans la partie aérienne.

**Parmi ces outils et méthodes appliqués sur le compartiment aérien (Figure 2)**, 32% sont explicitement référencés par les concepteurs sur les cultures fruitières; 16% sont référencés sur des plantes pérennes ligneuses (le plus souvent la vigne et quelques cas sur arbres forestiers) ; et 18% sont a priori mobilisables sur toutes cultures. Dans ces deux derniers cas, on peut supposer que l'adaptation à l'arboriculture fruitière est assez facilement envisageable, ce qui porte à 66% le nombre des outils pouvant être considérés comme 'adaptés à l'arboriculture'. Le tiers des outils restants, principalement développés sur grandes cultures ou non renseignés sur leur utilisation, ouvre des opportunités possibles à la filière 'fruits' pour développer de nouveaux outils à partir de résultats issus d'autres filières.

Pour les cultures fruitières, ces outils du compartiment aérien sont moins diversifiés en terme d'utilisation (points rouges sur la Figure 2 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) comparativement aux autres cultures : 40% sont des 'méthode de terrain' basées sur des observations assez classiques de la croissance et du développement des arbres (vigueur, entrée en floraison, charge,...). Elles peuvent être accompagnées d'analyses minérales d'organes (feuilles, fruits, rameaux,..) assez spécifiques des fruitiers. Un seul outils terrain, le dendromètre est spécifiquement référencé en production fruitière : son potentiel paraît intéressant mais il reste assez lourd et compliqué à mettre en œuvre. Des outils portatifs de mesure d'indices de végétation utilisés sur feuilles pour le pilotage de la fertilisation (type *chlorophyll-meter*), sont surtout utilisés en grandes cultures ou en vigne et seraient à calibrer en arboriculture pour confirmer leur utilité et leur fiabilité. En effet, une précision souvent insuffisante et un manque de transparence et de connaissances sur la signification réelle de l'indice mesuré sont régulièrement mentionnés par les utilisateurs.

Les thématiques d'étude liées à chaque outil ou méthode (points bleus sur la Figure 2) sont globalement représentées de façon homogène pour toutes les cultures. En production fruitière on retrouve néanmoins la surreprésentation des méthodes basées sur des observations de croissance et développement déjà mentionnées. De façon logique au regard des risques d'impacts liés aux pratiques fertilisantes, la thématique de la nutrition azotée est peu développée pour les filières du ligneux (arboriculture et viticulture). On note également l'absence d'outils sur la thématique 'stockage de C', à forts enjeux potentiels en verger : les outils, principalement des modèles développés en viticulture ou grandes cultures mériteraient d'être adaptés à l'arboriculture fruitière.

Enfin, toutes cultures confondues, il existe peu d'outils pour l'étude des racines et la caractérisation des flux d'eau et de nutriments dans la plante. Dans le premier cas, les seuls outils recensés dans la base de données sont des analyses de mycorhization des racines et la cartographie racinaire (profil cultural). Pour les flux dans la plante, on trouve le dendromètre, les analyses de sève, les sondes d'humectation et de température du feuillage et les chambres à pression. Ces méthodes d'analyses sont pour la plupart assez lourdes et compliquées à mettre en œuvre.



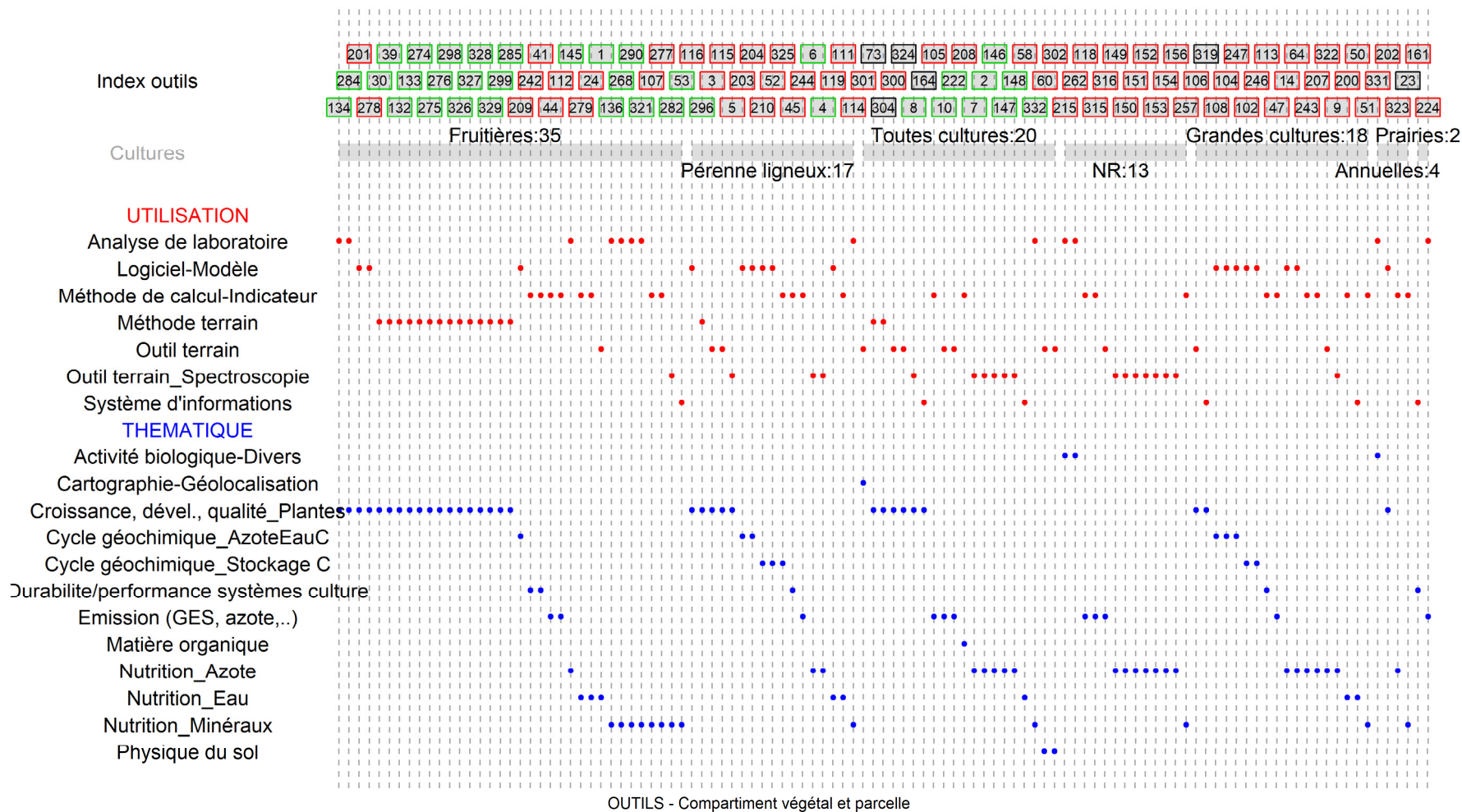


Figure 2: **Outils et méthodes d'analyse du sol - compartiment végétal, parcelle et couvert** (respectivement cadre vert, rouge et noir sur les lignes Index). Les 109 éléments présentés sont identifiés par leur index tel que défini dans le [fichier Excel de la base 'Outils'](#). L'utilisation référencée de l'outil sur un type de culture spécifique est indiquée sur la ligne 'Cultures' avec 'Pérennes ligneux' = utilisation sur vigne ou arbres forestiers et NR= non renseigné. Le type d'outil concernant son mode d'utilisation (analyse de laboratoire, outil ou méthode de terrain...) sont spécifiées en rouge. La thématique principale couverte par chaque outil est spécifiée en bleu.

**Concernant les outils et méthodes appliqués sur le compartiment sol (Figure 3)**, on constate un équilibre correct entre les objectifs d'analyse concernant les caractéristiques physico-chimiques (51%) et biologiques (36%) du sol. Ainsi le regain d'intérêt des agronomes pour améliorer la compréhension du fonctionnement biologique des sols semble avoir permis de se doter rapidement d'outils et méthodes pour répondre à cet objectif. La fréquence d'utilisation des outils dédiés à ces deux grandes types d'approche doit néanmoins différer au profit des approches physico-chimiques.

En terme de type d'outils et d'utilisation (points rouges sur la Figure 3), les analyses de laboratoires sont majoritaires (47%) Elles recensent, d'une part, les analyses physico-chimiques classiques, détaillées avec les normes associées (C/N, taux de MO, pH, CEC, macroéléments, ...). En production fruitière, ce sont toutes les analyses réalisées en routine par les producteurs, généralement avant plantation et ensuite tous les 4/5 ans. En parallèle, et de façon plus récente, des outils de terrain sont conçus comme aide au pilotage de la fertilisation. Il s'agit surtout de kits terrain (photomètres) permettant la mesure des teneurs en éléments minéraux de la solution du sol (de base l'azote nitrique et parfois les phosphates et la potasse). L'exemple le plus connu est le Nitrachek® pour le suivi régulier, en cours de saison, de l'évolution des nitrates. Il peut venir compléter la pratique du dosage annuel (souvent fin d'hiver) des reliquats d'azote (azote ammoniacal et nitrique mesurés en laboratoire). La base de données contient d'autre part différents outils et méthodes de laboratoire permettant de caractériser la qualité et l'activité biologique du sol, en particulier concernant le compartiment microbien (bactéries et champignons). Là aussi, il se développe en parallèle, quelques outils de mesure 'in situ' permettant d'élaborer des indicateurs d'activité microbienne (SituResp®, Solvita *Field Test*, *Bait lamina*, ...). Pour les macroorganismes du sol divers protocoles de terrain sont disponibles et diffusés en expérimentation, notamment pour l'étude des vers de terre (site de l'OPVT : [ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT\\_accueil](http://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT_accueil)). Enfin des outils généralistes de diagnostic global, physico-chimique et biologique se présentent sous la forme de kits d'évaluation 'in situ' comme la mallette USDA ([www.nrcs.usda.gov](http://www.nrcs.usda.gov)) ou Biofunctool® ([www.biofunctool.com](http://www.biofunctool.com), (Thoumazeau *et al.*, 2019).

Les thématiques d'étude couvertes par ces outils dédiés au sol (points bleus sur la Figure 3) sont diversifiées et bien réparties entre outils. On note l'importance des outils et méthodes concernant la 'qualité des sols', qui traduit peut-être l'émergence d'une vision de plus en plus holistique du fonctionnement du sol. Deux thématiques d'intérêt pour le futur, encore assez récentes et probablement à développer, sont un peu sous-représentées : d'une part la 'cartographie-géolocalisation' permettant de comprendre les hétérogénéités spatiales et de piloter les cultures en fonction, et d'autre part l'utilisation de bio indicateurs permettant des approches à faible intrant et potentiellement multicritères.

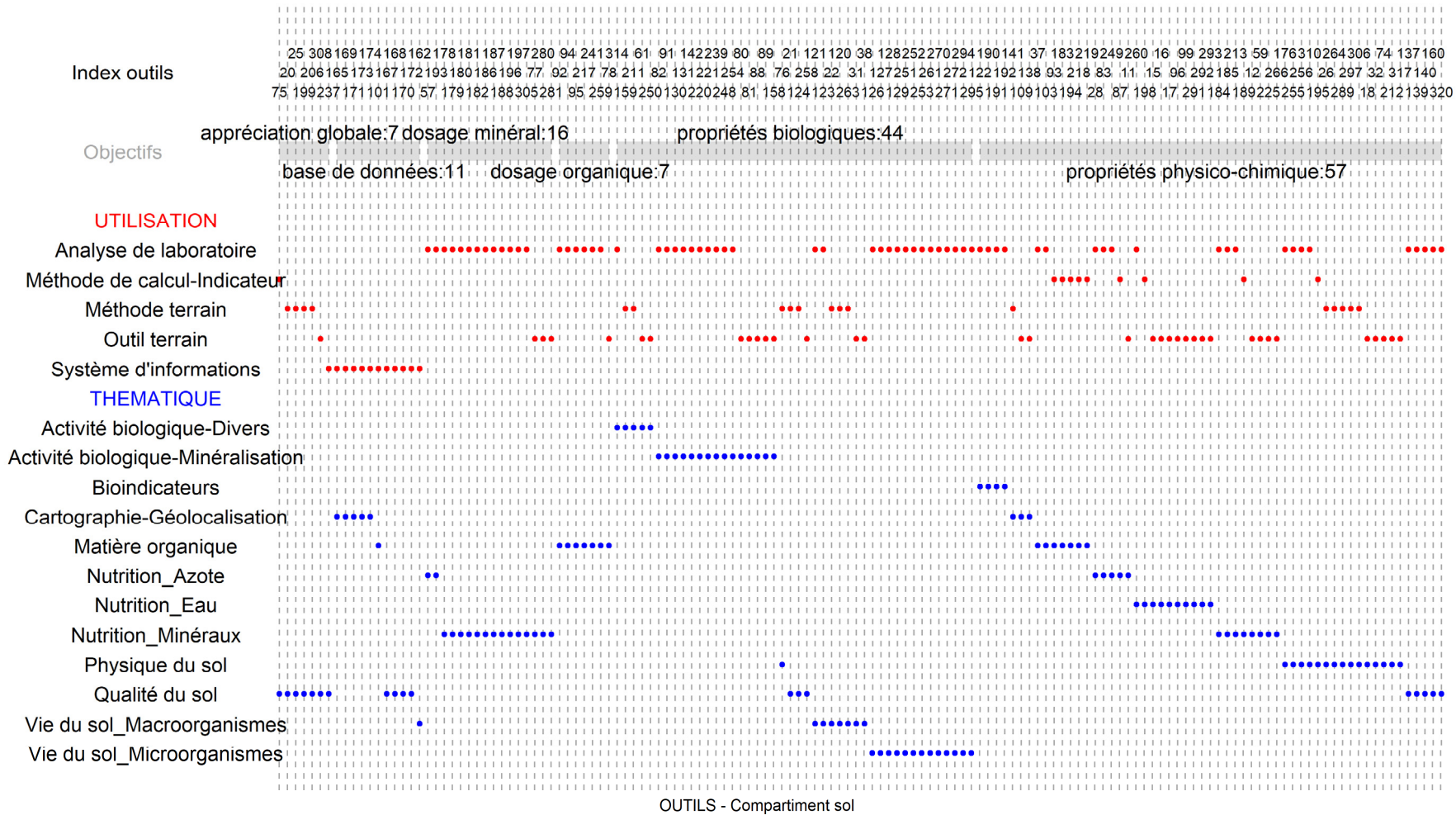




Figure 3: **Outils et méthodes d'analyse du sol - compartiment sol**. Les 142 éléments présentés sont identifiés par leur index tel que défini dans le [fichier Excel de la base 'Outils'](#). Ils sont classés en fonction de 6 objectifs principaux : rectangle gris indiquant le nombre de représentants par objectif. Le type d'outil concernant son mode d'utilisation (analyse de laboratoire outil ou méthode de terrain...) sont spécifiées en rouge. La thématique principale couverte par chaque outil est spécifiée en bleu.

**1.3. Avis des utilisateurs interrogés sur les outils de pilotage et de diagnostic** Parallèlement à l'analyse menée à partir des éléments bibliographiques disponibles et des rencontres avec les développeurs d'outils, les avis recueillis auprès des praticiens de terrain, eux-mêmes utilisateurs, ont été synthétisés dans le Tableau 1.

