

Rapport d'étude

(Mars-Septembre 2017)

Construction d'une méthode d'évaluation, pour analyser les performances globales des systèmes de culture innovants : cas de l'expérimentation SEFerSol maraîchage biologique.



par Marie Baelen

Organisme d'accueil : EPLEFPA Les Sillons de Haute Alsace, exploitation Les Jardins du Pflixbourg

Avant-propos

Ce document est issu du mémoire de fin d'études (du même titre et auteur) soutenu pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en horticulture et paysage (Option : horticulture, spécialité : production végétale durable) à Montpellier SupAgro.

Sur les conseils du corps enseignant, des partenaires du projet SEFerSol et du maître de stage, le mémoire de fin d'études a été complété à la suite de la soutenance pour en améliorer sa qualité. Ce rapport d'étude présente donc des modifications et éléments supplémentaires par rapport au mémoire de fin d'études.

Résumé

Construction d'une méthode d'évaluation, pour analyser les performances globales de systèmes de culture innovants : cas de l'expérimentation SEFerSol maraîchage biologique.

Le projet SEFerSol vise à concevoir, tester et évaluer des systèmes de cultures innovants, qui entretiennent la fertilité du sol en maraîchage biologique. Deux systèmes de cultures innovants sont testés, « Engrais vert max » et « Conservation du sol », en comparaison à un système « Référence » qui représente les pratiques courantes des maraîchers en agriculture biologique d'Alsace. Après deux ans d'expérimentation, les porteurs du projet souhaitent construire une méthode d'évaluation adéquate aux objectifs de l'expérimentation et initier l'analyse des systèmes de cultures testés sur quatre critères : la fertilité du sol, l'impact sur la qualité de l'eau, les résultats technico-économiques et sociaux et l'autonomie vis-à-vis des intrants. La méthode d'évaluation proposée est issue d'une démarche participative qui a impliqué les acteurs du projet. Elle consiste à analyser les résultats sous différents angles (analyses graphiques, analyses multicritères...) et à confronter les résultats d'analyses statistiques, avec une analyse par tableau de bord. Cette dernière analyse est plus sensible et a permis d'exprimer un pourcentage de variation des systèmes de culture innovants vis-à-vis du système « Référence ». Face aux limites que peut présenter cette méthode, il est également envisagé de réaliser un tableau de bord basé sur des références régionales pour contextualiser les résultats sur les systèmes étudiés. Enfin, une agrégation des notes des indicateurs, basée sur une arborescence de type DEXi, est préconisée pour obtenir une image des performances globales des systèmes de cultures.

Les premiers enseignements issus du test de la méthode, révèlent que deux années d'expérimentation constituent une période trop courte pour conclure sur les systèmes de cultures innovants. Les systèmes de culture sont probablement en phase de transition. Des éléments permettent cependant de dire que la qualité de l'eau semble moins impactée sur les deux systèmes innovants. Les temps de travaux augmentent dû à la gestion des adventices sur « Engrais vert max » et « Conservation du sol » mais également dû à la pose manuelle de paillage sur ce dernier système. Le système « Engrais vert max » semble obtenir des rendements similaires au système « Référence » ce qui le rend particulièrement efficient. Les conclusions tirées de ces premières analyses sont à confirmer ou non dans la suite du projet SEFerSol.

Mots clés [Systèmes de culture, fertilité du sol, maraîchage biologique, évaluation multicritère, indicateurs de performances, qualité de l'eau]

Abstract

Construction of an assessment method, to analyze overall performances of innovative cropping systems: focus on the organic vegetable crop experimentation, SEFerSol.

The SEFerSol project aims at testing and assessing innovative cropping systems that enhance soil fertility of organic vegetable crops. Two cropping systems are tested, “Max Green Manure” and “Soil conservation”, compared to a system that is used as a reference regarding usual farmer’s practices. After two years of experimentation, the construction of a method to assess the results of the trial is needed. This multi-criteria assessment is based on the analysis of four criteria: soil fertility; impact on water quality; technical, economic and social results; self-sufficiency regarding inputs. The assessment method has been constructed thanks to the implication of the group of technical partners. The method consists in analyzing the results from different angles (graphic analysis, multicriteria analysis...) and confronting the results of both statistical and dashboard methods. The dashboard method is sensitive and enables to interpret indicators by transforming them into a variation rate, relative to the “Reference” crop system. A second dashboard will be considered to interpret the results in another way, to contextualize them regarding regional references. Finally, it is planned to aggregate indicators scores thanks to the Dexi tree structure method, to provide an image of overall performances of the cropping systems.

First results show that two years of experimentation are not long enough to conclude on innovative systems performances. Cropping systems are probably in a transition phase. According to the results, innovative crop systems seem to reduce their impact on water quality. Both innovative systems seem to increase weeding time. The crop system “Soil conservation” also seems to increase working time because of manual mulching. Yields on “Max Green Manure” don’t seem to be different from the yields of the “reference” system, which make that crop system efficient. More results from the next years will reinforce SEFerSol data and confirm or invalidate conclusions of this initial analyze.

Key words [Cropping system, soil fertility, organic vegetable crops, multi-criteria assessment, performance indicator, water quality]

Remerciements

Un grand merci à Guillaume Delaunay pour son encadrement et ses connaissances qui m'ont permis de travailler sur un projet passionnant. Guillaume, merci beaucoup pour tes relectures du mémoire, les nombreuses discussions autour du sujet de stage, mais aussi pour tout ce que tu as partagé au cours de ces 6 mois.

Je remercie les partenaires du projet pour leur implication et leur disponibilité, ainsi que l'EPLEFPA Les Sillons de Haute Alsace pour m'avoir accueillie.

Un merci particulier à Gwenaél Imfeld, Christophe Barbot, Camille Fonteny et Marie-Line Burtin pour leur aide précieuse et encouragements au cours du stage.

Merci à ma tutrice Brigitte Brunel pour ses relectures et sa disponibilité.

Merci au personnel de l'exploitation : Clémence, Lucas, Pierre, Ophélie et Stéphanie pour leur dynamisme permanent et pour avoir pimenté les pauses repas.

A mes colocataires : Justine, J-P, Claire & la petite Lena, Noémie et Christophe. Merci pour m'avoir accueilli pendant cette période studieuse. Un grand merci pour leur joie de vivre, leurs connaissances alternatives et pour m'avoir montré différents chemins de vie possibles.

Table des matières

Avant-propos	1
Résumé.....	2
Abstract.....	3
Remerciements.....	4
Table des matières.....	5
Table des figures.....	8
Table des tableaux.....	10
Sigles et acronymes	12
Introduction	13
Partie 1 : Etat des connaissances et problématique	15
I. Le sol, un organisme vivant.....	15
I.1 Généralités sur le fonctionnement du sol	15
I.2 Qu'est- ce que la fertilité du sol ?.....	15
II. Pratiques culturales d'entretien de la fertilité en maraîchage biologique	16
II.1 La nutrition de la plante et du sol.....	16
II.2 Le travail du sol.....	17
III. Systèmes de culture innovant en fertilité du sol en maraîchage	18
III.1 La conception de SdC innovants.....	18
III.2 L'évaluation de SdC innovants en fertilité du sol	18
IV. Démarche d'évaluation multicritère	19
IV.1 L'évaluation multicritère et les choix préalables à l'évaluation	19
IV.2 L'utilisation d'indicateurs de performances.....	20
IV.2.1 L'interprétation des indicateurs	20
IV.2.2 La synthèse et l'agrégation des indicateurs.....	21
IV.3 Choisir ou construire une méthode d'évaluation multicritère ?.....	21
IV.3.1 Les méthodes existantes.....	21
IV.3.2 La construction d'une méthode ad hoc	22
V. Insertion de l'étude dans le projet SEFerSol.....	22
V.1 Les grandes lignes du projet SEFerSol	22
V.2 Leviers d'actions mobilisés et hypothèses sur les systèmes de cultures	23
V.3 Objectifs de l'étude	24
Partie 2 : Matériel et méthodes	26

