



Gestion de la fertilité des sols en cultures  
légumières et maraîchères.

Rapport d'étude du GIS Piclég

Claire Thibault (Légumes de France), François Lecompte (INRA)

Avril 2018

## Remerciements

Les auteurs adressent en premier lieu leurs remerciements au GIS PIClég ainsi qu'à Légumes de France qui ont permis la réalisation de cette étude. Instiguée par le groupe de travail 'Fertilisation et Eau' du GIS, l'étude a été accompagnée tout au long de sa réalisation par les membres de ce groupe de travail.

Les auteurs remercient particulièrement les membres des GIS Piclég qui se sont joint au comité de pilotage et qui ont guidé ces travaux en apportant leur expertise : Nicolas Cavan (INRA), Olivier Favaron (Unilet), Michel Le Roux (CATE), Christiane Raynal (CTIFL), Bertrand Rival (Légumes de France), Hélène Védie (GRAB) et plus particulièrement pour l'aide apportée Benoît Jeannequin (INRA), coordinateur du GIS PIClég.

Les auteurs remercient l'Unité EcoInnov de l'INRA pour avoir accueilli la chargée d'étude dans ses locaux. Merci à Frédérique Angevin pour avoir fait le lien entre le GIS PIClég et l'unité EcoInnov, à Antoine Messéan d'avoir accepté cet accord et à Elisabeth Lancesseur d'avoir assumé les démarches administratives.

Les remerciements des auteurs s'adressent aussi à tous les experts en systèmes de productions légumières et maraîchères qui ont passé du temps pour partager leurs savoirs, leur vision et leur retour d'expérience : Bertrand Decoopman, Céline Matthieu, Claire Goillon, Damien Penguilly, Dominique Berry, Jean-Philippe Calmet, Laure Pares, Laurent Nivet, Marcel Caporalino, Marie Uguen, Mireille Navarrete, Solenn Pérennec, Stéphane Plas et Vianney Estorgues.

Enfin, un grand merci aux conseillers et ingénieurs de réseaux pour leur réponse au sondage sur l'utilisation des indicateurs de fertilité. Merci également, aux personnes qui ont contribué à la diffusion logistique du sondage, particulièrement Anne Terrentroy, Sandrine Gelin, Cathy Eckert, Jean-Luc Péden et Danielle Breton.



## Table des matières

PARTIE I : Identification des indicateurs de fertilité du sol et spécificités en cultures L&M .....	6
1. Les indicateurs de fertilité du sol utilisés en grande culture et leur classification .....	7
2. Choix de classification de ces indicateurs de la fertilité du sol .....	8
a. Une grande diversité de classification existantes, définies par les objectifs de chaque inventaire .....	8
b. Choix de la méthode de classification de cette étude, et définition de descripteurs des indicateurs .....	9
c. Analyse des indicateurs par la classification .....	12
3. Les spécificités des cultures L&M justifient-elles l'utilisation d'indicateurs particuliers ? .....	13
4. Quels sont les indicateurs utilisés actuellement en culture L&M ? Quels sont ceux qu'il faudrait préférer ? .....	16
PARTIE II : Les liens entre les pratiques et la fertilité des sols .....	25
1. Exemples de systèmes de production L&M .....	25
a. Système de production en maraichage sous abris .....	25
b. Système de production en maraichage de plein champ .....	29
c. Système de production en légumes frais de plein champ .....	31
d. Système de production en légumes plein champ d'industrie .....	35
2. Synthèse des liens entre pratiques, effets sur la fertilité et indicateurs à mobiliser .....	39
a. Synthèse des liens entre pratiques – fertilité .....	39
b. Quels indicateurs mobiliser pour rendre compte des effets des pratiques ? .....	44
PARTIE III : Les recommandations pour la filière .....	47
1. Recommandations sur les indicateurs à utiliser pour gérer la fertilité du sol .....	47
2. Des recommandations sur les pratiques culturales en lien avec la fertilité et la qualité des sols .....	48
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>48</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>54</b>

## Introduction

Le sol est un compartiment essentiel des agroécosystèmes, il assure un grand nombre de fonctions biologiques et fournit plusieurs services écosystémiques d'approvisionnement et de régulation. En cultures légumières, et en maraîchage en particulier, les sols sont souvent utilisés de manière intensive et sont les supports d'une production importante de biomasse. Les interventions directes sur le sol sont nombreuses, qu'elles soient liées à son travail mécanique, à des apports d'eau, d'amendements, ou de fertilisants, à la mise en place de mulchs et paillages biologiques ou synthétiques, ou bien encore à des techniques de désinfection chimique ou physique. Lors de leur développement et de leur mise en œuvre à grande échelle, ces interventions techniques ont le plus souvent été justifiées par les bienfaits attendus sur la quantité ou la qualité des productions végétales à court terme. Cependant les effets à long terme des perturbations des sols ont été moins pris en compte dans les raisonnements agronomiques. D'autre part, les indicateurs de qualité ou de fertilité des sols semblent avoir été faiblement mobilisés jusqu'à aujourd'hui, et peu mis en rapport avec les itinéraires techniques développés dans les différents systèmes de culture légumiers.

Les indicateurs de la qualité des sols sont nombreux, de natures diverses et peuvent jouer des rôles différents dans cette gestion, allant du diagnostic au suivi à plus ou moins long terme des effets des pratiques. Cette étude recense de manière la plus exhaustive ces indicateurs et étudie les liens entre les pratiques techniques, la qualité du sol, et les indicateurs dédiés.

Un premier objectif était d'identifier les indicateurs de fertilité du sol généralement utilisés en agronomie et la spécificité éventuelle d'indicateurs pour les cultures légumières et maraîchères (abrégées dans la suite du texte avec L&M). Une première étape a consisté à répertorier ces indicateurs et à proposer une méthodologie de classification et de hiérarchisation. Puis les particularités des cultures légumières et maraîchères ont été étudiées pour définir un besoin éventuel en indicateurs spécifiques. Dans un troisième temps, l'utilisation des indicateurs en cultures L&M, ainsi que les raisons de cette utilisation, ont été analysées.

La seconde partie du document propose une analyse des liens entre les pratiques culturales observées dans différents systèmes de production légumières et maraîchères et les problèmes de fertilité à court et à long terme que peuvent poser ces pratiques culturales. Cette analyse débouche sur l'identification des indicateurs de fertilité qui pourraient être mobilisés pour mieux caractériser les effets des pratiques à court et moyen terme.

Le dernier objectif de ce travail était d'identifier, à partir de l'analyse menée, un certain nombre de recommandations à destination des acteurs. Ces recommandations visent à orienter les usagers des sols légumiers et maraîchers ou leurs conseillers, à mieux appréhender les outils et méthodes permettant de juger de la fertilité des sols et de son évolution. Les recommandations portent également sur des suggestions de travaux de recherche et développement à mener pour mieux promouvoir et maîtriser l'usage des indicateurs de fertilité.

Dans le temps imparti pour celle-ci, l'étude a largement exclu de son champ les questions liées aux bioagresseurs des cultures légumières et maraîchères et à leur régulation, par des moyens chimiques ou biologiques. En particulier, les conséquences des introductions de molécules toxiques ou d'organismes exogènes (organismes de lutte biologique, stimulateurs, organismes symbiotiques) ne sont pas abordées. Certains problèmes liant les pratiques culturales aux évolutions des communautés de ravageurs ou pathogènes ne sont mentionnés ponctuellement qu'à titre d'exemples.

## PARTIE I : Identification des indicateurs de fertilité du sol et spécificités en cultures L&M

Le terme “fertilité des sols” désigne dans son acception la plus courante, la capacité des sols à soutenir la production de biomasse végétale. Il s’agit cependant d’une notion complexe et ambiguë. La définition et la caractérisation de la fertilité des sols font l’objet de nombreuses publications dans la littérature scientifique et technique (Patzel *et al.*, 2000). La FAO, dans sa définition la plus récente de la fertilité du sol, la désigne comme une « fonction du sol, qui réfère à la capacité du sol à soutenir et entretenir la croissance des plantes, notamment en rendant disponibles les éléments minéraux prélevés par les plantes ». Le monde anglo-saxon utilise plus fréquemment le terme de « qualité du sol » (soil quality) (Karlen *et al.*, 1997), le terme « soil fertility » pouvant être plus restrictif en désignant la capacité des sols à fournir des éléments minéraux aux plantes. La société Américaine de Science du Sol (SSSA) donne la signification la plus simple possible de la qualité du sol : la capacité du sol à assurer ses fonctions (Karlen *et al.*, 1997). Ces fonctions principales sont le stockage et la purification de l’eau, la décomposition des matières organiques, le cycle des éléments nutritifs, le stockage de C, la détoxification des molécules polluantes et la suppression d’organismes nuisibles ou pathogènes (Doran and Zeiss, 2000). Le terme « qualité des sols » apparaît désormais régulièrement dans la communauté agronomique francophone, mais il peut selon les cas se rapprocher de l’acception anglaise, ou être utilisé comme synonyme de fertilité. On peut suggérer que le terme « fertilité » se rapporte davantage à la production végétale tandis que la « qualité » se rapporte à l’ensemble des fonctions des sols, mais cette distinction pourrait ne pas faire l’objet d’un consensus dans la communauté scientifique.

En outre, définir la fertilité du sol comme la «capacité du sol à subvenir aux besoins des plantes» (Sebillotte, 1989), ou à maintenir la productivité des cultures, fait rapidement émerger une équivoque, car les capacités et ressources de chaque sol sont différentes, et des équilibres durables entre les plantes et les sols peuvent engendrer des masses de production primaire végétale très différentes. D’autre part, la perturbation des équilibres caractéristiques des sols, y compris dans le sens d’une évolution généralement favorable à la croissance végétale, comme par exemple l’augmentation de la teneur en nutriments, peut aboutir à une perte de richesse végétale spécifique du milieu (Bedford *et al.*, 1999). Ainsi, la vision de la fertilité des sols comme la capacité de ceux-ci à permettre des rendements végétaux élevés peut-elle être opposée à une définition plus orientée vers l’accueil et la préservation de la biodiversité végétale et de certaines autres fonctions écosystémiques.

A moins d’être objectivée par une biomasse végétale produite, la fertilité du sol reste souvent une appréciation qualitative. On la caractérise généralement à partir des facteurs favorables à la croissance des plantes, en réunissant des propriétés ou des caractéristiques ayant trait au fonctionnement physique, chimique et biologique des sols (Karlen *et al.*, 1997). Pour évaluer ces caractéristiques, qui en général ne sont pas directement mesurables, on a recours à des indicateurs (Bockstaller *et al.*, 2009). Cette étude traite des indicateurs de fertilité : nous retenons ici une acception de la fertilité dans son sens le plus large, équivalente à la « qualité » du sol, et qui porte sur l’ensemble des caractéristiques du sol lui permettant de remplir ses fonctions.

## 1. Les indicateurs de fertilité du sol utilisés en grande culture et leur classification

Une première analyse de la littérature scientifique, de documents techniques agricoles et de programmes de recherche, avait pour objet de faire un recensement, des indicateurs de fertilité. On peut identifier :

- Les indicateurs utilisés dans les analyses de sol physico-chimiques classiques. Sources : les sites et analyses de sols des laboratoires Auréa, LANO, Celesta Lab, Galys, AgroSystèmes, les publications (Coll *et al.*, 2012, Fardeau, 2015, Proix *et al.*, 2015).
- D'autres indicateurs du statut physico-chimique du sol (structure, pouvoir tampon) en général non mesurés dans les analyses de sol courantes. Sources : les programmes SolAB 2013, Agrinnov 2015, le dictionnaire DoneSol (Sol, 2012), les publications (Coll *et al.*, 2012, Fardeau, 2015, Monnier and Stengel, 1982) et des entretiens avec des experts.
- Les indicateurs de la biomasse et de la matière organique (MO) non vivante du sol. Sources : les publications (étude ministère de l'agriculture (Balloy *et al.*, 2017, Bispo *et al.*, 2012, Coll *et al.*, 2012, Valé *et al.*, 2011), les programmes Microbioterre 2017-2020 et BiIndicateurs (ADEME)
- Les indicateurs du statut hydrique. Sources : les programmes SolAB 2013 et Agrinnov 2015, le dictionnaire DoneSol, les thèses (Bottinelli, 2010, Schneider, 2008), des documents techniques et des entretiens avec des experts.
- Les indicateurs sur la chimie environnementale, identifiés dans le programme BiIndicateurs (ADEME)

Cette analyse permet de recenser 85 groupes d'indicateurs référencés dans le tableau 1. Une définition de chacun des indicateurs est donnée en annexe 1. Les indicateurs rassemblés en groupes renseignent une même caractéristique mesurée par plusieurs critères, par exemple « Lombriciens (abondance, diversité) », ou ceux qui sont issus d'une méthode de mesure commune, par exemple les cations échangeables « CaO, K<sub>2</sub>O, MgO, Na<sub>2</sub>O » extraits à l'acétate d'ammonium. On utilisera le terme indicateur dans la suite du texte, même si ce terme renvoie parfois à un groupe d'indicateurs. Dans la liste d'indicateurs présentée, on peut distinguer trois types :

- des indicateurs **élémentaires** : issus d'une mesure ou d'une observation
- des indicateurs **composites** : obtenus à partir d'indicateurs élémentaires. Il peut s'agir de ratio comme pour « K<sub>2</sub>O/MgO » ou de calculs combinaisons plus complexes pour former des indices comme pour « l'indice Nématofaune » ou des fonctions de pédotransfert comme pour la RU.
- des indicateurs **d'expertise** basés sur un ensemble d'observations (visuelle, toucher, odeur...) pour évaluer la fertilité du sol. Il en existe de nombreux utilisés au champ par les agriculteurs et les conseillers. Cette étude s'intéresse aux plus courants : le profil cultural, le test bêche ou encore la pénétration des racines. Parmi ceux pour lesquels une méthodologie a été développée, Bünemann *et al.* (2018) présentent leur facilité de mise en œuvre et les observations effectuées (Annexe 2). Ces méthodes évaluateur-dépendantes permettent de compléter voire d'interpréter les analyses de sol en laboratoire.

Tableau 1 : liste des indicateurs

Indicateurs (1/3)	Indicateurs (2/3)	Indicateurs (3/3)
Activité microb. (FDA hydrolase)	Effervescence HCl	Pénétration des racines
Al échangeable (KCl)	ETM (métaux) échangeables	pH eau
APM : Azote Pot. Minéralisable	ETM (métaux) totaux	pH eau - pH KCl
Aptitude à la fissuration	Fe, Mn, Cu, Zn, Al (eau)	pH KCl
As, Bar, Li, Mo, St, Ti, Va totaux	Fractionnement granulo des MO	Pierrosité (estimation)
Biomasse fongique (ergostérol)	Indice de battance	Pierrosité (labo)

Biomasse microb. (C microbien)	Indice de stabilité structurale	Potentiel de minéralisation C org
Biomasse microb. moléculaire	Indice Oméga 3	Potentiel de minéralisation N org
C minéral	Infiltrométrie de Beerkan	Pouvoir fixateur du sol en P
C organique total	Infra-rouge (SPIR)	Pouvoir tampon du sol vis-à-vis K
C organique total /N total	Largeur des fentes	Pouvoir tampon du sol vis-à-vis P
C total	Litter bag, tea bag	Profil de sol
Ca, Mg, K, P, Na (eau)	Lombriciens (abondance, div)	Profondeur du sol (estimation)
CaCO3 actif	Masse terre fine /ha (calcul)	Ratio K2O/MgO, CaO/MgO
CaCO3 Calcaire Total	Microarthropodes	Résistance mécanique du sol
CaO, K2O, MgO, Na2O éch.	N minéral (bandelette)	Résistivité électrique
Carbone labile	N minéral (labo)	Risque d'asphyxie
CEC effective (Riehm)	N total (combustion)	RU potentielle
CEC potentielle (Metson)	N total (N.T.K.)	Slake Test
Cl, S (eau)	Nématodes niv trophiques sup	Stabilité des agrégats
Conductivité électrique	Nématodes microbivores	Stock C
Conductivité hydraulique terrain	Nématodes phytophages	Stock N
Couleur observée	Nématofaune (indices)	Taux de saturation de la CEC
Densité apparente estimée	Oligo : Bore	Teneur en MO
Densité apparente mesurée	Oligo : Fe, Mn, Zn, Cu (EDTA)	Test bêche
Disponibilité en eau (sondes)	Oligo : Mn, Zn, Cu (DTPA)	Texture (avec décarbonatation)
Diversité métabolique pot. (N, C)	P Dyer	Texture (sans décarbonatation)
Diversité microb. (champi bact)	P J-Hébert	
Diversité taxo. microb.(ADN)	P Olsen (P2O5)	

Ces indicateurs peuvent apporter des niveaux d'information différents mais peuvent également être redondants. Dans les études scientifiques ou dans la pratique agricole, on mobilise en général une partie seulement de cet ensemble d'indicateurs, et l'on peut s'interroger sur la manière de classifier ou de hiérarchiser ces indicateurs.

## 2. Choix de classification de ces indicateurs de la fertilité du sol

a. Une grande diversité de classification existantes, définies par les objectifs de chaque inventaire

On trouve dans la littérature ou dans les projets scientifiques différents types de classification :

- Selon la nature de l'indicateur. Exemples : AgrInnov, *indicateurs du test Bêche, bioindicateurs, indicateurs physico-chimiques* ; la publication du MAAF (Balloy et al., 2017), *indicateurs microbiologiques, faunistiques, complémentaires* , le programme BioIndicateurs (ADEME, 2015) *indicateurs faunistiques, floristiques, microbiologiques*.
- Selon la méthodologie employée pour la mesure de l'indicateur. Exemples : la publication du MAAF (Balloy et al., 2017), *indicateurs mesurés par méthodes classiques, méthodes en développement, autres méthodes non normalisées*.
- Selon les caractéristiques ou composantes du sol évaluées. Exemples : les analyses de sol, *granulométrie, carbone et azote, statut acido-basique, cations échangeables, oligo-éléments,...* ; la publication du MAAF (Balloy et al., 2017), *MO et éléments C & N, état biologique* ; le projet CASDAR Microbioterre (2017-2020) *activité microbienne, abondance*



*microbienne ; AgrInnov, chimique, physique, biologique (Annexe 3) ; l'ouvrage de Bispo et al. (2012) selon les fonctions sol requises par services écosystémiques (Annexe 4).*

Il semble ne pas exister de classification commune et universelle des indicateurs de fertilité, mais une multitude de classifications chacune adaptée à une problématique.

Des approches fondées sur des méthodes de sélection multicritère permettent de hiérarchiser des indicateurs. Par exemple, il a été proposé une méthode pour sélectionner des bioindicateurs à partir de ceux proposés dans le cadre du programme de recherche « Bioindicateurs de qualité des sols » (ADEME) (Devillers *et al.*, 2009). Chaque indicateur était caractérisé par une vingtaine de critères (ou descripteurs). Les critères ont été hiérarchisés<sup>1</sup> en considérant la problématique d'évaluation des risques pour les sites et sols pollués et celle de la surveillance de la qualité des sols. Ceci a abouti à des typologies différentes selon les scénarios. Notre approche reprend cette volonté de classer les indicateurs grâce à des critères ou descripteurs : ce sont les objectifs de l'étude qui ont guidé dans le choix et la construction des descripteurs.

## b. Choix de la méthode de classification de cette étude, et définition de descripteurs des indicateurs

### ⇒ Méthodes de classification existantes

Des classifications assez courantes et fonctionnelles renvoient à la distinction de la composante du sol évaluée (phase solide minérale, phase solide organique, phase liquide, phase gazeuse) et à la nature de la propriété mesurée, en s'appuyant sur la distinction entre les propriétés physiques, chimiques et biologiques. Cependant, cette classification peut rapidement devenir compliquée :

- un indicateur peut souvent se rapporter à plusieurs phases ou à plusieurs propriétés,
- il peut être intéressant de dresser une classification à plusieurs niveaux, par exemple pour distinguer la matière organique morte de la matière organique vivante,
- on peut vouloir spécifier des particularités dans les propriétés, par exemple, identifier parmi les indicateurs du statut chimique ceux qui relèvent de la caractérisation du pH, ce dernier étant déterminant dans un grand nombre de processus se déroulant dans le sol.

Ainsi la littérature présente une grande diversité de modes de regroupement des caractéristiques du sol. En outre, il peut s'avérer commode de définir une classification agrégeant les deux notions de composantes du sol et de nature de la propriété renseignée. Dans cette étude nous avons défini un descripteur intitulé « caractéristique du sol évaluée » décliné en six classes : le statut physique, le statut acido-basique, le statut chimique, la MO non vivante, la biomasse (MO vivante) et le statut hydrique.

En plus d'une classification sur la caractéristique du sol évaluée, une attention particulière a été portée à la manière dont on peut faire usage de ces indicateurs : (i) sont-ils assez facilement utilisables ; (ii) peuvent-ils renseigner sur les effets de certaines pratiques agricoles ?

### ⇒ Définition des descripteurs des indicateurs

<sup>1</sup> Les hiérarchisations sont faites par une méthode multicritère (SIRIS : Système d'Intégration du Risque par Intégration de Scores) et des méthodes multivariées classiques

A partir de la réflexion sur la classification souhaitée, 23 descripteurs qualifiant les indicateurs de fertilité ont été renseignés ; ils sont présentés dans le tableau 2. Ces descripteurs correspondent soit à des informations (par exemple la méthode utilisée pour la mesure), soit à des critères de classification (avec un nombre de classes allant de 2 à 7 selon le descripteur).

Afin de distinguer les indicateurs opérationnels et ceux pour lesquels il manque des connaissances et/ou des référentiels, il a été proposé un descripteur d'**opérationnalité** (faible ; moyenne ou forte). Un autre descripteur renseigne l'**usage de l'indicateur** en distinguant les indicateurs mobilisables pour piloter les pratiques et ceux qui renseignent sur un état du sol plus tamponné dans le temps. Ces deux descripteurs d'opérationnalité et d'usage ont été construits en agrégeant l'information portant sur plusieurs autres descripteurs, ainsi que cela est explicité dans l'ENCADRE 1.

ENCADRE 1 : définitions des descripteurs utilisés

Définition de l'**opérationnalité** d'un indicateur selon :

- le référentiel (établi, limité à une région ou un contexte, en développement, pas de référentiel)
- le coût de l'indicateur (matériel ou analyse)
- la simplicité de l'indicateur (d'utilisation et d'interprétation)

OPERATIONNALITE		simplicité de l'indicateur (utilisation et interprétation)		
	coût de l'indicateur (matériel ou analyse)	simple	intermédiaire	formation nécessaire
référentiel	< 50€	forte	forte	forte
référentiel établi	entre 50 et 150€	forte	forte	forte
	> 150€	forte	forte	moyenne
référentiel limité	< 50€	forte	forte	forte
	entre 50 et 150€	forte	moyenne	moyenne
	> 150€	moyenne	moyenne	moyenne
référentiel en développement	< 50€	moyenne	moyenne	moyenne
	entre 50 et 150€	moyenne	moyenne	faible
	> 150€	faible	faible	faible
pas de référentiel	< 50€	moyenne	faible	faible
	entre 50 et 150€	faible	faible	faible
	> 150€	faible	faible	faible

Définition de l'usage de l'**indicateur** selon leur :

- opérationnalité. Les indicateurs faiblement opérationnels sont utilisés en recherche – expé.
- sensibilité aux pratiques et usages de sol. Elle est liée à l'intensité et la rapidité de changement de valeur de l'indicateur lorsqu'il y a des modifications du milieu (hors variations saisonnières/intraparcellaires).
- type de réponse aux changements de pratiques. Elle est liée à la possibilité de prévoir les changements de valeur de l'indicateur après une modification du milieu (liée à une/des pratique(s) ou usage(s) du sol).

TYPE D'INDICATEUR		réponse aux changements de pratiques/rotation	
opérationnalité	sensibilité aux pratiques/usages de sol	prévisible (dépend de peu de pratiques ou aucune)	non prévisible (très systémique)
moyenne à forte	sensibilité forte	de pilotage opérationnel	de pilotage stratégique
	sensibilité moyenne	de pilotage stratégique	
	sensibilité faible/nulle	de diagnostic	
faible	toutes sensibilités	de recherche - expérimentation	

Tableau 2 : Liste des descripteurs

Descripteur	Définition (classes)
Nom de l'indicateur	Nom de l'indicateur dans cette étude
Caractéristique du sol évaluée	composante évaluée par l'indicateur. Impliquée dans les propriétés garantes de la fertilité du sol (statut physique ; statut acido basique ; statut chimique ; MO non vivante ; biomasse ; statut hydrique)
Utilisation en Grandes Cultures (GC)	état des lieux de l'utilisation de l'indicateur en grandes cultures en 2017 (oui plusieurs fois par an ; oui 1 à 5 ans ; oui > 5 ans ; oui occasionnellement ; en développement ; recherche ; peu courant)
Référentiel	état des lieux du référentiel de l'indicateur pour les grandes cultures en 2017 (établi ; limité ; en développement ; pas de référentiel)
Coût de l'indicateur (analyse ou matériel)	état des lieux du coût de l'indicateur en 2017 (< 50€ ; 50 - 150 € ; > 150 € ; so)
Simplicité d'utilisation et d'interprétation	utilisation de l'indicateur concerne le prélèvement, l'observation ou la manipulation au champ ; l'interprétation concerne la compréhension de l'information délivrée par la valeur de l'indicateur (simple ; intermédiaire ; formation nécessaire)
Opérationnalité	agrège le référentiel, du coût et de la simplicité de l'indicateur (forte ; moyenne ; faible)
Variations spatiales de l'élément mesuré (intra zone avec nature du sol homogène)	concerne les variations liées à la mobilité de l'élément mesuré ou à la source (diffuse / locale) ayant une influence sur répartition de l'élément mesuré au sein d'une zone de nature de sol homogène. Peut conditionner le plan d'échantillonnage à adopter (positionnement, nombre d'échantillons à moyenner). (plutôt faibles ; moyennes ; plutôt importantes ; so)
Variations temporelles connues (saisonniers) de l'élément mesuré	concerne les variations de l'élément mesuré liées aux saisons (précipitations, températures...) : conditionne la précision de la période de l'année à laquelle faire la mesure. (plutôt faibles ; moyennes ; plutôt importantes ; so)
Restriction d'utilisation	selon les périodes de l'année : restrictions liées aux saisons ou aux pratiques. (non ; oui ; so)
Sensibilité aux pratiques culturales/usage des sols	intensité/rapidité de changement de valeur de l'indicateur lorsqu'il y a des modifications du milieu (hors variations saisonnières/intraparcellaires). (faible ou nulle ; moyenne ; forte)
Réponse aux changements de pratiques/usages de sol	possibilité de prévoir les changements de valeur de l'indicateur après une modification du milieu (liée à une/des pratique(s) ou usage(s) du sol) (réponse peu ou pas prévisible ; réponse prévisible)
Usage de l'indicateur	agrège l'opérationnalité, la sensibilité et la réponse aux changements de pratiques (diagnostic ; pilotage opérationnel ; pilotage stratégique ; recherche – expérimentation)
Niveau d'information	renseigne sur le degré d'écart et d'interprétation entre l'indicateur et des mesures sur le sol (indicateur primaire ; indicateur composite ; indicateur d'analyse)
Méthode - analyse	description succincte de la méthode pour obtenir la valeur de l'indicateur (mesure, calcul, observation) (normalisée ; en cours de normalisation ; protocole ; non ; so)
Méthodologie	état des lieux de la normalisation de la méthode en 2017
Mesure évaluateur-dépendant	la valeur de l'indicateur dépend de l'évaluateur (niveau d'expertise, spécialisation) (non ; oui)
Traitement de la mesure	comment la mesure de l'indicateur est effectuée : par prélèvement classique à envoyer au laboratoire, observation, manipulation au champ (laboratoire de routine ; laboratoire spécialisé ; champ ou laboratoire ; champ ou laboratoire spécialisé ; champ ; calcul – indice)
Nature de la mesure	sur quoi s'appuie la mesure de l'indicateur (physique ; chimique ; bioindicateur faunistique ; floristique ; microbiologique ; calcul - indice ; observation)
Type de matériel pour le prélèvement/protocole	le type de matériel requis pour l'évaluateur (ne prend pas en compte le matériel du laboratoire si un échantillon de terre est envoyé) (courant ; spécialisé ; très spécialisé)
Temps d'obtention des résultats interprétables	délai entre le prélèvement/observation et l'obtention de la valeur de l'indicateur. Correspond temps de mise en place du protocole et de la mesure/observation si elle est effectuée au champ

	ou bien au temps d'analyse au laboratoire si un échantillon est envoyé. (< 1 jour ; 1 - 5 jours ; 5 - 15 jours ; > 15 jours ; so)
Propriété du sol - processus associé	fonction(s) ou propriété(s) du sol évaluée(s) par l'indicateur
Projet - source - doc de référence	source(s) ou document(s) des informations renseignant les descripteurs pour chaque indicateur

### c. Analyse des indicateurs par la classification

#### ⇒ Opérationnalité des indicateurs

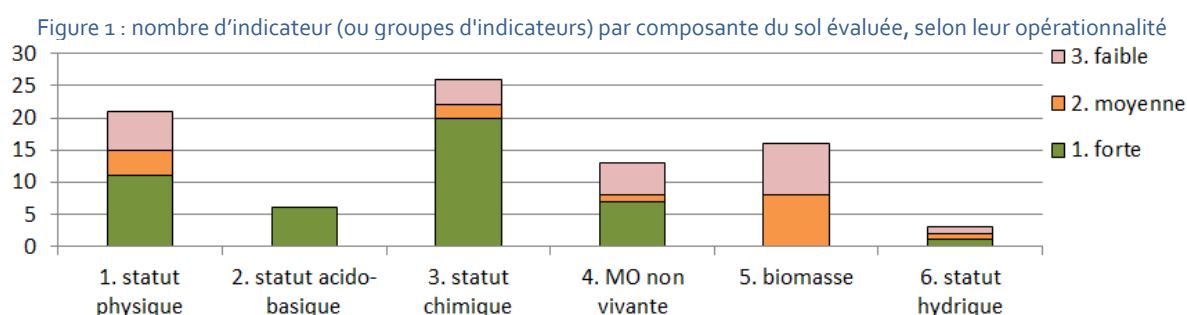
Avec le mode de classification choisi, on identifie sur les 85 indicateurs renseignés :

- 45 indicateurs dont l'opérationnalité est forte. Ils sont mobilisables sans contraintes particulières et l'interprétation de la mesure peut aider au choix des pratiques.