Les textes entre guillemets sont des verbatims des interviews conduites pendant la mission.

Tableau 1: Tableau de synthèse des avis sur quelques outils de gestion de la fertilité des vergers.

| Outils                    | Avis  |   |
|---------------------------|---|---|
|                           |    |    |
| <b>Analyses foliaires</b> | <p>Elles sont utilisées en diagnostic et en prévisionnel de l'année N+1.</p> <p>C'est un appui technique quand une carence est constatée visuellement.</p> <p>Elles permettent d'étudier le statut azoté et les équilibres minéraux des feuilles : N/K élevé peut indiquer un excès de vigueur ; K/Mg un excès de potasse ou une carence en magnésie.</p> <p>La potasse joue sur le calibre et le sucre des fruits, le phosphore sur le développement racinaire et la fermeté du fruit (pommes)</p> <p>Le suivi par analyses foliaires est un bon indicateur de l'état nutritionnel de l'arbre s'il est bien référencé par rapport aux années précédentes (fruit ou plante).</p> <p>Ces analyses sont à mettre en relation avec les analyses de sol et de fruits.</p> | <p>L'interprétation est difficile et les corrélations pas évidentes avec les analyses de sol et de fruits.</p> <p>Les analyses de feuilles seules ne suffisent pas pour piloter la fertilisation azotée.</p> <p>Les seuils de références sont à ajuster en fonction du système de culture.</p> <p>« Les analyses foliaires ne donnent pas une indication de l'état nutritionnel de l'arbre. »</p> <p>« Elles permettent de constater une carence mais pas de l'anticiper »</p> <p>Elles ne permettent pas de diagnostiquer certains problèmes d'alimentation: « [...] ce n'est pas un bon indicateur de déficit hydrique par exemple ».</p> |
| <b>Analyses de fruits</b> | <p>Les analyses de fruits ne permettent pas de diagnostiquer correctement des carences ou problèmes.</p> <p>« Ça marche pour les extrêmes mais les différences observées se diagnostiquent en visuel et avec de l'expérience, par exemple en fonction de la charge en fruits pour le bitter pit. »</p>  |   |



|                            |  |   |
|----------------------------|--|---|
| <b>Analyses de rameaux</b> | <p>Les analyses de rameaux ne se font pas en routine mais quand un problème est constaté sur les fruits (maladies conservation, déficit de production).</p> <p>Les analyses de rameaux en hiver (décembre-janvier) donnent des informations sur le végétal, à mettre en corrélation avec les analyses de sol.</p> <p>Les éléments minéraux sont analysés (Ca, Mg, ...), ainsi que les équilibres de ces minéraux.</p> <p>Le taux d'amidon des rameaux donne une information sur la mise en réserve de l'arbre : si le stock n'est pas bon, il y a risque d'alternance ou de problème physiologique. Le « potentiel glucidique » indique l'énergie disponible dans les rameaux.</p> <p>« Ce ne sont pas les éléments minéraux qui m'intéressent mais la mise en réserve de l'arbre ».</p> <p>« Les analyses de rameaux en hiver ont montré des carences en bore et zinc pour la mise en réserve, le sol n'en fournissait pas suffisamment donc des apports foliaires étaient nécessaires. »</p> |   |
| <b>Chlorophyll-meter</b>   | <p>Outils de pilotage, utilisation au champ, rapide.</p> <p>Suivi régulier possible pour ajuster la dose apportée.</p>   | <p>Pas assez précis : les différences observées entre modalités de fertilisation sont également visibles à l'œil nu.</p> <p>Il y a beaucoup de variabilité dans les mesures due à : l'épaisseur de la feuille (privilégier la réflectance à l'absorbance comme méthode utilisée), la variété, les dates de mesures, la méthode d'échantillonnage.</p> <p>Manque de précision et de transparence sur la variable mesurée. Ces outils sont souvent jugés trop difficiles à calibrer et pas assez ou pas encore opérationnels. «Ce sont des outils de recherche plutôt que des outils de pilotage de terrain».</p> |
| <b>Reliquats d'azote</b>   | <p>Il s'agit de la détermination de l'azote nitrique et ammoniacal (formes d'azote bio disponible) du sol, majoritairement en sortie d'hiver et en pré récolte (septembre) et plus rarement tous les mois, de mars à novembre environ.</p> <p>En culture pérenne, il y a mise en réserve des nutriments donc le bilan azoté est difficile à faire.</p> <p>Réalisés au printemps, les reliquats d'azote permettent d'observer le début de la minéralisation. Ils sont intéressants à poursuivre ensuite tous les mois, en particulier en agriculture</p>  | <p>Très bon outil mais l'analyse doit être réalisée en laboratoire.</p> <p>Le prélèvement et l'envoi des échantillons doivent respecter un protocole précis.</p> <p>Mesure non réalisable en routine sur toute la profondeur de l'enracinement.</p> <p>Trop ponctuel.</p>   |

|                    |  |   |
|--------------------|--|---|
|                    | <p>biologique où la connaissance de la cinétique de la minéralisation est importante.</p> <p>Permet de mesurer l'azote ammoniacal et l'azote nitrique en simultanée.</p> <p>Méthode de laboratoire relativement peu coûteuse et fiable.</p>  |   |
| <b>Nitrachek®</b>  | <p>Outil opérationnel, mesure réalisable par les producteurs.</p> <p>Permet de suivre la minéralisation d'azote.</p> <p>« Nous nous en servons quand nous fertilisons ou quand nous changeons le plan de fumure ».</p>   | <p>Mesure non réalisable en routine sur toute la profondeur de l'enracinement.</p> <p>Ne permet pas d'anticiper la minéralisation de la matière organique.</p> <p>Ne permet pas de mesurer l'azote ammoniacal.</p> <p>«Les mesures du Nitrachek® sont variables et trop longues, tout le monde n'a pas forcément d'agitateur».</p>  |
| <b>Dendromètre</b> | <p>Le dendromètre est un outil de mesure du taux d'accroissement des branches, du tronc ou des fruits. Il est souvent couplé avec des sondes tensiométriques ou capacitatives dans le sol. Ce couplage permet de piloter l'irrigation et d'identifier d'éventuels stress hydriques ou des défaillances d'un des capteurs.</p> <p>« Les sondes vont donner de bonnes courbes d'humidité du sol mais les dendromètres vont aider à déterminer si cette quantité d'eau est « bonne » pour l'arbre. »</p> <p>Ils sont aussi utilisés pour mesurer le calibre des fruits de juin à septembre.</p> <p>Possibilité de les relier à un boîtier enregistreur par Bluetooth.</p> | <p>Mesures multifactorielles (chaleur, insolation, humidité, stress alimentation, ...) qui sont difficiles à interpréter.</p> <p>Les dendromètres permettent d'identifier un stress hydrique mais leur utilisation et interprétation restent complexes.</p> <p>Une attention particulière doit être portée lors de l'installation, elle conditionne la précision et la justesse des mesures.</p> <p>« Il faut les mettre sur de jeunes branches où l'écorce est un peu malléable, ne pas trop, ni trop peu serrer, le réglage est à ajuster avec une vis de précision »</p> |

|                            |   |  |
|----------------------------|---|--|
| <b>Chambres à pression</b> | <p>Elles permettent de mesurer le potentiel hydrique de base de la plante, c'est-à-dire le potentiel hydrique mesuré en fin de nuit (en équilibre avec celui du sol).</p> <p>Permet aussi de mesurer le potentiel hydrique de tige ou de feuille au midi solaire qui correspond à l'état de stress maximal de la plante.</p> <p>Mesures assez simples et précises de l'état hydrique. C'est la méthode de référence en écophysiologie.</p> <p>« J'ai utilisé les chambres à pression en parallèle des sondes capacitives pour travailler sur l'irrigation, pour chercher à quel niveau d'eau dans le sol, l'arbre commence à souffrir. C'est à priori quand la pression diminue en deçà de 7 mb mais ce seuil est variable, il dépend, entre autre, du climat et du risque d'asphyxie. Ces mesures ont tout de même permis de caler les sondes capacitives et d'ajuster l'irrigation ».</p> | <p>Pas très opérationnel : il faut se lever tôt pour effectuer les mesures du potentiel de base. Pour le potentiel au midi solaire, il faut poser des sacs en aluminium sur les feuilles 2/3h avant la mesure et faire beaucoup de répétitions.</p> <p>Elles ne permettent pas d'avoir un rythme de mesure élevé à cause de la complexité d'utilisation. Elles sont surtout utilisées en expérimentation et permettent, entre autres, de caler d'autres méthodes plus opérationnelles.</p> <p>Des outils de mesure en continu existent mais ils sont très chers.</p> |
| <b>Tensiomètres</b>        | <p>Moins cher que les sondes capacitives, pas de paramétrage requis.</p>  | <p>Ils ont tendance à se désamorcer sur des sols très argileux lors de dessèchements ou de fissures.</p> <p>Bruit dans les mesures induit par des espaces dus aux fissures qui se remplissent d'eau.</p> <p>Difficulté de placement des sondes par rapport au bulbe d'humectation (petit en sols sableux).</p> <p>Faible volume de prospection.</p>  |
| <b>Sondes capacitives</b>  | <p>Mesure assez fine.</p> <p>Volume d'eau convertie en mm.</p> <p>Volume de sol prospecté, prix et durée de vie plus ou moins grands en fonction des marques.</p> <p>Les sondes Sentek ont une longue durée de vie.</p> <p>Certaines sondes mesurent la salinité du bulbe.</p>  | <p>« Je préfère les tensiomètres à certaines sondes capacitives qui sont paramétrées pour 2 types de sols uniquement, moins précises en dessous de 30 cm, et qui semblent peu sensibles aux différences de mm d'eau entre été et hiver »</p> <p>La mise en place pose problème, « si le trou est trop large ça marche pas, s'il y a trop de cailloux idem, ... ».</p> <p>« Tous les ions sont mis dans le même paquet lorsque la salinité est mesurée. »</p>   |

|                      |  |  |
|----------------------|--|--|
|                      |  |  |
| <b>Profil de sol</b> | <p>Outil descriptif qui permet de détecter la présence de freins au niveau de la structure du sol. Il est pratiqué avant plantation et ponctuellement pour un problème au niveau du sol.</p> <p>La description de l'enracinement est primordiale (profondeur d'enracinement et pourcentage de racines fines en fonction des horizons). Les analyses de terre sont souvent réalisées dans les différents horizons du sol en parallèle.</p> <p>Permet de mieux positionner les drains.</p> | Lourd à mettre en œuvre, formation et pelleteuse requises.   |
| <b>Test bêche</b>    | <p>Permet d'évaluer la qualité de la structure du sol.</p> <p>Très utilisé (producteurs et conseillers), simple et rapide une fois l'utilisateur formé, alternative simplifiée du profil.</p> <p>Comme alternative, certaines personnes pratiquent juste « le coup de tarière », jusqu'à 60 cm de profondeur.</p> <p>Outil très pédagogique.</p>   | <p>Outil comparatif, non chiffrable.</p> <p>Ne prend pas en compte les racines de plantes pérennes.</p>  |
| <b>Porosité</b>      | <p>L'infiltrométrie (méthode Beerkan simplifiée) est un outil pédagogique.</p> <p>Mise en œuvre accessible, facilement disponible, bonne compréhension et acceptabilité par les producteurs.</p> <p>« La porosité est le caractère le plus important mais elle n'est pas évaluée en routine. »</p>   | <p>Outil comparatif, plutôt utilisé en expérimentation.</p> <p>La mesure dépend entre autres des facteurs climatiques et de la teneur initiale en eau du sol.</p> <p>La mesure peut être longue (1 jour) en fonction du sol.</p> <p>Référentiels requis pour application chez les producteurs.</p> |
| <b>Pénétromètre</b>  | <p>Outil de mesure de la résistance physique du sol.</p> <p>Il permet de diagnostiquer des problèmes au niveau du sol, par exemple l'existence de croûte calcique ou de tassement induit par le passage d'engins.</p> <p>Simple d'utilisation.</p> <p>Des schémas de compaction des sols de vergers peuvent être réalisés et représenter la cinétique de compaction</p>  | <p>Plusieurs personnes requises pour la mesure : une pour enfoncer et l'autre pour noter la pression.</p> <p>« Trop superficiel, par exemple à 50cm il pourrait y avoir une croûte imperméable. »</p>  |



|   |  |  |
|---|--|--|
| <b>Vers de terre</b>                    | La présence de vers de terre est souvent évaluée via la présence de turricules, de 'cabanes' en surface ou de macropores.  | Les comptages de vers de terre en respectant les protocoles sont trop longs.<br>Difficultés liées à l'identification des groupes fonctionnels (surtout en phase juvénile).<br>Tests uniquement comparatifs<br>Le prélèvement doit être réalisé de janvier à avril en sol non gelé. |
| <b>Litter/tea bag, Slip test</b>        | Tests assez fiables, visuels.<br>Les tests tea bag sont des proxys de l'activité microbiologique.  | Tests uniquement comparatifs, non chiffrables.   |
| <b>Biomasse et activité microbienne</b> | Il faut environ compter 30 euros pour l'analyse de l'activité microbienne (FDA) et 50 euros pour l'analyse de la biomasse microbienne.<br>« Analyses non systématiques, uniquement quand un problème est constaté. Par exemple, sur des sols de marais souvent asphyxiés, quand la nappe se rabat en juin, le sol commence à respirer et la minéralisation augmente ; ou quand il y a des problèmes de fatigue de sols à la replantation. »<br>« Comment interpréter les résultats de l'activité microbienne en terme de pilotage? On n'en est pas encore là, mais c'est faisable avec la matière organique. » |  |

## 2. Recensement des 63 travaux expérimentaux récents conduits sur les sols de vergers : données disponibles et possibilités d'utilisation

### 2.1. Description du contenu de la base sur la partie 'travaux'

La base ([fichier Excel 'TRAVAUX'](#)) décrit également différents systèmes expérimentaux développés en France, de type factoriel ou système, permettant, ou ayant permis dans les 10 dernières années, des comparaisons et évaluations de modalités de gestion du sol et de sa fertilité. La diversité des espèces fruitières et des parcelles en viticulture utilisées dans ces travaux est représentée sur la figure 4. Les trois principaux bassins de production (sud-est, sud-ouest et nord-ouest) mais avec une sous-représentation du bassin sud-ouest.

Ce fichier 'TRAVAUX' contient 4 onglets (= 4 tables) :

**L'onglet 'TRAVAUX'** structure la base autour des 63 travaux recensés à ce jour. Chacun constitue une ligne de la base et représente une parcelle suivie sur une ou en général plusieurs années avec les mêmes modalités expérimentales. Dans certains cas, le protocole expérimental a évolué au fil des ans et une même parcelle peut être référencée plusieurs fois mais associée à des années différentes. Pour chacun de ces 63 travaux, les éléments suivants sont renseignés :

- Des informations générales sur la durée du suivi expérimental, l'espèce concernée, les objectifs généraux du protocole ainsi que des liens sitographiques ou des références.
- Les facteurs expérimentaux travaillés, regroupés en 4 thématiques principales : (1) la gestion du rang (travail, désherbage, couvert, ...) ; (2) la gestion de l'inter rang (couvert végétal et autres gestions du sol) ; (3) la gestion des apports fertilisants (dose et type des apports : organique, minéral, ...) ; (4) la gestion de l'irrigation (dose et type des apports : goutte à goutte, enterré, aspersion, ...) ; et enfin, (5) une thématique 'autre' regroupe quelques modalités moins fréquentes comme : précédent cultural, modalités de replantation ou de cultures avant plantation (rotations, travail du sol, replantation sur l'ancien rang ou en inter rang...) ou utilisation d'activateurs biologiques.
- Une dernière colonne indique si la parcelle fait partie d'un dispositif expérimental plus large, nommé 'Projet', dont la liste et la description figurent dans le dernier onglet du fichier 'TRAVAUX'.