I. Description du site expérimental.....	26
I.1. Contexte pédoclimatique	26
I.2. Le dispositif expérimental	27
I.3. Conduite des Systèmes de Culture.....	28
II. Mesures expérimentales.....	28
II.1. Collecte des échantillons.....	28
II.2. Indicateurs du projet SEFerSol	29
III. Méthode d'analyse des résultats.....	31
III.1. Evaluation critère par critère des performances des SdC	31
III.1.1 Analyse statistique des indicateurs.....	31
III.1.2 Analyse des performances des systèmes par critères	32
III.2. Evaluation multicritère des indicateurs de performances des SdC.....	32
III.2.1 Construction d'un tableau de bord relatif aux objectifs des SdC.....	32
III.2.2 Schéma de la méthode d'analyse de l'étude	33
Partie 3 : Résultats.....	35
I. Critère de fertilité du sol	35
I.1 Variabilité inter-systèmes par années et parcelles	35
I.2 Analyse multivariée de la fertilité du sol.....	38
II. Critère de l'impact sur la qualité de l'eau.....	39
II.1 Evolution des reliquats azotés	39
II.2 Evolution du drainage	40
II.3 Estimation du risque de lixiviation azotée	41
III. Critère basé sur les résultats technico-économiques et sociaux.....	42
IV. Critère d'autonomie vis-à-vis des intrants	43
Partie 4 : Discussion.....	44
I. Analyse des résultats	44
I.1 Impacts des SdC sur la fertilité du sol.....	44
I.2 Impacts des systèmes de cultures sur la qualité de l'eau	46
I.2.1 Fertilisation et dynamique des reliquats azotés dans le sol	46
I.2.2 Couverts végétaux et dynamique du drainage	47
I.2.3 Impact des SdC sur la concentration en nitrates dans la lame d'eau drainante.....	47
I.3 Impacts sur les paramètres technico-économiques et sociaux et de l'autonomie vis-à-vis des intrants	48
I.3.1 Impacts des SdC sur les paramètres technico-économiques et sociaux.....	48
I.3.2 Efficience de l'utilisation des ressources pour les SdC innovants	48
I.4 Les SdC répondent-ils à leurs objectifs initiaux ?	49
I.4.1 Tableaux de bords des différents critères.....	49
I.4.2 Synthèse des principales tendances	51
II Limites de la méthode et améliorations possibles	52
II.1 Limites de la méthode proposée	52
II.1.1 Incertitudes et approximations liées aux indicateurs choisis.....	52

II.1.2 Analyse de la méthode d'évaluation proposée.....	53
II.1.3 Amélioration des indicateurs de performances.....	54
II.2 Propositions d'améliorations de la méthode et perspectives pour le projet SEFerSol	55
II.2.1 Analyser les résultats par rapport à des références « dans l'absolu ».....	55
II.2.2 Synthétiser les performances par l'agrégation	55
II.2.3 Améliorer la méthodologie d'analyse de la fertilité du sol	55
Conclusion.....	56
Bibliographie.....	58
ANNEXES	61

Table des figures

<i>Figure 1 : La décomposition des MO fraîches d'après (Duchaufour 1984)</i>	<i>16</i>
<i>Figure 2: Vue d'ensemble du site expérimental SEFerSol.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure 3: succession culturale envisagée sur le dispositif expérimental SEFerSol.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure 4: plan d'expérimentation du dispositif SEFerSol</i>	<i>28</i>
<i>Figure 5: Schéma de la méthode utilisée dans le cadre de l'étude</i>	<i>34</i>
<i>Figure 6 : Biomasse fongique exprimée en ng d'ADN/g de sol sur SEFerSol 1 en année 2(A) et consommation en oxygène du sol en mg O₂/g de MS en sur SEFerSol 2 pour l'année 1(B)</i>	<i>35</i>
<i>Figure 7: Nombre de vers de terre dénombrés et composition par classe déterminées pour chacun des 3 SdC sur 3 ans.</i>	<i>36</i>
<i>Figure 8 : Temps d'infiltration de l'eau dans le sol en Juin sur SEFerSol 1 en année 1 (A) et sur SEFerSol 2 en année 3 (B).</i>	<i>37</i>
<i>Figure 9 : Quantité d'agrégats stables à l'eau sur SEFerSol 1 année 2 (A) et SEFerSol 2 année 1 (B)</i>	<i>37</i>
<i>Figure 10 : Graphique des individus (A) et des variables (B) sur les indicateurs de la fertilité du sol. Le « biplot » de l'ACP est présenté en Annexe 8.</i>	<i>38</i>
<i>Figure 11 : Evolution des reliquats azotés sur la parcelle SEFerSol 1 (trois années)</i>	<i>39</i>
<i>Figure 12 : Evolution des reliquats azotés sur la parcelle SEFerSol 2 (deux années).....</i>	<i>40</i>
<i>Figure 13 : quantité d'eau drainée en (mm) sur SEFerSol 1 (3 années)</i>	<i>40</i>
<i>Figure 14 : quantité d'eau drainée en mm sur SEFerSol 2 (2 années)</i>	<i>41</i>
<i>Figure 15 : Concentration de nitrates potentiellement lixivié dans la lame d'eau drainante sur SEFerSol 1 (3 années).....</i>	<i>41</i>
<i>Figure 16 : Concentration de nitrates potentiellement lixivié dans la lame d'eau drainante sur SEFerSol 2 (2 années).....</i>	<i>42</i>
<i>Figure 17 : Performances technico-économiques et sociales de la parcelle SEFerSol 1 (moyenne sur les deux premières années, exprimée en pourcentage de variation par rapport à SdC 1).</i>	<i>42</i>
<i>Figure 18 : Performances technico-économiques et sociales de la parcelle SEFerSol 2 (année 1, valeurs exprimées en pourcentage de variation par rapport à SdC 1).</i>	<i>43</i>

<i>Figure 19 : Performances d'autonomie vis-à-vis des intrants de la parcelle SEFerSol 1 (moyenne sur les deux premières années, exprimée en pourcentage de variation par rapport à SdC 1).</i>	43
<i>Figure 20 : Performances d'autonomie vis-à-vis des intrants de la parcelle SEFerSol 2 (année 1, exprimée en pourcentage de variation par rapport à SdC 1).</i>	44
<i>Figure 21 : Efficience moyenne d'utilisation des intrants sur SEFerSol 1 (2 années).</i>	49
<i>Figure 22: Butteuse à planche</i>	62
<i>Figure 23: Vibroplanche</i>	62
<i>Figure 24: Cultibutte avec herse</i>	62
<i>Figure 25: parcelle SEFerSol 1</i>	64
<i>Figure 26: parcelle SEFerSol 2</i>	64
<i>Figure 27: Itinéraire technique sur SEFerSol 1 année 1 SdC 1</i>	65
<i>Figure 28 : Itinéraire technique sur SEFerSol 1 année 1 SdC 2</i>	66
<i>Figure 29: Itinéraire technique sur SEFerSol 1 année 1 SdC 3</i>	67
<i>Figure 30: Itinéraire technique sur SEFerSol 2 année 1 SdC 2</i>	68
<i>Figure 31 : Carbone potentiellement minéralisé sur SEFerSol 1 année 1 (A) année 2 (B) et SEFerSol 2 année 1 (C) année 2 (D) en mg/kg/28j</i>	79
<i>Figure 32 : Azote potentiellement minéralisé sur SEFerSol 1 année 1 (A) année 2 (B), année 3 (C) et SEFerSol 2 année 1 (D) année 2 (E) en mg/kg/28j</i>	80
<i>Figure 33: Rendement commercialisable sur SEFerSol 1 pluriannuel (A) année 2 (B) et SEFerSol 2 année 1 (C) en kg/are</i>	81
<i>Figure 34 : Analyse en composante principale de l'ensemble des indicateurs de la fertilité du sol</i>	82
<i>Figure 35 : Risque de lixiviation des nitrates vis-à-vis des pratiques culturales et du drainage. SEFerSol 1 SdC 1</i>	83
<i>Figure 36 : Risque de lixiviation des nitrates vis-à-vis des pratiques culturales et du drainage. SEFerSol 1 SdC 2</i>	83
<i>Figure 37 : Risque de lixiviation des nitrates vis-à-vis des pratiques culturales et du drainage. SEFerSol 1 SdC 1</i>	84
<i>Figure 38 : Risque de lixiviation des nitrates vis-à-vis des pratiques culturales et du drainage. SEFerSol 1 SdC 3</i>	84