- 16 indicateurs d'opérationnalité moyenne : mobilisables avec quelques contraintes concernant le coût, l'interprétation ou encore la réalisation de la mesure.

- 24 indicateurs d'opérationnalité faible : difficilement mobilisables ou bien dont les valeurs sont difficilement interprétables (manque de référentiel ou de connaissances sur le lien avec les pratiques).

Parmi les six caractéristiques du sol évaluées, seule la biomasse n'a pas d'indicateurs d'opérationnalité forte (figure 1). L'opérationnalité moyenne est due soit au coût des techniques comme celles basées sur l'analyse d'ADN, soit à une utilisation qui nécessite une formation comme le comptage de populations de vers de terre, soit enfin, au manque de référentiels pour interpréter les résultats, comme pour la biomasse par carbone microbien.



#### ⇒ Usage des indicateurs

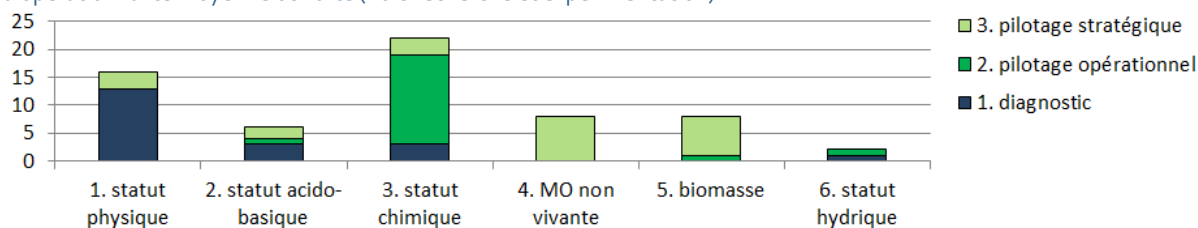
- Les indicateurs utilisés en recherche et expérimentation (24) :

Une partie des indicateurs aujourd'hui classés en recherche-expérimentation (faible opérationnalité) pourraient devenir opérationnels assez rapidement. Par exemple, les méthodes utilisant le séquençage ADN devraient devenir plus abordables d'ici 5 à 10 ans et la rapidité d'exécution d'analyses massives faciliterait la création de référentiels (cf le webinaire de l'AFES « La microbiologie moléculaire au service de la qualité des sols » par Cuny, Maron et Ranjard, 2017 <https://vimeo.com/channels/webinairesafes/248182646>) . Le projet Microbioterre financé par le CASDAR vise à faciliter la réalisation des analyses biologiques du sol en routine, notamment en développant des référentiels d'interprétation. De même, pour le fractionnement granulométrique des MO, le référentiel est en train d'être développé par le laboratoire Celesta Lab.

- Evaluation de la fertilité par les producteurs et techniciens (62)

63 indicateurs sont d'opérationnalité « moyenne » ou « forte » : 19 indicateurs de diagnostic, 21 indicateurs de pilotage opérationnel et 23 indicateurs de pilotage stratégique (figure 2).

Figure 2 : proportion d'indicateurs par composante du sol évaluée selon les types d'indicateurs, parmi ceux d'opérationnalité moyenne ou forte (hors recherche et expérimentation)



Les 19 indicateurs de diagnostic permettent d'adapter le système de culture au contexte pédoclimatique en prenant en compte : la texture, la profondeur du sol, la pierrosité du sol, la quantité de calcaire ou encore la RU potentielle. Les 21 indicateurs de pilotage opérationnel permettent de guider la conduite d'une culture : contrôle du pH, de la fertilisation (éléments nutritifs selon les méthodes d'extraction, éléments métalliques, salins et toxiques, conductivité électrique), de la désinfection du sol (nématodes phytophages) ou encore de l'irrigation (sondes). Les 23 indicateurs de pilotage stratégique permettent de guider les pratiques à l'échelle de la rotation : la stratégie de travail du sol, la succession des cultures, les amendements calciques ainsi que les apports en matières organiques. Ils intègrent des grandeurs agrégées, comme le potentiel d'acidification, la taille du réservoir accessible aux racines ou encore les équilibres des éléments nutritifs.

### 3. Les spécificités des cultures L&M justifient-elles l'utilisation d'indicateurs particuliers ?

Les cultures maraîchères peuvent se différencier des cultures légumières par le fait qu'elles cumulent plus d'une culture par an au cours de la rotation. Ainsi la distinction entre cultures légumières et maraîchères porte plus sur l'usage du sol que sur les espèces cultivées. Dans cette étude, quatre types de systèmes de production sont distingués : le maraîchage sous abris haut (maraîchage sous-abri), le maraîchage de plein air (maraîchage plein champ), les légumes de plein champ en frais (légumes en frais) et les légumes de plein champ d'industrie (légumes d'industrie). Ces cultures ont la particularité d'avoir, pour la plupart, des cycles plus courts qu'en grandes cultures. Elles sont aussi caractérisées par une forte exportation d'éléments minéraux et des exigences concernant la structure du sol. Le niveau d'intensification est traduit synthétiquement par la vitesse de rotation de cultures exportées des parcelles, et la fréquence des opérations de travaux du sol, d'amendements, d'apport d'eau et de fertilisants.

La variabilité des périodes d'implantation et des longueurs de cycles, ainsi que la structure géométrique des flux d'eau, de gaz, de solutés et de particules ne permet pas d'appliquer pour les cultures de L&M la méthode du bilan azoté utilisée en grande culture. Pour les cultures légumières, le pilotage de la fertilisation azotée dépend du type de précédent, des périodes d'implantations et de la durée du cycle (Whitmore, 1996). Pour les cultures maraîchères, plusieurs cultures à cycle court (de trois à six mois en moyenne) se succèdent par an. La fertilisation est raisonnée à une échelle de temps plus courte et peut nécessiter plusieurs mesures de la teneur en azote par mois pour un suivi optimum. Ceci explique l'investissement dans un indicateur estimant la concentration en nitrates dans la solution du sol à l'aide de bandelettes réactives et d'un réfractomètre. Le référentiel tient compte de certaines propriétés physiques du sol

Dans le cas particulier du maraichage sous abris, les apports de quantités importantes de fertilisants en ferti-irrigation localisée, et l'accumulation de ces éléments minéraux dans des zones sèches du sol peut aboutir à des excès de salinité (Bar-Yosef, 1999). Ceci peut justifier le recours à une mesure de la conductivité électrique. La conductivité électrique a une influence importante sur les transferts depuis le sol dans la plante et la qualité des organes récoltés. Elle peut contribuer à la manifestation de désordres physiologiques chez de nombreuses espèces végétales. La ferti-irrigation localisée induit également des hétérogénéités sur la parcelle, justifiant des protocoles d'échantillonnage adaptés pouvant permettre d'en tenir compte (Record, 2006).

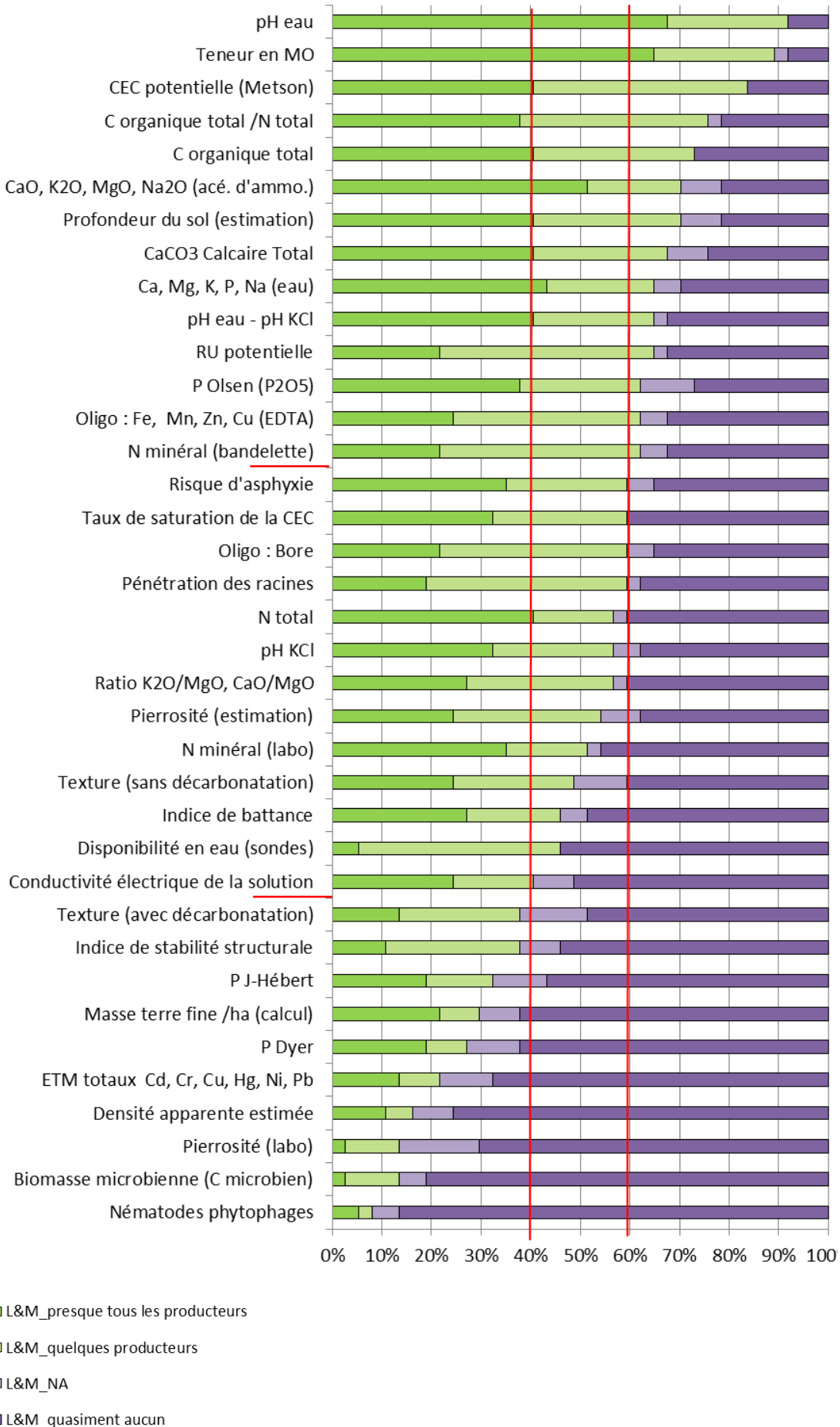
Les exportations élevées imposent de maintenir des apports et le plus souvent des stocks élevés de minéraux et une bonne capacité des sols à mettre à disposition des plantes ces minéraux. Pour cette raison, les systèmes légumiers et maraîchers reposent sur des apports importants de matière organique. En parallèle les pratiques intensives (notamment le travail du sol fréquent) et les températures souvent élevées (en particulier sous abris) accélèrent la minéralisation de cette matière organique (Abiven, 2004). Des références basées sur des fonctions normalisées pour la température et l'humidité ont été fournies par le CTIFL (base AZOPRO [www.ctifl.fr](http://www.ctifl.fr)). Les apports importants et la dégradation accélérée suggèrent une dynamique des matières organiques propre aux systèmes légumiers, et pas toujours synchronisés avec la dynamique de besoin des cultures. Les abondances et activités des communautés biologiques impliquées dans ces processus en sont peut-être également modifiées.

Par ailleurs, la nature de l'organe récolté peut imposer un certain niveau d'exigence concernant la structure du sol. En effet, pour certains légumes-racine comme les carottes, la texture du sol et la finesse des agrégats influe sur les risques de légumes fourchus ou coudés.

En conclusion, les spécificités des cultures légumières et maraîchères justifient parfois de l'utilisation de méthodologies adaptées pour la mesure des indicateurs. D'autre part, les référentiels ou les protocoles d'échantillonnage relatifs à certains indicateurs doivent être adaptés pour prendre en compte les différences d'exigences ou la variabilité spatio-temporelle des processus se déroulant dans le sol. Cependant il n'apparaît pas que l'on manque d'indicateurs pour évaluer ces processus et le fonctionnement des sols cultivés en cultures légumières. A quelques exceptions près, il n'apparaît pas de spécificités qui justifieraient l'utilisation d'indicateurs particuliers qui ne seraient pas utilisés en grandes cultures : seuls les niveaux de ces indicateurs devraient être adaptés aux cultures légumières et maraîchères. Des experts mentionnent pourtant certaines particularités. Des méthodes aujourd'hui peu courantes en grandes cultures pour mesurer le phosphore (P Dyer et P J-Hébert) peuvent être employées en cultures légumières. Dans certaines filières de production, en particulier en maraichage sous abri, les éléments minéraux P, K, Ca, Mg et éventuellement Na et Cl sont très souvent dosés après une extraction à l'eau. Enfin des indicateurs peu communs comme la biomasse microbienne (C org) et les nématodes phytophages peuvent être mesurés.

La partie suivante permet d'apprécier quantitativement l'utilisation de ces indicateurs en cultures légumières et maraîchères.

Figure 3 : % des conseillers qui estiment que les producteurs qu'ils suivent, **utilisent** ou **utilisent rarement** l'indicateur.





#### 4. Quels sont les indicateurs utilisés actuellement en culture L&M ? Quels sont ceux qu'il faudrait préférer ?

Dans ce paragraphe, une liste restreinte d'indicateurs utilisés couramment en grande culture a été établie :

- Parmi les indicateurs mesurés au laboratoire : à partir des menus d'analyse de terre proposés pour les grandes cultures (indicateurs primaires et composites).
- Parmi les indicateurs mesurés/observés au champ : à partir de ceux mesurés sans matériel spécialisé, sans formation nécessaire et d'opérationnalité moyenne ou forte. Ainsi, ont été retenus : la pierrosité, la profondeur du sol, la pénétration des racines. En laissant de côté « la largeur des fentes de retraits » et l'effervescence HCl qui est redondante avec l'analyse chimique.
- Parmi les indicateurs composites qui peuvent compléter les analyses de terre et d'opérationnalité forte : on retient la masse de terre fine et la réserve utile.

Cette liste a été complétée avec les 5 indicateurs mentionnés dans la partie précédente, a priori utilisés en cultures légumières et maraichères et identifiés par les entretiens avec les experts, la consultation d'analyses de sol, de comptes rendu et protocoles d'essais (en bleu dans le tableau). Les cultures légumières et maraichères étant souvent irriguées, on ajoute enfin l'indicateur « disponibilité en eau (sondes) ». La liste restreinte (tableau 3) obtenue comporte 37 indicateurs, intégrant les indicateurs utilisés couramment en GC et les indicateurs supplémentaires utilisés en L&M.

Tableau 3 : Liste restreinte d'indicateurs

Indicateurs (1/3)	Indicateurs (2/3)	Indicateurs (3/3)
Biomasse microbienne (C microb.)	Masse terre fine /ha (calcul)	pH KCl
C organique total	N minéral (bandelette)	Pierrosité (estimation)
C organique total /N total	N minéral (labo)	Pierrosité (labo)
Ca, Mg, K, P, Na (eau)	N total	Profondeur du sol (estimation)
CaCO <sub>3</sub> Calcaire Total	Nématodes phytophages	Ratio K <sub>2</sub> O/MgO, CaO/MgO
CaO, K <sub>2</sub> O, MgO, Na <sub>2</sub> O Ech.	Oligo : Bore	Risque d'asphyxie
CEC potentielle (Metson)	Oligo : Fe, Mn, Zn, Cu (EDTA)	RU potentielle
Conductivité électrique	P Dyer	Taux de saturation de la CEC
Densité apparente estimée	P J-Hébert	Teneur en MO
Disponibilité en eau (sondes)	P Olsen (P2O <sub>5</sub> )	Texture (avec décarbonatation)
ETM totaux Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb	Pénétration des racines	Texture (sans décarbonatation)
Indice de battance	pH eau	
Indice de stabilité structurale	pH eau - pH KCl	

⇒ Enquête sur l'utilisation de ces 37 indicateurs

Nous avons sollicité des conseillers et ingénieurs réseaux pour évaluer l'usage des indicateurs contenus dans la liste restreinte. Il a été demandé aux enquêtés si d'après eux chacun des indicateurs est utilisé par quasiment aucun, quelques-uns ou presque tous les producteurs (figure 3). Lorsque l'enquêté n'a pas répondu pour un indicateur, la réponse est notée « NA » (Non Acquis). Le sondage a été diffusé via l'actualité du GIS PicLég, une liste de diffusion de mails du programme EcoPhyto et des chambres d'agriculture. Les enquêtés ont répondu par une démarche volontaire (36 réponses) (voir figure 5 à mettre en face). La variabilité de la nature des réseaux de producteurs répondant, les fonctions et le niveau d'expertise des conseillers ont pu conditionner les réponses. Cette enquête étant



basée sur le volontariat, les précautions nécessaires à l'obtention d'un échantillon représentatif n'ont pas pu être prises. Ainsi, les résultats doivent-ils être considérés comme des tendances, et les éléments chiffrés comme des ordres de grandeur.

Il ressort de cette enquête et d'entretiens avec des experts des filières que l'utilisation d'indicateurs pour gérer la qualité des sols est loin d'être généralisée. Souvent, les producteurs ne traitent pas les indicateurs directement, c'est leur conseiller qui assure l'analyse des résultats, le commentaire puis le conseil d'adaptation des pratiques, ajouté aux commentaires des laboratoires sur les valeurs mesurées. En plus de ces indicateurs, et parfois à la place, les conseillers précisent qu'ils utilisent d'autres indicateurs, souvent des observations au champ pour jauger le niveau de fertilité d'un sol. Par exemple, ils observent la vitesse de décomposition de déchets organiques, les espèces présentes (flore sauvage), les différents horizons d'un profil (couleur, odeur, profondeur, texture au toucher, structure, développement racinaire, vers de terre) et la surface (croue de battance, turricules). Même s'il n'y a pas de mesures précises, ces observations sont, selon plusieurs d'entre eux, indispensables et préalables à toute mesure pour évaluer le fonctionnement d'un sol. Par ailleurs, certains utilisent également des données morpho-pédologiques pour commenter l'analyse.

En rassemblant les réponses pour l'ensemble des filières, il apparaît qu'aucun indicateur n'est mesuré systématiquement, et que pour chaque indicateur les personnes enquêtées ont porté un avis contrasté sur l'usage qui est fait d'un indicateur donné. Les indicateurs les plus généralement utilisés sont le pH eau et la teneur en MO, que plus de 60% des conseillers estiment comme « utilisés par presque tous les producteurs ». Ces deux indicateurs renseignent des caractéristiques qui conditionnent la plupart des fonctions du sol et sont sensibles aux pratiques culturales (on y reviendra dans la deuxième partie). Les plus rarement utilisés considérés par plus de 60% des conseillers comme « quasiment jamais utilisés par les producteurs » sont : la masse de terre fine par hectare, le P Dyer, les ETM totaux, la densité apparente estimée par le producteur, la pierrosité mesurée en laboratoire, le C de la biomasse microbienne, et le groupe d'indicateurs sur les nématodes phytophages.

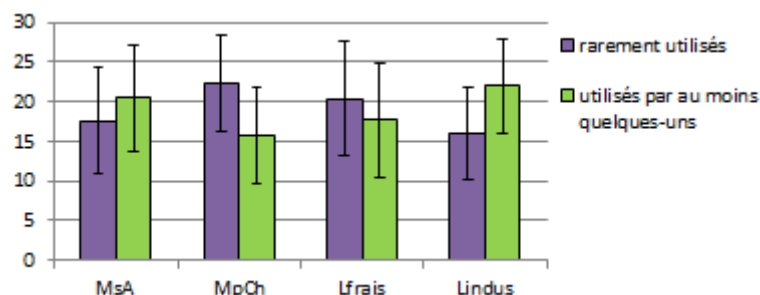
⇒ Quelles différences d'utilisation selon les systèmes de production ?

Il a été choisi pour la suite de l'analyse de regrouper les réponses en 2 groupes :

- « **utilisés par au moins quelques-uns** » = rassemble les indicateurs utilisés par « quelques producteurs » et « presque tous les producteurs »
- « **rarement utilisés** » = rassemble les indicateurs utilisés par « quasiment aucun des producteurs utilisés » et les « NA »

Le nombre d'indicateurs utilisés et non utilisés a été évalué dans les 4 systèmes de production distingués dans cette étude (figure 4).

Figure 4 : nombre d'indicateurs « rarement utilisés » ou « utilisés », en fonction des systèmes de production. Ecart types Pearson des réponses des conseillers par rapport à la moyenne pour le système de production.



Les résultats de l'enquête ne font pas apparaître de différences significatives d'utilisation des indicateurs entre les systèmes de production.

Pour évaluer si un système de production se distingue d'un autre dans l'usage d'un indicateur particulier, il a été établi pour chaque indicateur l'écart entre le rang moyen d'usage de l'indicateur tous systèmes de productions confondus et le rang d'usage de cet indicateur pour le système de production (Annexe 5). Les résultats sont synthétisés dans le tableau 4.

Exemple : pour « la conductivité électrique » en maraichage sous abris : rang moyen des quatre systèmes (27) - rang d'usage en maraichage sous abris (6) = écart de 21 rangs d'usages.

Tableau 4 : des indicateurs plus ou moins utilisés par certains systèmes de production

Système de production	Indicateurs plus utilisés qu'en moyenne. Ecart de plus de 10 (14) rangs d'usage au-dessus de la moyenne.	Indicateurs moins utilisés qu'en moyenne. Ecart de plus de 10 (14) rangs d'usage en dessous de la moyenne.
Maraichage sous abris	Ca, Mg, K, P, Na (eau) N minéral (labo) <b>Conductivité électrique</b>	<b>Oligo : Fe, Mn, Zn, Cu + Bo (EDTA)</b>
Maraichage plein champ		Pierrosité (estimation)
Légumes en frais	<b>P Olsen (P2O5)</b> Ratio K2O/MgO, CaO/MgO	
Légumes d'industrie	Oligo : Fe, Mn, Zn, Cu + Bo (EDTA) <b>Disponibilité en eau (sondes)</b>	<b>N minéral (bandelette)</b>

La conductivité électrique est propre au maraichage sous abris liées aux pratiques salinisantes et à la production de certains fruits comme les fraises dont la qualité peut être pilotée par cet indicateur. Au contraire les oligo-éléments sont moins mobilisés que la moyenne dans ce type de système de production. Les productions en légumes frais, souvent cultivés en région de GC et dont les rotations intègrent parfois des céréales, utilisent plus que la moyenne le phosphore Olsen, largement adopté en grande culture. Enfin, les productions en légumes d'industrie ont un cahier des charges qui demande un suivi assez poussé, notamment pour atteindre un rendement et une qualité définie. Ceci explique l'acquisition de sondes pour suivre la disponibilité en eau et piloter l'irrigation. Au contraire, ces systèmes utilisent moins les méthodes de bandelettes pour suivre l'azote minéral du sol que les autres systèmes de production.

Il ressort de cette étude qu'entre 15 et 20 indicateurs couramment utilisés en grande culture ne seraient pas utilisés en cultures légumières et maraîchères et que certains indicateurs seraient mobilisés plus spécifiquement dans certains systèmes de production. On peut s'interroger sur l'intérêt qu'il y aurait à utiliser certains des indicateurs courants en grandes cultures dans les filières légumières et maraîchères, et questionner l'intérêt des indicateurs spécifiques aux filières légumières et

maraîchères. Dans la suite on considérera qu'un indicateur est **peu utilisé** s'il est déclaré « utilisé au moins par quelques-uns » dans moins de 40% des enquêtes, **utilisé** s'il est déclaré « utilisé au moins par quelques-uns » dans plus de 60% des enquêtes, et non classé s'il est entre les deux (c'est le cas où une proportion comparable de conseillers et experts déclarent qu'il est utilisé et qu'il n'est pas utilisé).

⇒ Quelle est la pertinence des indicateurs « utilisés en L&M » mais pas en GC ?

- **N minéral (bandelette) : pertinent**

Le suivi par bandelettes (Nitratek par exemple) est utilisé en maraichage pour adapter la fertilisation au plus près des besoins. Les bandelettes peuvent être utilisées pour estimer l'azote nitrique du sol ou des plantes. Cela permet d'ajuster les apports surtout pour des cultures à cycles courts. Certains outils d'aide à la décision (OAD) comme la méthode PILazo® ou la grille Zenit mobilisent cet indicateur pour fournir un conseil de fertilisation. La méthode PILAZO utilise cet indicateur sol du semis à l'apparition des premières feuilles, avant de se baser sur des tests de nitrates pétiolaires, qui peuvent également être mesurés avec des bandelettes.

- **Ca, Mg, K, P, Na (eau) : la pertinence pose question**

Les extractions à l'eau évaluent, outre l'azote nitrique, la concentration en phosphore et en cations dans la solution du sol. Du fait des échanges entre la solution du sol et la phase solide pour ces éléments, ces analyses sont difficilement interprétables sans information sur le pouvoir tampon du sol pour ces éléments. S'agissant de juger de l'intérêt d'une fertilisation de fond, ces analyses peuvent aboutir à une interprétation erronée dans les sols fortement tamponnés, où il y a peu de variations de la concentration en solution suite à un apport. Ainsi des concentrations mesurées relativement faibles peuvent inciter à fertiliser (en cohérence avec les seuils utilisés par les laboratoires réalisant ces analyses), alors que des apports excessifs et répétés depuis plusieurs années correspondent à des quantités échangeables ou assimilables de ces éléments très élevées. Dans l'état actuel des connaissances et des technologies de mesures de routine, les mesures d'extraits à l'eau ne peuvent pas remplacer les analyses d'éléments échangeables (pour les cations) et du phosphore assimilable. Les extraits à l'eau sont réalisés pour des raisons de rapidité et de tradition (ce qui présente l'avantage de proposer un référentiel...même si celui-ci est agronomiquement inutile). Le COMIFER doit se saisir dans les prochaines années des données pouvant rénover le raisonnement de la fertilisation P et K en GC et L&M.

⇒ Quelle est la pertinence des indicateurs « peu utilisés » en L&M alors qu'ils le sont en GC ?

- **La texture**

La texture, en particulier la proportion d'argile (combinée à la nature minéralogique de ces argiles) détermine une bonne part de la CEC, ainsi que les propriétés mécaniques des sols; elle a une influence sur la stabilité structurale donc sur les risques éventuels de ruissellement et d'érosion et sur la sensibilité au compactage suite à un travail du sol ou à la circulation d'engins lourds (Baize and Jabiol, 2011). La texture peut être déterminée par une analyse granulométrique, ou estimée, avec dans ce dernier cas un risque d'erreur lié à l'évaluateur. Dans les analyses de sol, la texture sert à définir un type de sol, et beaucoup de seuils proposant les teneurs optimales d'éléments minéraux dépendent du type de sol renseigné (MO, CEC, ...). En GC une multitude d'OAD reposent sur la définition du type de sol pour implémenter des modèles (gestion de l'irrigation, de la fertilisation, traitement d'images satellites...). Les résultats de l'enquête sur l'utilisation de cet indicateur en cultures L&M sont étonnants (l'utilisation semble être sous-estimée). Peut-être qu'en culture L&M, la texture est connue par d'autres indicateurs non normalisés (connu historiquement ou par observation). Ainsi, le type de sol est nommé parfois avec des noms vernaculaires. Une analyse granulométrique pourrait permettre de vérifier le nom donné du sol correspond au type de sol attribué par le laboratoire et d'améliorer les

préconisations en cas d'erreur. La texture étant évaluée par granulométrie, le calcaire du sol peut modifier les pourcentages des fractions granulométriques. En GC, la texture avec décarbonatation est utilisée en sols calcaires pour optimiser la mesure. Peut-être que ce biais n'est pas bien connu par les techniciens et conseillers en cultures L&M.

- **Indice de stabilité structurale**

Comme l'indice de battance ou le risque d'asphyxie, l'indice de stabilité structurale dépend de la texture (triangle de texture ou fonction de pédotransfert) et de la MO (Monnier and Stengel, 1982). Ils permettent d'évaluer des risques mais ne sont pas totalement le reflet de la réalité (ils ne peuvent pas prendre en compte les effets des pratiques, la topographie,...). En outre, les référentiels ont été validés uniquement dans des sols de Picardie, même si l'utilisation de ces indicateurs a été élargie à l'ensemble de la France par les laboratoires. Une observation sur le terrain peut s'avérer nécessaire pour compléter les indications obtenues par ces indicateurs. Afin de caractériser la stabilité structurale, il est possible de faire une mesure de la stabilité des agrégats même si aujourd'hui cette mesure très informative est faiblement opérationnelle.