**L'onglet 'TRAVAUX-PRATIQUES'**. Cette table reprend et complète la précédente en précisant pour chaque facteur étudié, les modalités mises en œuvre. Pour homogénéiser la présentation et permettre une méta-analyse sur l'ensemble des travaux issus de projets différents, les modalités testées ont été catégorisées. Cette catégorisation des modalités pour les 4 thématiques principales est fournie dans les figures 6 à 9 de l'Annexe 2. A titre d'exemple, pour la thématique 'gestion du rang', la modalité : 'couverture du rang avec fabacées' est attribuée à tous les travaux ayant introduit une fabacée comme espèce dominante sur le rang, quelles que soient l'espèce ou la variété. Chaque parcelle peut combiner des modalités de plusieurs facteurs.

L'onglet 'TRAVAUX-OUTILS' permet de faire un lien entre les deux volets du travail en indiquant la liste des outils mobilisés dans chaque protocole. Tous les outils cités figurent dans le fichier 'OUTILS' avec le même index de référence dans les deux fichiers. Cette table contient 870 entrées.

L'onglet 'PROJETS' recense et détaille 27 projets c'est-à-dire des programmes d'expérimentation ou recherche d'une certaine ampleur, souvent financés sur Appel à Projets et souvent multi partenariales et multi sites. Il s'agit de projets dont font partie certains travaux mentionnés dans la table 'TRAVAUX' (onglet 1), ou d'autres projets identifiés d'intérêt pour la réflexion.

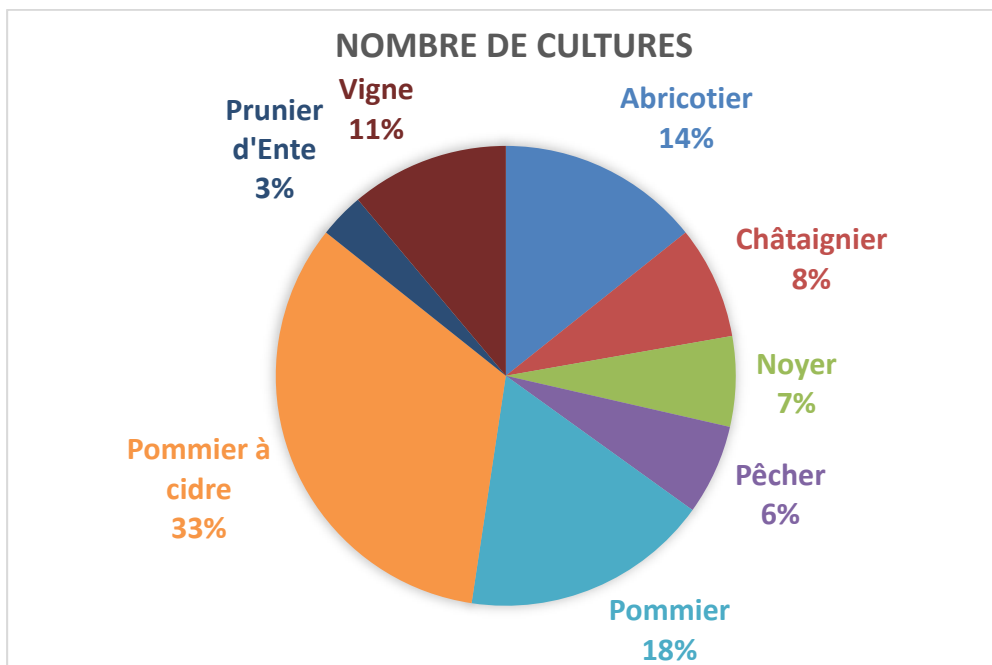


Figure 4: Cultures concernées par les travaux expérimentaux recensés dans la base de données.

## 2.2. Nombreuses possibilités d'utilisation de la base 'travaux'

### 2.2.1. Bilan sur les outils mobilisés dans les travaux : une amélioration des référentiels est possible

**Comparaison entre outils mobilisés dans les expérimentations et outils disponibles.** La figure 5 permet de comparer le nombre et le type d'outils et de méthodes mobilisés dans les travaux avec ceux recensés dans la table 'OUTILS'. De façon attendue, ceux concernant le compartiment 'sol' (84 outils) ou le compartiment 'plante en cultures fruitières' (19 outils) ont été les plus utilisés dans les travaux expérimentaux analysés. On note cependant qu'ils ne représentent respectivement que 59% et 54% des outils référencés dans la base pour les mêmes catégories, ce qui laisse encore une marge de manœuvre non négligeable pour diversifier et enrichir dans le futur, le choix de ces outils et méthodes d'analyses et de suivis au verger. De même, il existe vraisemblablement dans les autres filières de production, peu exploitées à ce jour, des idées à explorer et à adapter à la filière fruitière.

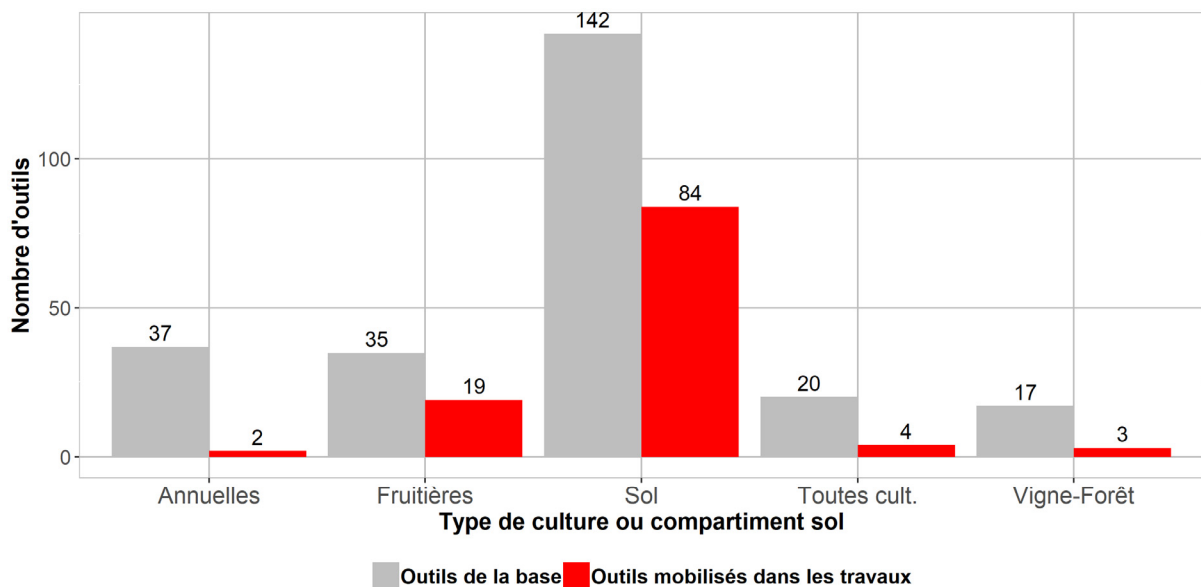


Figure 5: **Nombre et types d'outils ou de méthodes mobilisés dans les travaux en comparaison des outils et méthodes référencés dans la base.** Les outils sont catégorisés comme défini en page 6, en fonction du compartiment spatial analysé (sol, plante) et du type de culture testé quand il est renseigné.

**Analyse des outils mobilisés dans les expérimentations.** A partir du bilan croisé outils - travaux (Annexe 2: **Analyse croisée des outils mobilisés dans chaque 'travaux'**

Figure 77 et 8), l'un des objectifs de cette compilation était de s'interroger (1) sur la possibilité de mobiliser les résultats expérimentaux pour affiner l'évaluation des outils (fiabilité, reproductibilité) et développer ou améliorer les référentiels d'interprétation et (2), en retour, sur la possibilité de faciliter et d'améliorer l'interprétation croisée de résultats issus de



différents protocoles en parvenant à mieux homogénéiser le choix et les méthodes de mesure des variables et des observations lors des expérimentations ou des suivis chez les producteurs.

Au niveau du sol, **les outils récurrents** sont les analyses physico-chimiques de terre, le profil de sol ou cultural, les reliquats d'azote et des analyses biologiques (vers de terre, biomasse et activité microbienne, minéralisation de la MO).

Les analyses physico-chimiques de sol (C/N, CEC, taux de MO, texture, pH, cations extractibles, éléments métalliques, ...) sont les plus courantes, généralement effectuées à plusieurs profondeurs avant plantation puis tous les 4-5 ans pour constater ou non une évolution. Par contre, les protocoles ne sont pas toujours détaillés, or il existe souvent plusieurs méthodes d'analyse pour un même indicateur qui sont à interpréter différemment. Par exemple, la CEC Metson est la méthode la plus employée. Elle représente une CEC idéale à un pH=7 soit 'la taille du réservoir et non la quantité de carburant' tandis que la CEC cobaltihexamine (saturée en carbonates pour les sols calcaires) se rapproche d'une CEC effective (Proix *et al.*, 2015). De même, il existe 2 méthodes pour la granulométrie: avec et sans décarbonatation. La décarbonatation permet de se rapprocher de la proportion d'argile minéralogique dans la fraction inférieure à 2 micromètres et il peut être intéressant de mesurer le calcaire libéré par décarbonatation car il participe à la formation du complexe argilo-humique et donc indirectement à la capacité de rétention d'un sol et à sa porosité ([www.wiki.aurea.eu](http://www.wiki.aurea.eu)). Il serait donc important de préciser systématiquement la méthode employée sur les résultats d'analyses physico-chimiques du sol. Dans la base, lorsque les méthodes ou normes d'analyses physico-chimiques ne sont pas précisées, ces analyses sont désignées sous le terme 'analyses de terre de routine'.

Le profil de sol est généralement fait à la plantation et des profils culturaux ou racinaires sont réalisés ponctuellement une fois le verger implanté.

Les reliquats d'azotes sont mesurés dans la plupart des expérimentations, majoritairement en sortie d'hiver, en pré récolte (septembre) et plus rarement tous les mois, de mars à novembre environ.

Le Nitrachek® est un outil de 'terrain' pour la mesure de l'azote nitrique, également très présent dans les travaux recensés. Il permet une plus grande fréquence de mesures que les reliquats azotés qui nécessitent un prélèvement et une mesure en laboratoire.

Le test bêche, la porosité (méthode Beerkan simplifiée) et la détermination de l'abondance des groupes fonctionnels de vers de terre sont réalisés dans beaucoup de travaux recensés. L'implémentation dans la base d'une grande partie des travaux de SolAB peut générer un biais concernant l'importance accordée à cette mesure des vers de terre. Elle reste néanmoins très utilisée dans les expérimentations plus récentes, même hors production AB.

Une analyse approfondie de la matière organique (fractionnement granulométrique et indices de minéralisation de l'azote et du carbone) associée à la détermination de la biomasse et de l'activité microbienne sont de plus en plus fréquentes. Elles sont proposées par un nombre limité de laboratoires privés comme Celesta-lab, qui possède des référentiels confidentiels pour interpréter les résultats en cultures pérennes (vigne et arboriculture) (Salducci, 2018).

En parallèle à ces analyses de sol, des indicateurs de performance (composantes du rendement et de la vigueur de l'arbre) sont systématiquement mesurés (Figure 2). Les analyses minérales de feuilles sont aussi très pratiquées.

**Utilisation des jeux de données disponibles pour améliorer les référentiels d'interprétation des mesures.** L'existence de jeux de données conséquents, acquis de façon globalement homogène et contrôlée en terme d'outils et de méthodes, sur des modalités différentes est

une condition indispensable pour améliorer l'interprétation des résultats et le développement de référentiels solides. Parmi les travaux recensés, les figures de l'annexe 2 montrent que de tels jeux de données existent et que cette démarche est envisageable pour les deux leviers d'action 'fertilisation' et 'gestion de la couverture du rang' (respectivement avec les modalités fertilisation minérale v/s organique et les modalités désherbage v/s enherbement spontanée v/s bâche). C'est plus difficile pour le levier irrigation pour lequel la modalité 'irrigation par aspersion' a peu de modalités alternatives.

**Autre utilisation possible des jeux de données pour aider à l'interprétation et/ou développer des outils simples et rapides d'utilisation.** En regroupant des jeux de données issus de différents dispositifs expérimentaux, il est également possible d'obtenir des corrélations solides entre des mesures analytiques 'classiques' (de référence) et des indicateurs, évaluant le même processus, mais obtenus avec des outils au champ plus simples et rapides. Par exemple, au niveau du sol, les mesures de nitrates au Nitrachek® peuvent être comparées avec celles des reliquats d'azote (dosage en laboratoire). Au niveau de la plante, les indices de végétation mesurés par le SPAD® ou le N-tester® peuvent être comparés avec les teneurs en azote issues des analyses minérales de feuilles. L'objectif serait de pouvoir remplacer un outil par l'autre en fonction des circonstances.

L'analyse précise des figures de l'Annexe 2 montre que ces corrélations entre outils ou ces agrégations de résultats pourraient concerner les cas évoqués ci-dessous.

**Cas des outils de mesures sur plante.** A côté, du nouvel outil N-tester® mentionné plus haut mais qui reste assez faiblement utilisé, l'agrégation des résultats d'analyse minérale de feuilles issus de plusieurs jeux de données pourrait être tentée. Cette méthode déjà ancienne de pilotage de la fertilisation a souvent été décrite pour son manque de répétabilité d'une année sur l'autre, probablement en partie lié aux conditions d'échantillonnage, mais une reprise de ces résultats sur des situations diversifiées et croisée avec d'autres analyses pourrait améliorer la compréhension de cette mesure. Une agrégation des méthodes et des enseignements à tirer des profils racinaires dans un verger pourrait également être envisagée.

On peut enfin s'interroger sur la faible utilisation d'un outil comme le dendromètre qui pourtant, d'après plusieurs témoignages, semble être un bon outil de compréhension des **interactions** entre l'arbre et le sol et un bon indicateur de l'état nutritionnel de l'arbre. Des partages d'expérience autour de cet outil seraient intéressants à mener.

**Cas des outils de mesures sur sol.** Les outils de pilotage rapide de la fertilisation par mesure de la teneur en nitrates et phosphates de la solution de sol (Nitrachek® et PF-3) sont de bons candidats à cette amélioration des référentiels via l'agrégation des données.

Le test bêche, la porosité et les relevés de vers de terre sont très utilisés mais les mesures sont relatives et ces outils servent surtout à suivre l'évolution temporelle d'une même parcelle. Par contre, le regroupement de jeux de données issus de parcelles différentes n'est pas forcément pertinent dans ce cas, sauf pour comparer l'effet dans le temps de l'application d'un même levier d'action dans des contextes différents.