<i>Figure 39 : Risque de lixiviation des nitrates vis-à-vis des pratiques culturales et du drainage.</i>	
<i>SEFerSol 2 SdC 1.....</i>	<i>85</i>

<i>Figure 40 : Risque de lixiviation des nitrates vis-à-vis des pratiques culturales et du drainage.</i>	
<i>SEFerSol 2 SdC 2.....</i>	<i>85</i>

<i>Figure 41 : Schéma méthodologique final pour l'analyse des résultats du projet SEFerSol.....</i>	<i>87</i>
---	-----------

Table des tableaux

<i>Tableau 1: Leviers d'actions mis en place pour conduire les systèmes de cultures.....</i>	<i>23</i>
<i>Tableau 2: indicateurs de la fertilité du sol</i>	<i>29</i>
<i>Tableau 3: indicateurs de l'impact sur la qualité de l'eau</i>	<i>30</i>
<i>Tableau 4: Indicateurs de résultats.....</i>	<i>29</i>
<i>Tableau 5: Indicateurs d'autonomie.....</i>	<i>30</i>
<i>Tableau 6: Méthode d'analyses des performances des SdC par critère</i>	<i>32</i>
<i>Tableau 7 : Tableau de bord du critère « impact sur la qualité de l'eau »</i>	<i>50</i>
<i>Tableau 8: Tableau de bord du critère « résultats technico-économiques et sociaux »</i>	<i>50</i>
<i>Tableau 9: Tableau de bord du critère « autonomie vis-à-vis des intrants »</i>	<i>50</i>
<i>Tableau 10: Tableau de bord du critère « fertilité du sol ».</i>	<i>51</i>
<i>Tableau 11: Evaluation de la méthodologie proposée pour l'analyse des résultats</i>	<i>53</i>
<i>Tableau 12 : Méthodes de transformations des indicateurs utiles à leur interprétation.....</i>	<i>63</i>
<i>Tableau 13: Méthode de modélisation du drainage par calcul du bilan hydrique.</i>	<i>69</i>
<i>Tableau 14 : Justification des analyses utilisées et des choix de représentation</i>	<i>71</i>
<i>Tableau 15 : Les différentes échelles d'analyses possibles : comment et pourquoi les utiliser.....</i>	<i>74</i>
<i>Tableau 16: p value obtenues pour chaque indicateur du critère de fertilité du sol.</i>	<i>75</i>
<i>Tableau 17: p value obtenues pour chaque indicateur du critère de l'impact sur la qualité de l'eau..</i>	<i>76</i>
<i>Tableau 18: p value obtenues pour chaque indicateur du critère basé sur les résultats technico-économiques et sociaux.</i>	<i>76</i>
<i>Tableau 19: p value obtenues pour chaque indicateur du critère d'autonomie vis-à-vis des intrants.</i>	<i>77</i>

<i>Tableau 20: observations issues du test bêche sur SEFerSol 2 en Juin 2017</i>	<i>78</i>
<i>Tableau 21: Tableau de bord du critère « fertilité du sol » : indicateurs qui nécessitent une analyse en fonction de leur évolution théorique</i>	<i>86</i>

Sigles et acronymes

SEFerSol: Systèmes d'Entretien de la Fertilité du Sol

EPLEFPA: Etablissement Public Local d'Enseignement et de Formation Professionnelle Agricole

SdC: Système de Culture

MO: Matière organique

CEC: Capacité d'échange cationique

RMT: Réseau mixte technologique

GEDUBAT: GEstion DURable des BioAgresseurs Telluriques dans les systèmes maraîchers sous abris

LILLA: Limitation de la lutte chimique en culture de laitues par l'introduction et la combinaison de méthodes culturales

SYSLEG: SYStèmes de production intégrée de cultures LEGumières sous abri non chauffé

MASC: Multi-attribute Assessment of the Sustainability of Cropping systems

ARAA: Association pour la Relance Agronomique en Alsace

OPABA: Organisation Professionnelle de l'Agriculture Biologique en Alsace

BRF : Bois Raméal Fragmenté

CV : Couvert Végétal

RU : Réserve Utile

ACP : Analyse en composante principale

GRAB : Groupement de Recherche en Agriculture Biologique

ITAB : Institut Technique de l'Agriculture Biologique

Introduction

Depuis la seconde moitié du 20^{ème} siècle en France, l'agriculture s'est intensifiée dans le but d'augmenter les rendements. L'usage important de pesticides et de fertilisants ainsi que le travail du sol répété et mécanisé, ont été privilégiés. Or dans les années 90, les limites du modèle agricole intensif ont fait surface. L'agriculture a alors été observée au travers des impacts des produits phytosanitaires sur la santé et l'environnement (Tilman et al. 2002). Ces changements participent à la redéfinition de l'agriculture, on reconnaît désormais qu'elle est multifonctionnelle. En effet, au-delà de l'alimentation des populations, l'agriculture forme le paysage, agit sur les écosystèmes et les ressources naturelles, caractérise les territoires (OCDE 2001). L'agriculture est devenue un enjeu incontournable du développement durable. Cette dynamique a également permis de se rendre compte de l'épuisement des sols, de leur importance et de leur complexité (FAO 2011). Le sol n'est pas uniquement un support nutritif, mais il est un élément de connexion vivant, entre les pratiques agricoles et l'environnement. Aussi, il est nécessaire d'étudier l'effet des pratiques agricoles sur les sols, afin qu'ils conservent leurs qualités (Gis Sol 2013).

Pour répondre aux nouvelles exigences sociétales et faire évoluer le monde agricole sur les plans sociaux, économiques et environnementaux, les différents acteurs engagent une réflexion autour de la conception de systèmes agricoles et de la mobilisation de techniques alternatives. Il s'agit d'innover, dans le sens où les systèmes de cultures répondent à de nouveaux objectifs, par de nouvelles technologies ou de nouvelles combinaisons de techniques. Pour le monde scientifique, l'enjeu est également de produire de nouvelles références, qui permettront de guider au mieux les choix de techniques agricoles (Reau et Doré 2008). Pour cela, une approche expérimentale comme celle développée dans l'expérimentation « système de culture », est un outil qui permet d'analyser l'effet de nombreuses et complexes interactions entre plusieurs techniques sur l'agroécosystème (Deytieux et al. 2012). Par cette forme d'expérimentation, les systèmes de cultures innovants peuvent être évalués sur plusieurs critères, à partir d'un jeu d'indicateurs. L'évaluation multicritère permet de vérifier si les systèmes de cultures testés atteignent leurs objectifs. Sa complexité réside dans la recherche d'une méthode permettant d'analyser un nombre important d'indicateurs, pour répondre à un problème à plusieurs dimensions. Ce type d'évaluation permet de saisir une réalité complexe, mais doit faire des compromis entre volonté de représenter au mieux plusieurs enjeux et simplifier les mécanismes évalués (Lairez et al. 2015).