- **Densité apparente estimée et masse de terre fine/ha**

La densité apparente (ou masse volumique sèche) est difficile à mesurer. Certains laboratoires attribuent une densité estimée selon la texture du sol. A part pour certains sols particuliers, la densité apparente varie dans une gamme assez restreinte ; pour avoir une idée de la masse de terre fine à l'hectare, on peut par défaut lui attribuer une valeur entre 1,3 pour les horizons travaillés et 1,5 pour les horizons sous-jacents, avec : Masse = (profondeur \* 1ha) \* (1-%cailloux) \* densité.

La masse de terre fine à l'hectare est un indicateur pertinent en GC pour se rendre compte du réservoir potentiellement exploitable par les racines. De plus, dans les analyses de sol, les teneurs en éléments sont exprimées en mg/kg ou g de terre fine. En cultures légumières et maraichères, certaines cultures (à cycle très court, comme la laitue) ont une exploration racinaire faible (~30cm). L'enjeu est alors moins la masse de terre exploitable que l'optimisation du petit volume de terre accessible.

- **Pierrosité (laboratoire) (%cailloux)**

Elle peut être mesurée en laboratoire par le poids des refus des éléments > 2mm. Souvent les agriculteurs, techniciens, conseillers ou préleveurs estiment la pierrosité par observation sur le terrain. En plus de guider dans le choix de certaines pratiques, l'appréciation de la teneur en cailloux permet de calculer la masse de terre fine et d'estimer la RU.

- **ETM : Éléments Traces Métalliques**

Les ETM phytodisponibles peuvent présenter un risque pour la santé, puisque ces éléments, toxiques en trop grande quantité, peuvent s'accumuler dans les organes dédiés à la consommation (légumes feuilles, tubercule, grains...) (Chang *et al.*, 2014). Une réglementation européenne fixe pour certains d'entre eux les teneurs maximales. La majorité des sols et des produits végétaux ne présentent pas une contamination en ETM (Mench and Baize, 2004). Cependant, on peut en retrouver dans les engrais phosphatés (cadmium) et dans les amendements issus des boues de stations d'épuration ou de compost d'ordures ménagères. Une étude récente du CTIFL montre que l'absorption de ces éléments par les plantes dépend de plusieurs propriétés du sol. Cet indicateur est utilisé occasionnellement en GC, s'il y a une suspicion d'un historique avec des épandages de boues, source de pollution à proximité. En culture L&M, il peut être utilisé pour les mêmes raisons ou imposé par un cahier des charges.

⇒ Indicateurs peu utilisés en GC et « peu utilisés » en L&M : un intérêt à les développer ?

- **P Dyer et J-Hébert**

Ces deux méthodes de mesure du phosphore ne sont presque plus utilisées en GC. Le P Dyer sous-estime le P biodisponible en sols calcaires et le P Joret-Hébert en sols acides. Certains laboratoires

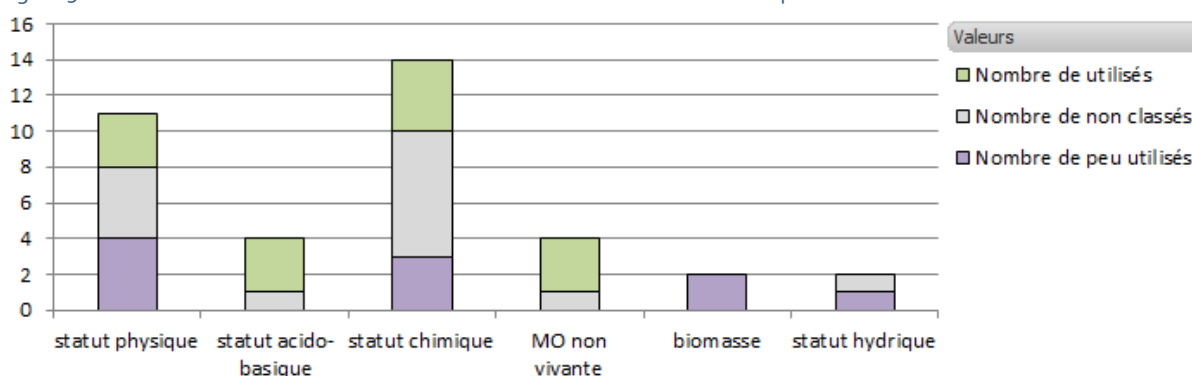
continuent d'adapter le protocole de dosage du P assimilable au type de sol. Cependant le P Olsen est la mesure la plus courante et fiable aujourd'hui, qui permet d'établir des référentiels nationaux ; le COMIFER préconise son utilisation en GC, en adaptant les seuils au type de sol. Même si certaines analyses de sol en L&M et certains experts les mentionnent, il semblerait que ces indicateurs soient rarement utilisés en L&M, et que le P Olsen soit aussi privilégié.

- Biomasse microbienne (carbone)
- Nématodes phytophages (par analyse de populations au laboratoire)

Cet indicateur est utilisé en légumes d'industrie, dans les cas où la parcelle est suspectée d'être infestée. Les analyses peuvent être ciblées (ex : *Pratylenchus*) ou globales et peuvent servir à justifier une désinfection chimique du sol.

Au-delà de la pertinence des indicateurs mentionnés, on peut questionner globalement l'usage des indicateurs selon la caractéristique du sol évaluée (Figure 6).

Figure 5 : nombre d'indicateurs utilisés ou rarement utilisés selon la caractéristique du sol évaluée



Il apparaît que les indicateurs se rapportant à la biomasse vivante (biomasse microbienne et nématodes phytophages) sont peu utilisés. Les indicateurs de la chimie, du statut hydrique et de la physique du sol ne sont pas tous mobilisés. Cependant, des conseillers enquêtés ont précisé que la physique du sol (notamment la structure) était parfois évaluée avec d'autres observations que celles proposées dans le sondage.

Ainsi, parmi la totalité des indicateurs répertoriés, certains de ceux qui sont en développement en grandes cultures, pourraient être intéressants à utiliser en L&M. Il faudrait rendre opérationnels certains indicateurs en construisant des référentiels pour les cultures légumières et maraichères selon les contextes pédologiques.

- Pour mieux évaluer la biomasse du sol :

La biomasse microbienne (C microbien et ADN) évalue la qualité biologique des sols en raison de son rôle dans la régulation, la transformation et le stockage des nutriments. Cette quantité de biomasse microbienne est par ailleurs démontrée comme étant un indicateur sensible, robuste et précoce des perturbations d'un sol (modifications de pratiques agricoles, contaminations, changement de statut organique, etc... (Chaussod, 1996, Ranjard *et al.*, 2006). La mesure de la biomasse moléculaire microbienne est une technique permettant d'estimer l'abondance des microorganismes dans le sol au même titre que la méthode de fumigation/extraction (Bouzaiane *et al.*, 2007, Widmer *et al.*, 2006, Blagodatskaya *et al.*, 2003, Marstorp *et al.*, 2000). L'indicateur C microbien est proposé par quelques laboratoires pour les analyses en routine mais son prix est encore aujourd'hui élevé (la mesure de cet indicateur peut doubler le prix de l'analyse de sol). Cet indicateur est utilisé quand les autres paramètres analytiques ne donnent pas de réponse par rapport à un problème de fertilité. L'indicateur

est utilisable en relatif, en comparant des situations similaires d'un point de vue pédoclimatique, mais il n'y a pas encore de référentiel suffisamment développé pour apporter des interprétations précises (Balloy *et al.*, 2017). En effet, la biomasse microbienne est très dépendante des caractéristiques physico-chimiques (dont la température et l'humidité) du sol et de leur mode de gestion (Chaussod, 1996).

La **diversité microbienne (funges et bactéries)** évalue la structure de la communauté microbienne : niveau de durabilité et de performance/fonctionnement du sol en termes de fertilité biologique, de productivité végétale, de résistance à des perturbations (Balloy *et al.*, 2017). Cet indicateur présente une sensibilité forte aux changements de pratiques culturales et aux types d'occupation des sols (travail du sol, mode d'occupation). Elle varie selon les impacts anthropiques liés au travail du sol ou à la présence de polluants, qui ont tendance à diminuer la biomasse fongique totale. Le type et l'âge du peuplement végétal agit également qualitativement et quantitativement sur la biomasse fongique.

**Nématofaune (indices)** (Balloy *et al.*, 2017) **SI : Indice de Structure** reflète la stabilité du milieu : plus il est élevé moins le milieu est perturbé. Il est fonction de l'abondance relative de plusieurs familles (les bactérivores, les fongivores, les omnivores et les prédateurs). **EI : Indice d'Enrichissement** donne une indication sur la dynamique des éléments nutritifs. Cet indice est particulièrement utile dans les agrosystèmes. L'EI augmente avec la disponibilité en nutriments, et en particulier l'azote. **Trois autres indices** peuvent être utilisés : le MI (Indice de Maturité), le PPI (Indice des nématodes PhytoPhages) et le IVD (Indice des Voies de Décomposition de la matière organique).

Les **indicateurs d'activité** sont très réactifs mais encore difficiles à interpréter faute de références.

- **Pour mieux qualifier les matières organiques**

**Fractionnement granulométrique des matières organiques** : cet indicateur permet d'apprécier plusieurs propriétés du sol, d'adapter les apports organiques et d'anticiper la dynamique du stock de MO. Les matières organiques ont un temps de résidence dans les sols variables en fonction de leurs dimensions, de leur nature chimique, et d'autres facteurs liés aux sols. Les fractions les plus grossières (> 200µm ; 50-200µm), facilement séparables des minéraux, communément appelées matières organiques particulières (MOP), sont les plus labiles (> 0,05 mm, temps moyen de résidence entre 1 année et 20-30 ans) : les nutriments de cette fraction sont disponibles plus vite que ceux de la fraction stable et ces fractions réagissent plus vite aux changements de pratiques (ce sont donc des indicateurs précoces de changements) (Chan, 2001). A l'inverse, les fractions les plus fines (<50 µm) sont des matières organiques stables (temps moyen de résidence > 50 ans en sol cultivé tempéré) qui participent donc au stockage de matière organique de plus longue durée. Ces fractions sont également utilisées pour estimer la taille de compartiments cinétiques pour la modélisation des effets de changements de pratiques sur l'évolution de la matière organique du sol. Cet indicateur permet de renseigner sur la quantité et la qualité des MO, la nature de cette MO (labile/stable) et la disponibilité potentielle en éléments minéraux, quand les stocks organiques représentent la majeure partie des réserves du sol (N en particulier).

Par ailleurs, il y a eu un effort significatif des instituts techniques pour caractériser les potentiels de minéralisation (C et N) des principaux amendements apportés en cultures L&M. Les paramètres issus de ce travail permettent d'alimenter les modèles de cultures et des OAD. Cependant, ces indicateurs pour évaluer les MO du sol sont difficiles à déployer à grande échelle en laboratoire du fait d'une part des 28 jours d'incubation pour obtenir un résultat et d'autre part des référentiels pas encore suffisants pour interpréter les valeurs selon les cultures et les contextes pédoclimatiques.

- **Pour mieux évaluer la physique du sol**

**Test bêche** (ISARA Lyon, 2016)<sup>2</sup> : ce test est moins destructeur qu'un profil de sol et présente l'avantage d'évaluer plusieurs aspects de la structure par un système de classe. Cette notation permet de comparer des modalités ou de suivre l'évolution d'une parcelle. Il permet d'observer facilement la structure d'un sol afin de détecter les éventuels problèmes impactant la culture. L'observation du sol et l'interprétation en classes aide à faire un diagnostic rapide de l'état de la structure du sol afin de guider dans le choix des pratiques à mettre en place ou à modifier.

En conclusion, le tableau 5 présente les indicateurs intéressants à mobiliser selon l'usage et la composante du sol à évaluer. Les indicateurs d'opérationnalité forte sont en vert, moyenne en orange et faible en rouge. Les indicateurs propres à un système de production sont en italique. La dernière ligne présente les indicateurs dont l'usage serait à développer. Le tableau ne prend pas en compte certains indicateurs composites que des laboratoires proposent comme les indices de stabilité structurale et de battance ou encore le risque d'asphyxie. Ils présentent une information intéressante mais doivent être validés par des observations de terrain. De plus, certains indicateurs composites sont présents mais pas les indicateurs primaires pour les calculer : la masse de terre fine (- densité apparente), le C/N (- C organique et N total) ou encore le pH eau-pH KCl (- pH KCl). Le but est de faire apparaître les indicateurs dont l'interprétation apporte une information pour la gestion.

---

<sup>2</sup> [http://orgprints.org/31137/1/peigne-et-al-2016-GuideTestBeche-ISARA\\_Lyon.pdf](http://orgprints.org/31137/1/peigne-et-al-2016-GuideTestBeche-ISARA_Lyon.pdf)



Tableau 5 : Synthèse des indicateurs disponibles ou à développer pour gérer la qualité des sols

Indicateur de	statut physique	statut acido-basique	statut chimique	MO non vivantes	biomasse	statut hydrique
pilotage opérationnel		pH eau	N minéral (labo et bandelette) CaO, K <sub>2</sub> O, MgO, Na <sub>2</sub> O P Olsen Taux de saturation de la CEC Oligo : Fe, Mn, Zn, Cu et Bo <i>Conductivité électrique</i> <sup>3</sup>		<i>Nématodes phytophages</i> <sup>4</sup>	<i>Disponibilité en eau (sondes)</i> <sup>4</sup>
pilotage stratégique	<i>Pénétration racines</i>	pH eau - pH KCl	CEC potentielle (Metson) Ratio K <sub>2</sub> O/MgO, CaO/MgO	C/N Teneur en MO		
diagnostic	Pierrosité Masse terre fine /ha Profondeur du sol Texture	Calcaire Total	<i>Eléments Traces Métalliques</i>			RU potentielle
usage à développer	<i>Test bêche</i>			Fractionnement MO Potentiel de minéralisation du C et N	Biomasse microbienne Nématofaune (indices) Diversité microbienne	

<sup>3</sup> Maraichage sous abri

<sup>4</sup> Légumes d'industrie



## PARTIE II : Les liens entre les pratiques et la fertilité des sols

Cette partie de l'étude avait pour objectif de faire le lien entre les interventions techniques et la fertilité du sol. Cette partie s'appuie sur les quatre systèmes de production définis partie I : le maraichage sous abris, le maraichage plein champ, les légumes plein champ en frais et les légumes plein champ d'industrie. Des exemples de conduites techniques observées dans ces quatre systèmes sont étudiés, et les pratiques ayant une forte influence sur la fertilité du sol sont recensées, ainsi que les indicateurs qui renseignent le mieux les conséquences des choix techniques.

La qualité des sols en cultures légumières et maraichères est questionnée par les pratiques culturales intensives (rotations courtes sur peu d'espèces, travail du sol, passages répétés et fertilisation). Ces pratiques pourraient conduire à la diminution de la teneur en MO, à la détérioration de la structure et à la perte de biodiversité (Willekens *et al.*, 2014).

Le choix des pratiques culturales est dépendant du contexte du système de production que nous décrivons ici comme un ensemble de contraintes et d'atouts pour la gestion de la fertilité. Ainsi, les problèmes de sols rencontrés varient selon les systèmes de productions.

Pour chacun des quatre systèmes de production, des exemples de systèmes de culture (SdC, voir ENCADRE 2) sont proposés. Les SdC présentés ne sont pas des modèles, mais des exemples illustratifs. Ainsi, les pratiques et les fréquences des différentes pratiques décrites dans ces exemples correspondent à l'observation d'un cas particulier et en aucun cas à la moyenne des pratiques rencontrées dans des systèmes de production similaires.

Dans un premier temps, les quatre systèmes de production seront présentés pour comprendre les liens entre fertilité et pratiques. Dans un deuxième temps, une synthèse des liens entre pratiques et fertilité et pratiques et indicateurs sera proposée.

### ENCADRE 2 : Définition du système de culture et itinéraire technique

D'après Sebillotte (1989), chaque système de culture se définit par la nature des cultures et leur ordre de succession ainsi que les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures, ce qui inclut le choix des variétés. L'itinéraire technique ayant été lui-même défini comme « combinaison logique et ordonnée de techniques qui permettent de contrôler le milieu et d'en tirer une production donnée. ».

#### 1. Exemples de systèmes de production L&M

##### a. Système de production en maraichage sous abris

⇒ Exemple d'un système de culture en maraichage sous abris

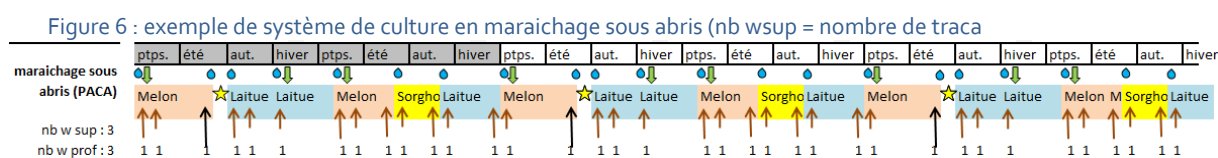
Pour les cultures maraichères en général (sous abris et plein champ), le mode de commercialisation et les caractéristiques des espèces cultivées affectent la gestion de la fertilité du sol.

Le **système de commercialisation** a un effet sur la **diversification** de la rotation. Les systèmes de culture en maraichage sous abris sont très variables. D'un côté les exploitations qui vendent aux grossistes ont tendance à se spécialiser à cause de l'organisation commerciale. D'un autre côté, les exploitations qui sont en vente directe ont tendance à diversifier leurs cultures pour proposer une gamme de produits variée tout au long de l'année.

Les besoins instantanés en éléments nutritifs des espèces et les successions rapides des cultures nécessitent une réactivité importante pour la fertilisation.

Les abris engendrent des conditions d'humidité et de température particulières. D'autre part, les structures génèrent des coûts financiers élevés. Ainsi, les surfaces d'abris et les temps sont optimisés. De ce fait certaines pratiques peuvent s'avérer contraignantes à mettre en place comme la localisation des passages de roues ou encore l'intégration de couverts végétaux dans des intercultures.

La description du système de culture Figure 7 illustre les pratiques dans une rotation qui peut être observée en maraichage sous abris: melon – laitue – laitue – melon – (sorgho) – laitue.



Ce système de culture est particulièrement intensif et un exemple de conduite cultural est donné ci-dessous.

- **Rotation** : la rotation est courte (1 an), très peu diversifiée (deux familles représentées par les cultures principales et une troisième avec le couvert végétal) avec 2,5 implantations de cultures/an. Le sorgho piège<sup>5</sup> à nématode est implanté d'août à octobre.

- **Travail du sol** : on peut observer par an 3 travaux profonds et 3 travaux superficiels par an avec de plus des rappuyages au rouleau<sup>6</sup>. Dans l'exemple observé, un sous – solage est pratiqué avant la solarisation.

- **Fertilisation** : un apport d'engrais minéraux est effectué avant chaque laitue pour couvrir les besoins de la culture et le melon est géré en ferti-irrigation par le goutte à goutte. Des PRO déshydratées sous forme de pellets (3T/ha) sont apportés avant le melon et avant la laitue qui précède le deuxième melon. La laitue suivante bénéficie de la restitution du sorgho fourrager broyé et enfoui, même si les caractéristiques du sorgho peuvent aboutir temporairement à une organisation nette d'azote.

- **Irrigation** : deux pleins en eau du sol par an sont réalisés : un avant la plantation des laitues afin de remplir la réserve utile du sol et un avant la solarisation pour améliorer la conductivité

<sup>5</sup> Les nématodes qui parviennent à pénétrer dans les racines de sorgho peuvent être détruits si le sorgho est enfoui avant la libération des pontes (durée estimée à 3-4 semaines dans les conditions provençales).

<sup>6</sup> Pour l'implantation des melons, un passage au rotobèche enfouit les résidus du précédent et restaure la porosité sur une vingtaine de cm puis le cutlirateur façonne la planche. Pour l'implantation des laitues, un passage au rotobèche est suivi d'un nivellement par une herse et d'un rappuyage au rouleau. La deuxième laitue est implantée après un passage à la herse rotative et rappuyée au rouleau. Pour l'implantation du sorgho, un passage au rotobèche est suivi d'un passage à la herse rotative et d'un semis à la volée.

thermique du sol lors de l'opération. Les laitues sont irriguées par aspersion et le melon en goutte à goutte.

- Gestion des bioagresseurs telluriques se fait par la solarisation, l'intégration d'un sorgho nématicide ou encore le paillage des cultures.

⇒ Les principaux problèmes de sols soulevés par les experts et liens avec les pratiques

- Liés à la gestion de l'azote

**Inconvénients** : fertilisation non optimale peut entraîner un surcoût et le lessivage d'éléments mobiles.

**Effets des pratiques** : Les engrais azotés sont apportés par des apports de fond (laitue et melon) avant les cultures ou par ferti-irrigation (melon), ajustée aux estimations des besoins instantanés de la culture. En parallèle, une quantité d'azote non négligeable (plusieurs dizaines de kilo) provient de la minéralisation des matières organiques, des engrais verts ainsi que des mottes de terreau. En maraichage sous abris, la température et l'humidité ambiantes stimulent l'activité biologique. De plus, le travail du sol intensif (nombreux passages, outils animés) éclate les agrégats et expose la matière organique aux microorganismes décomposeurs. De fait, la minéralisation de la matière organique peut être accélérée (Jackson *et al.*, 2003).

Si la fertilisation repose seulement sur les engrais pour couvrir tous les besoins de la culture, l'azote excédentaire libéré par minéralisation n'est pas prélevé et peut être lixivié. Les pleins en eau qui excèdent la capacité de la RU et les irrigations qui suivent peuvent lessiver l'azote excédentaire (Lecompte, 2012). L'intégration de couverts végétaux peut capter l'azote du sol (ex : sorgho fourrager) mais cela dépend de la nature des couverts et de leur durée d'implantation. Par ailleurs, l'implantation de couverts végétaux à base de légumineuses pour apporter de l'azote et limiter le recours aux engrais azotés mais est encore mal maîtrisée sous abris, comme le montre des essais menés au GRAB<sup>7</sup>. La combinaison d'amendement organiques et d'engrais minéraux permet d'adapter les fournitures aux besoins et d'améliorer à la fois les rendements et la qualité des sols (Miao *et al.*, 2011).

Les conditions sous abris nécessitent l'estimation des dynamiques spécifiques de minéralisation des MO : c'est un des aspects étudiés dans un projet long **conduit entre 2002 et 2010 par l'INRA Alénya<sup>8</sup>**, et cet aspect constitue un des objectifs du **projet ORION<sup>9</sup>**

- Liés à la fertilisation P, K, Mg

**Inconvénients** : fertilisation non optimale peut entraîner des surcoûts et l'accumulation (par exemple de P) ou le transfert d'éléments mobiles (K, Mg).

**Effets des pratiques** : Certains engrais minéraux complets apportés sur la base du raisonnement de la fertilisation azotée peuvent aboutir à des apports supérieurs aux besoins des cultures pour les autres éléments, en particulier pour le phosphore. Par ailleurs, les apports systématiques et en grande quantité de composts de déchets verts, attrayants par leur bas prix mais chargés en magnésie, peuvent engendrer l'accumulation de cet élément (peu prélevé par les plantes) dans le sol. L'accumulation de Mg<sup>2+</sup> et éventuellement de Ca<sup>2+</sup> peut limiter de l'assimilation du potassium. Un diagnostic préalable des équilibres chimiques permet de raisonner les apports les mieux adaptés.

<sup>7</sup> Engrais verts en Maraichage Biologique sous abri (2013 - 2015) - GRAB (Régional PACA)

<sup>8</sup> Effets des apports MO en maraichage sous abris (2002 - 2010) - INRA Alénya (Régional Sud Est)

<sup>9</sup> ORION : Outils d'aide à la décision innovants pour une meilleure maîtrise de l'eau et du pOtentiel Nutritif du sol (2017 - 2020) - APREL (Régional PACA)

- L'hétérogénéité des parcelles

**Inconvénient** : hétérogénéités en éléments peuvent mener à des parcelles avec des rendements inégaux.

**Effets des pratiques** : Les cultures en rang irriguées en goutte à goutte (melon dans l'exemple choisi, mais cela concerne aussi les autres cucurbitacées, les solanacées et autres espèces cultivées en été) créent des hétérogénéités chimiques et physiques. Les éléments chimiques sont attirés à la périphérie des bulbes d'irrigation générés par le goutte à goutte (Gardenas *et al.*, 2005, Li *et al.*, 2004) et les éléments mobiles en particulier nitrates s'accumulent entre les rangs (Lecompte, 2012, Lecompte *et al.*, 2008). Par le passé, on a pu utiliser le plein en eau pour atténuer ces hétérogénéités.

- Fort parasitisme tellurique :

**Inconvénients** : les dégâts sur les cultures causent des pertes de rendement.

**Effets des pratiques** : Une rotation trop courte favorise la sélection de certaines populations pathogènes et augmente la pression des maladies racinaires (comme certains nématodes). Comme le suggèrent certains projets de recherche, **du CTIFL**<sup>10</sup>, **ou encore du GRAB**<sup>11</sup>, la diversification des familles dans la rotation et l'intégration de couverts végétaux/engrais verts sont utilisés pour :

- améliorer la fertilité du sol, en maintenant la structure et apportant de la MO
- leurs fonctions biocides par l'intégration de plantes de coupures (ex : seigle), de plantes biocides (ex : sorgho nématicide) ou de plantes pièges dans les racines desquelles les nématodes restent (ex : piment/poivron)

Sous abris, la solarisation<sup>12</sup> est une méthode efficace pour gérer les nématodes et certains autres microorganismes pathogènes (Scopa *et al.*, 2009, Védie *et al.*, 2014). Notamment testée dans le projet GEDUBAT [**ROT\_CTIFL, APREL, INVENIO, INRA, GRAB**]<sup>8</sup>, la solarisation peut réduire les populations pendant quelques mois sans totalement les éradiquer. L'abondance et les équilibres des populations d'organismes pathogènes et non pathogènes sont modifiées par cette pratique (Scopa *et al.*, 2009, Sofi *et al.*, 2014, Védie *et al.*, 2014).

En conséquence, la répétition trop fréquente de cette pratique pourrait engendrer un déséquilibre des populations du sol mais des références supplémentaires seraient nécessaires pour en attester.

Les apports de MO ont effet protecteur contre certains pathogènes comme les nématodes. Ainsi, un essai de l'INRA Alénia<sup>13</sup>, avait pour but de tester différents type d'apports organiques en reconcevant les SdC afin de réguler les parasites et le projet **Gédunem**<sup>14</sup> avait entre autre pour enjeu d'améliorer la fertilité du sol pour contrôler les nématodes. La régulation biologique est plus faible avec des apports de MO très stables (bouchons de compost mature) par rapport à des MO peu évoluées (fumier ou compost jeune).

⇒ Indicateurs pour évaluer les problèmes soulevés et piloter la fertilité en maraichage sous abris

Les indicateurs du tableau de synthèse de la partie I permettent de mieux évaluer la MO du sol, le statut physique et d'adapter le travail du sol, l'irrigation, la fertilisation, les apports de PRO et l'intégration de couverts végétaux. Ils sont à mettre en parallèle avec l'historique des pratiques pour mieux comprendre les résultats et adopter les stratégies adéquates.

<sup>10</sup> Le sorgho fourrager comme engrais sert à effet assainissant (2016 - .) - CTIFL (National)

<sup>11</sup> GEDUBAT (2012 - 2018) - CTIFL, APREL, INVENIO, INRA, GRAB (National)

<sup>12</sup> ou désinfection du sol : bien que les produits nématicides pour la désinfection chimique des sols soient de moins en moins nombreux (perte des homologations) et assez coûteux.

<sup>13</sup> SdC intensif et fatigue des sols (2000 – 2007) - INRA-Alénia (Régional Sud Est)

<sup>14</sup> Gédunem (2012 - 2015) - IRD (National ?)

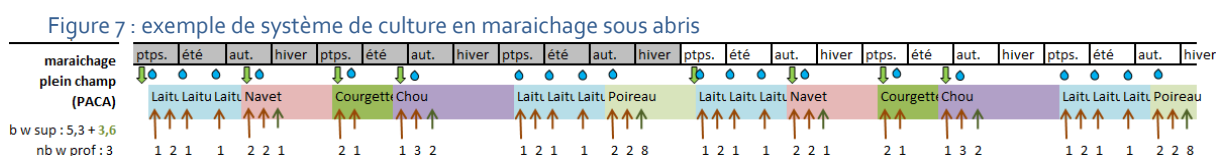
De nouveaux OAD à venir vont permettre d'améliorer la gestion de la fertilisation en légumes sous abris. Le projet ORION vise à produire un OAD pour mieux évaluer les dynamiques des MO. Un des objectifs du projet **REVEIL**<sup>15</sup> est la construction d'un OAD pour la fertilisation raisonnée en P et en K pour les cultures de tomates et de laitues.

## b. Système de production en maraichage de plein champ

⇒ Exemple d'un système de culture en maraichage de plein champ

Une partie du contexte est commun aux cultures maraîchères sous abri, en particulier le mode de commercialisation et les caractéristiques des cultures mises en place.