L'utilisation d'indicateurs de terrain fiables et reproductibles de l'activité biologique des sols reste un enjeu majeur en arboriculture fruitière comme dans les autres filières, car sur ce point les référentiels sont quasi inexistantes, en particulier sur les indicateurs microbiologiques. La

base montre néanmoins que les outils de laboratoire basés sur la biologie moléculaire commencent à être largement utilisés dans les expérimentations récentes. Il faudrait approfondir l'analyse pour évaluer la facilité d'interprétation des résultats acquis en conditions expérimentales et les possibilités d'un transfert à court terme des résultats vers les praticiens de terrain. Dans d'autres filières (dont la filière viticole), des projets apparemment prometteurs, référencés dans la base (sous les noms AGRO-ECO SOL ; Agrinnov et REVA), visent à rendre opérationnels des indicateurs comme l'abondance et la diversité des communautés microbiennes (bactériennes, fongiques et nématodes), et à créer des référentiels en croisant des jeux de données issus des producteurs. Des projets similaires pourraient être menés en arboriculture fruitière.

L'étude du développement des mycorhizes expérimentée dans des travaux déjà anciens (années 2000) semble redémarrer un peu, en particulier lorsque des modalités d'application d'activateurs biologiques sont étudiées.

#### 2.2.2. Bilan sur les pratiques et leviers d'action étudiés : une méta analyse serait souhaitable

Rappel : le temps imparti à ce travail ne permettait pas d'analyser les résultats obtenus dans les expérimentations référencées. Néanmoins, à partir du bilan des thématiques les plus utilisées dans ces expérimentations, cette compilation, si possible encore un peu élargie, pourrait permettre à terme (1) de s'interroger sur la possibilité et l'opportunité de mobiliser tout ou partie des résultats expérimentaux pour développer une méta-analyse sur l'effet des pratiques et leviers d'action testés et (2) en cas de réponse positive, de bien définir les parcelles éligibles et les conditions de faisabilité de cette méta-analyse.

Dans cette optique, une analyse des correspondances multiples sur les dispositifs expérimentaux reste à faire en vue d'en faire une typologie et d'établir un premier réseau de parcelles expérimentales à partir des parcelles déjà recensées.

### 3. Identification des problématiques les plus cruciales et perspectives d'action

Dans ce chapitre, la synthèse des 12 entretiens menés lors du projet est croisée avec les éléments recueillis lors des ateliers du séminaire sur les deux thèmes : outils et leviers d'action. Ces constats partagés doivent permettre d'identifier les problématiques les plus cruciales à travailler et proposer en conséquences des perspectives d'action.

#### 3.1. Hiérarchisation des problématiques soulevées sur les outils

Les difficultés à comprendre le fonctionnement du sol et à raisonner la fertilisation ont conduit à interroger les personnes rencontrées sur la pertinence des outils actuellement disponibles et des indicateurs mesurés. L'objectif était de pouvoir répondre à la question : **faut-il développer un axe d'expérimentation et de recherche spécifique sur les outils ? Les réponses divergent fortement entre acteurs.**

##### Nouveaux outils ou amélioration des outils existants ?

Si les  $\frac{3}{4}$  des enquêtés souhaitent des outils de pilotage ou de diagnostic « *vraiment opérationnels* » (fiables, simples et rapides), « *conçus à destination du producteur* » (pas des adaptations d'outils de recherche) et utilisables '*in situ*' de préférence, certains comptent essentiellement sur le développement de nouveaux outils alors que d'autres estiment qu'il est avant tout nécessaire d'améliorer l'existant.

Le premier groupe considère que si les outils actuels ne sont pas assez précis ou pertinents pour différencier l'influence des pratiques de fertilisation, c'est qu'ils ne s'intéressent pas aux bonnes variables : « *les méthodes classiques sont sans doute insuffisantes pour analyser l'effet du passage aux apports organiques sur la qualité de la production. Si on ne voit pas de différence, c'est peut-être qu'on n'observe pas les bons paramètres. Si on étudiait par exemple les types de polyphénols ou les types de sucres, on verrait peut-être des différences.* »

Le second groupe estime par contre que les outils et indicateurs disponibles sont suffisants et qu'avant de développer de nouvelles technologies, il faut mieux utiliser l'existant. Pour eux, les analyses ne sont pas toujours utilisées et interprétées correctement. Par exemple, les analyses chimiques du sol sont davantage pratiquées que les analyses physiques : « *pourtant, le b.a.-ba de l'interprétation du sol est la granulométrie 5 fractions pour voir si le sol fonctionne bien ou si au contraire il est asphyxiant. C'est une approche simple et rigoureuse.* » « *Les producteurs font des analyses par routine après plantation mais ils ne s'en servent pas assez pour raisonner la fertilisation. Par exemple ils ne suivent pas assez l'évolution de la matière organique.* »

##### La question des référentiels est également largement débattue

« *Ce qui manque avant tout, c'est une formalisation commune des méthodes de mesure et d'interprétation, déjà pour des analyses classiques comme les profils de sol.* »

Près de la moitié des enquêtés ont évoqué la nécessité de créer ou d'améliorer les référentiels afin de valider les outils et de mieux interpréter les indicateurs mesurés. Il est reproché aux

référentiels existants de ne plus correspondre aux systèmes de culture actuels. Par exemple les besoins en azote du pommier sont surévalués, ils ont été établis sur des pommiers en pots et sont à adapter aux pratiques culturales actuelles.

L'utilisation de référentiels privés développés par certains laboratoires et maintenus confidentiels est également questionnée.

Ces résultats des enquêtes recourent l'un des constats importants du séminaire :

- **Les outils et méthodes de pilotage de la fertilisation ne sont pas assez opérationnels et validés. Que ce soit pour les outils classiques ou plus novateurs, il est impératif de développer des référentiels d'interprétation plus robustes.**

### 3.2. Hiérarchisation des problématiques soulevées sur les leviers d'action

Sur ce second thème, deux autres constats importants sont ressortis du séminaire

- **La difficulté de quantifier correctement les dynamiques de fonctionnement du sol et du cycle des nutriments dans les vergers.** Ainsi, les dynamiques de minéralisation de la matière organique et les dynamiques d'absorption des nutriments à l'échelle journalière ou hebdomadaire, semblent constituer deux points de blocage importants pour une bonne maîtrise de la fertilisation et de la qualité des sols.
- **Les approches de modélisation plus ou moins complexes venant de la recherche ou développées de façon plus empirique par des producteurs et conseillers semblent être des méthodes incontournables pour développer des connaissances plus génériques et tester des pratiques de façon plus raisonnée.** Les différentes approches, plus ou moins complexes présentées lors du séminaire doivent être croisées et approfondies.

A nouveau ces constats rejoignent les principales conclusions des entretiens avec les producteurs et conseillers, détaillées ci-dessous.

#### **Fertilisation organique**

Contrairement à la fertilisation minérale, en apports au sol ou foliaires, la fertilisation organique ne permet pas, ou plus difficilement, de corriger rapidement des carences en cours de saison. Une meilleure évaluation de la dynamique d'évolution des éléments apportés, en particulier la minéralisation de la matière organique, apparaît de façon récurrente comme un objectif indispensable à atteindre pour adapter les pratiques de fertilisation.

Les facteurs de variabilité de la minéralisation organique sont globalement connus : il s'agit pour une grande part de la pluviométrie et de la température qui agissent à l'échelle journalière ou hebdomadaire. Ces échelles de temps sont importantes à considérer car elles constituent probablement un des points de blocage des méthodes classiques de bilans de fertilité qui sont trop souvent raisonnées à l'échelle d'un cycle de production et ne prennent donc pas en compte les spécificités de l'année climatique.

L'azote est l'élément qui semble poser le plus de problème du fait de son importance pour l'arbre, de sa solubilité dans le sol et de sa minéralisation qui dépend non seulement du climat mais aussi des pratiques de fertilisation à la fois minérale et organique.

Pour les autres éléments comme la potasse et le phosphore, la biodisponibilité dépend entre autre du type de sol. Les phénomènes de mises à disposition et d'absorption sont complexes et mal connus.

Un autre point de blocage pour une bonne maîtrise de la fertilisation organique concerne les informations fournies sur les engrais organiques. Elles semblent trop souvent insuffisantes et ne permettent pas de prédire l'évolution des apports après application: « *les indices de minéralisation disponibles ne sont pas assez précis, l'ISMO ou ISB des produits devraient être connus et accessibles par tous* » et « *Il y a un gros problème de traçabilité des produits organiques vendus. Les lots, dates et zones de provenance sont de gros facteurs de variabilité* ».

### **Absorption minérale et interactions sol-plante**

En plus de l'évaluation insuffisante de la biodisponibilité réelle des nutriments dans le sol, les conditions d'une bonne absorption de ces nutriments par l'arbre ne sont pas non plus toujours maîtrisées : « *Même si on trouve de l'azote disponible dans le sol, on ne sait pas si l'arbre en pompe* ». Dans de nombreux cas, la disponibilité des nutriments dans le sol et les teneurs foliaires des nutriments ne sont pas corrélées: « *Il n'y a pas de corrélation du P soluble du sol, ni avec les apports fertilisants, ni avec les teneurs dans la plante. Le phosphore dépend du type de sol et aussi de son activité biologique: s'il y a une bonne activité microbiologique, le phosphore est assimilé* ».

En conséquence, certains producteurs ont tendance à privilégier l'analyse de l'état nutritionnel de l'arbre: « *pour évaluer la fertilité du verger, il faut mieux analyser la plante plutôt que le sol car on ne maîtrise pas les interactions sol-plante*»; et « *le capteur plante est essentiel: à choisir j'enlève les capteurs sols et je prends le capteur plante* »; et « *Pour moi, le meilleur indicateur de la fertilisation est l'état aérien de l'arbre et l'état des racines. Une approche directe par observation du comportement racinaire est efficace* ».

Néanmoins, la majorité des enquêtés s'accordent sur le fait que les analyses de sol et les analyses de l'état nutritionnel de l'arbre doivent être couplées, même si la mise en corrélation de ces mesures n'est pas toujours évidente à interpréter: « *pour raisonner la fertilisation, les analyses des nutriments du sol (analyses de terre, photomètres) sont généralement mises en corrélation avec la teneur en nutriments de la plante (feuille, fruits, rameaux,...)* ». Certains exemples évoqués semblent avoir permis de remonter à la cause du problème rencontré: « *Nous avons suivi les teneurs en N P K dans la solution de sol et mis en relation ces mesures avec des analyses de feuilles et de rameaux. Nous avons ainsi mis en évidence l'effet de la forme d'apport. Par exemple, le P passe mieux sous forme organique dans l'arbre. En fonction des formes d'apports, il y a des pics à des moments intéressants et à d'autre moins* » ; et « *Grâce à ces outils (outils portatifs d'analyse des éléments dans une solution de sol ou de végétal), j'ai fait le lien entre, d'un côté des apports importants et peu fractionnés et de l'autre une mauvaise assimilation de K et un taux Brix pas satisfaisant du fruit* ».



Enfin, après absorption hydrominérale, les mécanismes d'allocation des nutriments entre les organes de l'arbre ne sont pas non plus bien connus, ce qui complique encore l'interprétation des indicateurs disponibles.

### **Couverts végétaux**

Plusieurs interrogations et points de blocage ont également été évoqués sur les couverts végétaux en particulier sur le rang dont l'implantation se renforce, en alternative au travail du sol et surtout au désherbage chimique.

Les interrogations tournent autour du choix des espèces en fonction du contexte agro-pédo-climatique, du système de culture et des fonctionnalités visées. En effet ces couverts peuvent entrer en concurrence avec les arbres pour les ressources en azote et posent donc des questions sur les compléments nutritionnels à fournir et sur les dates de fauche : « [...]ils (les couverts végétaux) sont conduits dans une stratégie de gestion de l'enherbement et détruits tard pour attirer les auxiliaires de culture. En terme de gestion de l'azote, ce n'est pas ça, il faudrait le détruire en mars/avril pour que l'azote soit disponible au moment du grossissement du fruit »; et « [...] l'orge et l'avoine vont gratter le sol en profondeur, nous gardons ce couvert le plus tard possible mais il bouffe de l'azote et quand nous le broyons, cela entraîne une faim d'azote. Si on a les outils de semis, on peut implanter de la fèverole ou du trèfle pour éviter la faim d'azote ».

Des problèmes sont aussi liés :

- aux techniques d'implantation et d'entretien des couverts : « Comment les semer ? Comment avoir une levée suffisante ? »
- à l'utilisation des paillages organiques : « le mulch et le BRF sont chers, ils provoquent une faim d'azote et l'herbe pousse quand même au travers ».

De façon plus annexe, d'autres problèmes liés aux pratiques culturales ont été évoqués, dont le tassement et la fatigue de sol à la replantation.

### **3.3. A l'issue du séminaire 4 problématiques prioritaires émergent**

Lors des ateliers, les groupes ont formulé quatre problématiques prioritaires :

- |   |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Comment intégrer des couverts en inter rang pour une gestion durable des sols ?</li><li>• Quels services/dis services d'un couvert sur le rang en verger adulte ?</li><li>• Comment adapter un modèle de minéralisation de l'azote organique en verger adulte (minéralisation naturelle, des apports d'engrais et/ou d'engrais verts) ?</li><li>• Peut-on développer un outil d'aide à la décision permettant de suivre et maintenir/améliorer: la production (rendement et qualité), la vie du sol et la durabilité du verger?</li></ul> |
|---|

Ces problématiques recourent à nouveau les 3 préoccupations récurrentes et régulièrement mentionnées depuis la première enquête, avec des attentes fortes concernant i) l'amélioration des connaissances sur les dynamiques de la matière organique et des nutriments dans le verger; ii) l'amélioration des connaissances sur les effets des pratiques de gestion de la couverture du sol et iii) la création d'outils d'aide à la décision permettant de raisonner les pratiques culturales liées au sol.

Lors des ateliers du séminaire, chaque groupe de travail devait proposer des actions de recherche susceptibles de répondre aux problématiques formulées. Ces propositions peuvent être regroupées en quatre pistes principales:

- 1) Poursuivre la **collecte** des connaissances, des expérimentations et des jeux de données existants sur :
  - l'effet des pratiques culturales en lien avec le sol;
  - les processus impliqués dans l'alimentation hydrominérale des arbres contribuant au maintien de la qualité du sol et à la production du verger: dynamiques des nutriments (minéralisation de la matière organique et absorption de l'azote), stockage de l'arbre et séquestration de carbone.

- 2) **Analyser** la base de données pour identifier et hiérarchiser les facteurs les plus influents sur ces processus et l'effet des pratiques culturales.

Parmi ces facteurs, il faudra distinguer les facteurs intrinsèques au verger (historique, contexte pédoclimatique, ...) et les leviers d'action variables qui peuvent être contrôlés et changés par le producteur (pratiques de fertilisation, gestion du sol, ...).

Compte tenu du contexte « glyphosate », un groupe a proposé de faire un focus prioritaire sur l'analyse des effets (services et dis-services) associés à la présence de couverts végétaux sur le rang.

- 3) **Identifier** les variables déterminantes à mesurer pour évaluer la fertilité et la qualité des sols en verger et les outils d'analyses associés:

Il s'agirait de :

- Connaître les outils les plus adaptés et opérationnels;
- Revalider les outils et les protocoles d'échantillonnages;
- Adapter des modèles de minéralisation et d'absorption des nutriments, en fonction des nouvelles pratiques (développement de la fertilisation organique, nouvelles méthodes de travail du sol,...) ou des nouveaux produits (engrais) disponibles.

- 4) **Créer un réseau** national de parcelles expérimentales, chez les producteurs et les stations d'expérimentations afin d'obtenir des références dans diverses conditions agronomiques et pédoclimatiques.