A l'exploitation horticole Les Jardins du Pflixbourg de l'EPLEFPA Les Sillons de Haute Alsace, le projet « SEFerSol maraîchage biologique », s'insère dans cette nouvelle dynamique. Il vise à concevoir, tester et évaluer des systèmes de cultures innovants qui entretiennent la fertilité du sol en maraîchage biologique. Les cultures maraîchères sont intéressantes pour cette problématique puisque les rotations sont souvent rapides, le sol est

très sollicité. Parfois le passage d'engins mécanisés se fait dans de mauvaises conditions de portance et de ressuyage (Vedie et Romet 2008). De plus en Alsace, certains sols très sableux et caillouteux sont particulièrement drainants et des pratiques de fertilisation intensive en agriculture biologique comme en agriculture conventionnelle, peuvent contaminer les nappes. L'expérimentation système pluriannuelle SEFerSol, a démarré en 2015. Deux systèmes de culture innovants sont testés : l'un avec un apport maximal d'engrais verts dans la succession culturale et l'autre géré avec une approche de conservation du sol. Ces deux systèmes sont comparés à un troisième système de référence qui a été construit selon les pratiques culturales des maraîchers en agriculture biologique d'Alsace. Bien que l'attention soit portée prioritairement sur la fertilité du sol, d'autres critères sont observés pour évaluer les systèmes de cultures : l'impact sur la qualité de l'eau, les résultats technico-économiques et sociaux et l'autonomie vis-à-vis des intrants. Un des enjeux du projet est donc de développer une méthode qui permette d'évaluer au mieux les systèmes de cultures innovants sur ces critères, sachant que jusque-là, en maraîchage biologique, la fertilité du sol a été peu explorée dans ce type d'évaluation.

En poursuivant en 2017 la troisième année d'expérimentation, les porteurs de ce projet souhaitent entamer une démarche d'évaluation des systèmes de cultures testés. **On cherchera donc à construire une méthode d'évaluation adéquate aux objectifs de l'expérimentation « SEFerSol maraîchage biologique ». On évaluera ensuite les performances globales des systèmes de culture innovants sur la fertilité du sol aux Jardins du Pflixbourg en Alsace.** Après un état des connaissances sur le sujet et une présentation de la méthode d'évaluation utilisée, ce mémoire présente les premiers enseignements de l'expérimentation SEFerSol.

Partie 1 : Etat des connaissances et problématique

I. Le sol, un organisme vivant

I.1 Généralités sur le fonctionnement du sol

Le sol est un volume complexe formé par l'altération des minéraux de la roche mère, où des dimensions biologiques, chimiques et physiques interagissent constamment. Il est un milieu organisé sur plusieurs échelles d'espace et de temps. A la fois formé par la pédogenèse sur des milliers d'années, il est également modifié, sur les premiers centimètres, par les pratiques agricoles à l'échelle d'une année (INRA 2010). Or le sol est une ressource fragile qui s'épuise, (Huber et Schaub 2011) il est donc nécessaire de le connaître et de pouvoir maîtriser l'impact des pratiques agricoles sur son état.

Le sol est constitué de trois fractions. Les minéraux, les composés organiques et êtres vivants forment la fraction solide. La solution du sol forme la fraction liquide. Cette dernière est composée d'eau dans laquelle des éléments solubles issus de l'altération des roches, de la décomposition des matières organiques et des apports d'engrais ou divers amendements par l'homme, transitent continuellement. Enfin, la fraction gazeuse est l'air qui transite dans les pores du sol. Elle est composée de l'atmosphère et de gaz provenant de la décomposition des matières organiques (Soltner 2000).

Les constituants du sol interagissent constamment et lui confèrent ses propriétés. C'est la dynamique entre les propriétés physico-chimiques et biologiques qui caractérise le fonctionnement propre à chaque type de sols (Gobat et al. 2010). La plante est à l'interface entre le sol et l'atmosphère où elle trouve les éléments nécessaires à sa croissance (Soltner 2000).

I.2 Qu'est- ce que la fertilité du sol ?

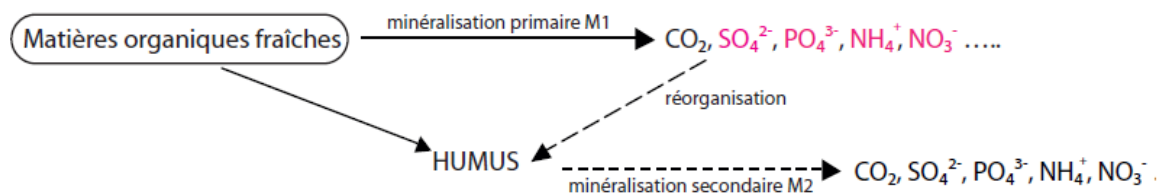
On trouve de nombreuses définitions dans la littérature. Selon (Morel 1989a), la fertilité d'un sol correspond à la facilité pour la plante, de capter en quantité suffisante dans le sol tous les éléments essentiels à sa croissance. La notion de fertilité des sols, a donc été définie uniquement par rapport aux fonctions de production qui intéressent l'homme (Chaussod 1996).

Aujourd'hui, cette notion de fertilité tend à être remplacée par la notion de « qualité des sols » (Chaussod 1996). Cette notion ne se limite pas à la nutrition et croissance des cultures mais prend en compte les diverses fonctions écosystémiques auxquelles le sol contribue (stockage du carbone, biodiversité, qualité de l'eau...). Ce concept reste encore subjectif, car ce que la société définit comme une qualité peut évoluer avec le temps et changer en fonction des groupes sociaux. Selon (Andrews, Karlen, et Cambardella 2004), on reconnaît la qualité d'un sol à sa capacité à fonctionner, c'est-à-dire à réaliser ses fonctions. Un sol de qualité doit pouvoir retenir et faire circuler l'eau, retenir et faire circuler les solutés et les nutriments, être un support physique stable, filtrer les éventuels éléments toxiques et conserver une biodiversité et activité biologique diversifiée.

Au centre de ces différentes fonctions, le rôle de la matière organique et de l'activité biologique apparaissent comme prépondérants. Les organismes du sol, par leur abondance,

leur diversité et leur activité, participent à l'entretien de la structure des sols et à la décomposition de la matière organique (MO). La matière organique joue un rôle capital dans la fertilité du sol dans la mesure où elle apporte les éléments nécessaires à la plante, stimule l'activité des organismes, structure et stabilise le sol (Chambre régionale d'agriculture du Languedoc-Roussillon 1997).

La minéralisation primaire de la MO apportée au sol (matière organique fraîche, figure 4) est rapide et permet la libération d'éléments nutritifs ou leur absorption par le complexe argilo humique. La minéralisation secondaire de la MO affecte l'humus (MO du sol) du sol et



libère lentement les éléments nutritifs (Duchaufour 1984).

Figure 1 : La décomposition des MO fraîches d'après (Duchaufour 1984)

On note deux dynamiques principales dans l'évolution de la matière organique. D'une part celle de la matière organique dite libre ($> 50\mu\text{m}$) qui se dégrade rapidement, jusqu'à 5 ans pour la fraction rapide et jusqu'à 30 ans pour la fraction plus lente. D'autre part, celle de la matière organique dite liée aux argiles et limons ($< 50\mu\text{m}$), qui se dégrade lentement avec un temps de résidence supérieur à 100 ans (Chambre régionale d'agriculture du Languedoc-Roussillon 1997).