Un exemple de système de culture très intensif est donné Figure 7. L'exemple choisi est une exploitation en agriculture biologique. Il illustre les pratiques et rotations possibles, ici : laitue – navet – courgette – chou – laitue – poireau.



Il s'agit d'un cas spécifique de système intensif, d'autres systèmes en particulier en AB sont moins intensifs, avec moins de cultures de laitue chaque année, ou l'implantation d'un couvert végétal en hiver, a fortiori si les conditions automnales sont humides. En AB le nombre de cultures par an est en moyenne entre 1,5 et 2.

- Rotation : la rotation est plutôt courte (3 ans), peu diversifiée (4 familles mais retour de la laitue tous les 2 ans à cause du marché) et très intensive (3,3 implantations de cultures/an)
- Travail du sol : D'après les fiches techniques et compte-rendu d'essais examinés, le travail du sol consiste en 3 travaux profonds par an (sans sous-solage) et une moyenne de 5,3 travaux superficiels par an pour la préparation de la mise en place des cultures<sup>16</sup>. En moyenne 3,6 désherbages mécaniques sont observés, mais on peut avoir jusqu'à 8 binages pour une culture de poireau. Des opérations de buttage sont effectuées pour le poireau et le chou.
- Fertilisation : des apports d'engrais organiques (sous forme liquide ou en pellet) sont apportés avant chaque culture pour couvrir ses besoins. Des amendements déshydratés sous forme de pellets (à une dose d'environ 3T/ha) sont également apportés.
- Irrigation : les cultures sont irriguées par aspersion sauf les courgettes qui sont irriguées en goutte à goutte.

<sup>15</sup> REVEIL (2018 - 2021) - APREL (Régional PACA) : Recherche de Variétés Economes en Intrants P et K pour la laitue et les tomates

<sup>16</sup> Pour l'implantation des premières laitues (en tête de la série de 3): un rotavator (pour enfouir les résidus du précédent et restaurer la porosité sur une vingtaine de cm), un passage au cultivateur pour affiner la surface et un passage au cultivateur pour former la planche. Entre les laitues successives : cultivateur et cultivateur. Pour l'implantation des autres cultures : un ou deux passages profonds (parfois un labour avant le passage au rotavator) et un passage au cultivateur. Pour les cultures d'hiver, un ou deux passages au cultivateur le cultivateur.

- Gestion des bioagresseurs : les adventices sont maîtrisées pour les cultures d'été (laitues et courgettes), par des paillages en plastiques noirs et pour les autres cultures par désherbage mécanique. Divers produits autorisés en AB sont utilisés pour lutter contre les insectes et champignons.

⇒ Le principal problème de sol soulevé par les experts et leurs liens avec les pratiques :

- Les tassements :

**Inconvénients** : les tassements peuvent générer de mauvais démarrages des cultures et des parcelles hétérogènes, ils limitent la circulation de l'eau et l'aération du sol.

**Effets des pratiques** : Les tassements sont dus aux nombreux passages d'engins sur les parcelles dans des conditions parfois peu favorables. Ceci est la conséquence de fenêtres d'intervention très restreintes (rotation rapide et période de maturité courte) : la portance et le ressuyage du sol ne sont pas toujours optimaux lors des opérations. Par exemple, la récolte des poireaux en sortie d'hiver avec des engins lourds en conditions humides est fréquemment la cause de compaction des sols.

La gestion en planches permanentes mécanisées permet de localiser les passages de roues, ce qui assure une meilleure portance et limite les zones de compaction. La planche permanente est moins tassée par les passages et, selon le type de sol, certaines opérations de travail du sol visant à l'émietter peuvent être évitées. De manière générale, une réduction des opérations de travail du sol diminue les perturbations des habitats de la biomasse et favorise son fonctionnement (bioturbation et stabilisation des agrégats). Toutefois, comme dans d'autres systèmes de production, la réduction du travail du sol peut rendre plus difficile la maîtrise de certains bioagresseurs (adventices, ravageurs ou maladies telluriques). Des essais<sup>17</sup> sur l'optimisation du travail du sol en maraichage, intégrés au projet CASDAR SolAB<sup>18</sup>, montrent que pour certains sols observés six années après la mise en place des traitements, les planches permanentes ont une structure de sol plus favorable dans l'horizon supérieur (8 – 15 cm : porosité plus importante, proportion de terre fine supérieure et traces d'activité biologique plus nombreuses). Sur les sols sensibles à la compaction, avec peu de sables et pas de cailloux, les horizons sous-jacents ont été plus tassés en planches permanentes. En cas de tassements, la seule activité biologique ne permet pas de régénérer la structure du sol à court terme et un travail plus profond peut être nécessaire.

Par ailleurs, l'intégration de couverts végétaux d'hiver est un moyen efficace de maintenir la structure du sol et la biomasse (Stirzaker and White, 1995). D'une part, les tissus racinaires occupent la porosité et l'évapotranspiration du couvert peut augmenter en comparaison à un sol nu, ce qui évite une humidité et une sensibilité aux tassements trop élevée. D'autre part, les couverts végétaux favorisent l'activité biologique par l'apport de MO des tissus et le rejet d'exsudats racinaires dans la rhizosphère. Un essai de l'ACPEL<sup>19</sup> vise à acquérir des références pratiques sur les couverts végétaux en maraichage. Afin de contourner les contraintes des intercultures courtes et bénéficier de l'irrigation de la culture en place, un semis de couvert végétal avant la récolte de la culture peut être une solution

<sup>17</sup> Optimisation du travail du sol en maraichage AB comparaison itinéraire classique et planches permanentes (2005 - 2011) - GRAB, ADABio & Sérail, PLRN, ACPEL, CA Rhône (National)

<sup>18</sup> SolAB (2009 - 2011) - ITAB, ISARA, INRA et partenaires (National)

<sup>19</sup> Acquérir des références pratiques sur des engrais verts et des couverts végétaux adaptés au contexte maraicher en AB. (2014 - 2017) - ACPEL (Régional Poitou Charentes)

intéressante mais reste peu pratiquée. Cette technique est d'étudiée dans des essais comme ceux de Terre d'Essai, de la Sérail<sup>20</sup> et de l'ACPEL<sup>21</sup>.

- **Fort parasitisme tellurique** : Les problèmes de bioagresseurs telluriques sont souvent communs à ceux rencontrés en maraîchage sous abri (voir paragraphe précédent).

⇒ Intérêt des indicateurs pour évaluer les problèmes soulevés et piloter la fertilité en maraîchage en plein champ

Pour mieux évaluer les caractéristiques physiques et la MO du sol les indicateurs présentés dans le tableau 5 pourraient être mobilisés afin d'adapter le travail du sol, des dates de passage, les apports de PRO et l'intégration de couverts végétaux.

De plus en plus de maraîchers sont intéressés par des diagnostics concernant la fertilité biologique de leurs sols. Les référentiels pour évaluer la biomasse nécessiteraient d'être adaptés pour des types de sols particuliers (sols sableux, sols riches en MO) et pour tenir compte de pratiques plus intensives qu'en GC. Dans le projet ENI<sup>22</sup>, les producteurs et conseillers sont sollicités pour faire des comptages de vers de terre. En outre, des réflexions sont menées pour développer un partenariat entre l'unité INRA d'Alénya et l'unité INRA Génosol<sup>23</sup> afin de créer des référentiels pour les indicateurs de biomasse microbienne (ADN).

### c. Système de production en légumes frais de plein champ

⇒ Exemple d'un système de culture en légumes frais de plein champ

Les cultures légumières de plein champ se caractérisent par des calendriers d'interventions très courts, du fait de la contractualisation avec des agents extérieurs (pépiniéristes, transformateurs ou grossistes) et des conditions de marché. Les plants mis en place sur les parcelles, commandés à l'avance, ne se conservent pas longtemps, et les planter avant qu'ils ne se détériorent peut impliquer un travail du sol et une plantation dans de mauvaises conditions. D'autre part, les périodes de maturité des légumes sont courtes (de l'ordre de 2 ou 3 jours) et les organes récoltés lourds : ceci augmente les risques de tassements liés à de passages d'engins en conditions inadaptées. Le lien étroit avec les prix du marché fait que lorsque les cours des légumes sont élevés, les producteurs sont incités à intervenir même si les conditions ne sont pas optimales. Par exemple, ils peuvent être amenés à débarder le chou-fleur en mauvaises conditions.

La réglementation associée à la directive nitrates impose aux producteurs situés en « Zone Vulnérable Nitrates » d'implanter des couverts végétaux en hiver (CIPAN) pour limiter les pertes d'éléments par transferts. Ce règlement modifie significativement la gestion des cultures et des sols des régions concernées. La Bretagne où sont cultivés 48 000 ha de légumes (soit la première région française avec 20% des surfaces nationales) est particulièrement concernée, puisqu'elle est intégralement en zone vulnérable.

<sup>20</sup> Intégration d'engrais verts en maraîchage plein champ (2018 - 2020) - Sérail (Régional Rhone Alpes)

<sup>21</sup> Évaluation de l'implantation directe d'une culture de légumes dans un couvert végétal implanté en hiver (2017 - 2020) - ACPEL (Régional)

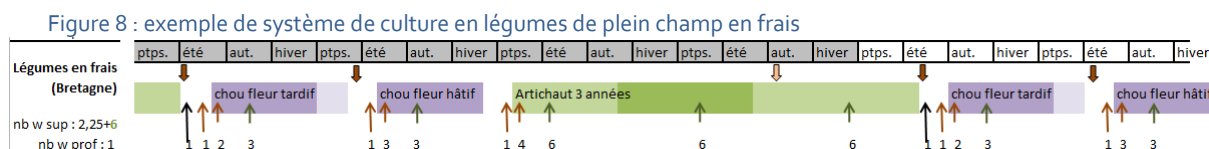
<sup>22</sup> Référentiel vers de terre dans Projet ENI (2014 - 2018) - CA Bretagne (Régional Bretagne)

<sup>23</sup> Fertilité biologique des sols (en réflexion) - INRA Génosol



Dans certaines régions, les exploitations en cultures légumières tendent à s'agrandir. Cette augmentation de superficie facilite l'intégration de céréales dans la rotation, ainsi qu'une diversification des espèces, comme en Bretagne où l'on observe l'intégration d'ail et d'échalote dans les rotations.

Une rotation traditionnelle bretonne<sup>24</sup>, sans céréales, a été prise en exemple de ce système de production de légume : chou-fleur – chou-fleur – artichaut (voir Figure 9).



- Rotation : la rotation est longue (5 ans), très peu diversifiée (2 familles), et plutôt extensive (0,75 implantations de cultures/an) avec la culture d'artichaut qui reste implantée 2 à 3 ans.

- Travail du sol : dans cet exemple, un travail profond et 2,25 travaux superficiels sont effectués en moyenne par an<sup>25</sup>. On compte en moyenne 6 passages annuels pour le désherbage mécanique. Un sous – solage est pratiqué en tête de rotation (avant le premier chou, après l'artichaut) pour décompacter les zones tassées.

- Fertilisation : des apports d'engrais minéraux sont réalisés à chaque culture, avec un peu moins d'azote pour le deuxième chou-fleur et la première année de l'artichaut, puisque ces cultures bénéficient des résidus d'un précédent riche en azote. Des apports de MO sont également pratiqués, avec dans l'exemple étudié 24T/ha de fumier de bovin pour le premier chou, 10T/ha de compost pour le second et des fientes en localisé à l'automne, avant les buttages de la 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> année pour l'artichaut.

- Gestion des bioagresseurs : elle fait recours à la lutte chimique, aux binages et buttages pour lutter contre les adventices.

⇒ Les principaux problèmes de sols soulevés par les experts et leurs liens avec les pratiques

- Erosion

**Inconvénients** : perte de sol dans les parcelles, risques de coulées de boues sur les routes, risque de transfert du P chargé sur des colloïdes de terre.

**Effets des pratiques** : Travailler le sol dans le sens de la pente (par exemple, pour faciliter l'évacuation de l'eau) augmente le risque d'érosion. Le risque est accru avec des cultures comme les échalotes et l'ail qui laissent une large part de sol nu. Par ailleurs, le buttage et les paillages plastiques ont pour effet de concentrer l'eau de pluie qui ruisselle entre les bandes plastiques et créer des rigoles d'érosion.

<sup>24</sup> Cette rotation représente 21% des rotations types présentées dans l'Enquête agronomique Chou-fleur conventionnel. Finistère. Campagne 2013/2014.

<sup>25</sup> Pour l'implantation des choux-fleur, un labour précède le passage d'une herse rotative pour affiner la surface ; puis ont lieu des opérations de buttage. Dans le cas du deuxième chou-fleur, le labour est précédé d'un passage au rotavator pour enfouir les résidus du premier chou-fleur. Pour l'implantation des artichauts : un itinéraire similaire est suivi, cependant un dernier passage au cultivateur est souvent réalisé afin d'affiner encore plus le lit de semence.



Le phénomène d'érosion peut être limité, d'une part en ralentissant le ruissellement et d'autre part en limitant les arrachements de terre (Bardy *et al.*, 2009). Eviter d'avoir des sols nus permet de réguler ces deux phénomènes. Pour cela, on choisit de resserrer les inter-rangs, de laisser au sol les résidus de culture ou encore intégrer des couverts végétaux (Sainju *et al.*, 2002, Panagos *et al.*, 2015, Blanco-Canqui and Lal, 2009, Poesen and Govers, 1990). Par ailleurs, la réduction du travail du sol peut concentrer les MO en surface, favoriser l'activité biologique et limiter la déstructuration des mottes grâce à une surface plus cohérente avec des agrégats mieux cimentés.

- Battance

**Inconvénients** : la battance peut limiter l'infiltration de l'eau et le fonctionnement et le développement racinaire, ce qui peut provoquer des stress hydriques et des pertes de rendement.

**Effets des pratiques** : La croûte de battance se forme lorsque l'impact des gouttes d'eau désagrège les colloïdes de terre en surface (surtout en sols limoneux). On peut limiter de manière préventive cet effet en augmentant les teneurs en MO en surface et en réduisant les opérations de travail du sol. De manière curative, les sarclages répétés permettent, en plus de la gestion des adventices, de casser la croûte de battance et favoriser l'infiltration de l'eau.

- Lessivage

**Inconvénients** : la fertilisation non optimale favorise les risques de transferts d'éléments mobiles.

**Effets des pratiques** : Les résidus de certaines cultures comme le chou-fleur sont très riches en azote. De plus, la minéralisation des matières organiques (comme ces résidus) est accélérée par les opérations de travail du sol fréquentes (labour et 7 binages/an). Les lessivages consécutifs aux fortes pluies peuvent être fréquents.

L'implantation de couverts végétaux pièges à nitrates (CIPAN) en périodes à risque (automne – hiver) limite le risque de lessivages (Wyland *et al.*, 1996). La station expérimentale du Caté, la chambre d'agriculture de Bretagne et la station Terre d'Essai mettent en place des projets<sup>26</sup>; <sup>27</sup> pour travailler sur les pratiques limitant les fuites d'azote.

L'intégration des couverts végétaux dont la capacité à recycler les nitrates du sol est bien documentée affecte aussi la fertilité biologique. Les travaux en cours devraient permettre d'évaluer l'impact de ces pratiques sur la biomasse et son activité. En particulier, le projet Agroéco-Syst'N a pour but de diagnostiquer les pertes d'azote des systèmes de culture contenant du chou-fleur et de l'artichaut, et d'identifier des systèmes performants concernant l'azote.

- Tassements des sols

**Inconvénients** : les tassements peuvent être à l'origine de difficultés de développement racinaire, d'asphyxie des racines, d'une mauvaise infiltration de l'eau et donc d'une perte de rendement.

**Effets des pratiques** : Les sols de légumes de plein champ subissent de nombreux passages d'engins en particulier pour la gestion des adventices soit par le faux semis ou les désherbages mécaniques successifs (de 6 binages en moyenne jusqu'à une douzaine<sup>28</sup> en artichaut). Le paillage, qui a vocation à réduire les opérations mécaniques en culture, génère aussi un passage d'engin. Certaines cultures, en particulier le chou-fleur sont aujourd'hui conditionnées au champ avec des engins de

<sup>26</sup> Evaluation couverts végétaux - réduction fuites de nitrates - Caté (Régional)

<sup>27</sup> BreizhLégum'eau : lessivage azote Légume plein champ (2015 - 2018) - Caté, CA Bretagne (Régional Bretagne)

<sup>28</sup> Rapport **Estorgues V, Stien J. 2015**. Enquête agronomique d'une rotation chou-fleur conventionnel dans la finistère campagne 2013/2014. CA Finistère et Comité de dév des agri zone légumière. (binage p22) : il est intéressant de noter que ceux qui appliquent des herbicides n'ont pas forcément moins de passages que ceux qui ne font que du désherbage mécanique.

récolte de plus en plus lourds (remorque, tapis). Le nombre de passages importants et le poids des engins provoquent des tassements (superficiels et profonds) d'autant plus marqués lorsque les interventions sont faites en conditions humides.

L'intégration de céréales dans la rotation diminue la fréquence annuelle des opérations de travail du sol du fait des cycles de culture plus longs des céréales et du nombre moins important de binages qu'elles requièrent. En outre, les engins de récolte sont moins lourds et ces cultures offrent une fenêtre d'intervention plus large pour la récolte ce qui permet d'intervenir dans de meilleures conditions. De plus, la bibliographie et des essais en cours<sup>29</sup>, montre que l'intégration de céréales et de couverts végétaux améliore la structure du sol grâce à leurs systèmes racinaires fasciculés qui souvent permettent une exploration complémentaires avec pour conséquence un maintien de la porosité existante et un ressuyage amélioré en période hivernale. L'adaptation de la largeur et de la pression des pneus des engins réduisent les tassements à poids équivalent. Une autre technique consiste à créer des bandes de roulement, si possible enherbées pour une meilleure portance, afin de localiser les ornières. Cela peut être bénéfique lors des opérations lourdes en conditions humides, comme le débardage de chou-fleur.

A court terme et dans de bonnes conditions (sol ressuyé), le travail du sol permet de restaurer la porosité en profondeur (labour, décompactage, sous solage, rotavator...). Ces opérations doivent être raisonnées en complémentarité d'autres techniques de régénération de l'état structural par actions physiques ou biologiques. Une diminution des opérations mécaniques peut améliorer les processus naturels lié à l'activité biologique. La macrofaune restaure la porosité et brasse les MO et les micro-organismes améliorent la stabilité structurale. Toutefois, la réduction du travail du sol est freinée par la gestion des adventices et la volonté de réduire les herbicides chimiques qui implique plus de passages mécaniques.

- Parasitisme tellurique : exemple de la hernie du chou.

En cas d'excès d'eau, des conditions anoxiques peuvent favoriser le développement de maladies comme la hernie du chou (Wolfe *et al.*, 1995). Cette maladie est également régulée par l'acidité des sols ce qui a justifié leur chaulage régulier dans les années 90. Le chaulage a pu avoir un effet positif sur la structure des sols. En effet, en sols acides, le chaulage peut améliorer la portance et la résistance à la battance grâce à la formation de ponts calciques qui renforcent la stabilité du complexe argilo-humique.

#### ⇒ Intérêt des indicateurs pour piloter la fertilité en légumes en frais plein champ

Pour mieux évaluer la matière organique vivante, les MO du sol, le statut hydrique et le statut physique afin d'adapter le travail du sol, des dates de passage, les apports de PRO et l'intégration de couverts végétaux, les indicateurs présentés dans le tableau de conclusion de la partie I pourraient être mobilisés.

La maîtrise de l'eau (limiter l'érosion, faciliter son infiltration, ne pas saturer les sols) et des tassements sont des enjeux majeurs dans les systèmes de plein champ. Pour bien comprendre les effets des pratiques les organismes de R&D pourraient s'appuyer sur un indicateur de la qualité physique du sol développé dans une étude « Least Limiting Water Range (LLWR) ». Il correspond à l'état hydrique du sol où l'eau, l'oxygène et la résistance mécanique ne sont pas limitants pour la croissance racinaires (Ferreira *et al.*, 2017).

<sup>29</sup> Quelles espèces et quels itinéraires techniques favoriser afin d'intégrer des grandes cultures dans les rotations légumières ? (2009 - 2016) - PAIS (Régional)

Les producteurs ont progressivement changé la nature des apports de MO, du fumier de bovin aux résidus de couverts végétaux et les effets de ces évolutions sur la fertilité biologique sont difficilement évaluables. Les principales questions des acteurs des cultures légumières en frais sont :

- quels indicateurs du sol faut-il utiliser pour suivre et voir ces effets sur la fertilité biologique ?
- comment améliorer ces pratiques selon les résultats des indicateurs (taux de MO optimum, quantité, date et moyen de destruction optimum) ?

Concernant l'évaluation de la fertilité physique, un référentiel est en cours de constitution (comm. B. Decoopman) sur les densités de sol en légume, la quantification des vers de terre et de la stabilité structurale. Pour limiter les tassements du sol, les praticiens sont intéressés par la mise en place d'outils d'aide à la décision pour les dates et les outils optimum lors des opérations de travail du sol.

d. Système de production en légumes plein champ d'industrie

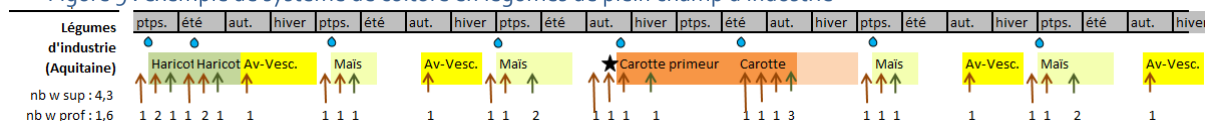
⇒ Exemple d'un système de culture en légumes d'industrie

Une partie du contexte est commun aux cultures légumières en frais, en particulier les caractéristiques des espèces cultivées et le lien au marché.

Les producteurs en cultures légumières d'industrie ont des contrats avec différentes OPA, ainsi des interlocuteurs multiples sont impliqués dans le choix des pratiques. Les producteurs sous contrat respectent un cahier des charges sur l'utilisation d'intrants (fertilisants certifiés<sup>30</sup>, irrigation suffisante), l'état sanitaire de la parcelle et ont des restrictions sur les dates de semis et de récolte. Les OPA qui interviennent gèrent l'état du sol (fertilisation, irrigation, travail du sol, désinfection) pour le cycle de la culture implantée mais n'ont pas d'enjeux à raisonner la fertilité à plus long terme.

La description du système de culture Figure 10 illustre un exemple de pratiques pour une rotation possible en légumes d'industrie d'Aquitaine : haricot(1) – haricot(2) – (avoine-vesce) – maïs – (avoine-vesce) – maïs – carotte primeur (1) – carotte de garde (2) – maïs – (avoine-vesce) – maïs – (avoine-vesce).

Figure 9 : exemple de système de culture en légumes de plein champ d'industrie



- Rotation : la rotation est longue (6 ans), avec 4 familles culturales et des couverts végétaux sur les intercultures hivernales et 1,33 implantation de cultures/an.

<sup>30</sup> Les récoltes doivent être indemnes de corps étrangers, il est conseillé d'éviter les épandages de boues urbaines (ETM), déchets organiques mal décomposés (éléments grossiers, plastiques), composts (contaminations germinatives).

- Travail du sol : en moyenne ce système a 1,7 travaux profonds / an et 2,3 travaux superficiels/an pour la préparation du sol<sup>31</sup>. A ces travaux superficiels s'ajoutent 2 passages pour le désherbage mécanique/an.
- Fertilisation : des apports d'engrais minéraux à chaque culture au semis et en fractionné pour l'azote. Il n'y a pas d'apports d'amendements organiques mais restitution systématique des résidus des maïs.
- Irrigation : les cultures sont irriguées par aspersion avec un pilotage par sondes tensiométriques.
- Gestion des bioagresseurs : lutte chimique (ex : désinfection du sol) contre les bioagresseurs parfois associée à la lutte biologique (ex : usage de *Coniothyrium minitans* contre *Sclerotinia* spp.) et physiques (ex : binages).

Les légumes d'industrie sont aussi très présents en Picardie. Le climat et les sols y sont sensiblement différents, avec une dominance de sols limono-argileux moins sableux que ceux des Landes. Ainsi, d'autres espèces sont cultivées dans les rotations des cultures légumières d'industrie en Picardie, par exemple, on peut trouver la succession suivante : betterave – blé – pomme de terre – blé – pois ou haricot.

⇒ Les principaux problèmes de sols soulevés par les experts et liens avec les pratiques

- Tassements (Aquitaine - Picardie)

**Inconvénients** : ils provoquent des difficultés d'implantation des cultures, de circulation de l'eau, de l'air ce qui peut limiter l'activité biologique.

**Effets des pratiques** : Les cultures d'industrie sont implantées et récoltées à dates fixées dans le contrat avec les OPA, quelles que soient les conditions de ressuyage et de portance du sol. De plus, la récolte des espèces légumières est basée sur des engins lourds, à l'instar des espèces d'autres familles intégrées dans les rotations en légumes d'industrie (maïs grain en Aquitaine, pomme de terre et betterave en Picardie) : le passage de ces engins peut augmenter les tassements. Enfin, les cultures légumières d'industrie sont irriguées, et les sols pendant les cultures sont fréquemment dans des conditions d'humidité favorables aux tassements. Si en Aquitaine, les sols sableux des Landes sont faciles à travailler pour récupérer des zones de tassements (à l'aide d'un décompactage et d'un labour), en Picardie les sols limoneux marquent les tassements profonds et peuvent être très dégradés. Dans les Hauts de France, des travaux<sup>32</sup> ont été menés par Agrotransfert pour aider à gérer la fertilité physique des sols.

Concernant les pratiques pour limiter les tassements (en particulier l'intégration de couverts végétaux et de céréales dans la rotation) on peut se référer au paragraphe sur les tassements pour les cultures légumières en frais.

<sup>31</sup> Pour l'implantation des haricots : un déchaumage au cover-crop, puis un labour suivi d'un passage à la herse rotative pour affiner la surface. Pour l'implantation de la carotte, un labour suivi d'un passage au cultivateur pour former la planche. Pour l'implantation des maïs : un déchaumage suivi d'un labour. Les couverts végétaux sont semés après un déchaumage.

<sup>32</sup> Sol-D'PHY (2012 - 2018) - Agrotransfert (Régional Haut de France) et Prévention des risques des tassements des sols (2015 -2016) - Agrotransfert (Régional Haut de France)

- Hétérogénéités de structure et de MO

**Inconvénient** : elles peuvent engendrer des rendements inégaux (tassement localisés, provisions en éléments disparate).

**Effets des pratiques** : En Aquitaine, les sols sableux sont d'anciennes lagunes avec des dépressions de relief (de quelques cm) sur quelques mètres qui sont à l'origine de zones d'accumulation de MO. C'est ce qui donne aux parcelles des landes les aspects « tâches de léopard ». Les sols sableux et plutôt acides maintiennent des teneurs en MO stables en lien avec leur activité biologique faible. Les veines de zones humifères peuvent être à l'origine de baisse de rendement liées à des maladies localisées en conditions météorologiques difficiles. En Picardie, pour les cultures de pois et de haricots, les hétérogénéités peuvent provenir des variations de la structure (tassements localisés) ou de la texture du sol. Sans adaptation des variétés (ex : pois tardif), la valorisation de la fertilisation azotée par les pois est pénalisée dans zones argileuses des parcelles qui se réchauffent plus lentement. Par ailleurs, les tassements du sol impactent le développement précoce de la culture (haricot ou pois) et peut engendrer quelques jours de décalage de maturation.

A la date fixée de la récolte, ces cultures auront des rendements inégaux sur la parcelle.

- Faibles teneurs en MO

**Inconvénients** : ceci peut aboutir à des pertes de rendement à cause de la baisse de qualité des services rendus par la MO : maintien de la structure, rétention d'eau, réserve d'éléments nutritifs et habitat et ressource énergétique de la biomasse (cycle des éléments, structure).

**Effets des pratiques** : En Aquitaine, les sols sableux et acides gardent des teneurs en MO relativement faibles (2 à 3%). De plus, les apports de MO sont restreints. D'une part, les MO d'origines animales sont difficilement accessibles dans cette région. D'autre part, les apports d'autres types d'amendements (boues, composts de déchets verts) sont évités du fait de l'exigence des contrats sur leur qualité (plus coûteux) et les risques d'apports d'éléments grossiers, qui peuvent faire obstacle au développement racinaire des carottes (carottes fourchues). En Picardie, les taux de MO sont bas, hors zone d'élevage. Un sol pauvre en MO peut provoquer des nécroses racinaires sur le haricot, fragiliser la structure du sol et incite à une fertilisation minérale élevée pour compenser les exportations des cultures, selon leur dynamique : les fertilisations répétées accentuent les risques de lessivages de nitrates, et de rejet de N réactif dans l'atmosphère par volatilisation et réduction des nitrates en N<sub>2</sub>O et NO.

L'intégration de couverts végétaux est un moyen efficace de restituer de la MO au sol, en raisonnant les conditions et dates de destructions.

- Fort parasitisme tellurique : beaucoup de problèmes de bioagresseurs telluriques sont similaires à ceux rencontrés dans les systèmes de productions préalablement présentés.