### 3.4. La proposition du GISFruits pour 2019-2020

Cette proposition se base sur quatre postulats :

- Il est possible de faire avancer conjointement, à partir du même dispositif expérimental (réseau de parcelles ou autre), la réflexion sur l'amélioration des outils et celle sur la recherche des leviers d'action les plus efficaces.
- Parmi l'ensemble des leviers d'action envisageables, deux apparaissent prioritaires: 1) la gestion du rang et ses modalités alternatives à l'utilisation du glyphosate et 2) le passage à la fertilisation organique (qualité et quantité) comme modalité alternative à l'azote minérale.
- Compte tenu des interactions complexes sol x arbre x plantes de couverture x pratiques, du coût et de la lourdeur des expérimentations en arboriculture fruitière, des analyses permettant l'agrégation de jeux de données issus de parcelles différentes (en terme de contexte et de leviers d'action mis en œuvre) semblent particulièrement pertinentes (approche 'méta-analyse' simplifiée).
- La qualité d'une méta-analyse dépend de la capacité à homogénéiser les jeux de données disponibles. La question du choix, de la calibration et des référentiels d'interprétation des outils et méthodes mobilisés est déterminante.

**La proposition vise globalement à s'appuyer sur un réseau de parcelles pour tester simultanément l'impact de leviers d'action communs et la pertinence de quelques outils et méthodes de pilotage pour caractériser les contextes, élaborer et piloter des règles de décision génériques et évaluer les performances agronomiques (rendement, qualité) et environnementales (consommation d'intrants : eau, fertilisants, énergie) des parcelles.**

Ce projet pourrait se dérouler en deux temps :

- Une phase développée à partir de jeux de données déjà acquis qui permettrait une évaluation globale de la démarche sur trois critères :
  - la capacité à discriminer de façon cohérente les modalités testées en fonction du contexte
  - la capacité à construire des hypothèses explicatives compatibles concernant les processus biophysiques impliqués.
  - la comparaison des résultats obtenus par les outils et méthodes mobilisés dans différents contextes: la comparaison se faisant sur résultats bruts ou via les corrélations entre ces résultats bruts et des résultats plus 'classiques' et normés.

Dans cette optique les travaux déjà référencés dans la base devraient permettre d'identifier un premier ensemble de jeux de données disponibles à compléter par un appel à participation auprès des partenaires. Si le travail est suffisamment préparé en amont, cette première phase pourrait être menée dans le cadre d'un mémoire de fin d'étude niveau M2.

- Une phase d'acquisition de nouvelles données, plus ciblées, en fonction des premiers résultats obtenus et des opportunités de financement

## Références

### Références citées dans le rapport

- Abbott L.K. & Murphy D.V., éd. 2007. What is Soil Biological Fertility? Dans : *Soil Biological Fertility - A key to sustainable land use in Agriculture*. Dordrecht : Springer Netherlands, p. 1-15.
- Balloy B., Bispo A., Bouthier A., Chenu C., Cluzeau D., Degan F., & Metzger L. 2017. *Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols*. Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, 61 p.
- Bünemann E.K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R.E., De Deyn G., de Goede R., Fleskens L., Geissen V., Kuyper T.W., Mäder P., Pulleman M., Sukkel W., van Groenigen J.W., & Brussaard L. 2018. Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*. 120, p. 105-125.
- Guillermin P., Coureau C., Delavaud M., Fourrié L., Guérin A., Le Clanche X., Parveaud C.-éric, Rivière N., & Varlet P. 2017. Bilan de l'enquête « SOLS en vergers » et perspectives. , 9 p.
- Poisson A.-S. 2015. *Les Outils d'Aide à la Décision*. GIS Fruits, 10 p.
- Proix N., Cleret L., Viart G., Ducristel D., & Guerin A. 2015. *Mesure de CEC et de cations échangeables par une solution de cobaltiheximine saturée en carbonate*.
- Salducci X. 2018. *Quels outils pour caractériser le fonctionnement biologique du sol ?... retour sur 20 ans d'expérience...*
- SCE. 2016. *Recensement et analyse des outils de raisonnement dynamique et de pilotage de la fertilisation azotée*. Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, 81 p.
- Thibault C. & Lecompte F. 2018. *Gestion de la fertilité des sols en cultures légumières et maraîchères*. GIS Piclé, 72 p.
- Thoumazeau A., Bessou C., Renevier M.-S., Trap J., Marichal R., Mareschal L., Decaëns T., Bottinelli N., Jaillard B., Chevallier T., Suvannang N., Sajjaphan K., Thaler P., Gay F., & Brauman A. 2019. Biofunctool®: a new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part A: concept and validation of the set of indicators. *Ecological Indicators*. 97, p. 100-110.

### Webographie

**Journée d'échange sur la valorisation des sols de vergers : quels leviers d'actions pour une production durable ?** Inra, 19 février 2019, consulté sur : <https://www.gis-fruits.org/Evenements-du-GIS/Journee-d-echange-sur-la-valorisation-des-sols-de-vergers>

**Rapport Gestion des sols de vergers : panorama des outils et travaux, pistes pour la recherche**, Inra, 3 octobre 2019, consulté sur : <https://www.gis-fruits.org/GROUPES-THEMATIQUES/Approche-systeme/Rapport-Gestion-des-sols-de-vergers-panorama-des-outils-et-travaux-pistes-pour-la-recherche>

## Références citées dans le tableau 'Outils'

- Baize, D., Deslais, W., Saby, N., 2007. Teneurs en huit éléments en traces (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn) dans les sols agricoles en France. Résultats d'une collecte de données à l'échelon national. ADEME – INRA – GIS Sol.
- Balloy, B., Bispo, A., Bouthier, A., Chenu, C., Cluzeau, D., Degan, F., Metzger, L., 2017. Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols. Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Forêt.
- Bartholomé, O., Grigulis, K., Colace, M.-P., Arnoldi, C., Lavorel, S., 2018. Methodological uncertainties in estimating carbon storage in temperate forests and grasslands. *Ecol. Indic.* 95, 331–342. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.07.054>
- Bouchez, T., Blieux, A.L., Dequiedt, S., Domaizon, I., Dufresne, A., Ferreira, S., Godon, J.J., Hellal, J., Joulain, C., Quaiser, A., Martin-Laurent, F., Mauffret, A., Monier, J.M., Peyret, P., Schmitt-Koplin, P., Sibourg, O., D'oiron, E., Bispo, A., Deportes, I., Grand, C., Cuny, P., Maron, P.A., Ranjard, L., 2016. Molecular microbiology methods for environmental diagnosis. *Environ. Chem. Lett.* 14, 423–441. <https://doi.org/10.1007/s10311-016-0581-3>
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussièrre, F., Cabidoche, Y., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillère, J., Hénault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model stics. *Eur. J. Agron.* 18, 309–332. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00110-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00110-7)
- Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T.W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J.W., Brussaard, L., 2018. Soil quality – A critical review. *Soil Biol. Biochem.* 120, 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Cadre, E.L., Kinkondi, M., Koutika, L.-S., Epron, D., Mareschal, L., 2018. Anionic exchange membranes, a promising tool to measure distribution of soil nutrients in tropical multispecific plantations. *Ecol. Indic.* 94, 254–256. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.041>
- 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. *Appl. Environ. Microbiol.* 69, 3593–3599. <https://doi.org/10.1128/AEM.69.6.3593-3599.2003>
- Canali, S., Trinchera, A., Intrigliolo, F., Pompili, L., Nisini, L., Mocali, S., Torrì, B., 2004. Effect of long term addition of composts and poultry manure on soil quality of citrus orchards in Southern Italy. *Biol. Fertil. Soils* 40. <https://doi.org/10.1007/s00374-004-0759-x>
- Cannavo, P., Harmand, J.-M., Zeller, B., Vaast, P., Ramírez, J.E., Dambrine, E., 2013. Low nitrogen use efficiency and high nitrate leaching in a highly fertilized Coffea arabica–Inga densiflora agroforestry system: a 15N labeled fertilizer study. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 95, 377–394. <https://doi.org/10.1007/s10705-013-9571-z>
- Cébron, A., 2004. Nitrification, bactéries nitrifiantes et émissions de N<sub>2</sub>O. Université Paris VI – Pierre et Marie Curie.
- Celette, F., Ripoche, A., Gary, C., 2010. WaLIS—A simple model to simulate water partitioning in a crop association: The example of an intercropped vineyard. *Agric. Water Manag.* 97, 1749–1759. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.06.008>
- Chabert, A., 2017. Expression combinée des services écosystémiques en systèmes de production agricole conventionnels et innovants : étude des déterminants agroécologiques de gestion du sol, des intrants et du paysage. Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse).

- Ciavatta, C., Govi, M., 1993. Use of insoluble polyvinylpyrrolidone and isoelectric focusing in the study of humic substances in soils and organic wastes. *J. Chromatogr. A* 643, 261–270. [https://doi.org/10.1016/0021-9673\(93\)80560-U](https://doi.org/10.1016/0021-9673(93)80560-U)
- Coleman, K., Jenkinson, D.S., 1996. RothC-26.3 - A Model for the turnover of carbon in soil, in: Powlson, D.S., Smith, P., Smith, J.U. (Eds.), *Evaluation of Soil Organic Matter Models*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 237–246.
- Crossley, D.A., Blair, J.M., 1991. A high-efficiency, “low-technology” Tullgren-type extractor for soil microarthropods. *Agric. Ecosyst. Environ.* 34, 187–192. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(91\)90104-6](https://doi.org/10.1016/0167-8809(91)90104-6)
- Culman, S.W., Snapp, S.S., Freeman, M.A., Schipanski, M.E., Beniston, J., Lal, R., Drinkwater, L.E., Franzluebbers, A.J., Glover, J.D., Grandy, A.S., Lee, J., Six, J., Maul, J.E., Mirksy, S.B., Spargo, J.T., Wander, M.M., 2012. Permanganate Oxidizable Carbon Reflects a Processed Soil Fraction that is Sensitive to Management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76, 494. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0286>
- De Bruyne, F., Besset, J., Girard, T., Vigne, C., 2004. Outil pour la mesure de la circonférence des troncs. *Cah. Tech. INRA* 52, 23–27.
- Delalande, M., Gavaland, A., Mistou, M.N., Meunier, F., Marandel, R., Miglionico, G., Fargier, S., Doussan, C., 2017. Mesure de l’eau du sol : questions, méthodes et outils Exemples d’application sur deux plateformes champs du réseau « PHENOME » 32.
- Denoroy, P., Dubrulle, P., Villette, C., Colomb, B., 2004. *RegiFert, interpréter les résultats d’analyses de terre*, INRA Editions. ed, Collection Techniques et pratiques.
- Fardeau, J.-C., Morel, C., Boniface, R., 1988. Pourquoi choisir la méthode Olsen pour estimer le phosphore « assimilable » des sols ? *Agronomie* 8, 577–584. <https://doi.org/10.1051/agro:19880702>
- Floch, C., Capowiez, Y., Criquet, S., 2009. Enzyme activities in apple orchard agroecosystems: How are they affected by management strategy and soil properties. *Soil Biol. Biochem.* 41, 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.09.018>
- Fragoulis, G., Trevisan, M., Di Guardo, A., Sorce, A., van der Meer, M., Weibel, F., Capri, E., 2009. Development of a Management Tool to Indicate the Environmental Impact of Organic Viticulture. *J. Environ. Qual.* 38, 826. <https://doi.org/10.2134/jeq2008.0182>
- Hassouna, M., Eglin, T., Cellier, P., Colomb, V., Cohan, J.-P., Decuq, C., Delabuis, M., Edouard, N., Espagnol, S., Eugène, M., Fauvel, Y., Fernandes, E., Fischer, N., Flechard, C., Genermont, S., Godbout, S., Guingand, N., Guyader, J., Lagadec, S., Laville, P., Lorinquer, E., Loubet, B., Loyon, L., Martin, C., Méda, B., Morvan, T., Oster, D., Oudart, D., Personne, E., Planchais, J., Ponchant, P., Renand, G., Robin, P., Rochette, Y., 2016. Measuring emissions from livestock farming: greenhouse gases, ammonia and nitrogen oxides. INRA-ADEME.
- Henault, C., Bizouard, F., Laville, P., Gabrielle, B., Nicoullaud, B., Germon, J.C., Cellier, P., 2005. Predicting in situ soil N<sub>2</sub>O emission using NOE algorithm and soil database. *Glob. Change Biol.* 11, 115–127. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00879.x>
- Herrick, J.E., Whitford, W.G., de Soyza, A.G., Van Zee, J.W., Havstad, K.M., Seybold, C.A., Walton, M., 2001. Field soil aggregate stability kit for soil quality and rangeland health evaluations. *Catena* 44, 27–35.
- Husson, O., 2013. Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy. *Plant Soil* 362, 389–417. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1429-7>
- Islam, K., Singh, B., McBratney, A., 2003. Simultaneous estimation of several soil properties by ultra-violet, visible, and near-infrared reflectance spectroscopy. *Soil Res.* 41, 1101. <https://doi.org/10.1071/SR02137>



Janssens, I.A., Kowalski, A.S., Longdoz, B., Ceulemans, R., 2000. Assessing forest soil CO<sub>2</sub> efflux: an in situ comparison of four techniques. *Tree Physiol.* 20, 23–32. <https://doi.org/10.1093/treephys/20.1.23>

Jolivet, C., Almeida-Falcon, J.-L., Berché, P., Boulonne, L., Fontaine, M., Gouny, L., Lehmann, S., Maître, B., Ratié, C., Soler-Dominguez, N., 2018. Manuel du Réseau de mesures de la qualité des sols 137.

Jones, J., Hoogenboom, G., Porter, C., Boote, K., Batchelor, W., Hunt, L., Wilkens, P., Singh, U., Gijsman, A., Ritchie, J., 2003. The DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.* 18, 235–265. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)

Juste, C., Pouget, R., 1972. Appréciation du pouvoir chlorosant des sols par un nouvel indice faisant intervenir le calcaire actif et le fer facilement extractible. *CR Acad Agric* 58, 352–364.

Keuskamp, J.A., Dingemans, B.J.J., Lehtinen, T., Sarneel, J.M., Hefting, M.M., 2013. Tea Bag Index: a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems. *Methods Ecol. Evol.* 4, 1070–1075. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12097>

Kjeldahl, J., 1883. Neue Methode zur Bestimmung des Stickstoffs in organischen Körpern. *Fresenius Z. Für Anal. Chem.* 22, 366–382. <https://doi.org/10.1007/BF01338151>

Kratz, W., 1998. The bait-lamina test: General aspects, applications and perspectives. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 5, 94–96. <https://doi.org/10.1007/BF02986394>

Le Bissonnais, Y., 2016. Le Bissonnais, Y. (1996). Aggregate stability and assessment of crustability and erodibility: 1. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science* , 47, 425-437.: Reflections by Y. Le Bissonnais. *Eur. J. Soil Sci.* 67, 2–4. [https://doi.org/10.1111/ejss.2\\_12311](https://doi.org/10.1111/ejss.2_12311)

Lescourret, F., Moitrier, N., Valsesia, P., Génard, M., 2011. QualiTree, a virtual fruit tree to study the management of fruit quality. I. Model development. *Trees - Struct. Funct.* 25, 519–530.

Lidón, A., Ramos, C., Ginestar, D., Contreras, W., 2013. Assessment of LEACHN and a simple compartmental model to simulate nitrogen dynamics in citrus orchards. *Agric. Water Manag.* 121, 42–53.