Les interactions entre l'activité biologique et la matière organique permettent à des colloïdes de se former. Ces colloïdes favorisent une texture grumeleuse du sol et une structure aérée qui permet à l'eau de circuler. En effet, ils forment le complexe argilo-humique et assurent la cohésion entre les agrégats. La stabilité des agrégats du sol, lui permettent d'être résilient face à l'érosion ou à la compaction. Le complexe argilo-humique permet de fixer ou de libérer les éléments nutritifs dans la solution du sol, son rôle est essentiel dans la capacité du sol à échanger les cations (Soltner 2000).

II. Pratiques culturales d'entretien de la fertilité en maraîchage biologique

II.1 La nutrition de la plante et du sol

En agriculture biologique, les producteurs ont aujourd'hui accès à des produits de nature, d'origine et de caractéristiques très différentes pour nourrir la plante. Certains, composés de matières organiques très stables, vont alimenter le stock de carbone stabilisé dans le sol. D'autres sont constitués de matières organiques plus labiles, leur dégradation dans le sol est très rapide. Un essai mené pendant 15 ans à la SERAIL a comparé l'effet de différents amendements organiques sur le sol. L'étude a mis en évidence l'importance pour le statut organique du sol de combiner l'apport de produits stables (compost d'écorce, de déchets verts) aux apports de matières plus rapidement dégradables comme les fumiers (Dragon et Icard 2010).

L'utilisation des engrais verts est également une technique intéressante pour la production biologique (Mazollier et Védie 2003). Elle permet d'agir simultanément sur la fixation des éléments nutritifs du sol, la restitution de matière organique, la structuration du sol par le travail des systèmes racinaires, de rompre les successions d'espèces légumières et de contenir le développement des espèces adventices.

Des travaux ont également été menés, dans le cadre du programme SolAB, sur la couverture du sol à l'aide de différentes matières utilisées en mulch (Bois Raméal Fragmenté, paille, compost de déchets verts). Des faims d'azote ont été observées sur la modalité avec apport de BRF (Clerc 2012).

II.2 Le travail du sol

Il existe une diversité de pratiques possibles en matière de travail du sol en maraîchage biologique : labour, labour occasionnel, travail superficiel, non labour, travail en planches permanentes, semis direct sous couvert, conservation du sol (Cadillon et Fourrié 2014)

L'optimisation et la simplification du travail du sol en maraîchage biologique a fait l'objet d'études en réseau (GRAB, SERAIL) coordonné par l'ITAB (2005-2007) et qui a porté sur le travail en planches permanentes comparé à un travail du sol classique. Sur l'unique site où l'expérimentation a duré 10 ans et avec des outils spécifiquement conçus pour la technique des planches permanentes, des effets positifs sur la fertilité du sol, notamment sur la structure du sol dans les 15 premiers centimètres, ont pu être démontrés (Védie et al. 2012). Les outils des planches permanentes sont présentés en Annexe 1.

La réduction du travail du sol peut présenter plusieurs difficultés : le ralentissement du cycle de l'azote dans le sol, en particulier au début de la transition vers ce type de systèmes (Bodiou 2009), nécessitant alors des apports d'azote organique. Des difficultés de maîtrise de l'enherbement, qui peuvent être réglées par des techniques d'occultation à l'aide de bâches. L'une des principales difficultés réside aussi dans le manque d'accès à du matériel adapté au non travail du sol, en particulier pour l'implantation des cultures (semis, plantation) et la destruction des couverts.

L'agriculture de conservation est une pratique prometteuse qui combine la couverture du sol associée à des rotations de cultures et au non travail du sol. D'après (Craheix et al. 2016) des effets positifs sur la durabilité des systèmes des cultures ont été démontrés si l'ensemble des principes de cette pratique sont respectés. Des difficultés d'ordres social et agronomique ont cependant été reportées et doivent être prises en compte. Pour parvenir à mieux gérer la fertilité de leur sol, les maraîchers ont besoin de références et de repères, à la fois sur les facteurs influençant la fertilité du sol, mais également sur la combinaison de ces facteurs. L'expérimentation système est un outil permettant de répondre à ce besoin.

III. Systèmes de culture innovant en fertilité du sol en maraîchage

III.1 La conception de SdC innovants

Face aux nouvelles préoccupations sociétales, l'expérimentation « système de culture » (SdC) est un outil qui permet de traiter les enjeux du développement durable (Deytieux et al. 2012). Ce type d'expérimentation a pour but de tester un ensemble de stratégies et des combinaisons de techniques qui permettent de satisfaire des objectifs. L'expérimentation « système » est différente de l'expérimentation factorielle, où on recherche plutôt le meilleur système de culture pour un contexte expérimental précis, toutes choses étant égales par ailleurs (Reau et Doré 2008).

Par système de culture, on entend l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique. Un système de culture se caractérise par la nature des cultures, leur succession et les itinéraires techniques appliqués (Sebillote 1990).

L'expérimentation système s'inscrit dans un processus de conception de systèmes innovants, d'évaluation et d'adaptation continue de ces systèmes (Deytieux et al. 2012).

Des réseaux comme le RMT système de cultures innovant se mobilisent pour concevoir, tester et évaluer des systèmes de cultures innovants majoritairement en grandes cultures ou polyculture élevage. Par ailleurs, plusieurs expérimentations comme les projets GEDUBAT, LILLA, ou 4SYSLEG de l'INRA visent à reconcevoir des systèmes de cultures innovants en maraîchage, la réduction des produits phytosanitaires étant leur axe de travail principal.

Il existe quelques projets qui, tout comme le projet SeFerSol maraîchage biologique, conçoivent des systèmes de cultures innovants en fertilité du sol en maraîchage. Le projet SolAB porté par l'ITAB ou le projet SoilVeg porté par le GRAB en sont des exemples. Cependant ces projets ont également révélés l'absence de références adaptées au maraîchage dans ce domaine (Vedie 2010). De nouvelles pratiques de gestion de la fertilité des sols sont testées, dans des démarches d'expérimentation systèmes. Il en découle un besoin méthodologique important pour évaluer ces pratiques et systèmes de cultures innovants (Cadillon et Fourrié 2014).

III.2 L'évaluation de SdC innovants en fertilité du sol

Selon (Acton 1994) un indicateur de la qualité du sol est une propriété mesurable, qui influence la capacité du sol à effectuer une fonction donnée. Un indice global de la qualité du sol serait donc défini par l'ensemble des paramètres qui apportent des informations sur la capacité du sol à exécuter ses fonctions.

De nombreux travaux ont déjà cherché à évaluer la qualité d'un sol, les travaux des américains (Karlen et al. 1997) ont été parmi les premiers à considérer la fertilité du sol comme multiparamétrique (Bastida et al. 2008). Suivant les groupes de recherches impliqués et les fonctions attribuées au sol, différents types d'indicateurs sont sélectionnés. Certains sont facilement mesurables au champ (infiltrométrie, test bêche, comptages de vers de terre) d'autres sont le fruit d'analyses en laboratoires (taux de MO, quantité de phosphore extractible, C/N, CEC).

Il existe un foisonnement d'indicateurs pour évaluer la fertilité du sol mais pas de consensus sur la façon de les utiliser (Bastida et al. 2008). Pourtant, c'est le choix et

l'assemblage de ces indicateurs qui va rendre compte de la complexité de la fertilité du sol (Koller, Schaub, et Theau En cours de préparation).