On note cependant des particularités liées aux rotations, aux caractéristiques des espèces cultivées et à la région. Les monocultures de maïs se sont diversifiées en légumes dans les 80s par l'introduction de la carotte et du haricot. Cette augmentation de la part des cultures légumières dans la rotation (par exemple rotations de 4 ans haricot –maïs –carotte –maïs) a pu être favorable au développement de certains parasites. Suite à l'intégration des carottes dans des rotations, on a pu par exemple identifier une recrudescence du risque de fusariose sur haricot (via les résidus de carotte). Les carottes sont également très sensibles aux attaques de nématodes *Pratylenchus* qui favorisent les défauts (carotte bouchon, fourchues, points, taches). Depuis une quinzaine d'année, certaines exploitations réintègrent du maïs dans la rotation pour enrayer en particulier des problèmes de *Sclerotinia*.

Sur les parcelles suspectées d'être infectées, UNILET propose une identification des pathogènes par des biotests, ou des identifications des nématodes phytophages. Un test d'observation des racines nécrosées ou galleuses est proposé. Il consiste à faire pousser des plants sur un échantillon de sol, et à mesurer les dégâts sur les racines pour voir le potentiel infectieux d'une parcelle. Une désinfection du sol est préconisée si le seuil de nuisibilité est dépassé. Un laboratoire s'est associé à l'UNILET pour produire un référentiel concernant le seuil de nuisibilité. Ces outils permettent de raisonner le recours à la désinfection chimique, qui reste très fréquente. Dans les Landes, 2/3 des parcelles qui mettent en culture des carottes sont désinfectées. La désinfection chimique limite les risques de défauts au niveau des racines et maîtrise la flore adventice. Cependant, cette pratique fragilise et désorganise les réseaux trophiques microbiens. Ainsi, après une désinfection chimique, les liens entre les composantes biologiques du sol sont principalement conditionnés par les guildes de nématodes (Kapagianni *et al.*, 2010). Cette pratique, paradoxalement, pourrait favoriser des populations pathogènes qui ne seraient plus régulées par les autres communautés. Toutefois, face à la désinfection chimique, la résilience et résistance de certaines fonctions biologiques du sol, en particulier la décomposition des MO par les champignons, pourrait être améliorée lorsque la fertilisation est complétée avec des amendements organiques d'élevages (Wada and Toyota, 2006). Les éventuelles restrictions futures sur l'utilisation des fumigants (métham sodium et dichloropropène) amènent à des réflexions sur des alternatives. La désinfection par biofumigation est aujourd'hui moins efficace contre les nématodes mais elle apparaît moins perturbatrice des équilibres du microbiote (Kapagianni *et al.*, 2010). Outre l'intégration de couverts végétaux (de rupture ou biocides), la réflexion sur le mode de travail du sol, et la fertilisation au semis pour rendre les jeunes plants plus vigoureux contre les nématodes (adjonction de biostimulants et fertilisants) est en cours.

#### ⇒ Les indicateurs pour gérer la fertilité des sols

Les indicateurs du tableau de synthèse de la partie I pour mieux évaluer la MO du sol, le statut physique adapter le travail du sol, l'équipement, l'irrigation, la désinfection chimique, les apports de PRO et l'intégration de céréales et de couverts végétaux.

Les conseillers d'UNILET ont été sollicités par Agrotransfert Territoires et Environnement pour apporter leur expertise sur des projets de gestion de la fertilité physique des sols et l'amélioration de l'outil SYST'N® aux cultures des Hauts-de-France<sup>33</sup>. Les cultures légumières d'industrie de Picardie acquièrent des OAD opérationnels pour gérer la fertilité de leurs sols.

---

<sup>33</sup> Les deux projets d'Agrotransfert cités précédemment + Amélioration de SYST'N pour les Hauts-de-France (2017 - ?) - Agrotransfert (Régional Picardie)

## 2. Synthèse des liens entre pratiques, effets sur la fertilité et indicateurs à mobiliser

En synthèse de cet examen des systèmes de production, il est proposé de revenir sur les principales techniques qui affectent la fertilité du sol. Dans un deuxième temps, les indicateurs permettant d'évaluer les conséquences de ces pratiques sont identifiés. De futurs travaux de R&D permettant d'augmenter les connaissances et les référentiels sont suggérés.

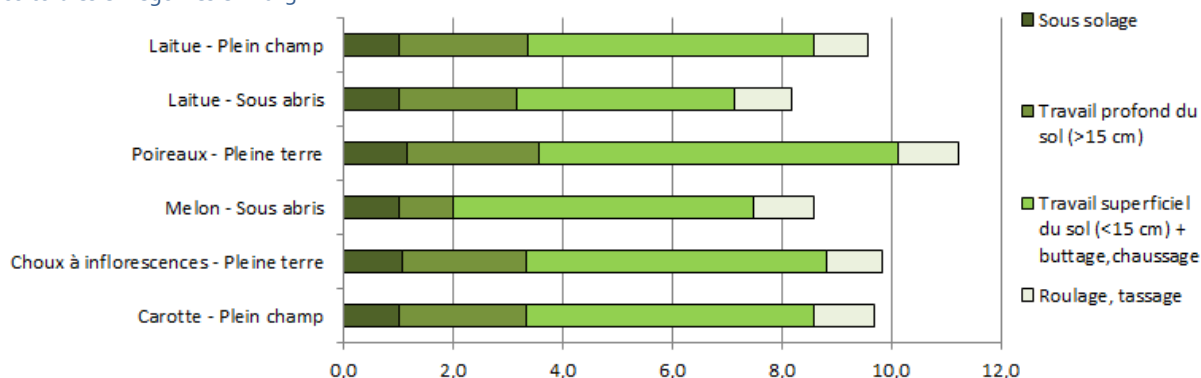
### a. Synthèse des liens entre pratiques – fertilité

Il ressort de l'étude des liens entre les pratiques culturales et la fertilité des traits communs aux quatre systèmes de production étudiés. Le travail mécanique du sol, les apports de PRO et les choix des cultures de la rotation (avec l'intégration de couverts végétaux en culture intermédiaire) sont déterminants. Ces pratiques ont une influence directe sur les 6 classes de caractéristiques servant à classer les indicateurs de fertilité (voir tableau en annexe 6). On doit mettre en avant l'influence de ces pratiques sur l'état hydrique du sol, et le statut chimique, en particulier le pH et le statut rédox, qui conditionnent le fonctionnement du sol et des cultures. Les variations de long terme du pH dans les cultures légumières intensives, en général dans le sens d'une acidification, ont été observées dans quelques études scientifiques. On s'intéressera davantage dans ce qui suit à des variations brusques d'indicateurs de fertilité en réponse aux choix de pratiques. Pour ce faire, les leviers pour faire évoluer les pratiques dans le sens d'un meilleur maintien de la fertilité ont été étudiés.

#### ⇒ Les effets du travail du sol

En cultures légumières et maraichères, les opérations de travail du sol sont fréquentes, incluant de nombreux passages profonds et superficiels. Les nombres de passages estimés dans les exemples de systèmes de production étudiés sont légèrement inférieurs au nombre d'opérations de travail du sol recensées dans l'enquête Pratiques Culturales 2013 d'Agreste (figure 10). En particulier, le sous-solage semble être moins souvent pratiqué dans les exemples présentés ici. L'enquête relève de 1 à 2 travaux profonds et 4 à 6 travaux superficiels (incluant le désherbage mécanique et les opérations de buttage) par culture, soit entre 7 et 10 interventions par culture, plus une opération de roulage, ce qui est semblable à ce qui a été illustré dans cette étude, même si ces valeurs moyennes cachent la variabilité des itinéraires d'une exploitation à l'autre.

Figure 10 : Nombre d'opérations de travail du sol selon les cultures. Source : SSP – Agreste – enquête sur les pratiques culturales en légumes en 2013





Le travail du sol aide au réchauffement précoce des terres, avec des températures maximales plus élevées en sol labouré (Lal, 1976) mais la réduction du travail du sol peut accroître la capacité de rétention en eau du sol (Lafond *et al.*, 1992, Lal, 1976).

Le travail du sol affecte également les organismes vivants, soit directement soit indirectement par la perturbation de leur habitat ou de la localisation de leurs ressources. Par exemple, le labour détruit les galeries des vers anéciques qui ne se reforment qu'en 3 ans environ sans perturbation ultérieure (Capowiez *et al.*, 2009). Cependant, lorsqu'il enfouit la MO en profondeur, le travail du sol peut favoriser les vers endogées (Pelosi *et al.*, 2009).

La quantité et l'activité des micro-organismes est variable dans l'espace du sol en fonction de la stratification de la MO (Balota *et al.*, 2003), qui dépend la stratégie de travail du sol. En grandes cultures comme en cultures légumières et maraichères, les communautés de champignons et de bactéries (gram-positives, actinomycètes), sont favorisées par la réduction de travail du sol, surtout dans les 10 premiers cm de sol (Willekens *et al.*, 2014). L'expansion de la biomasse en surface serait majoritairement due à l'expansion de la biomasse fongique. En effet, les hyphes le nombre de propagules mycéliens sont sensibles aux stress physiques, et sont préservés en l'absence de perturbation du sol (Spedding *et al.*, 2004). Les types d'outils ont également une influence : il semblerait que les outils animés aient un effet plus délétère pour les population fongiques qu'un labour (Cookson *et al.*, 2008). Par ailleurs, certains travaux dont ceux de Jackson *et al.* (2003) étayent l'hypothèse que les structures des communautés microbiennes du sol répondent rapidement (après quelques jours) aux perturbations induites par les opérations de travail du sol pour ensuite revenir à un équilibre initial en quelques semaines, sans variations de long terme. La prédominance des phénomènes de 'priming' de la matière organique par l'activation provisoire de certaines communautés est bien documentée dans la littérature scientifique. Les opérations de travail du sol mettent temporairement les populations microbiennes en situation de stress ce qui augmente la minéralisation de N de manière temporaire. Par ailleurs, la stabilité des agrégats est d'avantage favorisée par l'activité des champignons que par celle bactéries ou la nature des PRO apportés (Bossuyt *et al.*, 2001).

Si on souhaite limiter ces perturbations on peut se poser la question de la réduction du travail du sol en culture légumières et maraichères. En maraichage, des projets sur les planches permanentes ont déjà eu lieu et montrent leurs effets sur la structure et la biologie du sol plus ou moins appréciables selon le type de sol (cf projets « optimisation du travail du sol en maraichage »<sup>34</sup> et « solAB »).

La variabilité des géométries et des emprises sur le sol des couverts végétaux, la multiplicité des périodes d'implantation des cultures et le nombre de cultures par an, engendrent des justifications particulières des opérations de travail du sol, et le contexte pour aller vers une réduction du travail du sol est propre aux cultures légumières et maraichères. Les effets de changements de pratiques de travail du sol sur la fertilité pourraient en conséquence être différents de ceux qui ont pu être observés en GC. De plus, tant en GC qu'en cultures L&M, la réduction du travail du sol affecte les performances agronomiques parfois de manière antagoniste : elle peut améliorer l'activité biologique mais diminuer la maîtrise de bioagresseurs.

---

<sup>34</sup> Optimisation du travail du sol en maraichage AB comparaison itinéraire classique et planches permanentes (2005 - 2011) - GRAB, ADABio & Sérail, PLRN, ACPEL, CA Rhône (National)



Dans un premier temps, des travaux supplémentaires seraient nécessaires pour étudier les inconvénients et avantages des stratégies de réduction du travail du sol en L&M, au regard de la fertilité du sol mais aussi au regard des autres performances agronomiques, socio-économiques et environnementales. En particulier, en cultures L&M, les choix des outils de travail du sol et de la combinaison des opérations pour implanter une culture sont multiples, générant un nombre élevé de cas à étudier. Dans un deuxième temps, le développement d'OAD pour aider dans les choix des outils selon les cultures, les types de sols et les périodes d'implantations pourrait être intéressant, en mettant en évidence leurs effets sur les différentes performances agronomiques.

#### ⇒ Les effets des apports de Produits Résiduaux Organiques

Le facteur explicatif principal de la variation du stock de carbone organique dans le sol est la quantité de carbone apportée annuellement dans le sol : restitution des résidus de cultures et amendements (Kong *et al.*, 2005, Virto *et al.*, 2012). Ainsi, la variation du stock de MO dépend de la quantité de PRO apportée (fréquence \* dose) et la qualité des PRO (stables, rapidement minéralisables). L'amélioration du statut organique du sol favorise la fertilité globale des sols (Reeves, 1997).

Si pour certaines filières de production certains types de PRO peuvent avoir des impacts négatifs sur la qualité des légumes (cf partie précédente sur la morphologie des carottes), globalement, la bibliographie converge sur l'idée que les apports de PRO sont bénéfiques pour la fertilité des sols. Ce constat est vrai pour les cultures L&M, où des systèmes fertilisés avec des apports organiques favorisent les services des micro-organismes bénéfiques et peuvent diminuer l'incidence et les dégâts de populations pathogènes, augmentent la teneur en MO et la CEC et diminuent la densité apparente du sol (Bulluck *et al.*, 2002).

En France, les cultures L&M sont géographiquement concentrées au sein des régions et ne cohabitent pas toujours avec les autres productions. Les ressources en PRO traditionnels comme le fumier de bovin sont limitées hors régions d'élevage. En alternatives les plus courantes on retrouve les composts de déchets verts peu coûteux et les produits organiques industriels (sous forme de pellets ou de poudre). Ces derniers sont coûteux mais pratiques à épandre, avec des certifications et labels qui permettent de les choisir selon leur composition en évitant les risques de contaminations (métaux, plastiques, espèces invasives). De manière plus marginale on retrouve des fumiers de centres équestres.

Plusieurs projets de recherche – expérimentation ont été menés pour comparer les effets des PRO selon la nature et la quantité des apports sur la fertilité du sol à l'INRA Alénia<sup>35</sup>, à la Sérail<sup>36</sup> ou encore à la station expérimentale du Caté<sup>37</sup>. Certains autres projets évaluent également les effets économiques de ces apports, notamment pour les PRO en émergence comme le BRF<sup>38</sup>.

---

<sup>35</sup> Effets des apports MO en maraichage sous abris (2002 - 2010) - INRA Alénia (Régional Sud Est)

<sup>36</sup> Effets des apports MO en maraichage plein champ (1995 - 2010) - Sérail, INRA (Régional Rhone Alpes)

<sup>37</sup> Effets des apports MO en légumes en frais (1982 - 1997) - Caté (Régional Bretagne)

<sup>38</sup> Amélioration technico-économique de l'utilisation de Bois Raméaux Fragmentés en maraichage biologique dans le Morbihan (2012 - 2015) - CA Bretagne (Régional Bretagne)

Les indicateurs disponibles pour évaluer la qualité de PRO (fraction granulométrique, éléments chimiques, indices ISMO<sup>39</sup>) et les MO du sol (teneur en MO, C/N, fraction granulométrique, éléments chimiques) permettent d'adapter les apports aux besoins.

L'évolution des matières organiques ne dépend pas uniquement de la nature et quantité des PRO apportées mais aussi d'autres pratiques et du contexte pédoclimatique. En grande culture des modèles comme Siméos-AMG® (INRA et Agrotransfert) ont été développés pour mieux appréhender ces évolutions et adapter les techniques culturales. Aujourd'hui, les acteurs des filières de cultures L&M souhaiteraient disposer d'outils pour piloter les apports (qualité, quantité, date, moyens): selon les objectifs (améliorer la stabilité structurale, la CEC...), leur contexte et pratiques (travail du sol, irrigation...).

⇒ Les effets des rotations avec l'intégration de couverts végétaux

L'intégration de céréales dans la rotation ou de couverts végétaux en interculture ont des effets bénéfiques sur la fertilité du sol en culture L&M. D'une part, elle désintensifie les pratiques dégradant le sol en diminuant le nombre d'opérations de travail du sol, réduisant le poids des engins à la récolte et en offrant une fenêtre d'intervention plus large ce qui permet de profiter de meilleures conditions de passage. D'autre part, l'intégration de céréales et de couverts végétaux améliore la structure du sol grâce à des systèmes racinaires complémentaires de ceux des espèces cultivées, en plus qu'elle diversifie les espèces de la rotation. Les couverts végétaux en interculture présentent de nombreux intérêts agronomiques pour le sol.

Tout d'abord, les couverts végétaux influent positivement sur la fertilité du sol en augmentant la teneur de MO du sol. Les méta-analyses sur les causes des variations de la séquestration de carbone ont montré que le principal facteur explicatif était la quantité de carbone restitué au sol chaque année (Virto *et al.*, 2012), par exemple avec l'intégration de couverts végétaux. De plus, en couvrant les sols nus pendant les intercultures, ils permettent de protéger contre la battance, de ralentir le ruissellement et de limiter l'érosion. Cela permet aussi d'améliorer la gestion de l'eau en maintenant l'évapotranspiration des sols favorise le ressuyage des sols et limite les transferts rapides d'éléments mobiles (Dabney *et al.*, 2001). La mise en place de couvert végétaux permet aussi de capter les éléments mobiles et limiter les transferts de nitrates, en GC comme en cultures légumières (Dinnes *et al.*, 2002, Wyland *et al.*, 1996).

La mise en place de cultures intermédiaires dans le but de piéger l'azote nitrique (CIPAN) ou de protéger le sol contre l'érosion (culture de couverture) doit aujourd'hui s'accompagner d'une réflexion intégrant la question de leurs impacts sur les bioagresseurs (adventices, maladies, ravageurs) et sur la biodiversité fonctionnelle (organismes à l'origine de services écosystémiques rendus à la production agricole). Des travaux dans des systèmes de production de légumes en agriculture biologique montrent que les apports de carbone par l'intégration fréquente de couverts végétaux dans la rotation sont de meilleurs moteurs des modifications des chaînes trophiques du sol et de la qualité des sols que les apports de PRO et le travail du sol intensif (Brennan and Acosta-Martinez, 2017). De plus, d'après une étude de cas (Tiemann *et al.*, 2015), la diversité des cultures au sein de la rotation a un effet positif sur la diversité fonctionnelle microbienne. Plus la diversité des familles cultivées dans une rotation est élevée, plus les interactions symbiotiques augmentent potentiellement et les rhizosphères sont

---

<sup>39</sup> ISMO < 50 pour les engrais organiques ou fientes, et un ISMO > 75 pour les composts mûres ou boues urbaines

variées (nature, exsudats, profondeur), ce qui favorise le développement de plus de populations microbiennes (fongiques et bactériennes). Cette diversité peut promouvoir la résilience du système face aux perturbations, favorisant la conservation des fonctions des communautés microbiennes à l'échelle de la rotation. Cependant, il y a trop peu d'études pour permettre de comparer les effets des rotations sur les communautés fongiques ou bactériennes. Une méta-analyse de Venter *et al.* (Venter *et al.*, 2016) montre que l'on ne peut pas généraliser l'hypothèse avançant que l'introduction de légumineuses favoriserait les populations bactériennes (maintien des rhizobiums pour l'activité fixatrice de N).

Les producteurs légumiers sont de plus en plus nombreux à intégrer des couverts végétaux en période hivernale d'une part pour répondre aux réglementations d'autre part pour pallier au manque de sources de MO d'origines animales. Une de leur préoccupation est de savoir les effets du changement de la nature des MO apportées à la parcelle notamment sur la fertilité biologique du sol, et quelles sont les pratiques optimales pour favoriser l'activité biologique. L'intégration de couverts végétaux en cultures L&M demande une approche un peu différente qu'en GC à cause de la variabilité des périodes d'interculture et de la courte fenêtre pour l'implantation (dans le cas des cultures maraichères surtout). Concernant les cultures L&M, on recense plusieurs travaux menés sur l'adaptation des rotations et l'intégration de couverts végétaux (voir tableau 7).

Tableau 6 : Projets sur les effets de la rotation (+ Couverts Végétaux) en L&M (voir en annexe pour plus de détails)

Projet rotation (+CV) : nom du projet (dates) – organisme.s porteur.s (échelle du projet)
Acquérir des références pratiques sur des engrais verts et des couverts végétaux adaptés au contexte maraicher en AB. (2014 - 2017) - ACPEL (Régional Poitou Charentes)
Engrais verts en Maraîchage Biologique sous abri et en plein champ (2002 - 2017) - GRAB (Régional PACA)
Intégration d'engrais verts en maraichage plein champ (2018 - 2020) - Sérail (Régional Rhone Alpes)
Evaluation couverts végétaux - réduction fuites de nitrates. (nombreux) - Caté (Régional)
Évaluation de l'implantation directe d'une culture de légumes dans un couvert végétal implanté en hiver (2017 - 2020) - ACPEL (Régional)
Implantation d'engrais vert sous couvert - Chou-fleur - AB_2015 (2015 - 2016) - PLRN (Régional Picardie)
Engrais Verts et Fertilisation en culture précoce de chou-fleur d'été AB 2015 (2013 - 2015) - PLRN (Régional Picardie)
Effets de différents engrais verts sur les nématodes à galles (2005 - 2017) - GRAB (Régional)
Le sorgho fourrager comme engrais sert à effet assainissant (2016 - ) - CTIFL (National)
Rotation et durabilité en maraichage biologique plein champ (2009-2014) - CTIFL, Légumes Centre Action
Quelles espèces et quels itinéraires techniques favoriser afin d'intégrer des grandes cultures dans les rotations légumières ? (2009 - 2016) - PAIS (Régional)
SOILVEG : Optimisation de l'utilisation de plantes de services agro-écologiques par l'utilisation de couverts végétaux couchés au rouleau face (2015 - 2019) – GRAB en France (Européen)
GEDUBAT (2012 - 2018) - CTIFL, APREL, INVENIO, INRA, GRAB (National)

Tous ces projets n'ont pas pour objectif d'évaluer les effets sur la fertilité du sol. Dans un premier temps, il serait intéressant de faire une synthèse globale des résultats obtenus et d'observer la robustesse de ces résultats d'une étude à l'autre. Dans un second temps, les acteurs des filières L&M souhaiteraient avoir des outils de gestion pour intégrer des couverts végétaux à leur rotation (choix du

couvert, densité, dates d’implantation et destruction) selon leurs objectifs et le contexte pédoclimatique.

- ⇒ Autres projets de R&D traitant globalement de la fertilité des sols pour améliorer la gestion de la fertilité des sols en lien avec les pratiques en cultures L&M.

C’est une combinaison des pratiques qui va permettre la gestion optimale de la fertilité du sol. Par exemple, la réduction des risques d’érosion et de transferts des éléments pour des tomates cultivées en planches, est possible grâce à la réduction du travail du sol associée au mulching (résidus d’un couvert végétal) (Alliaume *et al.*, 2014).

D’autres projets cherchent à gérer globalement la fertilité du sol. Par exemple, le projet SEFerSOL<sup>40</sup> vise à mettre au point et tester deux stratégies innovantes de gestion combinée de la fertilité du sol et de l’enherbement en maraichage biologique diversifié. Le projet BreizhLégum’eau<sup>41</sup> cherche à faire émerger des pratiques innovantes pour gérer les fuites de nitrates.

b. Quels indicateurs mobiliser pour rendre compte des effets des pratiques ?

- ⇒ Pour les producteurs : détecter les problèmes de sol

Les producteurs de légumes doivent accéder aux moyens d’ajuster leur système de culture pour améliorer la fertilité du sol. Une synthèse des indicateurs clés est présentée tableau 7.

Tableau 7 : indicateurs clés pour détecter un problème de sol et adapter ses pratiques pour améliorer la fertilité

Exemples de problèmes de sol courants	Systèmes de production les plus concernés	Indicateurs pour détecter le problème de sol et améliorer la fertilité
Transferts de nitrates	Maraichage sous abris Légumes en frais	N minéral (labo et bandelette) C/N, Teneur en MO, Fractionnement MO Texture, Masse terre fine/ha (pierrosité et profondeur) et RU potentielle
Accumulation/transferts d’éléments nutritifs	Maraichage sous abris	CaO, K <sub>2</sub> O, MgO, Na <sub>2</sub> O et P Olsen CEC potentielle (Metson) Ratio K <sub>2</sub> O/MgO, CaO/MgO Texture, Masse terre fine/ha (pierrosité et profondeur) et RU potentielle
Hétérogénéité des parcelles	Maraichage sous abris Légumes d’industrie	N minéral (labo et bandelette) Teneur en MO et Texture Pénétration racines
Faibles teneurs en MO	Légumes d’industrie	Texture et pH eau C/N Teneur en MO Fractionnement MO Biomasse microbienne Masse terre fine (pierrosité et profondeur)
Tassements	Maraichage plein champ Légumes en frais Légumes d’industrie	Test bêche, Pénétration racines Texture, Pierrosité, Profondeur du sol pH eau et Calcaire Total Teneur en MO, Fractionnement MO

<sup>40</sup> SEFerSol - Mise au point de stratégies innovantes d'entretien de la fertilité du sol en maraichage biologique (2015 - 2023) - EPLEFPA, Rouffach, Wintzenheim (Régional Alsace)

<sup>41</sup> BreizhLégum’eau : lessivage azote Légume plein champ (2015 - 2018) - Caté, CA Bretagne (Régional Bretagne)

Battance	Légumes en frais	Texture, Pénétration racines Teneur en MO pH eau et Calcaire Total
Erosion	Légumes en frais	Texture Teneur en MO pH eau et Calcaire Total
Parasitisme en lien avec la fertilité	Maraichage sous abris Maraichage plein champ Légumes en frais Légumes d'industrie	Teneur en MO pH eau Biomasse microbienne Nématodes phytophages Nématofaune (indices)

⇒ Pour les organismes de R&D

Les organismes de R&D mobilisent également pour leur conseil technique des indicateurs pour quantifier les effets de nouvelles combinaisons techniques. Nous avons cherché à identifier dans différents projets<sup>42</sup> de R&D si les indicateurs mobilisés répondent aux changements de pratiques ou pas. Une première synthèse a été réalisée et retranscrite dans le tableau 8.

- S : effet significatif
- NS : non significatif
- 0 : pas d'effet
- Vide : pas d'informations

Tableau 8 : réponses des indicateurs au travail du sol, apports de PRO, intégration de CV et choix des espèces de la rotation dans les essais en cultures L&M - S : effet significatif ; NS : non significatif ; o : pas d'effet ; Vide : pas d'informations

Indicateur	Travail du sol	Apports de PRO	Couvert végétaux (CIPAN, EV)	Rotation
CEC		S		
Teneur MO	NS	S	S	
Fractionnement MO	NS	S	S	
Potentiel de minéralisation C et N	NS pour C ; S pour N	S		
Biomasse microb (Corg)	NS à S	S	S	
Biomasse lombricienne	NS à S			
Stabilité structurale	S	NS		
Densité apparente		0		
Infiltrométrie	NS à S	S		
Profil de sol, test bêche	S	NS à S	S	S
Pénétration racinaire	S		S	S
RU		S		

Si l'on confronte cette synthèse à des résultats plus complets en GC issus des travaux de Valé *et al.* (2011) (voir tableau 9), on s'aperçoit que, là où l'on dispose d'informations, les réponses de certains indicateurs aux pratiques ne sont pas strictement identiques.

<sup>42</sup> essais pour lesquels nous avons accès aux résultats, mobilisant des indicateurs de la fertilité du sol et comparant des modalités de pratiques liées soit au travail du sol, soit à l'intégration de couverts végétaux, soit aux apports de PRO soit encore à la diversification de la rotation : [WSOL\_GRAB, ADABio & Sérail, PLRN, ACPEL, CA Rhône.]; [PRO\_Sérail, INRA]; [PRO\_INRA Alénaya]; [ROT\_CTIFL, APREL, CA 29, GRAB].

Tableau 9 : Récapitulatif des effets des pratiques culturales sur les indicateurs biologiques mis en évidence sur les essais longue durée d'Arvalis

+ : effet significatif 0 : pas d'effet mis en évidence	Apports de PRO (6 essais)	CIPAN (3 essais)	TCS (0-10 cm) (3 essais)
%C, %N, C/N	+	0 (+ sur C/N)	+
Fractionnement granulométrique	+	0	0 à +
Biomasse microbienne	+	0	+
Métabolites microbiens	+	0	+
Minéralisation C et N	+	0 à +	+

Ainsi, en GC la réduction du travail du sol (Techniques Culturales Simplifiées : TCS) affecte significativement les différents indicateurs (%C, biomasse microbienne, minéralisation de C et N) et presque significativement le fractionnement granulométrique. En cultures L&M l'essai sur la mise en place de planches permanentes n'a pas toujours affecté significativement ces indicateurs.

A l'issue de cette étude, il n'apparaît cependant pas clairement que les effets des pratiques sur les évolutions des indicateurs sont spécifiques aux L&M. Pour avoir plus de recul, il serait intéressant de réaliser une méta-analyse de la bibliographie scientifique permettant de comparer les effets des pratiques de cultures L&M à ceux des SdC, mais la réalisation d'une étude de ce type allait au-delà du présent travail. Si les indicateurs s'avéraient répondre différemment aux pratiques culturales par rapport à ce qui est déjà documenté dans d'autres systèmes de production, il serait pertinent d'acquérir des références agronomiques supplémentaires à l'aide de travaux expérimentaux. A l'inverse, si les effets des pratiques sur les indicateurs s'avèrent prévisibles et peu différents de ce qui a été observé dans d'autres systèmes de production, l'effort de R&D devrait être davantage porté sur la diffusion de référentiels et d'outils d'aide à la décision destinés à accompagner la gestion des sols par les praticiens. Comme cela a été illustré dans cette étude, indépendamment des innovations qui pourront être introduites dans les conduites techniques, un effort est à poursuivre dans les structures de R&D, les structures de conseil, et les laboratoires pour généraliser l'usage d'indicateurs de fertilité et les niveaux de référence pour interpréter les mesures sur ces indicateurs.