Mirás-Avalos, J., Egea, G., Nicolás, E., Génard, M., Vercambre, G., Moitrier, N., Valsesia, P., González-Real, M., Bussi, C., Lescourret, F., 2011. QualiTree, a virtual fruit tree to study the management of fruit quality. II. Parameterisation for peach, analysis of growth-related processes and agronomic scenarios. *Trees - Struct. Funct.* 1–15.

Oehl, F., Sieverding, E., Ineichen, K., Mader, P., Boller, T., Wiemken, A., 2003. Impact of Land Use Intensity on the Species Diversity of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Agroecosystems of Central Europe. *Appl. Environ. Microbiol.* 69, 2816–2824. <https://doi.org/10.1128/AEM.69.5.2816-2824.2003>

Padilla, F.M., Gallardo, M., Peña-Fleitas, M.T., de Souza, R., Thompson, R.B., 2018. Proximal Optical Sensors for Nitrogen Management of Vegetable Crops: A Review. *Sensors* 18, 2083. <https://doi.org/10.3390/s18072083>

Parnaudeau, V., Réau, R., Dubrulle, P., 2012. Un outil d'évaluation des fuites d'azote vers l'environnement à l'échelle du système de culture: le logiciel Syst'N. *Innov. Agron.* 21, 59–70.

Plouffe, D., Canada, Agriculture et agroalimentaire Canada, 2018. CIPRA - Centre informatique de prévision des ravageurs en agriculture: guide des cultures, 2018.

Qian, P., Schoenau, J.J., 2002. Practical applications of ion exchange resins in agricultural and environmental soil research. *Can. J. Soil Sci.* 82, 9–21. <https://doi.org/10.4141/S00-091>

Ranjard, L., Poly, F., Lata, J.-C., Mougél, C., Thioulouse, J., Nazaret, S., 2001. Characterization of Bacterial and Fungal Soil Communities by Automated Ribosomal Intergenic Spacer Analysis Fingerprints: Biological and Methodological Variability. *Appl. Environ. Microbiol.* 67, 4479–4487. <https://doi.org/10.1128/AEM.67.10.4479-4487.2001>

- Rosier, C.L., Hoyer, A.T., Rillig, M.C., 2006. Glomalin-related soil protein: Assessment of current detection and quantification tools. *Soil Biol. Biochem.* 38, 2205–2211. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.01.021>
- Ruiz, N., Mathieu, J., Célini, L., Rollard, C., Hommay, G., Iorio, E., Lavelle, P., 2011. IBQS: A synthetic index of soil quality based on soil macro-invertebrate communities. *Soil Biol. Biochem.* <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.05.019>
- Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., Richard, G., 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil Tillage Res.* 83, 173–193. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004>
- SCE, 2016. Recensement et analyse des outils de raisonnement dynamique et de pilotage de la fertilisation azotée. Ministère de l’agriculture, de l’agroalimentaire et de la forêt.
- Segers, R., 1998. Methane production and methane consumption: a review of processes underlying wetland methane fluxes. *Biogeochemistry* 41, 23–51. <https://doi.org/10.1023/A:1005929032764>
- Shepherd, G., Stagnari, F., Pisante, M., Benites, J., 2008. Visual Soil Assessment - field guide for orchards. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Stone, D., Ritz, K., Griffiths, B.G., Orgiazzi, A., Creamer, R.E., 2016. Selection of biological indicators appropriate for European soil monitoring. *Appl. Soil Ecol.* 97, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.08.005>
- Thoumazeau, A., Bessou, C., Renevier, M.-S., Trap, J., Marichal, R., Mareschal, L., Decaëns, T., Bottinelli, N., Jaillard, B., Chevallier, T., Suvannang, N., Sajjaphan, K., Thaler, P., Gay, F., Brauman, A., 2019. Biofunctool®: a new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part A: concept and validation of the set of indicators. *Ecol. Indic.* 97, 100–110. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.09.023>
- Thoumazeau, A., Gay, F., Alonso, P., Suvannang, N., Phongjinda, A., Panklang, P., Chevallier, T., Bessou, C., Brauman, A., 2017. SituResp®: A time- and cost-effective method to assess basal soil respiration in the field. *Appl. Soil Ecol.* 121, 223–230. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.10.006>
- Veum, K.S., Sudduth, K.A., Kremer, R.J., Kitchen, N.R., 2017. Sensor data fusion for soil health assessment. *Geoderma* 305, 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.05.031>
- von Törne, E., 1990. Assessing feeding activities of soil-living animals. I. Bait-lamina-tests. *Pedobiologia* 34, 89–101.
- Werner, M.R., 1997. Soil quality characteristics during conversion to organic orchard management. *Appl. Soil Ecol.* 5, 151–167. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(96\)00139-4](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(96)00139-4)

## Liste des abréviations

ANPP : Association Nationale Pommes Poires

BDD : Base De Données

Bio : en Agriculture Biologique

BIP : Bureau Interprofessionnel du Pruneau

BRF : Bois Raméal Fragmenté

CEC : Capacité d'Echange Cationique

C/N : rapport carbone/azote

CTIFL : Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes

FAO : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*)

GIS : Groupement d'Intérêt Scientifique

IFPC : Institut Français des Productions Cidricoles

Inra : Institut national de la recherche agronomique

ISB : Indice de Stabilité Biologique

ISMO : Indice de Stabilité de la Matière Organique

ITAB : Institut Technique de l'Agriculture Biologique

K : Potassium

MAAF : Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt

MO : Matière Organique

N : Azote

OAD : Outils d'Aide à la Décision

OPVT : Observatoire Participatif des Vers de Terre

P : Phosphore

REVA : Réseau d'Expérimentation et de Veille à l'innovation Agricole

USDA : *United States Department of Agriculture*

## Table des figures

|   |    |
|---|----|
| Figure 1: Résultats de l'enquête 'Sols en vergers' (Guillermin et al., 2017) : attentes prioritaires (a) et classement des principaux problèmes rencontrés au sein de ceux classés « assez préoccupants à préoccupants » (b1) ou de ceux classés « très préoccupants » (b2) .....   | 5  |
| Figure 2: <b>Outils et méthodes d'analyse du sol - compartiment végétal, parcelle et couvert</b> (respectivement cadre vert, rouge et noir sur les lignes Index). Les 109 éléments présentés sont identifiés par leur index tel que défini dans la base 'Outils'. L'utilisation référencée de l'outil sur un type de culture spécifique est indiquée sur la ligne 'Cultures' avec 'Pérennes ligneux' = utilisation sur vigne ou arbres forestiers et NR= non renseigné. Le type d'outil concernant son mode d'utilisation (analyse de laboratoire, outil ou méthode de terrain...) sont spécifiées en rouge. La thématique principale couverte par chaque outil est spécifiée en bleu. .... | 8  |
| Figure 3: <b>Outils et méthodes d'analyse du sol - compartiment sol</b> . Les 142 éléments présentés sont identifiés par leur index tel que défini dans la base 'Outils'. Ils sont classés en fonction de 6 objectifs principaux : rectangle gris indiquant le nombre de représentants par objectif. Le type d'outil concernant son mode d'utilisation (analyse de laboratoire outil ou méthode de terrain...) sont spécifiées en rouge. La thématique principale couverte par chaque outil est spécifiée en bleu. ....   | 10 |
| Figure 4: Cultures concernées par les travaux expérimentaux recensés dans la base de données. ....  | 18 |
| Figure 5: <b>Nombre et types d'outils ou de méthodes mobilisés dans les travaux</b> en comparaison des outils et méthodes référencés dans la base. Les outils sont catégorisés comme défini en page 6, en fonction du compartiment spatial analysé (sol, plante) et du type de culture testé quand il est renseigné. ....   | 19 |
| Figure 6: Structure de la base de données.....  | 37 |
| Figure 7: Nombre d'utilisation des outils 'plante' pour chaque combinaison de modalités expérimentales comprenant des modalités de fertilisation et d'irrigation. ....  | 39 |
| Figure 8: Nombre d'utilisation des outils 'sol' pour chaque combinaison de modalités expérimentales comprenant des modalités de fertilisation et d'irrigation. ....   | 40 |
| Figure 9: Nombre d'utilisation des outils 'plante' pour chaque combinaison de modalités expérimentales comprenant des modalités gestion du rang.....  | 41 |
| Figure 10: Nombre d'utilisation des outils 'sol' pour chaque combinaison de modalités expérimentales comprenant des modalités gestion du rang.....  | 42 |

## Table des tableaux

|   |    |
|---|----|
| Tableau 1: Tableau de synthèse des avis sur quelques outils de gestion de la fertilité des vergers. ... | 11 |
|---|----|

## Annexes

|  |    |
|--|----|
| Annexe 1: Démarche générale .....  | 39 |
| Annexe 2: Analyse croisée des outils mobilisés dans chaque 'travaux' .....                           | 39 |
| Annexe 3: Liste de verbatim sur les attentes en termes d'OAD.....                                    | 43 |
| Annexe 4: Programme de la Journée d'échange sur la valorisation des sols de vergers :.....           | 45 |
| Annexe 5: Posters présentés au colloque « Enjeux sur le sol », Versailles, 14-15 novembre 2018 ..... | 47 |

## Annexe 1: Démarche générale

### 1. Démarche générale et méthodologie

#### 1.1. Les sources et ressources mobilisées

Trois sources principales d'informations ont été mobilisées pour construire la base de données.

Des recherches bibliographiques : elles se sont essentiellement basées sur des synthèses déjà existantes dont : l'étude du GIS Fruits sur les OAD de la filière Fruits (Poisson, 2015) ; l'étude du GIS PICLeg sur les indicateurs de fertilité des sols et la gestion de la fertilité en cultures légumières et maraîchères (Thibault & Lecompte, 2018); le rapport commandité par le Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt (MAAF) sur les outils de raisonnement dynamique et pilotage de la fertilisation azotée (SCE, 2016) ; le tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols commandité par le MAAF à un groupe d'experts (Balloy *et al.*, 2017) et la revue critique de Bünemann *et al* (2018) sur la qualité du sol.

Douze entretiens semi directifs, individuels ou en groupe, auprès de producteurs, conseillers, techniciens et scientifiques

Le guide d'entretien comportait trois volets.

- Il débutait par un retour critique sur les outils d'évaluation des caractéristiques du sol (fertilité chimique, activité biologique et état physique du sol et leurs évolutions au cours de la saison), et du statut hydrique et azoté de l'arbre au cours du développement. Pour chaque outil utilisé ou connu étaient abordés ses avantages, limites, et conditions d'utilisation (protocole, méthode d'utilisation et d'interprétation).
- Dans un second temps, un classement des indicateurs les plus pertinents pour évaluer la fertilité des sols de vergers ou la qualité de l'état nutritionnel de l'arbre était demandé.
- Enfin les attentes en terme d'OAD ou de production de connaissances par la recherche étaient questionnées.

Par contrainte de temps, ces entretiens n'ont pas été enregistrés mais l'essentiel des idées évoquées a été retranscrit et sera mobilisé en synthèse ou sous forme de verbatim (« *en italique* ») dans le document.

Des participations à plusieurs séminaires ou colloques : elles ont permis d'une part de prendre connaissance de résultats scientifiques récents et de rencontrer des chercheurs d'autres filières ou disciplines et d'autre part, dans le cadre des stands d'exposants parfois associés aux colloques, de rencontrer des développeurs d'outils.

#### 1.2. La structuration de la base de données et l'extraction des tableaux Excel

La structuration de connaissances dans une base de données doit être raisonnée pour pouvoir ultérieurement extraire diverses tables facilement utilisables par tous sous forme de tableaux Excel. La base de données se compose de différentes tables (outil, travaux,..), elles-mêmes composées de plusieurs champs (= variables) à implémenter. Les tables peuvent être liées entre elles par la valeur de champs communs.

En fonction des objectifs, la structure retenue est basée sur deux tables centrales : la table des outils, simple qui contient une ligne par outil et celle des travaux, plus complexe (Figure 2). La notion de travaux correspond globalement à un protocole expérimental centré sur l'étude d'une ou plusieurs pratiques culturales ou leviers d'action (couverture du sol, irrigation, fertilisation,..) testés sur une ou plusieurs modalités (fertilisation minérale v/s organique). Les mêmes pratiques étant mobilisées dans plusieurs travaux-protocoles, une table 'pratiques' regroupant l'ensemble des pratiques culturales et des modalités associées a été créé pour éviter les redondances. Contrairement à la table outil, les tables travaux et surtout pratiques comprennent un nombre assez important de valeurs manquantes en fonction des informations disponibles et communiquées.

Le lien entre les deux tables 'outils' et 'travaux' est assuré via un mot clef, généré automatiquement, servant à identifier chaque outil. Il est donc ainsi possible de savoir rapidement (1) pour chaque outil, dans quels travaux il a été utilisé et (2) pour chaque travail, quels ont été les outils mobilisés.

Enfin, un ensemble de verbatim d'intérêt, extraits des entretiens, ont également été introduits dans la base, dont ceux liées à l'appréciation des outils.

Le détail des différents champs introduits dans les deux tables 'outils' et 'travaux' est fourni au début des chapitres présentant le contenu de la base et ses différentes potentialités d'utilisation (chapitre 1 et 2).

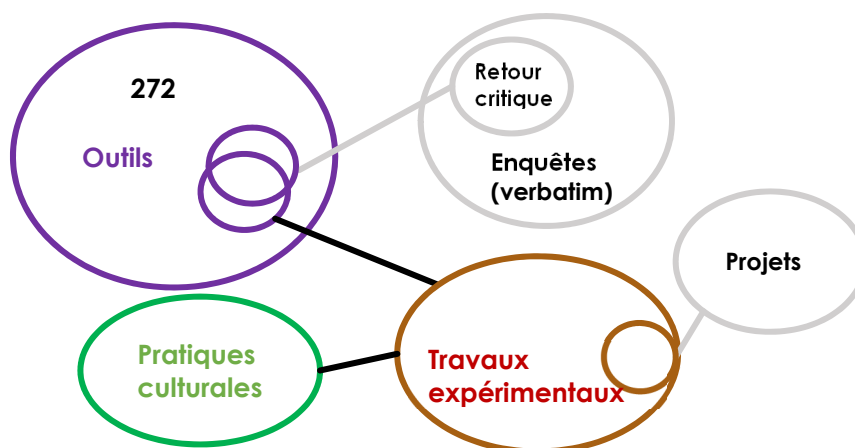


Figure 6: Structure de la base de données

### 1.3. Organisation et animation d'un séminaire de travail sur la problématique du maintien de la fertilité au verger

Dans l'avant dernier mois de l'étude, un séminaire (annexe 4) a été organisé avec la volonté de rassembler des acteurs concernés par la thématique de la fertilité des sols et représentatifs de la diversité de la filière (producteurs, conseillers, expérimentateurs et scientifiques). Sous l'hypothèse que les avancées en ce domaine ne pourront être que co-construite entre tous ces acteurs, les objectifs du séminaire étaient:

(1) Le partage des connaissances et des témoignages sur des résultats expérimentaux ou des observations de terrain et les principales difficultés rencontrées par chacun. Six présentations (respectivement assurées par deux chercheurs, deux expérimentateurs et deux conseillers-producteurs) suivies de courts débats ont permis le matin ce croisement des regards.