Plusieurs projets ont pour objectif d'évaluer la fertilité du sol en fournissant une interprétation et une synthèse d'indicateurs. Par exemple, le département de l'agriculture aux Etats Unis, a publié en 2001 un guide regroupant un ensemble d'indicateurs avec des valeurs de références issues de publications permettant leur interprétation (USDA 1999). En 2016, l'université de Cornell a publié un guide pour l'évaluation de la santé des sols. Chaque indicateur y est évalué en se basant sur des fonctions mathématiques. C'est la moyenne des scores des indicateurs qui donne la note globale de la fertilité du sol (Moebius-Clune 2016). En France, le programme BioIndicateurs lancé par l'ADEME permet la création d'un référentiel pour interpréter les valeurs des indicateurs. Par ailleurs, le projet AGRINNOV porté par L. Ranjard à l'INRA, propose un tableau de bord des indicateurs de la fertilité du sol, constitué des scores obtenus par les indicateurs, suivant un référentiel propre au projet. La note moyenne des scores fournit une appréciation globale de la fertilité du sol (Cérémonie et al. 2017). En maraîchage biologique, peu de données et de référentiels sont disponibles pour l'interprétation de ces indicateurs.

Les recherches actuelles convergent pour reconnaître que la fertilité du sol est multifactorielle. Un seul indicateur ou critère, ne suffit pas à rendre compte de sa complexité (Koller, Schaub, et Theau En cours de préparation). Une démarche d'évaluation multicritère est donc intéressante pour approcher de manière globale la fertilité du sol.

IV. Démarche d'évaluation multicritère

IV.1 L'évaluation multicritère et les choix préalables à l'évaluation

Plusieurs projets et acteurs ont déjà conçu et utilisé différentes méthodes d'évaluation multicritères. Aujourd'hui, il existe un panel assez large de méthodes multicritères (Bockstaller et al. 2008). Selon les acteurs qui s'engagent dans cette démarche, leur point de vue, la question initiale qui est posée, les destinataires des résultats, la démarche d'évaluation sera différente (Lairez et al. 2015). La méthode choisie peut être sélectionnée parmi le panel existant, elle peut être adaptée d'une méthode ou bien développée. La méthode doit être précise et transparente. Une démarche d'évaluation est composée de plusieurs étapes :

- **Les réflexions préalables** : Après identification du besoin d'évaluation, il convient de définir le groupe d'acteurs impliqué c'est à dire les commanditaires, les évaluateurs et les destinataires de l'évaluation.
- **Les choix préalables** : Le groupe d'acteur définit les finalités de l'évaluation. On peut chercher à connaître le système étudié, communiquer sur ce système, le piloter, identifier les éléments à améliorer... Il faut de plus définir les frontières du système étudié, les flux et les effets qui seront pris en compte. Enfin, selon les données disponibles et les choix précédents, la question du choix ou de la construction d'une méthode se pose. La construction d'une méthode permet la prise en compte d'enjeux nouveaux et d'adapter la méthode au projet ce qui peut être complexe et chronophage. L'utilisation d'une méthode existante peut permettre de gagner du

temps, de plus les limites et biais sont connus à l'avance. La méthode doit cependant correspondre aux finalités définies précédemment, ce qui n'est pas forcément le cas.

- **La méthodologie** : Une fois les réflexions et choix préalables réalisés, le groupe d'acteur choisira la méthode. Si le choix est de construire une méthode, d'autres décisions sont à prendre concernant les indicateurs sélectionnés, leur importance et comment ils seront interprétés.
- **L'évaluation** : Le groupe d'acteur utilisera ensuite la méthode choisie ou élaborée. Finalement, des questions d'interprétation des résultats et de format de communication se posent.

IV.2 L'utilisation d'indicateurs de performances

IV.2.1 L'interprétation des indicateurs

Quelques soient les choix de méthode, une évaluation multicritère s'appuie sur la manipulation d'indicateurs qui représentent des critères ou dimensions du système étudié.

D'après (Craheix et al. 2015), les critères sont des principes qui permettent de juger les performances des SdC. Ils sont toujours estimés ou décrits par des indicateurs qui permettent leur interprétation ». Par exemple, la fertilité du sol est un critère qui peut être estimé par des indicateurs tels que la porosité, la structure, la Capacité d'Echange Cationique.

Un indicateur peut être le résultat d'une mesure, d'une combinaison de données, de calculs simples ou de la simulation d'un modèle. On recense des indicateurs de pilotage du système, des indicateurs d'état, de pression ou d'émission, (Bockstaller et al. 2008). Selon (Maurizi et Verrel 2002) dans l'idéal, l'indicateur doit être sensible au changement attendu, fondé sur des données fiables, accessible et accepté par les utilisateurs.

Lorsque les indicateurs sont choisis, il convient d'interpréter les valeurs issues de leur mesure ou de leur calcul. La valeur absolue d'un indicateur ne permet pas de savoir si l'impact d'un système est acceptable ou non. Pour interpréter un indicateur, il convient de le positionner par rapport à une ou des valeurs de référence. D'après (Acosta-Alba et Van der Werf 2011), c'est la distance entre la valeur de l'indicateur et la valeur de référence qui permettra de juger le système étudié. Selon (Acosta-Alba et Van der Werf 2011), il existe deux types de références :

La valeur de référence peut être **absolue**, c'est-à-dire issue de publications scientifiques ou d'un consensus sociétal. Dans ce cas, on définit que le système doit atteindre une valeur cible ou ne doit pas dépasser une certaine valeur limite. La valeur de référence peut être **relative**, basée sur la comparaison à d'autres systèmes dans le temps ou dans l'espace.

Le choix de la valeur de référence est donc une étape méthodologique délicate qui dépend des choix des acteurs. Elle est en partie relative au choix de l'utilisateur et sa pertinence dépend du domaine de validité de la référence choisie, c'est pourquoi les choix doivent être justifiés et transparents.

Dans une évaluation multicritère, les indicateurs peuvent être nombreux et exprimés dans des unités différentes. Si on souhaite affiner l'interprétation des indicateurs et les comparer entre eux, pour pouvoir juger d'un critère, il est intéressant d'avoir recours à la transformation de ces indicateurs. Selon (Lairez et al. 2015), différents types de transformations sont possibles et présentés dans l'Annexe 2.

IV.2.2 La synthèse et l'agrégation des indicateurs

L'agrégation des indicateurs permet de les synthétiser pour représenter et juger un critère. On peut également agréger des critères entre eux, afin de représenter la durabilité d'un système ou ses performances globales. Cette démarche est souvent utilisée pour simplifier la représentation de phénomènes complexes (Lairez et al. 2015). Ceci permet aux commanditaires d'un projet d'émettre un jugement et de prendre des décisions en fonction de ce jugement. L'agrégation est également un outil intéressant si la communication est l'un des objectifs de l'évaluation. En effet, la simplification du jugement par l'agrégation permet d'ouvrir le dialogue avec des personnes extérieures au projet, voire non expertes (Nardo et al. 2005).

Chaque démarche possède des biais et est sujette aux décisions des acteurs. En effet, on peut hiérarchiser et pondérer les indicateurs ou les critères suivant l'importance qu'on souhaite leur accorder. Des problèmes de compensation entre indicateurs ou critères peuvent avoir lieu et mettre en péril la pertinence de la méthode. Par exemple, une note de durabilité correcte peut masquer une mauvaise note pour le critère environnemental, agrégée à une bonne note pour le critère économique (Nardo et al. 2005).

En choisissant ce type d'approche, les acteurs prennent le risque de se confronter à des écueils méthodologiques qui s'ajouteront à ceux de l'étape précédente d'interprétation des indicateurs. C'est pourquoi il faut au préalable s'assurer de la pertinence d'agréger vis-à-vis des objectifs du projet. Une fois l'agrégation engagée, il est nécessaire de pouvoir expliquer tous les choix avec transparence et de pouvoir fournir et communiquer sur l'information désagrégée (Lairez et al. 2015; Sadok et al. 2009).

IV.3 Choisir ou construire une méthode d'évaluation multicritère ?