## PARTIE III : Les recommandations pour la filière

Les recommandations de cette partie tiennent lieu de conclusion à l'étude et s'appuient sur les observations reportées dans les parties I et II.

### 1. Recommandations sur les indicateurs à utiliser pour gérer la fertilité du sol

L'étude ne fait pas apparaître de différences majeures, sur la nature et l'usage des indicateurs de fertilité, entre les cultures légumières et maraîchères et d'autres systèmes de production végétale, en particulier les grandes cultures. Il convient toutefois de porter une attention aux référentiels utilisés pour s'adapter aux niveaux des indicateurs communément mesurés en cultures L&M. L'enquête auprès des conseillers et des producteurs montre que des indicateurs utiles à la maîtrise du fonctionnement des sols sont faiblement voire pas utilisés en cultures légumières et maraîchères.

**R1. Cations K, Ca, Mg, Na : faire les dosages par extractions chimiques (à l'acétate d'ammonium) et non aqueuses.** Les dosages par extractions à l'eau rendent compte de la concentration et de la disponibilité dans la solution du sol à l'instant de la mesure. Les dosages après extraction chimique mesurent aussi les éléments échangeables adsorbés dans le sol. Prendre en compte les provisions du sol permet d'optimiser les apports c'est-à-dire de limiter les risques de d'accumulation ou de transferts (par lessivage) tout en couvrant les besoins de la culture.

**R2. Phosphore : préférer la méthode de dosage P Olsen** plutôt que P Dyer et P Joret Hébert, où le P extrait à l'eau. Contrairement aux deux autres méthodes parfois utilisées pour estimer le P assimilable, le P Olsen rend compte de la disponibilité pour les sols calcaires et non calcaires. De plus, l'harmonisation des méthodes de dosage permettra d'élargir le référentiel et de mieux l'adapter aux contextes pédoclimatiques. Les organismes travaillant sur la fertilisation phosphatée en cultures légumières et maraîchères se sont accordés pour bâtir les outils d'aide à la décision sur des mesures de P Olsen.

**R3. Systématiser les analyses granulométriques de la texture** de préférence avec décarbonatation pour les sols calcaires. La texture, et plus particulièrement la proportion d'argiles, caractérisent la CEC, ainsi que les propriétés mécaniques des sols. Dans les analyses de sol, la texture définit un type de sol, dont va découler le choix des seuils des teneurs optimales en MO ou des gammes de variations de la CEC. La texture est utilisée par les laboratoires/OAD pour l'interprétation d'autres indicateurs mais peut être aussi mobilisée par l'agriculteur ou le conseiller pour raisonner les pratiques.

**R4. Développer le test bêche.** En plus d'être très pédagogique, cet indicateur de la fertilité physique fournit une information complémentaire à l'analyse de sol. La formation des conseillers, techniciens et agriculteurs à la réalisation de ce test pourra inciter les producteurs à vouloir faire évoluer leurs pratiques pour améliorer la fertilité de leur sol.

**R5. Vérifier la pertinence des référentiels pour les indicateurs des MO<sup>43</sup> :** teneur en MO et C/N. Les systèmes de productions en cultures L&M ont des besoins instantanés élevés, prélèvent des quantités d'azote importants et minéralisent les MO plus vite qu'en GC. On peut questionner la spécificité des niveaux optimaux de MO, en particulier dans les systèmes qui veulent minimiser le recours aux engrais de synthèse : les niveaux et les rythmes de minéralisation susceptibles de compenser les exportations des cultures doivent encore être mieux objectivés. La construction de

---

<sup>43</sup> Les choix des seuils pour les indicateurs prennent en compte les optimums agronomiques selon les cultures et les contextes pédoclimatiques. Ils s'appuient sur des BDD ou des références techniques issues des laboratoires, des instituts techniques, des clients (coopératives, négoce) ou sont créés à partir de réseaux d'essais.



référentiels gagnerait à être réalisée par les organismes de R&D en partenariat avec des laboratoires réalisant les analyses de terre.

**R6. Développer l'indicateur « Fractionnement granulométriques des MO »** et les références pour préconiser les apports selon les résultats. Cet indicateur mesure les fractions labiles et stables de la MO, il permet d'adapter les types de matières organiques apportés et d'anticiper la dynamique du stock de MO. Il conviendrait de s'assurer que le référentiel utilisé pour interpréter cette mesure est adaptée pour des préconisations en cultures L&M.

**R7. Développer les indicateurs de biomasse : la biomasse microbienne** (abondance par une mesure du C organique ou de l'ADN microbien, diversité de la biomasse par le ratio champignons : bactéries) et **les indices de la nématofaune**. Ces indicateurs sont très réactifs aux pratiques. Les référentiels sont à consolider pour pouvoir interpréter les résultats dans différents contextes pédoclimatiques en système de production légumière et maraîchère. Une attention particulière devra être portée et des protocoles d'échantillonnage et d'interprétation adaptés doivent être fournis.

## 2. Des recommandations sur les pratiques culturales en lien avec la fertilité et la qualité des sols

**R8. Optimiser les apports d'engrais à l'aide d'OAD** prenant en compte les matières organiques. Les excès de fertilisation sont encore fréquents ; ils peuvent contribuer à des impacts négatifs sur l'environnement (acidification du sol, lessivages d'éléments mobiles, rejets de gaz à effet de serre, eutrophisation, perte de biodiversité terrestre et aquatique), à l'apparition de maladies et de ravageurs, et impacter négativement la qualité des légumes.

**R9. Raisonner le travail du sol avec les indicateurs de fertilité physique**. La mobilisation régulière de ces indicateurs pourrait permettre de **réduire l'utilisation des outils très destructeurs de la structure** comme le rotavator et préférer les outils non animés, et les passages d'outils à vitesse réduite. En maraichage, selon le type de sol (sableux, caillouteux) la mise en place de planches permanentes, peut être bénéfique à la qualité du sol.

Les acteurs de la filière souhaiteraient disposer d'OAD pour mieux gérer les apports de PRO, le travail du sol et le choix des couverts végétaux, selon le contexte et les cultures de leur système de production. Un premier travail consisterait à rassembler les références sur les différentes pratiques notamment leurs effets sur les stocks de matières (captage d'éléments, dégradation et minéralisation), sur les populations du sol (effets ruptures contre les bioagresseurs), sur les états physiques (structure, eau) et sur les autres performances (rendement, coût). Pour aider à la décision dans ces pratiques il faudrait, selon les types de sols et les systèmes de production :

**R10. Développer la pertinence des référentiels et outils à destination des producteurs et conseillers techniques**. Pour les PRO, prendre en compte le choix de la nature et quantité des PRO et les techniques d'apports (moyen et date). Pour les couverts végétaux, prendre en compte leur nature, leur moyen d'implantation et de destructions (technique utilisée et dates d'intervention). Pour les opérations de travail du sol prendre en compte le choix des outils, les moyen d'utilisation (type d'outil, vitesse, profondeur) et les dates d'intervention.

**R11. Synthétiser et produire de nouvelles références scientifiques et techniques sur les systèmes de production légumiers limitant le recours au travail mécanique du sol**

- Réaliser une méta-analyse pour statuer sur un impact trop élevé du travail du sol en cultures légumières et maraîchères sur le fonctionnement du sol et les indicateurs de fertilité ;



- Si cela s'avère nécessaire, étudier dans des travaux de recherche et recherche-développement des alternatives techniques et des évolutions des systèmes de culture permettant de limiter le recours au travail du sol.

### Bibliographie :

- Abiven S. 2004.** *Relations entre caractéristiques des matières organiques apportées, dynamique de leur décomposition et évolution de la stabilité structurale du sol*, PhD Thesis, Agrocampus-Ecole nationale supérieure d'agronomie de Rennes.
- Alliaume F, Rossing WaH, Tiftonell P, Jorge G, Dogliotti S. 2014.** Reduced tillage and cover crops improve water capture and reduce erosion of fine textured soils in raised bed tomato systems. *Agriculture Ecosystems & Environment*, **183**: 127-137.
- Baize D, Jabiol B. 2011.** *Guide pour la description des sols*, Versailles, Quae.
- Balloy B, Bispo A, Bouthier A, et al. 2017.** Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols. In: Maaf ed., MAAF.
- Balota EL, Colozzi A, Andrade DS, Dick RP. 2003.** Microbial biomass in soils under different tillage and crop rotation systems. *Biology and Fertility of Soils*, **38**: 15-20.
- Bar-Yosef B. 1999.** Advances in fertigation. *Advances in Agronomy*, **65**: 1 - 77.
- Bardy M, King D, Bispo A. 2009.** *Gestion durable des sols*, Versailles, Quae.
- Bedford BL, Walbridge MR, Aldous A. 1999.** Patterns in nutrient availability and plant diversity of temperate north american wetlands. *Ecology*, **80**: 2151-2169.
- Bispo A, Gattin I, Hedde M, Bodin J, Villenave C, Peres G. 2012.** Quels bioindicateurs pour la gestion durable des sols agricoles et forestiers. *Compte rendu des journées de restitution du projet «Bioindicateur pour la caractérisation des sols»*, Paris, **16**.
- Blagodatskaya EV, Blagodatskii SA, Anderson TH. 2003.** Quantitative isolation of microbial DNA from different types of soils of natural and agricultural ecosystems. *Microbiology*, **72**: 744-749.
- Blanco-Canqui H, Lal R. 2009.** Crop residue removal impacts on soil productivity and environmental quality. *Critical Reviews in Plant Sciences*, **28**: 139-163.
- Bockstaller C, Guichard L, Keichinger O, Girardin P, Galan M-B, Gaillard G. 2009.** Comparison of methods to assess the sustainability of agricultural systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, **29**: 223-235.
- Bossuyt H, Deneff K, Six J, Frey SD, Merckx R, Paustian K. 2001.** Influence of microbial populations and residue quality on aggregate stability. *Applied Soil Ecology*, **16**: 195-208.
- Bottinelli N. 2010.** *Evolution de la structure et de la perméabilité d'un sol en contexte de non labour associé à l'apport d'effluent d'élevage: Rôle de l'activité lombricienne*, PhD Thesis, Agrocampus-Ecole nationale supérieure d'agronomie de rennes.
- Bouzaiane O, Cherif H, Ayari F, Jedidi N, Hassen A. 2007.** Municipal solid waste compost dose effects on soil microbial biomass determined by chloroform fumigation-extraction and DNA methods. *Annals of Microbiology*, **57**: 681-686.
- Brennan EB, Acosta-Martinez V. 2017.** Cover cropping frequency is the main driver of soil microbial changes during six years of organic vegetable production. *Soil Biology and Biochemistry*, **109**: 188-204.
- Bulluck LR, Brosius M, Evanylo GK, Ristaino JB. 2002.** Organic and synthetic fertility amendments influence soil microbial, physical and chemical properties on organic and conventional farms. *Applied Soil Ecology*, **19**: 147-160.
- Bünemann EK, Bongiorno G, Bai Z, et al. 2018.** Soil quality – a critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, **120**: 105-125.
- Capowiez Y, Cadoux S, Bouchant P, et al. 2009.** The effect of tillage type and cropping system on earthworm communities, macroporosity and water infiltration. *Soil & Tillage Research*, **105**: 209-216.
- Chan KY. 2001.** Soil particulate organic carbon under different land use and management. *Soil Use and Management*, **17**: 217-221.

- Chang CY, Yu HY, Chen JJ, Li FB, Zhang HH, Liu CP. 2014.** Accumulation of heavy metals in leaf vegetables from agricultural soils and associated potential health risks in the pearl river delta, south china. *Environmental Monitoring and Assessment*, **186**: 1547-1560.
- Chaussod R. 1996.** La qualité biologique des sols : Évaluation et implications. *Etude et Gestion des sols*, **3 - 4**: 261 - 277.
- Coll P, Le Velly R, Le Cadre E, Villenave C. 2012.** La qualité des sols : Associer perceptions et analyses des scientifiques et des viticulteurs. *Etude et Gestion des Sols*, **19**: 79-88.
- Cookson WR, Murphy DV, Roper MM. 2008.** Characterizing the relationships between soil organic matter components and microbial function and composition along a tillage disturbance gradient. *Soil Biology & Biochemistry*, **40**: 763-777.
- Dabney SM, Delgado JA, Reeves DW. 2001.** Using winter cover crops to improve soil and water quality. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **32**: 1221-1250.
- Devillers J, Pandard P, Charissou A-M. 2009.** Sélection multicritère de bioindicateurs de la qualité des sols. *Etude et Gestion des Sols*, **16**: 233-242.
- Dinnes DL, Karlen DL, Jaynes DB, et al. 2002.** Nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in tile-drained midwestern soils. *Agronomy Journal*, **94**: 153.
- Doran JW, Zeiss MR. 2000.** Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, **15**: 3-11.
- Estorgues V, Stien J. 2015.** Enquête agronomique d'une rotation chou-fleur conventionnel dans le finistère campagne 2013/2014. CA Finistère et Comité de dév des agri zone légumière.
- Fardeau JC. 2015.** Des indicateurs de la fertilité des sols. *Étude et Gestion des Sols*, **22**: 77 - 100.
- Ferreira CJB, Zotarelli L, Tormena CA, Rens LR, Rowland DL. 2017.** Effects of water table management on least limiting water range and potato root growth. *Agricultural Water Management*, **186**: 1-11.
- Gardenas AI, Hopmans JW, Hanson BR, Simunek J. 2005.** Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation. *Agricultural Water Management*, **74**: 219-242.
- Jackson LE, Calderon FJ, Steenwerth KL, Scow KM, Rolston DE. 2003.** Responses of soil microbial processes and community structure to tillage events and implications for soil quality. *Geoderma*, **114**: 305-317.
- Kapagianni PD, Boutsis G, Argyropoulou MD, Papatheodorou EM, Stamou GP. 2010.** The network of interactions among soil quality variables and nematodes: Short-term responses to disturbances induced by chemical and organic disinfection. *Applied Soil Ecology*, **44**: 67-74.
- Karlen DL, Mausbach MJ, Doran JW, Cline RG, Harris RF, Schuman GE. 1997.** Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, **61**: 4-10.
- Kong AYY, Six J, Bryant DC, Denison RF, van Kessel C. 2005.** The relationship between carbon input, aggregation, and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems. *Soil Science Society of America Journal*, **69**: 1078.
- Lafond GP, Loeppky H, Derksen DA. 1992.** The effects of tillage systems and crop rotations on soil water conservation, seedling establishment and crop yield. *Canadian Journal of Plant Science*, **72**: 103-115.
- Lal R. 1976.** No-tillage effects on soil properties under different crops in western nigeria1. *Soil Science Society of America Journal*, **40**: 762.
- Lecompte F. 2012.** Management of soil nitrate heterogeneity resulting from crop rows in a lettuce-tomato rotation under a greenhouse. *Agronomy for Sustainable Development*, **32**: 811-819.
- Lecompte F, Bressoud F, Pares L, De Bruyne F. 2008.** Root and nitrate distribution as related to the critical plant n status of a fertigated tomato crop. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, **83**: 223-231.
- Li J, Zhang J, Rao M. 2004.** Wetting patterns and nitrogen distributions as affected by fertigation strategies from a surface point source. *Agricultural Water Management*, **67**: 89-104.
- Marstorp H, Guan X, Gong P. 2000.** Relationship between dsdna, chloroform labile c and ergosterol in soils of different organic matter contents and ph. *Soil Biology & Biochemistry*, **32**: 879-882.
- Mench M, Baize D. 2004.** Contamination des sols et de nos aliments d'origine végétale par les éléments en traces. *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*, **52**: 31-56.

- Miao Y, Stewart BA, Zhang F. 2011.** Long-term experiments for sustainable nutrient management in china. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, **31**: 397-414.
- Monnier G, Stengel P. 1982.** La composition granulométrique des sols : Un moyen de prévoir leur fertilité physique. *Bulletin Technique d'Information - Ministère de l'Agriculture*: 503-512.
- Panagos P, Borrelli P, Poesen J, et al. 2015.** The new assessment of soil loss by water erosion in europe. *Environmental Science & Policy*, **54**: 438-447.
- Patzel N, Sticher H, Karlen DL. 2000.** Soil fertility - phenomenon and concept. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **163**: 129-142.
- Pelosi C, Bertrand M, Roger-Estrade J. 2009.** Earthworm community in conventional, organic and direct seeding with living mulch cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development*, **29**: 287-295.
- Poesen J, Govers G. 1990.** *Gully erosion in the loam belt of belgium - typology and control measures.*
- Proix N, Cleret L, Viart G, Ducristel D, Guerin A. 2015.** Mesure de cec et de cations échangeables par une solution de cobaltihexamine saturée en carbonate. COMIFER.
- Ranjard L, Echairi A, Nowak V, Lejon DPH, Nouaim R, Chaussod R. 2006.** Field and microcosm experiments to evaluate the effects of agricultural cu treatment on the density and genetic structure of microbial communities in two different soils. *Fems Microbiology Ecology*, **58**: 303-315.
- Record. 2006.** Stratégie et technique d'échantillonnage des sols pour l'évaluation des pollutions. N° 04-0510/1A.
- Reeves DW. 1997.** The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil and Tillage Research*, **43**: 131-167.
- Sainju UM, Singh BP, Whitehead WF. 2002.** Long-term effects of tillage, cover crops, and nitrogen fertilization on organic carbon and nitrogen concentrations in sandy loam soils in georgia, USA. *Soil & Tillage Research*, **63**: 167-179.
- Schneider S. 2008.** *Estimation des paramètres hydrodynamiques des sols à partir d'une modélisation inverse de données d'infiltration et de résistivité électrique*, PhD Thesis, Université Paris Sud-Paris XI.
- Scopa A, Candido V, Dumontet S, Pasquale V, Miccolis V. 2009.** Repeated solarization and long-term effects on soil microbiological parameters and agronomic traits. *Crop Protection*, **28**: 818-824.
- Sebillotte M. 1989.** Fertilité et systèmes de production. Essai de problématique générale. In: Sebillotte M ed. *Fertilité et systèmes de production*. INRA.
- Sofi TA, Tewari AK, Razdan VK, Koul VK. 2014.** Long term effect of soil solarization on soil properties and cauliflower vigor. *Phytoparasitica*, **42**: 1-11.
- Sol G. 2012.** Donesol 3, dictionnaire de données - igsc. GIS Sol.
- Spedding TA, Hamel C, Mehuys GR, Madramootoo CA. 2004.** Soil microbial dynamics in maize-growing soil under different tillage and residue management systems. *Soil Biology and Biochemistry*, **36**: 499-512.
- Stirzaker R, White I. 1995.** Amelioration of soil compaction by a cover-crop for no-tillage lettuce production. *Australian Journal of Agricultural Research*, **46**: 553.
- Tiemann LK, Grandy AS, Atkinson EE, Marin-Spiotta E, McDaniel MD. 2015.** Crop rotational diversity enhances belowground communities and functions in an agroecosystem. *Ecology Letters*, **18**: 761-771.
- Valé M, Bouthier A, Trochard R, Chaussod R, Nouaïm - Chaussod R. 2011.** Pertinence de nouveaux indicateurs pour évaluer l'impact des pratiques culturales sur le fonctionnement biologique des sols. 10 pages., Laboratoire SAS - ARVALIS - INRA - SEMSE.
- Védie H, Leclerc B. 2010.** Réseau pro : Synthèse des essais amendements organiques et engrais organiques conduits en maraîchage biologique. ADEME, RMT "Fertilisation et Environnement", Quasaprove.
- Védie H, Mateille T, Tavoillot J. 2014.** Soil solarization and crop rotation to manage root-knot nematodes in organic greenhouses. *Acta Horticulturae*, **1041**: 87 - 94.
- Venter ZS, Jacobs K, Hawkins H-J. 2016.** The impact of crop rotation on soil microbial diversity: A meta-analysis. *Pedobiologia*, **59**: 215-223.

- Virto I, Barré P, Burlot A, Chenu C. 2012.** Carbon input differences as the main factor explaining the variability in soil organic c storage in no-tilled compared to inversion tilled agrosystems. *Biogeochemistry*, **108**: 17-26.
- Wada S, Toyota K. 2006.** Repeated applications of farmyard manure enhance resistance and resilience of soil biological functions against soil disinfection. *Biology and Fertility of Soils*, **43**: 349-356.
- Whitmore A. 1996.** Modelling the release and loss of nitrogen after vegetable crops. *Netherland Journal of Agricultural Science*, **44**: 73-86.
- Widmer F, Hartmann M, Frey B, Koelliker R. 2006.** A novel strategy to extract specific phylogenetic sequence information from community t-rflp. *Journal of Microbiological Methods*, **66**: 512-520.
- Willekens K, Vandecasteele B, Buchan D, De Neve S. 2014.** Soil quality is positively affected by reduced tillage and compost in an intensive vegetable cropping system. *Applied Soil Ecology*, **82**: 61-71.
- Wolfe DW, Topoleski DT, Gundersheim NA, Ingall BA. 1995.** Growth and yield sensitivity of four vegetable crops to soil compaction. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, **120**: 956–963.
- Wyland LJ, Jackson LE, Chaney WE, Klonsky K, Koike ST, Kimple B. 1996.** Winter cover crops in a vegetable cropping system: Impacts on nitrate leaching, soil water, crop yield, pests and management costs. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **59**: 1–17.

## Annexe 1 : définition des groupes d'indicateurs

Nom de l'indicateur	Définition
Activité microbienne (FDA hydrolase)	mesure avec un spectrophotomètre de la dégradation du diacétate de fluorescéine (FDA) par les enzymes des micro-organismes du sol
Al échangeable (KCl)	teneur en aluminium, dosage après extraction au KCl
APM : Azote Potentiellement Minéralisable	azote dosé après extraction chimique douce, travaillée par InVivo et les coopératives du réseau. Il représente 0,7 à 2,5% de l'azote total du sol et estime l'azote qui peut être minéralisé.
Aptitude à la fissuration	estimée à l'aide d'un triangle des textures et le rapport argiles/MO (Monnier et Stengel, 1982)
As tot, Bar tot, Li tot, Mo tot, St tot, Ti tot, Th tot, Va tot	teneur des contaminants dans le sol
Biomasse fongique (ergostérol)	quantification de l'ergostérol extrait du sol
Biomasse microbienne (C microbien)	technique par fumigation – extraction pour quantifier le carbone microbien et donc la biomasse microbienne
Biomasse microbienne moléculaire	technique par quantification de l'ADN pour apprécier l'abondance de microorganismes
C minéral	par calcimétrie pour calculer précisément le C organique (= Ctotal - C minéral)
C organique total	Carbone organique (utilisé pour calculer la teneur en MO)
C organique total /N total	le rapport C/N permet d'avoir une idée moyenne sur l'état de dégradation de la matière organique du sol : l'optimal se situe de 9 à 10. Il rend compte de la dynamique d'évolution des MO du sol.
C total	Carbone total
Ca, Mg, K, P, Na (eau)	concentration de ces éléments dans la solution du sol à l'instant du dosage des éléments, après extraction aqueuse. Ne prend pas en compte les éléments adsorbés dans le sol.
CaCO3 actif	calcaire actif (utilisé en vigne pour évaluer les risques de chlorose par exemple)
CaCO3 Calcaire Total	calcaire total renseigne sur la nature du sol calcaire ou pas
CaO, K2O, MgO, Na2O (acétate d'ammonium)	Cations échangeables dosés après extraction à l'acétate d'ammonium
Carbone labile	par oxydation de la matière organique du sol au permanganate qui permettrait de quantifier un compartiment labile du carbone du sol
CEC effective (Riehm)	capacité de rétention en nutriments du sol effective (peu utilisée)
CEC potentielle (Metson)	Capacité d'Echange Cationique renseigne sur la taille du "réservoir", conditionne la fréquence et la dose des apports.
Cl, S (eau)	évalue la contamination du sol en chlore et soufre par dosage de la solution du sol, utilisé dans les systèmes où l'eau d'irrigation est très chlorée.
Conductivité électrique du sol	mesure indirectement la concentration et la salinité de la solution du sol
Conductivité hydraulique terrain	mesure l'aptitude d'un milieu poreux à laisser passer un fluide sous l'effet d'un gradient de pression : rend compte de la porosité.
Couleur observée	compare la couleur du sol à un code Munsell qui permet de déterminer les teneurs en MO et agriles et en Fer.
Densité apparente estimée	plus ou moins précis dépend de la texture, la MO (fonction de pédo transfert) utilisé pour calculer de poids de terre.
Densité apparente mesurée	poids de volume de sols prélevés avec des cylindres métalliques et séchés.
Disponibilité en eau (sondes)	sonde capacitive ou tensiométrique : l'interprétation des mesures est à relier aux seuils référencés dans la méthode IRRINOV suivant le type de sol. Les courbes permettent de trouver le point de flétrissement et de capacité au champ ainsi que de piloter l'irrigation
Diversité métabolique potentielle (N et C)	Mesure de l'aptitude de la microflore du sol à utiliser pour sa croissance des substrats différents : substrats carbonés simples, substrats azotés. Peut permettre d'évaluer la richesse fonctionnelle (RF : nombre de puits positifs) et l'activité métabolique globale de la plaque (AWCD) avec le système Biolog --> indice BioDiF (pour Bio-Diversité Fonctionnelle).
Diversité microbienne (fonges et bactéries)	ratios pour identifier la proportion des différents groupes microbiens : Biomasse fongique (ADNr 18S) et biomasse bactérienne (ADNr 16s)
Diversité taxonomique microbienne (ADN)	empreinte moléculaire des communautés microbiennes par séquençage massif de l'ADN des microorganismes des sols. Cette technologie permet de caractériser la diversité bactérienne et de champignons dans sa totalité (nombre et inventaire des espèces présentes).
Effervescence HCl	effervescence plus ou moins importante au contact de HCl avec le sol : sol calcaire ou non



ETM éch Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, Se (eau)	mesure la présence des éléments traces métalliques dans la solution du sol (blocages, toxicité) mais ne peut pas juger des carences, certains de ces éléments étant adsorbés
ETM totaux Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn, Se	Eléments Traces Métalliques totaux (en solution et adsorbés au sol)
Fe, Mn, Cu, Zn, Al (eau)	mesure la présence des éléments dans la solution du sol. Ne prend pas en compte les éléments adsorbés dans le sol.
Fractionnement granulométrique des MO	fractionnement granulo-densimétrique des matières organiques pour séparer la MO libre, particulaire et liée. Les fractions grossières, facilement séparables des minéraux, sont les plus labiles, les fractions les plus fines contiennent de la MO stable.
Indice de battance	estimé par une fonction selon la MO et la texture
Indice de stabilité structurale	estimé à l'aide d'un triangle des textures (Monnier et Stengel, 1982)
Indice Oméga 3	rapport [acides gras C18:3] / [autres acides gras à C18] de la plante cultivée permet d'apprécier l'état de dégradation des lipides chloroplastiques qui dépend de la présence de contaminants dans le sol
Infiltrométrie de Beerkan	mesure la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol, en condition de sol humide et ressuyé : rend compte de la porosité du sol.
Infra-rouge (SPIR)	mesure la réflectance du sol pour en dériver les teneurs en éléments majeurs (dont le carbone) : rayonnement IR (moyen, proche) et rayonnement visible.
Largeur des fentes	la largeur des fentes de retrait en surface, indique la capacité d'auto-restructuration du sol par fissuration suite aux gonflements/dessiccation des argiles
Litter bag, tea bag	mesure de la décomposition en 4 mois d'une masse de paille définie contenu dans un filet pour rendre compte de l'activité biologique.
Lombriciens (biomasse, diversité)	Comptage et identification des vers de terre (méthode proposée par OPVDT : test moutarde)
Masse terre fine /ha (calcul)	calcul : densité * profondeur sol * 1ha * (1-pierrosité)
Microarthropodes	comptage et identification des Collembolés et les Acariens qui renseigne sur la qualité des sols.
N minéral (labo)	reliquat azoté (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> et NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) après extraction au KCl (Résultats en kg N-NO <sub>3</sub> et kg N-NH <sub>4</sub> /ha)
N minéral (NO <sub>3</sub> bandelette)	concentration en nitrates à l'aide de bandelettes réactives et d'un réfractomètre
N total (combustion)	Azote total : utilisé pour calculer le rapport C/N
N total (N.T.K.)	Azote total : utilisé pour calculer le rapport C/N
Nématodes de niveaux trophiques supérieurs	identification et comptage des organismes
Nématodes microbivores	identification et comptage des organismes
Nématodes phytophages	identification et comptage des organismes
Nématofaune (indices)	ratio des différentes populations de nématodes pour définir les indices : SI : Indice de Structure (stabilité du milieu), EI : Indice d'Enrichissement (dynamique des éléments nutritifs), le MI (Indice de Maturité), le PPI (Indice des nématodes PhytoPhages) et le IVD (Indice des Voies de Décomposition de la matière organique)
Oligo : Bore	oligoélément non métallique biodipsonible
Oligo : Fe, Mn, Zn, Cu (EDTA)	oligoéléments métalliques biodipsonibles
Oligo : Mn, Zn, Cu (DTPA)	oligoéléments du sol dosés après extraction DTPA.
P Dyer	phosphore biodisponible pour la plante en sols acides
P J-Hébert	phosphore biodisponible pour la plante en sols calcaires
P Olsen (P2O5)	phosphore biodisponible pour la plante (méthode de mesure Olsen)
Pénétration des racines	analyse de la progression des racines dans la strate, traduisant la présence d'obstacles ou de contraintes déviant le système racinaire.
pH eau	dosage H <sup>+</sup> dans la solution du sol : acidité active
pH eau - pH KCl	calcul qui caractérise le potentiel d'acidification du sol
pH KCl	dosage H <sup>+</sup> après extraction au KCl : acidité échangeable
Pierrosité (estimation)	% de cailloux en surface ou profil
Pierrosité (labo)	poids des éléments > 2mm (refus) rapporté au poids de l'échantillon
Potentiel de minéralisation C organique	Incubation de sol en conditions contrôlées et mesure de la minéralisation de la matière organique via le CO <sub>2</sub> produit et/ou l'O <sub>2</sub> consommé par la respiration microbienne du sol.