(2) L'identification et la formulation commune des points de blocage et des problématiques prioritaires puis l'élaboration de pistes d'action et de modes d'organisation à développer au sein de la filière pour y parvenir (principaux résultats attendus, propositions d'actions, partenaires et ressources envisagés). Dans cette optique, les participants se sont répartis dans quatre ateliers participatifs et ont choisi respectivement de travailler sur les thématiques des couverts végétaux (2 ateliers), des processus impliqués dans la nutrition de l'arbre et des outils de diagnostic de la fertilité du verger et du raisonnement de la fertilisation.

A travers les témoignages et retours d'expériences recueillis durant la journée, ce séminaire a aussi permis de compléter le travail d'entretiens individuels.

#### 1.4. Analyse et synthèse des données recueillies et réponses aux enjeux

L'analyse et la synthèse des résultats acquis se sont attachées à répondre à deux enjeux principaux. D'une part, un enjeu concernant l'opérationnalité de la base. Au-delà de la 'simple' compilation d'informations, il s'agit de suggérer des utilisations potentielles afin de faire vivre cet outil à court et moyen termes avec une actualisation régulière de son contenu.

D'autre part, un enjeu concernant la concrétisation d'actions à court terme. Dans cette optique, l'analyse doit faire émerger les principaux points de blocages rencontrés par la profession pour la gestion de la fertilité des vergers et doit, à terme, aider à la structuration de propositions d'action concrètes à mettre en œuvre au sein de la filière, et capable d'intégrer la diversité des acteurs sollicités.



## Annexe 2: Analyse croisée des outils mobilisés dans chaque 'travaux'

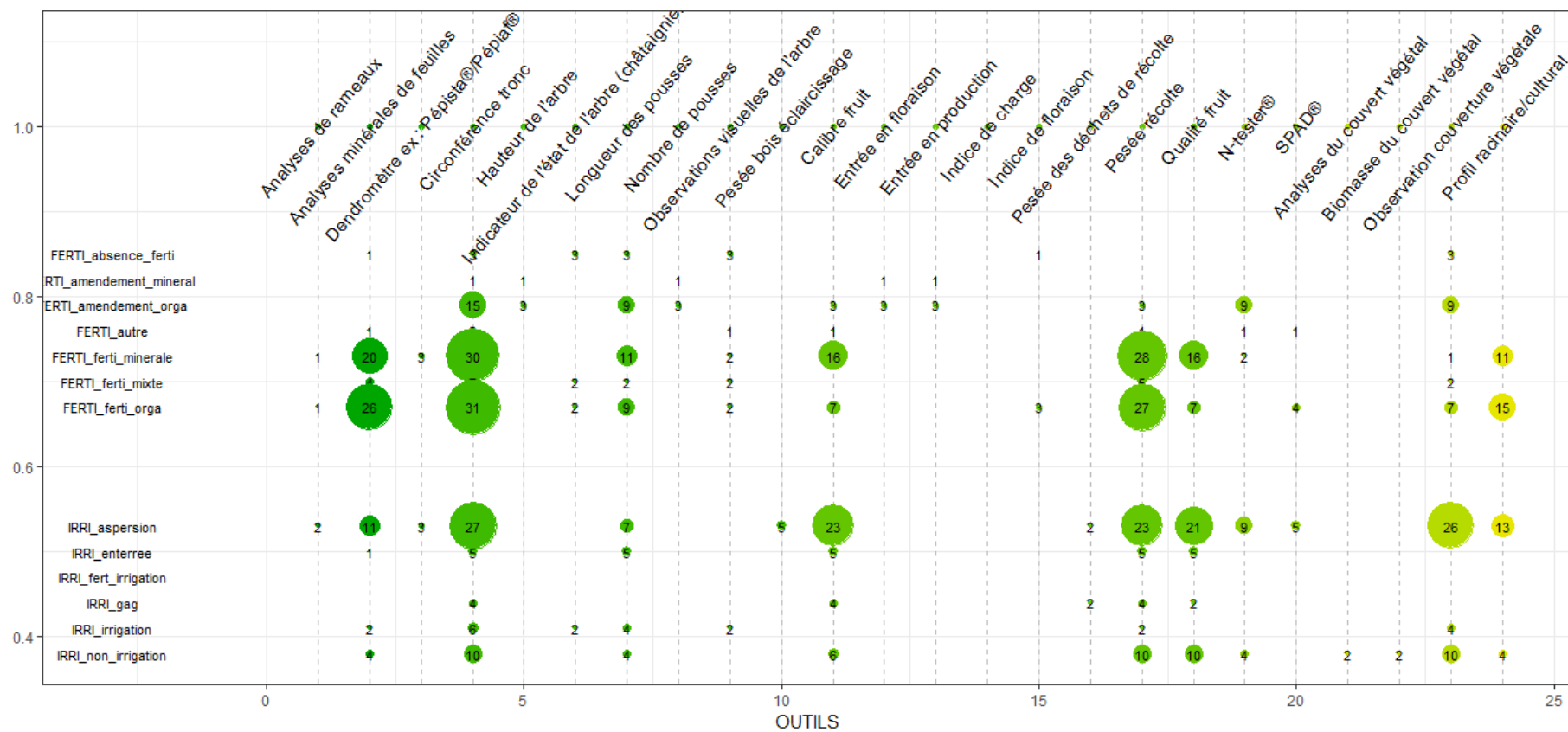


Figure 7: Nombre d'utilisation des outils 'plante' pour chaque combinaison de modalités expérimentales comprenant des modalités de fertilisation et d'irrigation.

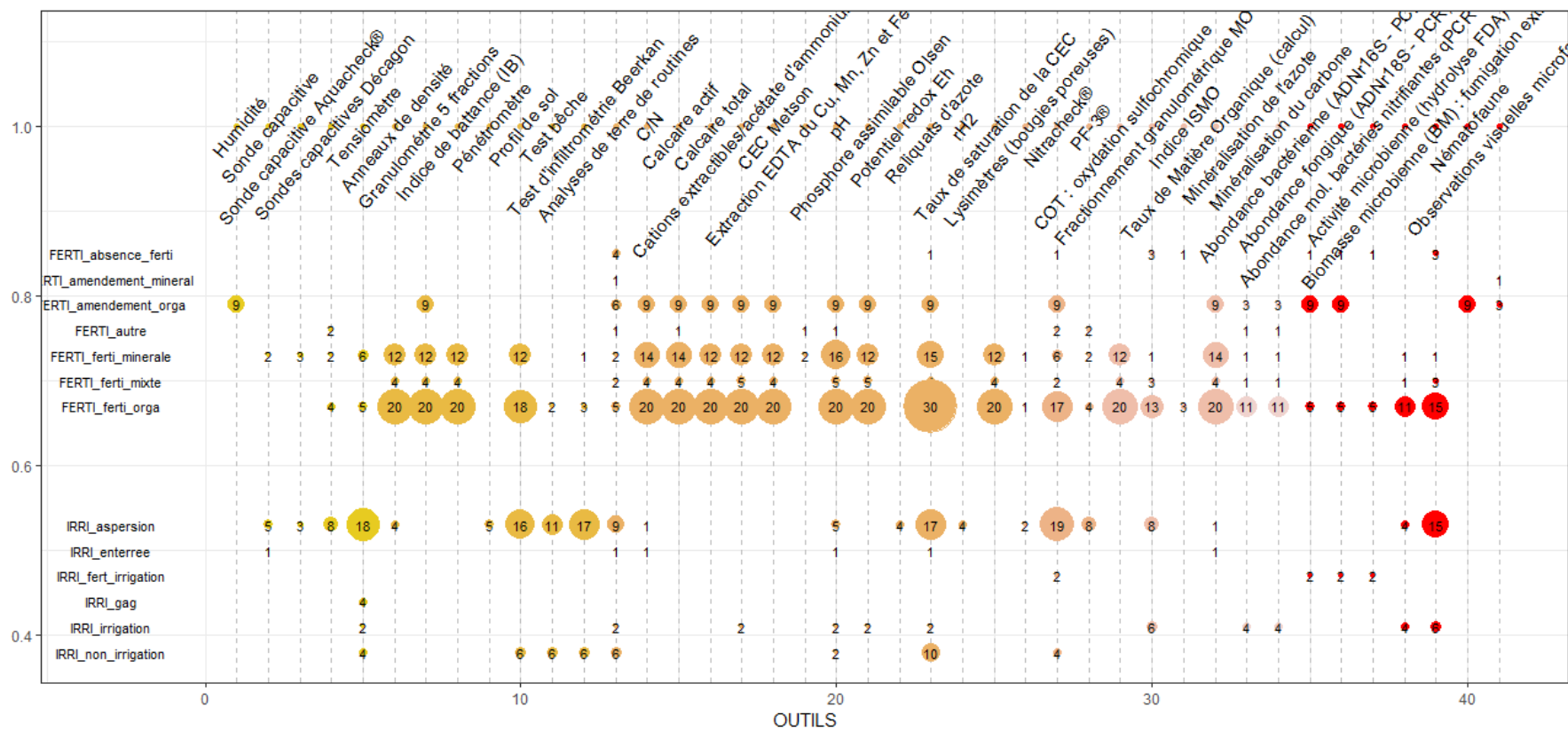


Figure 8: Nombre d'utilisation des outils 'sol' pour chaque combinaison de modalités expérimentales comprenant des modalités de fertilisation et d'irrigation.

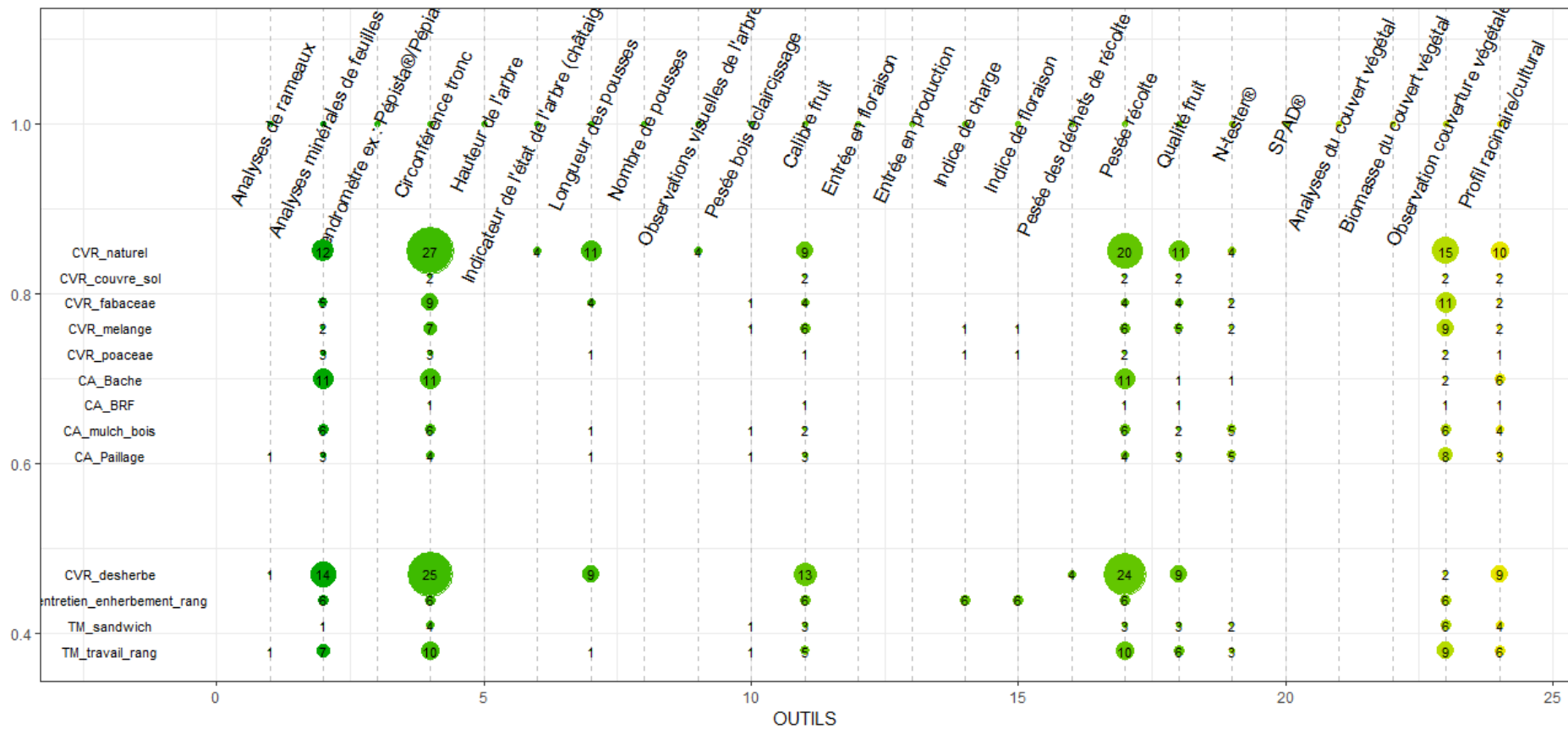


Figure 9: Nombre d'utilisation des outils 'plante' pour chaque combinaison de modalités expérimentales comprenant des modalités gestion du rang.



### **Annexe 3: Liste de verbatim sur les attentes en termes d'OAD.**

Les propos émis lors des entretiens ont été retranscrits le plus fidèlement possible.