IV.3.1 Les méthodes existantes

Depuis plusieurs années, différentes méthodes d'évaluation ont vu le jour (Carof, Colomb, et Aveline 2013). La plateforme MEANS créée par l'INRA et la plateforme PLAGE du RMT ERYTAGE font l'inventaire de différentes méthodes existantes et de leur caractéristiques. Les échelles spatiales prises en compte peuvent varier de la parcelle ou des systèmes de culture (MASC, DexiPM, DAEG, INDIGO) au cycle de vie (ACV), en passant par l'exploitation (IDEA, DIALECTE) et le territoire (Territ'eau). D'une méthode à l'autre, les dimensions de la durabilité couvertes sont variables. D'une méthode à l'autre, les finalités d'évaluation sont également différentes. Certaines méthodes permettent plutôt une sensibilisation à la durabilité, (IDEA) d'autres ont pour vocation la comparaison de systèmes étudiés (MASC, DeXiPM) (Lairez et al. 2015).

IV.3.2 La construction d'une méthode ad hoc

Si aucune des méthodes existantes ne correspond aux caractéristiques du projet, la construction d'une méthode adéquate se révèle appropriée, dans la mesure où certaines précautions sont prises. Selon (Lairez et al. 2015), les choix méthodologiques doivent être transparents, la méthode doit être sensible aux changements de paramètres mais robuste par rapport aux résultats. La méthode doit être complète par rapport aux objectifs et elle doit être validée. Pour valider la méthode, le groupe d'acteurs doit évaluer sa pertinence, sa cohérence, sa sensibilité et sa robustesse.

La qualité de la méthode sera également conditionnée par la consultation d'experts et l'implication du groupe d'acteurs. L'évaluateur peut consulter simplement des experts ou groupes sociaux mais décidera des choix finaux. Il peut également mettre en place une démarche participative en tentant de concilier les avis d'un groupe d'expert et/ou d'un groupe social. Cette dernière démarche nécessite des temps d'échanges et de débats qui peuvent s'avérer chronophages (Lairez et al. 2015).

V. Insertion de l'étude dans le projet SEFerSol

V.1 Les grandes lignes du projet SEFerSol

Le projet SEFerSol vise à concevoir, tester et évaluer des stratégies innovantes d'entretien de la fertilité du sol en maraîchage biologique. Ce projet a été soutenu par la Fondation de France et l'Agence de l'eau Rhin-Meuse en 2015 puis par l'Agence de l'eau et la fondation Terra Symbiosis en 2016-2017. SEFerSol est piloté par Guillaume Delaunay, chef de projet du pôle maraîchage de l'EPLEFPA Les Sillons de Haute Alsace à Wintzenheim et associe les partenaires suivants : l'ARAA (Association pour la Relance Agronomique en Alsace), l'OPABA, la Chambre d'Agriculture d'Alsace, l'Atelier Paysan, Planète légumes et RITMO.

La mise en place de l'expérimentation SEFerSol répond au besoin de produire de nouvelles références en maraîchage diversifié sur les combinaisons de pratiques qui permettent d'améliorer la fertilité du sol. Il s'agit de renforcer les connaissances dans ce domaine en maraîchage biologique, par une approche « système de culture » et multifactorielle. Pour satisfaire cet objectif, le projet se déroule selon quatre actions :

Action 1 – Etude des pratiques des maraîchers biologiques de la région

Une étude conduite chez plusieurs maraîchers de la région en 2012, a permis d'identifier des innovations intéressantes sur la fertilité du sol et de faire un état des lieux des pratiques des maraîchers du Haut-Rhin. Cette enquête a été conduite après le travail de conception des systèmes de cultures.

Action 2 – Expérimentation de systèmes de culture innovants en maraîchage biologique

L'expérimentation a démarrée en 2015. Deux systèmes de cultures innovant sont testés en comparaison à un système de référence qui représente les pratiques des maraîchers en agriculture biologique de la région. Les interventions culturales suivent des règles de décision. Chaque année, un ensemble de mesures en laboratoire et au champ permet de suivre l'évolution des systèmes de culture.

Action 3 – Evaluation multicritère des résultats de l'expérimentation

Cette action a débuté en 2017 afin de choisir une méthode d'évaluation appropriée au projet et d'obtenir une première évaluation des résultats. L'objectif est d'évaluer les performances globales des systèmes de culture selon quatre critères : performances technico-économiques et sociales, fertilité du sol, impact sur la qualité de l'eau et autonomie vis-à-vis des intrants. L'étude qui suit s'insère à ce niveau du projet.

Action 4 – Valorisation et diffusion des résultats.

Les partenaires diffusent les résultats des travaux au sein des réseaux techniques et professionnels et dans la formation.

V.2 Leviers d'actions mobilisés et hypothèses sur les systèmes de cultures

Par rapport au système de culture (SdC) « Référence » (nommé SdC1 REF) , les deux systèmes de cultures innovants (SdC2i EV MAX et SdC3i CONS SOL) visent une meilleure performance en matière de fertilité du sol, de qualité de l'eau et d'autonomie vis-à-vis des intrants. Concernant les résultats technico-économiques et sociaux, des performances au moins équivalentes à celles du système de référence sont attendues. Pour atteindre ces performances, une combinaison de leviers d'actions est mise en place par système de culture et résumée dans le tableau 1 suivant.

Tableau 1: Leviers d'actions mis en place pour conduire les systèmes de cultures

SdC	Leviers d'actions		
	Fertilisation	Travail du sol	Gestion des bioagresseurs et adventices
SdC1 « référence » <i>(SdC1 REF)</i>	Implantation d'engrais verts en hiver si possible. Apports de compost et d'engrais organiques (les pratiques de l'exploitation sont prises pour référence).	Travail du sol en plein. Passage de l'enfouisseur de pierre, d'outils à disques et à dents selon l'état du sol et les cultures implantées.	Faux semis mécaniques. Désherbage mécaniques et manuels. Traitements préventifs ou curatifs.
SdC2i « Engrais Verts Max » <i>(SdC2i EV MAX)</i>	Engrais verts systématiquement en interculture, si possible engrais verts intercalaires. Pas d'engrais organiques. Apport de compost raisonné par un bilan humique.	Passage d'outils à disques et à dents. Travail exclusivement en planches permanentes	Désherbage mécaniques et manuels. Engrais verts concurrents dans les successions de cultures. Traitements préventifs ou curatifs.

SdC3i « Conservation du Sol » <i>(SdC3i CONS SOL)</i>	Couverts végétaux systématiques entre culture, non incorporés au sol	Outils de travail du sol localisé (strip till) ou si nécessaire outils à disques et à dents. Travail exclusivement en planches permanentes.	Désherbage manuel
	Apports de composts et engrais organiques raisonnés (bilan humique et de fertilisation)		Couverts végétaux concurrents en interculture
	Couverture du sol complétée si besoin par mulchs organiques ou occultation par bâches		Occultation par bâche hors période de culture si pas de couvert végétal (CV)
			Couverture du sol pendant la culture (mulch)
			Traitements préventifs ou curatifs.

Le **SdC2i EV MAX** maximise l'usage des engrais verts dans les successions de culture. On suppose que cela permet d'atteindre un niveau d'activité biologique du sol capable de fournir des conditions physiques, chimiques et biologiques favorables à une bonne croissance des cultures sans apport d'engrais organique. Le contrôle des adventices est possible mécaniquement car le sol est travaillé et partiellement nu pendant la croissance des cultures récoltées. La gestion des adventices est supposée facilitée par l'absence d'apports d'engrais et la présence d'engrais verts dès que possible. Elle peut aussi être affectée en raison de périodes plus courtes de disponibilité du sol pour réaliser des interventions mécaniques (faux-semis et binages par exemple).