Potentiel de minéralisation N organique	Incubation de sol en conditions contrôlées et mesure de la variation de stock d'N minéral.
Pouvoir fixateur du sol en P	mesure la capacité du sol à fixer le phosphore, méthode Studer (1987)
Pouvoir tampon du sol vis-à-vis de K	capacité du sol à maintenir la concentration en K constante dans la solution du sol (dépend de la texture, du pH, des autres éléments en solution)
Pouvoir tampon du sol vis-à-vis de P	capacité du sol à maintenir la concentration en K constante dans la solution du sol (dépend de la texture, du pH, des autres éléments en solution)
Profil de sol	observation d'un profil de sol pour évaluer son potentiel selon la couleur, l'odeur, la profondeur, la texture au toucher, la structure, le développement racinaire, les vers de terre...
Profondeur du sol (estimation)	entre la surface et l'apparition de la roche mère
Ratio K <sub>2</sub> O/MgO, CaO/MgO	ratios qui renseignent sur les risques blocages de phytoassimilation à cause de la compétition entre ces ions sur leur place dans le complexe argilo humique
Résistance mécanique du sol	mesure avec un pénétromètre : résistance à l'enfoncement d'une tige dans le sol, rend compte de zones de tassement.
Résistivité électrique	Le conductimètre est placé dans un traineau tracté par un quad pour cartographier l'hétérogénéité de résistivité dans la parcelle. Un expert fait des analyses à la tarière dans chacune des zones repérées pour déterminer leur potentiel agronomique.
Risque d'asphyxie	estimé à l'aide d'un triangle des textures (Monnier et Stengel, 1982)
RU potentielle	Réserve utile en eau : calcul à partir de la texture, pierrosité, MO et profondeur enracinement potentiel (estimé par la profondeur du sol)
Slake Test	estime la stabilité des fragments de terre dans l'eau
Stabilité des agrégats	détermine la capacité du sol à maintenir ces agrégats agglomérés sous un effet d'une pluie.
Stock C	calculé par la teneur en carbone * masse volumique apparente
Stock N	calculé par la teneur en azote * masse volumique apparente
Taux de saturation de la CEC	calcul en fonction de la proportion de H <sup>+</sup> dans le CAH : indique la tendance du sol à s'acidifier
Teneur en MO	calcul, par convention, MO= 1,72*Corg
Test bêche	observation d'une bêchée de sol et analyse des mottes
Texture (avec décarbonatation)	% des particules assimilées à des argiles, des limons et des sables sans le calcaire
Texture (sans décarbonatation)	% des particules assimilées à des argiles, des limons et des sables avec le calcaire

Annexe 2 : comparaison des méthodes d'évaluation par observation (Bünemann et al., 2018).

Comparison of major visual soil assessment methods (X signifies required material or performed observations).

Country	Australia	France	Australia	UK	New Zealand	Brazil/UK	Germany
Reference	McKenzie (2001)	Roger-Estrade et al. (2004)	McGarry (2006)	Ball et al. (2007)	Shepherd et al. (2008)	Guimaraes et al. (2011)	Mueller et al. (2014)
Stated objectives (assessment of ...)	soil structure, suitability for root growth	soil structure	land degradation	soil structure	soil quality	soil structure	soil properties with respect to yield potential
Method name	SOILpak	Profil cultural trench	VS-Fast spade	Peerikamp spade	VSA spade	VESS <sup>a</sup> spade	M-SQR <sup>b</sup> pit
Principle	spade						
Material							
spade	X	X	X	X	X	X	X
plastic basin					X		
hard square board	X				X		
plastic bag or sheet				X	X	X	
knife	X			X	X	X	X
auger							X
water bottle					X		
tape measure or ruler			X	X	X	X	X
Time needed (min)	25-90	60-180	?	5-15	25	5-15	10-40
General observations							
soil layers, A-horizon			X				X
surface crusting or cover			X		X		
surface ponding					X		X
slope							X
soil erosion					X		
Soil physical properties							
soil texture			X		X		X
soil structure	X	X	X	X	X	X	X
soil consistence	X		X				
aggregate size distrib.			X	X	X	X	X
aggregate shape	X						
slaking/dispersion			X				
soil porosity	X			X	X	X	
soil colour	X		X		X		
soil mottles (no., colour)					X		
available water							X
water infiltration			X				
Soil chemical properties							
soil pH			X				
labile organic C			X				
Soil biological properties							
earthworms (no., size)			X		X		
potential rooting depth					X		X
root development	X		X	X		X	

Annexe 3 : Classification des indicateurs selon la fonction du sol évaluée, programme AgrInnov

Composantes du sol	Fonctions	Paramètres	Indicateurs validés par le GMT
Chimique	Ressource en nutriments	Dynamique de la MO	Litterbag (terrain) et SPIR (laboratoire)
	Puits et source de carbone	Analyses Physico-chimiques	Analyse de sol (laboratoire), Litterbag et SPIR
	Transformation de l'azote	Minéralisation	Litterbag et SPIR
Physique	Stabilité du sol	Stabilité des agrégats État de surface	Test bêche (terrain)
	Support Physique des cultures	Porosité	Test bêche
Biologique	Cf. Bioindicateurs		

Fonctions du sol à évaluer et indicateurs retenus

Abondance/diversité microbienne



Abondance diversité nématodes



Abondance diversité lombrics





Annexe 4 : Classification des indicateurs selon les fonctions requises par services écosystémiques du sol reproduction de (Bispo et al., 2012)

Services écosystémiques	Fonctions requises	Indicateurs
Biodiversité	Capacité d'accueil du sol	Biomasse microbienne Biomasse fongique Biomasse bactérienne Densité totale de nématodes Densité totale de microarthropodes Densité totale de macroinvertébrés Densité totale de lombriciens
	Hébergement d'une forte diversité taxonomique	Nombre de familles de nématodes Nombre d'espèces de collemboles Nombres d'ordres de macroinvertébrés Nombre d'espèces de lombriciens
	Hébergement d'une forte diversité fonctionnelle	Diversité catabolique microbienne (AWCD de Biolog) Respiration spécifique du carbone Minéralisation de l'azote Indice de structure des communautés de nématodes Nombre de groupes fonctionnels de collemboles Nombre de groupes fonctionnels de lombriciens
Recyclage des nutriments	Capacité à décomposer les MOS	Respiration spécifique du carbone Minéralisation de l'azote Activité glucosidase Activité arylamidase Activité phosphatase alcaline Activité glucosidase Densité de nématodes libres Biomasse de lombriciens endogés
	Capacité à dégrader les MOS (fractionnement + enfouissement)	Densité totale de collemboles Densité totale de macrosaprophages (cloportes, diplopodes, lombriciens épigés, gastéropodes) Densité totale de lombriciens anéciques
Fonction de tampon et de réactivité	Capacité tampon du sol	Teneur en Corg pH Teneur en argile
	Stimulation microbienne	Teneur en azote totale Phosphore assimilable Biomasse microbienne Activité laccase
Croissance végétale	Stimulation microbienne	Densité de nématode totaux Biomasse totale lombricienne
	Parasitisme végétal	Densité de nématodes phytoparasites
	Croissance végétale	Quantité de lipides foliaires (18:3)

Annexe 5 : Rang des indicateurs selon le système de culture, ordonnés par les rangs d'usage en moyenne.

Nom de l'indicateur	rang_MsA	rang_MpCh	rang_Lfrais	rang_Lindus
pH eau	1	1	2	1
Teneur en MO	2	2	3	2
CEC potentielle (Metson)	5	3	4	8
C organique total /N total	4	9	12	3
C organique total	18	8	6	9
CaO, K <sub>2</sub> O, MgO, Na <sub>2</sub> O (acé. d'ammo.)	16	7	11	11
Profondeur du sol (estimation)	17	4	5	17
CaCO <sub>3</sub> Calcaire Total	14	23	19	6
Ca, Mg, K, P, Na (eau)	3	19	18	20
pH eau - pH KCl	23	15	17	13
RU potentielle	13	13	16	5
P Olsen (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	24	26	1	16
Oligo : Fe, Mn, Zn, Cu (EDTA)	30	17	13	4
N minéral (bandelette)	8	10	7	25
Risque d'asphyxie	15	6	10	26
Taux de saturation de la CEC	7	20	14	12
Oligo : Bore	31	18	8	10
Pénétration des racines	12	12	15	19
N total	22	25	23	14

pH KCl	11	22	22	23
Ratio K <sub>2</sub> O/MgO, CaO/MgO	26	27	9	18
Pierrosité (estimation)	25	5	20	21
N minéral (labo)	10	21	30	28
Texture (sans décarbonatation)	29	16	21	22
Indice de battance	20	14	29	24
Disponibilité en eau (sondes)	21	30	26	7
Coordonnées GPS	28	28	24	15
Conductivité électrique de la solution	6	35	33	34
Texture (avec décarbonatation)	34	29	25	30
Indice de stabilité structurale	9	11	28	27
P J-Hébert	27	31	27	31
Masse terre fine /ha (calcul)	19	24	31	32
P Dyer	33	32	32	33
ETM totaux Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb	36	37	38	29
Densité apparente estimée	32	36	34	35
Pierrosité (labo)	37	34	37	38
Biomasse microbienne (C microbien)	35	33	36	36
Nématodes phytophages	38	38	35	37

## Annexe 6 : effet des pratiques sur les différentes caractéristiques du sol évaluées par les indicateurs de la fertilité des sols

Effet sur les caractéristiques du sol	Travail du sol	Apports de PRO	Intégration de couverts végétaux
Statut physique et statut hydrique	structure du profil de sol, état de la surface (nu ou couvert, émietté ou motteux)	augmentation de la stabilité structurale	protection contre la battance, limitation de l'érosion, maintien de la porosité
Statut acido-basique et statut chimique	dilution ou concentration en surface	Augmentation de la CEC	restitution de nutriments parfois non accessible par les cultures principales, captage des nitrates
MO non vivantes	dilution ou concentration en surface	Augmentation du N organique	restitution de nutriments (notamment azotés pour les couverts végétaux avec des légumineuses)
Biomasses	la faune et microorganismes du sol (perturbation de l'habitat, localisation des ressources); les adventices (destruction, enfouissement des résidus et stock semencier)	augmentation de la biomasse et diversité biologique (habitats et ressources)	rupture des familles dans la rotation, effet biocide (par piégeage ou biofumigation), maintien des organismes du sol (habitat, humidité, ressources)

Statut hydrique	structure du profil de sol, état de la surface (nu ou couvert, émietté ou motteux)	Augmentation du pouvoir de rétention en eau	ralentissement du ruissellement et amélioration de l'infiltration, assainissement des sols humides
-----------------	--	---	--

## Annexe 7 : références sur les projets mentionnés

<http://qfq.itab.asso.fr/recherche.php#update>

entretiens

base de références documentaire sur les produits résiduels organiques (COMIFER - version du 07 11 2016)

<http://www.comifer.asso.fr/fr/groupe-de-travail/pro/base-de-references-documentaires-sur-les-pro.html>

Nom	code
Optimisation du travail du sol en maraîchage AB comparaison itinéraire classique et planches permanentes (2005 - 2011) - GRAB, ADABio & Sérail, PLRN, ACPEL, Chambre d'Agriculture du Rhône. (National)	[WSOL_GRAB, ADABio & Sérail, PLRN, ACPEL, Chambre d'Agriculture du Rhône.]
Travail du sol - irrigation (2016 - 2018) - Sérail, CA Rhone (Régional Rhone Alpes)	[WSOL_Sérail, CA Rhone]
Effets des apports MO en maraîchage sous abris (2002 - 2010) - INRA Alénia (Régional Sud Est)	[PRO_INRA Alénia]
Effets des apports MO en maraîchage plein champ (1995 - 2010) - Sérail, INRA (Régional Rhone Alpes)	[PRO_Sérail, INRA]
Effets des apports MO en légumes en frais (1982 - 1997) - Caté (Régional Bretagne)	[PRO_Caté]
Amélioration technico-économique de l'utilisation de Bois Raméaux Fragmentés en maraîchage biologique dans le Morbihan (2012 - 2015) - CA bretagne (Régional Bretagne)	[PRO_CA bretagne]
Acquérir des références pratiques sur des engrais verts et des couverts végétaux adaptés au contexte maraîcher en AB. (2014 - 2017) - ACPEL (Régional Poitou Charentes)	[CV_ACPEL]
Engrais verts en Maraîchage Biologique sous abri (2013 - 2015) - GRAB (Régional PACA)	[CV_GRAB]
Intégration d'engrais verts en maraîchage plein champ (2018 - 2020) - Sérail (Régional Rhone Alpes)	[CV_Sérail]
Evaluation couverts végétaux - réduction fuites de nitrates. (nombreux) - Caté (Régional)	[CV_Caté]
Évaluation de l'implantation directe d'une culture de légumes dans un couvert végétal implanté en hiver (2017 - 2020) - ACPEL (Régional)	[CV_ACPEL]
Implantation d'engrais vert sous couvert - Chou-fleur - AB_2015 (2015 - 2016) - PLRN (Régional Picardie)	[CV_PLRN]
Engrais Verts et Fertilisation en culture précoce de chou-fleur d'été AB 2015 (2013 - 2015) - PLRN (Régional Picardie)	[CV_PLRN]
BreizhLégum'eau : lessivage azote Légume plein champ (2015 - 2018) - Caté, CA bretagne (Régional Bretagne)	[CV_Caté, CA bretagne]
Comparaison de la sensibilité de différents engrais verts de Brassicacées aux nématodes à galles (2012 - 2018) - GRAB (Régional)	[CV_GRAB]
Le sorgho fourrager comme engrais sert à effet assainissant (2016 - .) - CTIFL (National)	[CV_CTIFL]
Rotation et durabilité en maraîchage biologique plein champ (2009-2014) - CTIFL, Légumes Centre Action (.)	[ROT_CTIFL, Légumes Centre Action]
Quelles espèces et quels itinéraires techniques favoriser afin d'intégrer des grandes cultures dans les rotations légumières ? (2009 - 2016) - PAIS (Régional)	[ROT_PAIS]
SOILVEG : les plantes de services agro-écologiques (2015 - 2019) - GRAB (Européen)	[ROT_GRAB]

GEDUBAT (2012 - 2018) - CTIFL, APREL, CA 29, GRAB (National)	[ROT_CTIFL, APREL, CA 29, GRAB]
SEFerSol - Mise au point de stratégies innovantes d'entretien de la fertilité du sol en maraichage biologique (2015 - 2023) - EPLEFPA, Rouffach, Wintzenheim (Régional Alsace)	[SYS_EPLEFPA, Rouffach, Wintzenheim]
Fertilité biologique des sols (? - ?) - INRA Génosol (.)	[SYS_INRA Génosol]
MSV Maraichage Sol Vivant (2012 - ?) - association (National)	[SYS_association]
SdC intensif et fatigue des sols (2000 – 2007) - INRA-Alénya (Régional Sud Est)	[SYS_INRA-Alénya]
4SysLég (2013 - 2018) - INRA Alénya (Régional Sud Est)	[SYS_INRA Alénya]
SolAB (2009 -2011) - ITAB, INRA (National)	[EVAL FERTI_ITAB, INRA]
Sol-D'PHY (2012 - 2018) - Agrotransfert (Régional Haut de France)	[EVAL FERTI_Agrotransfert]
Prévention des risques des tassements des sols (2015 -2016) - Agrotransfert (Régional Haut de France)	[EVAL FERTI_Agrotransfert]
Référentiel vers de terre dans Projet ENI (2014 - 2018) - CA Bretagne (Régional Bretagne)	[EVAL FERTI_CA Bretagne]
REVEIL (2018 - 2021) - APREL (Régional PACA)	[EVAL FERTI_APREL]
AGRO-ECO SOL (2018 - 2021) - Auréa (National)	[EVAL FERTI_Auréa]
Landmark (2015 -2020) - Teagasc (International)	[EVAL FERTI_Teagasc]
Fertilcrop dans ERA Net - CORE Organic Plus (2016 - 2021) - ISARA, INRA Montpellier (Européen)	[EVAL FERTI_ISARA, INRA Montpellier]
ERA Net - BioDiversa SoilMan (2017 - 2020) - BioDiversa SoilMan (Européen)	[EVAL FERTI_BioDiversa SoilMan]
REVA (2017 - 2021) - REVA (National)	[EVAL FERTI_REVA]
ENVASSO (2006 - 2008) - ENVASSO (Européen)	[EVAL FERTI_ENVASSO]
ORION : Outils d'aide à la décision innovants pour une meilleure maîtrise de l'eau et du potentiel nutritif du sol (2017 - 2020) - APREL (Régional PACA)	[EVAL PRO_APREL]
Amélioration de SYST'N pour les Hauts-de-France (2017 - ?) - Agrotransfert (Régional Picardie)	[EVAL FERTI_Agrotransfert]
PROLAB (2014 - 2017) - INRA, CIRAD, LDAR, UniLaSalle, Rittmo, Arvalis (National)	[PRO_INRA, CIRAD, LDAR, UniLaSalle, Rittmo, Arvalis]

## 1. Fertilité du sol en L&M

- **SEFerSol - Mise au point de stratégies innovantes d'entretien de la fertilité du sol en maraichage biologique**

Elaboration d'outils, Enquête, Expérimentation système - En cours - Echelle Régionale - 68, EPLEFPA Rouffach, Wintzenheim – (2015 – 2023)

- Mettre au point et tester deux stratégies innovantes de gestion combinée de la fertilité du sol et de l'enherbement en maraichage biologique diversifié
- Évaluer les performances des systèmes de culture innovants (fertilité du sol, impacts sur la qualité de l'eau, autonomie vis-vis des intrants organiques, résultats techniques et économiques)
- Diffuser les connaissances acquises et les méthodes développées aux maraichers et futurs maraichers

### c. Rotation – culture intermédiaire (engrais vert, CIPAN...)

- **Quelles espèces et quels itinéraires techniques favoriser afin d'intégrer des grandes cultures dans les rotations légumières ?**

Expérimentation système - En cours - Echelle Régionale – PAIS – (2009 – 2016)

Comparaison de différentes associations d'espèces et d'itinéraires techniques de production de céréales dans une rotation légumière.

- **Évaluation de l'implantation directe d'une culture de légumes dans un couvert végétal implanté en hiver**

Expérimentation système - En cours - Echelle Régionale – ACPEL – (2017 – 2020)

Les objectifs de ces essais seront :

- de vérifier la faisabilité de la technique en maraîchage de plein champ,
- de maintenir le rendement et la qualité des légumes,
- de maîtriser l'enherbement,
- d'améliorer la fertilité du sol et de réduire la perturbation des sols (moins de travail du sol),
- de diminuer les coûts de production (réduire le temps de désherbage et la consommation d'énergie fossile).

- **SOILVEG :Optimisation de l'utilisation de plantes de services agro-écologiques**

Projet R&D - En cours - Echelle Européenne – GRAB – (2015 – 2019)

« Améliorer la préservation des sols et l'utilisation d'énergie dans les systèmes de production de légumes biologiques par l'utilisation et la gestion de plantes de services agro-écologiques », voilà l'enjeu du projet de recherche européen désigné par l'acronyme SoilVeg, piloté par l'institut italien de recherche en agriculture (CRA), et financé par l'Europe dans le cadre de Core Organic Plus.

Le GRAB, partenaire français, a conduit des essais pendant 3 ans pour évaluer la faisabilité et l'intérêt de planter des légumes dans des couverts végétaux utilisés en mulch de surface, sans travail du sol.

- **Acquérir des références pratiques sur des engrais verts et des couverts végétaux adaptés au contexte maraîcher en AB.**

Expérimentation système - En cours - Echelle Régionale – ACPEL – (2014 – 2017)

En région Poitou-Charentes, les producteurs identifient bien le fait que les engrais verts et les couverts végétaux présentent de nombreux intérêts. Cependant, cette pratique est très peu répandue dans les systèmes maraîchers. Les raisons avancées sont les difficultés d'implantation liées à la libération des sols, au choix de la bonne espèce, à la nécessité de bien gérer la biomasse.

Pour avancer sur ce sujet en région, il est donc nécessaire d'acquérir des données et des références adaptées au contexte cultural et pédoclimatique.

- **Rotation et durabilité en maraîchage biologique plein champ**

Expérimentation système – Terminé - Echelle National – CTIFL et Légume Centre Action – (2009 – 2014)

En agriculture biologique, la même espèce revient sur la même parcelle tous les 2-3 ans. Dans ces conditions, le parasitisme et les problèmes de sol deviennent vite des facteurs limitant la rentabilité des exploitations. Ce projet CASDAR cherche à évaluer l'influence de pratiques de rupture (engrais vert, plante de rupture) au sein de rotations en maraîchage de plein champ.

- **Intégration d'engrais verts en maraîchage plein champ**

Expérimentation analytique - En cours - Echelle Régionale – Sérail – (2018 – 2020)

Comment intégrer les engrais verts dans les rotations maraîchères, dont les intercultures sont très courtes ? Quels effets ? Les essais porteront sur les modalités d'implantation et destruction des engrais verts (par exemple test de l'occultation par bâchage des résidus pour accélérer la dégradation).

- **Engrais verts en Maraîchage Biologique sous abri et en plein champ**

Projet Recherche/Expé - En cours - Echelle Régionale – GRAB – (2002 – 2015)

Le créneau principal pour introduire les engrais verts est l'automne-hiver pour les parcelles de plein champ et l'été pour les abris. Les essais conduits au GRAB permettent de proposer un choix d'espèces adaptées aux différents créneaux et d'évaluer leurs performances. Des essais sont conduits de façon plus spécifique depuis 2013 sur l'insertion des légumineuses en engrais verts. Celles-ci permettent d'améliorer la disponibilité en azote « gratuit » du sol, et d'assurer une bonne coupure dans la

succession des cultures maraîchères sous abris qui intègrent peu de légumineuses. Elles peuvent améliorer l'autonomie des maraîchers vis-à-vis des intrants azotés.

- **Engrais Verts et Fertilisation en culture précoce de chou-fleur d'été AB 2015**

Projet Recherche/Expé - Terminée - Echelle Régionale – PLRN – (2015)

La production précoce de chou-fleur se plante sous bâche en mars et avril, pour alimenter le marché sur juin et juillet. Cette période en sortie d'hiver est une période de faible activité biologique, donc de minéralisation très faible, et de disponibilités très réduites suite au lessivage hivernal. Pallier aux déficiences des fournitures par le sol par des apports extérieurs s'avèrerait particulièrement coûteux, et par ailleurs, les engrais organiques potentiellement utilisables ont une libération trop lente pour satisfaire correctement et en temps aux besoins du chou-fleur.

Les mesures effectuées à la station vers sur plusieurs cycles ont permis de quantifier les besoins de la culture : une culture traditionnelle plantée à 24 000 pieds/ha absorbe entre 300 et 340 kg d'azote (variétés FREMONT et AVISO / essais 1998).

La station SECL qui étudie le sujet depuis plusieurs années, a montré tout l'intérêt que l'on pouvait tirer d'un précédent engrais verts (particulièrement la vesce velue seule ou associée à l'avoine), ou encore des retours d'un précédent chou-fleur (valeur mesurée entre 150 et 200 u N /ha).

Il serait donc intéressant de transposer ces enseignements au contexte du chou-fleur d'été. En 2015, une deuxième année d'essai a été menée pour consolider les résultats de 2013 (voir CR 2013).

Par ailleurs la région étant totalement classée zone vulnérable, le couvert hivernal en place est obligatoire, mais pour les zones de terres lourdes une dérogation est possible pour un labour pré-hivernal. Ces deux itinéraires sont donc potentiellement possibles et légaux.

L'objectif de cet essai est multiple :

- Evaluer la contribution d'un précédent engrais à la nutrition d'un chou-fleur précoce
- Permettre par cette implantation une disponibilité en azote précoce pour une meilleure croissance et par là faire une économie d'apport en engrais à libération rapides.
- Quantifier ce que peut apporter ce précédent.
- Déterminer le meilleur itinéraire de mise en œuvre : hiver en place et enfouissement de surface au printemps (planches fixes) ou enfouissement précoce par labour d'octobre.

- **Implantation d'engrais vert sous couvert - Chou-fleur - AB\_2015**

Projet Recherche/Expé - En cours - Echelle Régionale – PLRN – (2015 – 2016)

L'implantation d'un engrais vert derrière un légume de type légumineuse est compliquée. La libération tardive de la parcelle ou conditions météo défavorables (sécheresse) à la mise en place, soit il n'est pas réalisé ou il développe très peu de biomasse. Les semis sous couvert, technique inspirée des grandes cultures permettraient d'anticiper les semis. Technique quasi inexistante en production légumière dans la région, des producteurs s'interrogent aujourd'hui sur sa faisabilité. Des essais réalisés en grandes cultures permettent aujourd'hui d'avoir une base de données sur le choix de espèces (vitesse d'implantation, biomasse, plante couvre sol, ...). La station SECL a testé également ces techniques, mais avec des écartements entre-rangs de 90 cm avec des résultats intéressants. Dans la région nord, les écartements inter rangs sont à 70 cm donc moins de lumière pour les plantes couvre sol pouvant entraîner des résultats différents.

Outre l'intérêt fertilisation apporté par les engrais verts, ceux-ci pourraient avoir également une action secondaire sur la gestion des adventices.

Afin de pouvoir apporter des réponses aux producteurs, un essai sera mis en place en 2015 sur une implantation d'un engrais vert dans une culture de chou-fleur de saison.

Les objectifs de l'essai sont pour 2015 :

- Evaluer la faisabilité d'une implantation d'engrais vert sous couvert d'un chou
- Comparaison de différents engrais verts soit seul ou en mélange
- Evaluer l'effet compétition de l'engrais vert sur le chou-fleur
- Evaluer la production de biomasse MF, MS, et C/N de l'engrais vert (Avant destruction)
- Evaluer le dynamique azote après récolte et hiver (reliquat fin culture et hiver).

Et pour 2016:

- Evaluer la contribution des différents engrais verts à la nutrition Azote du chou-fleur précoce
- Evaluer la consommation d'azote du chou-fleur

#### d. Travail du sol

- **Travail du sol – irrigation**

Expérimentation système – en cours – Echelle régionale – Sérail – (2016 – 2018)

En maraichage biologique, la fertilisation mise à l'implantation de la culture doit permettre d'alimenter la culture jusqu'au bout. L'objectif est de trouver le rappuyage optimal (rouleaux) pour que le bulbe d'irrigation soit le moins vertical possible en retenant l'eau dans l'horizon des jeunes racines (difficile



en sols soufflés). L'hypothèse étant que le jeune système racinaire mieux pourvu en eau dès le début se développe plus rapidement. La progression des racines donne accès à un plus grand volume de terre (plus d'eau, plus d'éléments).

- **Optimisation du travail du sol en maraîchage AB comparaison itinéraire classique et planches permanentes (Casdar 2005-2007 et SolAB 2009-2011)**

Projet Recherche/Expé - Terminée - Echelle Nationale – GRAB (PACA), ADABio & Sérail (Rhône Alpes), PLRN (Picardie), ACPEL (Charentes-Poitou), Chambre d'Agriculture du Rhône – (2005 – 2011)

Observer l'évolution de la fertilité du sol et le comportement agronomique des cultures en fonction de deux pratiques différentes de travail du sol. Dans le cas du maraîchage, les problèmes de structure du sol sont particulièrement importants. La succession rapide de cultures entraîne des passages d'outils répétés dans des conditions de ressuyage et de portance parfois inadaptées ; on observe dans la majorité des exploitations maraîchères des problèmes de compaction. Les planches permanentes stabilisent les passages de roues pour une meilleure portance, limitent les problèmes de tassement de sol dues aux interventions répétées et conditions non optimales (fenêtres d'interventions courtes).

- Le labour classique étant considéré en AB comme une pratique efficace contre les mauvaises herbes, cela freine l'utilisation d'itinéraires techniques de travail du sol simplifié.

- De plus, le manque de références concernant les techniques de travail du sol pose des problèmes aux producteurs quant aux choix à effectuer.

- Il s'agit également de mettre au point et de valider des méthodes d'observation simplifiées de la fertilité permettant d'évaluer les modifications physiques et biologiques du sol, afin de les proposer en outils d'accompagnement de la fertilité des sols dans les réseaux de développement.

- Ce type d'action est transversal. Il intéresse aussi bien l'agriculture biologique que l'agriculture conventionnelle. Cette étude est coordonnée au niveau national par le GRAB (Hélène Védie) et elle fait l'objet d'un projet CASDAR (SOLAB).