*« Je souhaiterais des OAD plus précis pour les agriculteurs pour adapter les pratiques culturales (déclencher des méthodes alternatives, revenir au travail du sol, ...). Les outils sont trop empiriques et pas scientifiques, peut-être qu'il ne le faut pas ? »*

*« Je souhaite évaluer le système dans les grandes lignes. Plusieurs producteurs : je connais mon verger, je place les analyses avec expérience, je vois l'évolution de l'état du sol (sol meuble, beaucoup de vers de terre). S'il y a chlorose, ça se voit au sol. L'état de l'arbre se diagnostique aussi en visuel. »*

*« L'idéal serait une caméra / lunette pour voir ce qu'il se passe dans le sol et de comprendre. »*

*« Il pourrait être intéressant d'avoir groupe de travail reliquats, est-ce un outil pertinent en verger ? »*

*« J'aimerais pouvoir continuer à me servir de ce genre de logiciel pour d'autres cultures fruitières mais je ne sais pas lequel. Peut-être Regifert, le connaissez-vous? Ou en connaissez-vous d'autre? AUREA : à partir des jours normalisés et de la réserve utile sur 20 cm, ils arrivent à calculer minéralisation. Ça serait intéressant de l'utiliser et de l'intégrer dans des sondes ou d'autres outils in situ pour les producteurs. Je cherche un référentiel de minéralisation avec jours normalisés. Azofert idem : jours normalisé, mais pas d'infos précises sur les engrais. Il aimerait avoir la méthode MERCI pour les Prunes »*

*« Les méthodes d'Hérody ont marché sol limoneux mais ils n'ont pas d'outils pour les évaluer »*

*« J'ai besoin d'indicateur pour évaluer enherbement, le caractériser et le relier à d'autre paramètres. »*

*« Je souhaite mesurer la biodisponibilité des éléments de base dans solution du sol, la capacité du sol à rendre disponible. »*

*« Quels indicateurs pertinents à regarder en fonction état de l'arbre ? Je ne sais pas, c'est justement ce que je cherche ! Analyse en profondeur requise, analyse rapide en bilan annuel. »*

*« Ce que je reproche aux analyses de sol, c'est comment on les exploite, car elles donnent une photographie et non pas une dynamique. Si la fertilisation est organique, il faut une vision de la dynamique. »*

*« L'indicateur sol m'intéresse mais il n'y a pas de références (en vigne peut être ?), le bilan humique en particulier. C'est le plus intéressant même si ce n'est qu'un modèle, il permet de se projeter (en tant qu'agriculteur qui se pose des questions sur le sol). Il permet de prendre des décisions tout de suite même si marge d'erreur importante. »*

*« Il aimerait l'équivalent des sondes capacitives de pilotage l'irrigation pour l'azote et le pilotage de la fertilisation. Le problème de l'azote, c'est qu'il se dilue beaucoup dans le sol. »*

*« J'aimerais une sonde pour la teneur ou la disponibilité (un peu pareil) des nutriments, pour piloter régulièrement les apports. »*

*« J'apporte peu mais une fois par mois d'avril à fin août et j'ajuste les apports avec la sonde. »*

*« Je voudrais une chambre à pression continue et laissée sur place. »*

*« Température bien car augmente avec évaporation du noyer qu'il utilise pour se réguler. L'évaporation se stoppe ou augmente s'il y a un stress hydrique. »*

*« Attentes au niveau d'OAD : l'azote car chaque année, son comportement et les teneurs sont différents, ils veulent coupler sa dynamique aux stations qu'ils ont. »*

*« La dynamique de l'azote dépend des reliquats, de la fertilisation, des conditions climatiques et de l'évolution de matière organique, des nutriments et besoins de l'arbre (dynamique de prélèvement dans le temps sur l'azote). Sur les autres éléments, les outils sont suffisamment robustes et fiables. »*

*« Il manque la connaissance des quantités de MO restituées au sol par hectares pour calculer des bilans humiques. L'INRA de Dijon a commencé. Il faudrait savoir, à l'automne combien de tonnes de matière sèche sont apportées par la chute des feuilles et les bois de taille. »*

*« Je m'interroge sur les couverts végétaux à implanter dans mes vergers 'bio' pour éviter de travailler intensivement le sol comme les grosses exploitations 'bio'. »*

*« Ce ne sont pas les teneurs en éléments minéraux qui intéressent mais le stock de l'arbre. »*

*« [...] mieux caractériser la qualité de la plante et l'impact des pratiques »*



**Annexe 4:**  
**Programme de la Journée d'échange sur la valorisation des sols de vergers :**  
**quels leviers d'actions pour une production durable ?**  
**19 février 2019**

- **Introduction** de la journée, Sylvie Colleu (Inra-GIS Fruits) et Pascale Guillermin (Agrocampus Ouest, Angers).

- **Recensement des connaissances** sur l'évaluation et le pilotage de la fertilité des vergers :

- **Le point sur les outils et indicateurs** d'évaluation de la fertilité du sol et de l'arbre ; et travaux expérimentaux associés. Caroline Goutines (IFPC-Inra)

- **Témoignages** de terrain

Session 1 : Comment mieux raisonner les apports fertilisants ?

- Acquis et limites des méthodes de préconisation actuelles. Georges Fandos (Cofruid'Oc)

- Tests d'outils de pilotage de la fertilisation azotée du pommier. Méganne Cailleau (La Morinière)

- Les apports de la modélisation : des attentes de terrain ... aux propositions de la recherche. Julie Borg (Inra)

- Retour sur l'enquête terrain : autres outils et témoignages complémentaires.

Session 2 : Comment identifier les pratiques pour améliorer la qualité du sol et la nutrition de l'arbre ?

- Effet des pratiques sur les qualités physique et biologique du sol. Exemple de la scarification. Yvan Capowiez (Inra)

- Analyse de pratiques innovantes chez des producteurs. Focus sur les couvertures du sol. Arthur Buresi (Pour une agriculture du vivant)

- L'évaluation et le contrôle des dynamiques de minéralisation et d'absorption des apports : exemple d'une expérimentation-système, le 'Verger cidricole De Demain'. Anne Guérin (IFPC)

- Retour sur l'enquête terrain : autres outils et témoignages complémentaires.

- **Ateliers participatifs** : l'après-midi devra permettre d'élaborer les stratégies d'action à développer entre les partenaires du GIS Fruits pour lancer des projets. La réflexion sera menée au sein d'ateliers de co-construction, choisis par chaque participant parmi plusieurs propositions.



Liste des participants aux ateliers du séminaire du 19/02/19 (en gras, les animateurs et rapporteurs).

|                                    |                              |   |
|------------------------------------|------------------------------|---|
| Groupe Processus                   | Sophie Belin                 | Les Cidres de Loire                     |
|                                    | Serge Bidois                 | Producteur (pomme à cidre)              |
|                                    | Charly Chauveau              | IFO                                     |
|                                    | Gaetan Cottier               | Dalival                                 |
|                                    | Nicolas Dubois               | SCA Les Vergers d'Anjou                 |
|                                    | Henri Duval                  | INRA GAFL                               |
|                                    | <b>Anne Guerin</b>           | <b>IFPC</b>                             |
|                                    | <b>Xavier Le Clanche</b>     | <b>ANPP</b>                             |
|                                    | Muriel Millan                | Ctifl                                   |
|                                    | Luce Savian                  | Perlim                                  |
| Groupe Couvert végétaux Inter rang | Emilie Cartier               | Entreprise individuelle d'arboriculture |
|                                    | Sonia Diaz                   | Pink lady europe                        |
|                                    | Frédérique Didelot           | INRA                                    |
|                                    | <b>Laetitia Fourrié</b>      | <b>ITAB</b>                             |
|                                    | <b>Caroline Goutines</b>     | <b>INRA / IFPC</b>                      |
|                                    | Baptiste Labeyrie            | Ctifl / SEFRA                           |
|                                    | Pierre Louault               | Les Vergers de Bovieux                  |
| Justine Perrin                     | Les vergers Gazeau           |   |
| Groupe Outil                       | Julie Borg                   | INRA                                    |
|                                    | Maude Le Corre               | Réussir Fruits&Légumes                  |
|                                    | <b>Mégane Cailleau</b>       | <b>La Morinière</b>                     |
|                                    | <b>Claude Coureau</b>        | <b>La Morinière / Ctifl</b>             |
|                                    | Georges Fandos               | Coop. fruitière COFRUID'OC              |
|                                    | Adeline Gachein              | BIK                                     |
|                                    | Virginie Roulon              | Fredon PC                               |
|                                    | Sébastien Serot              | POM'EVASION                             |
|                                    | Delphine Sneedse             | SENuRA                                  |
| Groupe Couvert végétaux rang       | Yvan Capowiez                | INRA                                    |
|                                    | Justine Colusso              | Demain la Terre                         |
|                                    | Xavier Crete                 | SudExpé                                 |
|                                    | Stéphane Gouhier             | Cidres de Loire                         |
|                                    | <b>Pascale Guillermin</b>    | <b>Agrocampus Ouest, Angers</b>         |
|                                    | Thibault Jonville            | Pomanjou                                |
|                                    | Laurent Julhia               | INRA Corse UE Citrus                    |
|                                    | Christelle Renaudie          | Carrefour                               |
|                                    | <b>Marie Cécile Vergnaud</b> | <b>IFPC</b>                             |
| Gis Fruits                         | <b>Sylvie Colleu</b>         | <b>INRA</b>                             |
|                                    | <b>Laetitia Payet</b>        | <b>INRA</b>                             |

**Annexe 5: Posters présentés au colloque « Enjeux sur le sol »,  
Versailles, 14-15 novembre 2018**

**Le sol : une composante mal connue des  
'expérimentations - système'  
en verger**

**Les expérimentations-système : des dispositifs de suivis pluriannuels de l'ensemble du verger,**

pour concevoir, tester et évaluer de nouvelles combinaisons de pratiques agronomiques, à différentes échelles d'espace et de temps.

pour tester de nouveaux outils et méthodes de suivi et diagnostiques au verger et construire des évaluations multicritères.

**Et pour le sol :**

**Quelles nouvelles pratiques pour réduire les intrants (herbicides et eau) et maîtriser les apports organiques pour la fertilité des sols et le stockage carbone ?**

**Un besoin de renouvellement des méthodes de pilotage de la nutrition hydrominérale du verger par des mesures sur le sol et/ou sur l'arbre**

**Besoin et restitution au sol en fonction du matériel végétal et du mode de conduite des arbres**  
**Pilotage de l'irrigation et de la fertilisation**  
**Entretien du rang et de l'inter-rang**  
**Prophylaxie**  
**Installation de biodiversité fonctionnelle**  
**Evaluation des risques**

Enfouissement de la litière foliaire  
 Présence d'animaux  
 Enherbement spontané, légumineuses  
 Bandes fleuries sur l'inter-rang  
 Bâche, BRP ou mulch sur le rang  
 Irrigation par microjet, enterrée

**Analyses du sol : reliquats N, MO, ...**  
**Tensiomètres / sondes capacitives**  
**Biologie du sol (vers de terre,...)**  
 ...

**Analyses foliaires : N, Mg, K...**  
**Taux d'accroissement des troncs**  
**SPAD, pF3, ...**

**Des premiers résultats sur le sol :**

**Verger Cidricole de Demain – Pommier à cidre (2010 - ...)**  
Porteur de projet : Institut Français des Productions Cidricoles (IFPC)  
Partenaires : Producteurs, ACO, CRAB, CRAN, MCB, Cidres de Loire, AGRIAL, INRA-IRHS, ACTA Informatique, EPLEFPA Alençon-Sées, Le Robillard, LPA Pays de Bray.

En pommier à cidre (3 premières années du verger), les IFT Herbicides ont été diminués de 80%.  
Mais les alternatives au désherbage chimique du rang testées, combinées aux alternatives à la fertilisation azotée minérale et aux modes de gestion de l'inter-rang, ont induit des différences sur l'état nutritionnel des arbres (concurrence hydrique et azotée en jeune verger, équilibres minéraux du sol modifiés,...), préjudiciables à leur croissance et aux rendements (Guerin et al, 2015).

**BioREco - Pommier (2005 - ...)**  
Porteur du projet : INRA Gotheron  
Partenaires : GRCETA Basse-Durance, INRA PSH Avignon, EPLEFPA Valentin et Chambre d'Agriculture de la Drôme.

Sur pêcher, des méthodes alternatives de gestion de la couverture du sol des rangs ont également impactées les performances agronomiques des jeunes vergers (concurrence eau/fertilisation) (EcoPêche, Fiche projet EcoPhyto).

**CAP Red - Cerisier/abricotier/Pruniers (2013 - ...)**  
Porteur de projet : CTIFL  
Partenaires : CEFEL, CENTREX, La Pugère, SERFEL, La Tapy, BIP, INRA, AREFE.

**EcoPêche - Pêcher (2013 - ...)**  
Porteur de projet : INRA / CTIFL  
Partenaires : SERFEL, SEFRA, Sita centrex.

**De multiples questions en suspens :**

Comment lutter contre les campagnols ?    Quel porte greffe ?    Quelle(s) stratégie(s) face aux risques de restriction hydrique ?

Quelle biodiversité ?    Compétition en jeune verger ?    Mycorhize ?    Activateurs biologiques des sols ?    Contrôler les besoins de l'arbre ou « l'offre » du sol ? Et avec quels outils ?

(Enquête GIS Fruits, 2017)

Quelle(s) alternative(s) au désherbage chimique ? Travail ou couverture du sol ?    Passage à la fertilisation organique : oui, mais comment contrôler la minéralisation ?    Comment évaluer et améliorer l'activité biologique de mon sol ?

**Perspectives**

- Développer des **partenariats** et construire des **réseaux d'acteurs et d'expérimentateurs** (producteurs – conseillers – chercheurs), autour de **thématiques prioritaires** : fertilité du verger en pratiques bas intrants, qualité et services écosystémiques des sols,
- coupler **expérimentations systèmes ou factorielles, approches théoriques et empiriques** pour mieux comprendre les processus,
- répondre aux questions des professionnels et accompagner les transitions.

Contacts GIS Fruits : sylvie.colleu@inra.fr, caroline.goutines@inra.fr, pascale.guillermin@agrocampus-ouest.fr

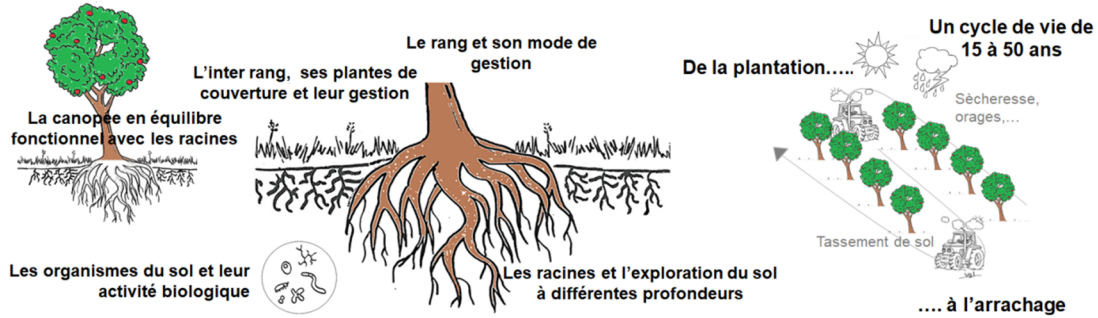
Sources photographiques : BIP, IFPC, INRA, SERFEL



## L'arbre : une large occupation de l'espace et du temps

Le sol du verger au sein d'un réseau d'organes vivants en interaction

Le sol du verger : un système pérenne sous des contraintes à répétition



## Les enjeux : mieux comprendre les processus pour gérer le sol en diminuant les intrants et en mobilisant les services écosystémiques

**Évaluation des besoins**  
Partage et allocation des ressources  
Compétition entre organes

**Développement et croissance racinaire**  
Assimilation eau et nutriments

**Quantification des apports**  
Restitution des bois de taille et feuilles  
Rhizodéposition

**Activité biologique des sols**  
Dégradation des litières  
Humification et minéralisation  
Mycorhization  
Allélopathie

**Plantes de couverture : un effet sur la biodiversité « du sol au plafond »**  
Régulation naturelle des bioagresseurs: attraction et conservation des auxiliaires, répulsion des ravageurs et des maladies  
Acteur du maintien des chaînes trophiques et de l'évolution de la matière organique

**La matière organique : au centre des processus de régulation de la qualité des sols**  
Rôle nutritionnel  
Limitation des risques érosifs et de lixiviation  
Rétention et dégradation des polluants

**Le sol : stockage de carbone pour réguler et atténuer les effets du changement climatique**  
Séquestration en verger :  
Productivité nette : 4,3 à 7,5 tC.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>  
Stockage net : 0,6 à 5,9 tC.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>  
(Scandellari et al, 2016)

## Enquête sol GIS Fruits : attentes sur le sol des vergers et perspectives de recherche

Réalisée auprès de producteurs et conseillers en arboriculture, elle visait à :

- évaluer l'importance des différents problèmes rencontrés en verger
- recenser et prioriser les attentes et les pistes de recherche à explorer
- établir un lien entre l'expression des symptômes et les caractéristiques du sol et/ou les pratiques mises en œuvre.

Dix attentes prioritaires ont été identifiées, elles concernent les outils et méthodes de diagnostic de l'état de l'arbre et du sol puis la maîtrise des pratiques (fertilisation, travail du sol).

Pour en savoir plus : [www.gis-fruits.org](http://www.gis-fruits.org)