#### e. Les apports de Produits résiduaire Organiques

Dans le cadre du Casdar Réseau PRO, l'ITAB a recensé plusieurs expérimentations ayant permis d'évaluer différents types de produits organiques en maraîchage biologique, en amendements pour améliorer la fertilité des sols, ou en engrais pour améliorer la nutrition, notamment azotée, des cultures (Védie and Leclerc, 2010). Les deux expérimentations suivantes y sont détaillées (Effet apports de MO en maraîchage, à INRA Alénya et la Sérail).

- **Effets des apports de matières organiques en maraîchage sous abris**

Expérimentation analytique – Terminée – Echelle Régionale – INRA Alénya – (2002 – 2010)

Mieux connaître l'évolution améliorer les états du sol et prendre en compte la minéralisation azotée pour mieux alimenter les plantes, notamment les cultures longues d'été pour lesquelles les engrais organiques usuels ne permettent pas une alimentation tardive correcte.

- **Effets des apports de matières organiques en maraîchage plein champ**

Expérimentation analytique – Terminée – Echelle Régionale – Sérail – INRA – (1995 – 2010)

Quinze années d'essai ont permis de mieux appréhender les propriétés à court et long terme des produits testés et d'apporter des éléments de choix aux agriculteurs en fonction des problématiques rencontrées.

	Fumier de bovin	Fumier déshydraté	Compost de DV	Compost d'écorces enrichi	Compost de tourteaux de café enrichi	"Effet dose d'apport" (EqC vs EqH)
Taux d'humus du sol	+	+	++	++	+	non
Biomasse microbienne	++	++	+	+	++	oui
Minéralisation C	++	++	+	+	+	oui
Minéralisation N	+	+	+	+	+	non
pH	0	0	+	+	+	non
CEC	+	+	++	++	+	non
Etat structural	+	+	+	+	+	non
Stabilité structurale	(++)	(++)	(+)	(+)	(+)	non
Résistance au compactage	+	Non testé	+	Non testé	0	Non testé
Réserve utile	++	++	++	++	+	oui
Effet fertilisant (N)	+	+	0	++	++	

0 : pas d'effet par rapport au témoin

+ : effet positif par rapport au témoin

++ : effet très positif par rapport au témoin

( ) : effet non statistiquement significatif (tendance)

- **Effets des apports de matières organiques en légumes en frais**

Expérimentation analytique – Terminée – Echelle Régionale – station expérimentale du Caté – (1982 – 1997)

Dans le début des années 80, la réduction de l'accessibilité au fumier pour fertiliser les cultures légumières soulève la question du taux de MO qu'il faut maintenir dans le sol (selon sa nature) pour garder bon état de fertilité. L'essai compare l'évolution de la fertilité du sol selon qu'il y ait des apports systématiques de fumier de bovin ou pas d'apports pour différents types de sol et de pratiques (rotation chou-fleur – artichaut). Dans tous les cas, la teneur en MO a baissé (avec ou sans apports de fumier).

Conclusions : le fumier de bovins apporté à des doses trop importantes (du fait du coût et de l'incidence sur la fourniture d'azote) ne compense pas les pertes de M.O du sol, dues au système cultural utilisé dans cet essai. Si l'on recherche le seul maintien d'un taux de M.O. du sol, d'autres produits ou d'autres rotations doivent être utilisés.

Question : le taux de matière organique d'un sol, tel qu'il est appliqué par les laboratoires est-il le bon indicateur pour mesurer la capacité d'aération d'un sol (effet structurant) ou (et) sa vie biologique (capacité de minéralisation, voire potentiel de résistance aux développements de parasites telluriques...)?

- **ORION : Outils d'aide à la décision innovants pour une meilleure maîtrise de l'eau et du pO potentiel nutritif du sol**

OAD, Expérimentation système – En cours – Echelle régionale (PACA) – APREL, ARDEPI, CIRAM, CETA, financé par l'agence de l'eau – (2017 – 2020)

La complémentarité entre fertilisation minérale et fertilisation organique est encore insuffisamment prise en compte dans l'évaluation des fournitures minérales aux cultures et des capacités des sols à assurer ses équilibres biologiques. L'irrigation, associée à la fertilisation influence à la fois les bilans minéraux des éléments mobiles et de nombreux traits fonctionnels des organismes du sol et des cultures. L'apport d'eau modifie l'activité de la faune et la flore du sol et, leur fonction de minéralisation de l'azote contenu dans la matière organique. La maîtrise conjointe des apports d'eau,



d'engrais minéraux, et de matières organiques est une des conditions de la durabilité des systèmes de culture maraîchers.

Il faut fournir aux maraîchers des outils adaptés permettant :

- de caractériser la mise à disposition de ressources azotées minérales pour les plantes
- montrer les effets bénéfiques de l'apport régulier de MO sur la qualité des sols.

D'autre part, de nouveaux matériels pour le pilotage des irrigations permettent une gestion plus fine et plus réactive du contenu en eau du sol, que les capteurs actuels, et doivent être testés pour conseiller au mieux les maraîchers dans leur choix d'équipement.

- **Amélioration technico-économique de l'utilisation de Bois Raméaux Fragmentés en maraîchage biologique dans le Morbihan**

Expérimentation système - En cours - Echelle Régionale – SEHBS – (2012 – 2015)

La technique du bois raméal fragmenté (BRF) consiste à apporter au sol des copeaux de bois vert issus de branches d'un diamètre inférieur à 7cm. Cet apport de matière organique ligneuse stimule la formation d'humus dans le sol et accroît donc le potentiel de fertilité de ce dernier. Apporté en paillage, le BRF limite le développement des mauvaises herbes et tamponne les variations de température du sol. Il permet également d'améliorer le pouvoir de rétention en eau du sol et de limiter l'évaporation. Enfin, il permet de conserver une bonne structure du sol réduisant ainsi la fréquence des travaux du sol.

Plusieurs avantages potentiels sont donc attribués à cette technique en maraîchage, elle permettrait de :

- remplacer le paillage plastique,
- limiter les apports de fertilisants (organique et minérale),
- proposer une alternative aux engrais organiques d'origine animale (cas particulier de l'interdiction d'utilisation dans les zones ostréicoles),
- réduire la consommation d'eau,
- diminuer l'utilisation de pesticides,
- amoindrir les frais de mécanisation,
- rendre cultivable des zones inadaptées au maraîchage (pente trop forte, absence de système d'irrigation),
- faciliter l'installation des nouveaux maraîchers,
- valoriser les déchets de la filière bois.

Cette étude a pour objectifs de vérifier les intérêts du BRF à l'échelle du système de culture et de tester sa faisabilité technico économique pour le maraîchage AB. Le but étant de définir les modalités techniques optimales d'utilisation du BRF.

## 2. Pratiques affectant la fertilité (pas l'objectif du projet)

### a. Système

- **Projet 4Sysleg**

Projet R&D, Expérimentation système – En cours – INRA Alénia (2013 – 2018)

Mettre en place des solutions contre les parasites aériens selon les systèmes de productions en bio ou en conventionnel, en prenant compte du circuit commercialisation.

- **GEDUBAT : Gestion DURable des BioAgresseurs Telluriques : Nématodes**

Projet Recherche/Expé - En cours - Echelle Nationale – CTIFL – (2012 – 2017)

Le projet GEDUBAT fait partie du programme DEPHY Expé, co-financé par l'Onema dans le cadre du plan Ecophyto. Il vise à tester, sur 6 ans, des techniques alternatives permettant la réduction des pathogènes telluriques sur les cultures afin de pouvoir diminuer les traitements. L'objectif général du

programme Eco-phyto est l'évaluation de systèmes permettant de diminuer les traitements phytosanitaires... (50%)

Sur le site expérimental suivi par le GRAB, la priorité est la gestion des nématodes à galles (*Meloidogyne* spp.), facteur n°1 limitant la production et la possibilité de cultiver certaines cultures (melon...). Le dispositif envisagé concerne 2 tunnels froids cultivés en AB.

A l'APREL, chacun des systèmes étudiés fait appel à plusieurs méthodes alternatives à la désinfection de sol qui peuvent permettre de réduire la pression en nématodes sur les principales cultures produites. L'exploitation se caractérise par une spécialisation des cultures : melon en été, salade en hiver. Les techniques alternatives qui sont mises en œuvre dans cette exploitation sont centrées sur l'interculture (solarisation, engrais vert...) ou sur des applications de produits de biocontrôle en culture.

- **Fertilité biologique des sols**

Projet Recherche – en projet - Echelle Nationale - INRA GénoSol

Pour les différentes modalités de GEDUBAT et 4SysLég, il s'agit d'étudier la biologie du sol. Le but serait d'acquérir des références effet des pratiques sur les biomasses microbiennes moléculaires. Les modalités pour lesquelles des biomasses seraient très différentes feraient l'objet d'une analyse plus poussée sur la structure microbienne.

#### b. Lessivage et rotation- cultures intermédiaires

- **Evaluation couverts végétaux - réduction fuites de nitrates.**

Plusieurs essais – En cours – Echelle Régionale – station expérimentale du Caté

L'implantation de couverts végétaux est de plus en plus pratiquée et la mise en place est obligatoire si la récolte a lieu avant octobre. Les essais visent à fournir des connaissances sur l'utilisation de couverts végétaux pour réduire les fuites nitrates.

- **BreizhLégum'eau : lessivage azote Légume plein champ**

Expérimentation système - En cours - Echelle Régionale – CA Bretagne – (2016 – 2019)

Terre d'essais de Pleumeur-Gautier (22) spécialisée en agriculture biologique va chercher des leviers pour limiter les risques de lixiviation de l'azote et optimiser la fertilisation azotée en bio par l'utilisation appropriée d'engrais verts et de couverts végétaux. La station du Caté à Saint-Pol-de-Léon (29) va aussi travailler sur les couverts végétaux afin de diminuer le lessivage hivernal et sur des techniques pour réduire l'utilisation d'engrais azotés. La station d'expérimentation horticole de Bretagne Sud à Auray (56) axe ses recherches sur une meilleure autonomie en intrants pour la fertilisation des cultures.

24 parcelles de producteurs séparées en deux : la moitié de la parcelle est conduite en itinéraire classique et l'autre moitié avec des pratiques innovantes. Le but étant de ne plus avoir d'azote minéral dans le sol pour le dernier trimestre de l'année (avant période de lessivage).

#### c. Bioagresseurs et rotation – cultures intermédiaires

- **Le sorgho fourrager comme engrais vert à effet assainissant**

Expérimentation analytique - En cours - Echelle Nationale – Ctifl – (2016)

Evaluation agronomique et potentiel pour la biofumigation (sous abri) de cette pratique améliorante

- **Comparaison de la sensibilité de différents engrais verts aux nématodes à galles - Effets sur l'infestation de la culture suivante**

Projet Recherche/Expé - En cours - Echelle Régionale – GRAB – (2005 – 2018)

Les nématodes à galles (*Meloidogyne* spp.) sont des ravageurs particulièrement coriaces : la durée de leur cycle est courte (3 à 8 semaines), ils sont très polyphages (cultures et plantes adventices), et peuvent descendre profondément dans le sol, ce qui rend la lutte très difficile. Les dégâts sont particulièrement importants en maraîchage sous abri, où les conditions de leur multiplication sont optimales (températures élevées, succession de cultures sensibles).

L'objectif des essais est d'étudier le comportement agronomique et la sensibilité de différentes espèces d'engrais verts aux nématodes à galles du genre *Meloidogyne* spp. Il s'agit également d'évaluer l'effet sur l'infestation de la culture suivante.

### 3. Effet des pratiques sur la fertilité en GC

- **Évaluation d'engrais verts**

Expérimentation analytique - Terminée - Echelle Régionale – ARMEFLHOR – (2017)

L'objectif de l'essai est de comparer différents engrais verts en espèce simple. L'intérêt est d'évaluer leur compétition face aux adventices et leurs productions de biomasse. L'essai permettra également de valider des pratiques sur l'installation de l'engrais vert : semis mécanisé, semis à la volée avec ou sans enfouissement. L'essai permettra également d'alimenter une base de données à partir des résultats sur les travaux menés sur les plantes de service.

Pour ce faire, les sous-objectifs opérationnels sont :

- de valider le semis à la volée pour chaque modalité à travers les notations de levée
- d'évaluer leur compétition face aux adventices
- d'évaluer leur production de biomasse.

- **RotaLeg - Thorigné : Expérimentation système de grandes cultures sans apport de fertilisants extérieurs**

Expérimentation système - En cours - Echelle Nationale - CA 49, CA Pays de la Loire, Ferme expérimentale de Thorigné d'Anjou – (2011 - 2014)

L'étude des rotations décrites par le réseau des fermes de références des Chambres d'Agriculture des Pays de la Loire montre que les rotations couramment rencontrées dans les systèmes spécialisés grandes cultures ligériens présentent a priori des faiblesses agronomiques.

L'objectif de la plateforme rotation de longue durée est de déterminer l'impact de l'introduction optimisée de légumineuses dans une rotation céréalière bio (légumineuses pluriannuelles ou non) et de la durée de la rotation sur :

- la fertilité du sol : vie du sol (biomasse microbienne), évolution du cycle de l'azote, évolution du cycle du carbone. L'accent sera mis sur le suivi de l'évolution des paramètres physico-chimiques d'une parcelle au potentiel moyen et ayant une CEC faible. L'objectif est de vérifier si à long terme, il est possible de maintenir et préserver les ressources en N, P, K, Ca.
- les rendements des cultures de la rotation (productivité)
- la qualité des produits (taux de matières azotées, etc.).
- l'évolution de l'enherbement.
- la rentabilité de la rotation, affectant directement le revenu de l'agriculteur.

L'objectif secondaire est de conforter les réponses techniques sur les dates de semis des légumineuses et les modes d'implantation des légumineuses (faisabilité des semis de légumineuses sous couvert), faisant suite aux expérimentations de semis sous couvert menées ces 2 dernières années par les Chambres d'Agriculture dans le cadre du programme « ExpABcultures » financé par le conseil régional.

### 4. Evaluation de la fertilité en GC

- **Prévention des risques des tassements des sols**

Projet R&D – Terminé – Echelle régionale – Agrotransfert - (2015 – 2016)

Donner des repères concrets et objectifs aux agriculteurs pour leur permettre d'identifier les situations à risque de tassement, et les conséquences agronomiques et économiques à court terme de ces tassements

- **Sol – D'PHY : gestion durable de la fertilité physique des sols cultivés**

Projet R&D – Terminé – Echelle régionale – Agrotransfert – (2012 – 2018)

Le projet vise à préserver la fertilité physique et biologique des sols cultivés en favorisant l'évolution des pratiques culturales et de l'organisation des chantiers.

Un diagnostic régional, fondé sur des enquêtes couplées à des observations de profils de sol en parcelles agricoles, réalisé sur près de 40 situations concrètes en Hauts de France, a permis de mettre en évidence à la fois des problèmes de tassement dans l'horizon labouré, surtout liés à l'implantation des cultures et aux chantiers de récoltes, ainsi que des tassements profonds, sous la profondeur actuelle de labour, souvent associés à des systèmes de culture intégrant plusieurs cultures « à risques » (impliquant des chantiers lourds en conditions humides).

Afin d'aider les agriculteurs à prendre conscience de la réalité des tassements, la méthode du mini-profil 3D a été développée.

Les résultats acquis à ce jour dans le cadre du projet SOL-D'Phy ont permis de mettre en évidence la réalité du problème de tassement dans les sols agricoles de la région. Les tassements, en particulier profonds sont difficiles à corriger mécaniquement et se restructurent lentement sous l'effet des acteurs naturels (climat, biologie). Ils peuvent entraîner des pertes de productivité significatives des cultures, que les aléas climatiques pourraient rendre fréquentes à l'avenir.

- **Essai indicateur de fertilité du sol**

Expérimentation analytique - Terminée - Echelle Régionale – CDDL – (2007 – 2012)

Cette étude multi site pluriannuelle a pour objectif la compréhension de la complémentarité des utilisations de la méthode « analyse BRDA-Hérody », analyse chimique classique et du profil cultural. Nos résultats doivent aussi permettre de comprendre, améliorer ou maintenir une fertilité optimale des différents types de sols à la fois en production sous abri et en culture plein champ dans le contexte agronomique de l'Anjou.

- **Microbioterre**

Projet R&D - En cours - Echelle Nationale - ARVALIS-Institut du Végétal – (2017 – 2020)

Microbioterre a pour objectif opérationnel de mettre au point et de diffuser un référentiel d'interprétation de l'analyse de terre élargie à la microbiologie du sol. Le projet s'appuie sur des laboratoires habitués à travailler directement avec les agriculteurs pour qu'ils puissent s'approprier un outil à coût raisonnable. Il s'agit d'optimiser les pratiques permettant à la fois de stocker suffisamment de carbone de manière durable et d'augmenter l'activité de dégradation de carbone qui conduit à la fourniture d'azote, de phosphore et de soufre aux cultures. Le champ de ce projet couvre les systèmes de grande culture et de polyculture élevages qu'ils soient conventionnels, conduits selon les principes de l'agriculture de conservation ou de l'agriculture biologique. Microbioterre est soutenu par les trois RMT : « fertilisation et environnement », « sols et territoires », « systèmes de culture innovants ».

- **SolAB : Etude des effets de différents modes innovants de gestion du sol en AB sur la fertilité et ses méthodes d'évaluation**

Projet Recherche/Expé - Terminée - Echelle Nationale – ITAB – (2009 – 2011)

1- Consolider les connaissances sur la faisabilité technique et la durabilité globale des systèmes de gestion du sol limitant le recours aux interventions mécaniques

2- Améliorer les connaissances sur l'évolution de la fertilité du sol via le suivi d'indicateurs physiques, chimiques et biologiques,

- 3- Mettre au point et valider des méthodes d'observation simplifiées de la fertilité permettant d'évaluer les modifications physiques et biologiques du sol,  
 4- Diffuser les techniques et outils étudiés

Le groupe de travail associe différentes filières (grandes cultures, arboriculture, maraîchage, viticulture) avec différents partenaires (INRA, stations d'expérimentations, instituts techniques agricoles, organismes de formation, chambres d'agriculture). Pour le maraîchage, quatre stations sont impliquées (GRAB, Adabio-SERAIL, PLRN, ACPEL).

Projets pour analyser les communautés telluriques en particulier microbiennes à de grandes échelles spatiales. Ces analyses à grandes échelles nécessitent des échantillonnages de grande envergure avec par exemple en France le RMQS géré par le GIS Sol et la mise en place de structure permettant l'extraction des ADN de ces grands échantillonnages, leur gestion, stockage et leur analyse (plateforme GenoSol)

- **ENVASSO (ENVironmental ASsessment of SOil for monitoring) : évaluation d'indicateurs face aux problèmes liés aux sols**

Programme – Echelle Européenne - (2006 – 2008)

Le projet a visé à définir et harmoniser les méthodologies et les protocoles pour la caractérisation et le suivi des sols. Les travaux menés dans le cadre de ce projet ont permis de recommander des bonnes pratiques pour la définition de réseau de suivi des sols que ce soit vis-à-vis de la définition du réseau spatialisé, des paramètres physico-chimiques et biologiques, ou de la stratégie d'échantillonnage et de conservation (taille et implantation des sites, nombre d'échantillons, échantillonnage vertical...).

- **Landmark**

Programme de recherche – Echelle Internationale (Europe + Brésil + Suisse + Chine) – Teagasc – (2015 – 2020)

La commission européenne finance Landmark à hauteur de 5 millions d'euros, dans le cadre de son programme de recherche Horizon 2020.

Ce projet réunit 17 pays afin de mieux comprendre le fonctionnement des sols et d'évaluer l'impact des pratiques agricoles et des politiques sur cette ressource naturelle. Il s'intéresse plus particulièrement à cinq « fonctions » des sols :

- la production agricole, ainsi que quatre services écosystémiques :
- la régulation de l'eau,
- la séquestration du carbone,
- la biodiversité,
- le cycle des nutriments.

EcoFINDERS : Caractériser la biodiversité et le fonctionnement des sols en Europe

Déterminer la place des organismes dans le fonctionnement du sol et les services écosystémiques : bouclage des cycles, stockage de carbone, rétention d'eau, régulation de la structure du sol, résistance aux ravageurs et maladies et régulation de la biodiversité.

Le projet Européen vise :

- au plan cognitif, à progresser dans notre connaissance de la biodiversité et de sa traduction en services écosystémiques selon le mode d'usage des sols,

- au plan opérationnel, à proposer des bioindicateurs de l'état et du fonctionnement biologique des sols ainsi que des procédures et méthodes standards pour la caractérisation de la biodiversité et de ses fonctions,
- au plan économique, à évaluer la valeur ajoutée de l'utilisation de ces bioindicateurs et de l'application de stratégies promouvant la fourniture des services écosystémiques.

#### SNOWMAN programm

SUSTAIN project (part of European SNOWMAN programme): Task 6.1. Detect and develop indicators The relationships between soil functional biodiversity (WP2), soil functions (WP3) and soil ecosystem services (WP4) will be assessed through multivariate analyses. The results obtained in WP2, WP3 will give a picture of what happens at individual times at specific sites. In order to have an overview of the relationships between soil parameters (soil functions) and ecosystem services at medium and long-term scales, the multivariate analyses will also include the amount data previously recorded by each team on Kerguehennec site. Currently, France has 10 site years of data which will be used to reinforce the measured parameters.

- **Acquisition de référentiels pour les vers de terre**

1. OPVT : Observatoire participative de Verre de Terre

[https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT\\_accueil.php](https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT_accueil.php)

L'Observatoire Participatif des Vers de Terre a pour objectifs:

- de proposer un outil d'évaluation simplifiée de la biodiversité animale à l'aide des vers de terre, dans les sols agricoles ou naturels
- de rendre possible ces observations par divers publics à l'aide d'un protocole simplifié : agriculteurs, scolaires, naturalistes, chasseurs, jardiniers, gestionnaires de milieux naturels ou très anthropisés (sols urbains, technosols, ...);
- d'établir progressivement des référentiels de ces macroorganismes du sol, grâce à la participation du plus grand nombre de personnes;

2. SBT – ENI : Surveillance Biologique du Territoire sur le suivi des Effets Non Intentionnels (ENI) des pratiques agricoles sur la biodiversité

Le réseau SBT-ENI vise à évaluer l'impact des pratiques agricoles par le suivi d'espèces bio indicatrices (flore, coléoptères, oiseaux et vers de terre). Trois types de production agricole sont étudiés : les grandes cultures, le maraichage (systèmes en laitue) et la vigne : création de référentiels propres aux systèmes de production ?

- ERA Net - BioDiversa SoilMan (Ecosystem services driven by the diversity of soil biota – understanding and management in agriculture)

<https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page/programme-soilman>

Projet de R&D - Echelle Européenne (2017 – 2020)

Les objectifs de ce projet sont :

- d'explorer la biodiversité du sol en fonction des types de gestion et des contraintes régionales ;
- d'explorer l'impact de la biodiversité du sol sur le fonctionnement du sol et la fourniture de services écosystémiques ;
- de développer une approche intégrative des interactions et fournitures de services écosystémiques des sols induits par le mode de gestion ;
- d'évaluer les principaux biens et services que les sols fournissent à la société et l'impact des politiques publiques sur cette fourniture ;
- de comparer les résultats régionaux et les relier aux politiques publiques européennes de manière à ce que les résultats du projet SoilMan puissent être utiles aux décideurs et producteurs de politiques publiques.

- ERA Net – CORE Organic Plus

<https://www.coreorganic.org/>

Projet de R&D – Européen - ISARA, INRA Montpellier (2016 - 2021)

Sous projet : Fertilcrop : Fertility building management measures in organic cropping systems

L'objectif est de développer des pratiques culturales préservant la fertilité des sols, qui favorisent et utilisent les interactions mutuelles des plantes, la stratification de la fertilité du sol, les organismes bénéfiques du sol.

- REVA (Réseau d'Expérimentation et de veille à l'innovation Agricole)

Projet de R&D – Echelle Nationale (2017 – 2021)

Il s'agit d'utiliser les outils AgrInnov en monitoring, en les couplant à des indicateurs qui permettent d'évaluer et de caractériser la performance économique des modèles agricoles (modèle agricole : l'ensemble des processus de production mis en oeuvre dans une entreprise agricole). Il s'agit par ce travail d'identifier les modèles agricoles existants qui répondent déjà aux critères du développement durable au titre de la double performance, c'est-à-dire qui sont écologiquement et économiquement durables.

Dans le cadre du REVA, les agriculteurs travaillent en groupe et se comparent entre eux pour s'enrichir mutuellement de leurs points forts et faire évoluer leurs pratiques vers les modèles agricoles les plus performants.

- **Système de culture intensif et fatigue des sols**

Projet recherche expé – Echelle Régionale - INRA-Alénya (2000 – 2007)

L'essai part du constat que dans les années 90, dans le Languedoc il y a moins d'amendements systématiques et une perte en MO. Le but est de tester à court et moyen terme sur des systèmes de culture très intensifs l'incidence de combinaisons techniques nouvelles sur l'hétérogénéité physico-chimique du sol et sur la réussite des cultures.

- **AGRO-ECO SOL**

Programme d'Investissements d'Avenir (PIA) – Echelle Nationale – Auréa – (2018 – 2021)

Les partenaires sont Arvalis, l'INRA (UMR Agroécologie, UMR EcoSys, US InfoSol) et il fera appel à de nombreux prestataires.

Développement d'une filière technique et économique sur le diagnostic et le conseil pour une gestion agro-écologique des sols cultivés.

- **REVEIL : Recherche de Variétés Economes en Intrants P et K pour la laitue et les tomates**

Projet de R&D – Echelle Régionale – APREL – (2018 – 2021)

Programme dans le cadre du PEI (Partenariat Européen pour l'Innovation - FEADER) en région PACA.

Il est porté par l'APREL (Association Provençale de Recherche et d'Expérimentation Légumière) et a pour partenaires le CTIFL, l'INRA-PACA (PSH, GAFL), le GRAB et quelques CETA maraîchers.

- **Amélioration de Syst'N® pour les Hauts-de-France**

Projet de R&D – Echelle Régionale – Agro-Transfert – (2017 - ?)

Le projet a été retenu par les Agences de l'Eau Seine-Normandie et Artois-Picardie. Ses partenaires sont l'INRA (UMR SAS et AgroImpact) et les chambres d'agriculture.

Il permettra de mieux adapter les paramétrages et formalismes de l'outil aux systèmes des cultures et aux types de sol présents dans la région des Hauts-de-France.

Dynamique des MO

- **PROLAB**

Projet R&D – Echelle Nationale – INRA, CIRAD, le LDAR, UniLaSalle, Rittmo et Arvalis - (2014 – 2017)

Il était financé dans le cadre de l'appel à projet DOSTE de l'ADEME.



Ce projet porte sur la dynamique d'évolution dans le sol du carbone et de l'azote des PRO après leur épandage. Il avait pour objectif d'étudier la transposition possible des mesures faites au laboratoire et ce qui se passe sur le terrain en matière de minéralisation du carbone et de l'azote, d'émissions gazeuses (N<sub>2</sub>O et NH<sub>3</sub>). Les résultats sont encore en cours de valorisation. Ils ont déjà fait l'objet de plusieurs présentations : posters aux Rencontres du GEMAS-COMIFER 2015 et au workshop N 2016 sur l'effet du séchage et du broyage sur les résultats de minéralisation des PRO, par Caroline Leroux du LDAR; communication au colloque RAMIRAN 2017 sur l'effet de l'état biologique du sol sur les dynamiques de minéralisation des PRO, par Nadia Laurent d'UniLaSalle. D'autres sont en cours.

Projets sur la volatilisation ammoniacale :

EVAPRO (Évaluation des pertes d'azote par Volatilisation Ammoniacale suite à l'épandage de Produits Résiduaux Organiques)

Projet de R&D – Echelle Nationale – Instituts techniques (2016 - 2019)

Financé par l'ADEME

Il associe Arvalis-Institut du Végétal (pilote), Terres Inovia, la CRAB, l'Institut de l'Élevage, l'IFIP, l'INRA (UMR ECOSYS, UMR SAS) et l'ITAVI.

L'évaluation de la méthode d'estimation des flux de volatilisation avec le modèle FIDES en mode inversé à partir de mesures au champ a été achevée en 2017 (premier article scientifique en cours de publication dans une revue internationale). Tous les essais antérieurs seront donc retraités avec cette nouvelle méthode. L'acquisition de références au champ sur des PRO peu ou pas référencés (digestats de méthanisation de lisiers, effluents d'élevages bovins sur prairie, nouveaux produits issus d'élevage porcin, et effluents «solides» issus d'élevages avicoles).

EVAMIN (Évaluation des pertes d'azote par Volatilisation Ammoniacale suite à l'épandage d'engrais MINéraux)

Projet de R&D – Echelle Nationale – Instituts techniques (2017 – 2020)

Financé par l'ADEME. Le réseau expérimental permettant d'établir de nouvelles références, mené par Arvalis-Institut du Végétal, l'ITB, Terres Inovia et l'UNIFA, en est à sa deuxième campagne. Parallèlement, les données antérieures au projet ont été rassemblées et la base de données ainsi constituée va permettre d'évaluer les outils opérationnels pour évaluer les émissions d'azote par volatilisation ammoniacale (modèles Syst'N, AzoFert et grille d'évaluation du risque de volatilisation du COMIFER) et de les améliorer si nécessaire. Le projet a également pour ambition de proposer des améliorations des facteurs d'émission des engrais minéraux actuellement utilisés dans les inventaires nationaux, intégrant les leviers agronomiques efficaces mis en évidence.