Le **SdC3i CONS SOL** adapte les principes de l'agriculture de conservation des sols au maraîchage. La stratégie consiste à assurer une couverture du sol la plus permanente possible. Dans l'idéal, cette couverture est assurée au moyen de couverts végétaux produits *in-situ*, détruits par roulage pour constituer un mulch organique au sol. L'absence de travail du sol en plein (localisée sur les lignes de semis/plantation) minimise la perturbation du sol. En minimisant le travail du sol et en implantant des couverts végétaux, on suppose que l'activité biologique du sol sera favorisée. La fourniture de nutriments issue de l'activité biologique du sol peut être complétée par des apports d'engrais organiques localisés. L'enherbement est contrôlé au moyen de la concurrence réalisée par les couverts végétaux, de la couverture du sol, de l'absence de travail du sol en plein et de la fertilisation localisée. En cas de besoin, les interventions mécaniques ne sont plus possibles, empêchées par la couverture du sol.

Ces stratégies nécessitent une phase de transition, qu'il est difficile aujourd'hui d'estimer, permettant au sol d'atteindre un meilleur niveau de fertilité pour assurer les fonctions essentielles à la croissance des plantes cultivées.

V.3 Objectifs de l'étude

L'étude présentée dans ce mémoire, s'insère dans l'action 3 du projet SEFerSol : évaluer les performances globales des systèmes de cultures innovants testés. Le projet est désormais, en 2017, dans sa troisième année d'expérimentation. Au démarrage de cette

étude, le jeu de données est constitué des indicateurs recueillis en 2015 et 2016 sur les quatre critères étudiés : fertilité du sol, qualité de l'eau, résultats technico-économiques et sociaux, autonomie vis à vie des intrants.

L'ensemble des partenaires et porteurs de ce projet souhaitent réaliser une évaluation multicritère des performances des SdC innovants à mi-parcours du projet. Les objectifs de cette évaluation sont la connaissance des systèmes de cultures testés et l'identification des stratégies qui permettent l'amélioration des performances. L'évaluation de la faisabilité des systèmes de cultures, ainsi que la communication et la valorisation des résultats, bien qu'elles soient dans les objectifs du groupe d'acteurs, ne fait pas partie du cadre de cette étude.

Dans ce projet, l'évaluation multicritère se situe à deux niveaux. Le premier niveau concerne l'évaluation multicritère des performances globales des SdC. Ce type de démarche est plutôt bien documenté dans la littérature pour répondre à des problématiques d'expérimentation « système de culture ». Le second niveau vise le critère « fertilité du sol » en lui-même. Il nécessite une réflexion méthodologique importante en raison de la complexité des relations entre les fonctions (ou sous-critères) qui le décrivent. Il peut donc faire l'objet d'une évaluation multicritère à lui seul. Par ailleurs, d'après la bibliographie, on trouve peu de références en maraîchage biologique où la fertilité du sol est un critère à part entière dans une démarche d'évaluation des performances globales de systèmes de cultures. Pour évaluer les performances globales des systèmes de cultures du projet SEFerSol, il est donc nécessaire de se pencher sur la construction d'une méthodologie adéquate qui prenne en compte la complexité des critères étudiés.

L'étude ainsi présentée dans le mémoire, consiste à proposer une méthode pour analyser les données du projet SEFerSol et à initier l'analyse des deux années qui ont précédé la démarche d'évaluation.

Partie 2 : Matériel et méthodes

I. Description du site expérimental

I.1. Contexte pédoclimatique

Le dispositif expérimental est situé au sein de l'exploitation maraîchère Les Jardins du Pflixbourg de l'EPLFPA Les Sillons de Haute Alsace dans le Haut-Rhin, en Alsace. Elle s'insère dans un paysage de Piémont Haut-Rhinois, délimité à l'Ouest par les montagnes Vosgiennes, à l'Est par la plaine de l'Ill, au Sud par la vallée de la Doller et au Nord par la limite départementale Haut-Rhin/Bas-Rhin. Dans cette zone, le sol est caractérisé par la présence d'alluvions des rivières vosgiennes du sud de l'Alsace. (Party 2003)

Dans cette partie de l'Alsace, les sols sont majoritairement cultivés par des vignobles, du maïs et des céréales à paille (Party 2003). L'Alsace bénéficie de la présence à faible profondeur de la nappe d'Alsace, l'une des plus importantes ressources souterraines en eau de l'Europe. Elle alimente l'ensemble du fossé rhénan et profite grandement au milieu agricole (SIGES 2017). La nappe est sujette aux pollutions d'origines agricoles, c'est pourquoi certaines parties de cette région se situent en zone vulnérable, où la fertilisation est un enjeu pour la qualité de l'eau. L'exploitation se situe hors zone vulnérable. Le climat alsacien est continental, les hivers sont froids et les étés chauds et secs. A Colmar (5 km à l'Est du site de l'exploitation), la pluviométrie moyenne est de 607 mm par an (METEO FRANCE 2017).

Le dispositif expérimental est situé au sein de l'exploitation maraîchère Les Jardins du Pflixbourg de l'EPLFPA Les Sillons de Haute Alsace. L'exploitation produit divers légumes de plein champ et sous tunnel, en maraîchage biologique sur 2.2 hectare. Les parcelles expérimentales du projet SEFerSol, sur 20 ares, sont bordées par les autres parcelles de l'exploitation et par la forêt des collines sous-vosgiennes.

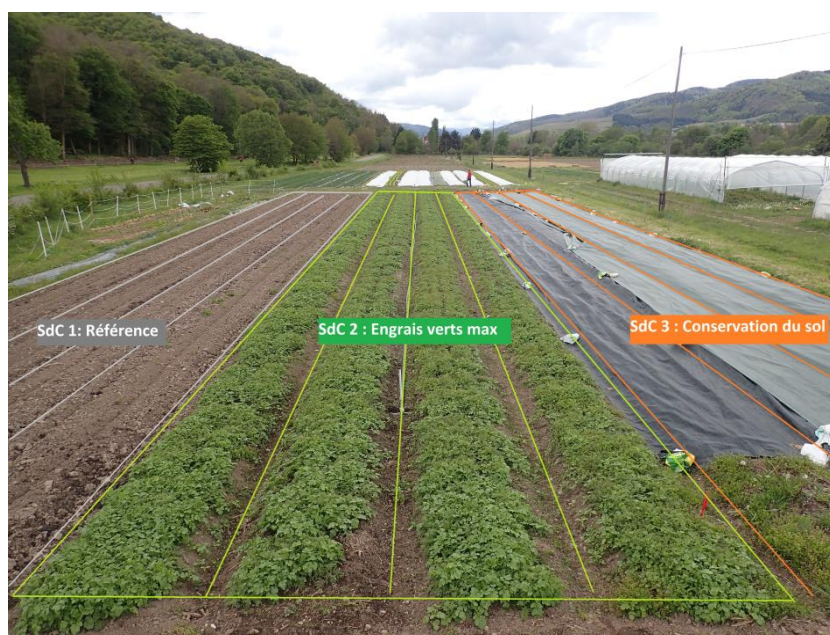


Figure 2: Vue d'ensemble du site expérimental SEFerSol. La parcelle SEFerSol 1 est présentée au premier plan avec les 3 SdC testés. La seconde parcelle (SEFerSol 2) qui porte aussi les 3 SdC testés est située au fond. (Photographie de M. Baelen, Mai 2017)

1.2. Le dispositif expérimental

Le dispositif SEFerSol est une expérimentation « système de culture », pluriannuelle et monosite. Le dispositif est composé de deux parcelles (SEFerSol 1 et 2) situées côte à côte. Chacune porte les trois SdC testés. Chaque parcelle accueille les mêmes successions culturales à un an d'intervalle (Figure 3).

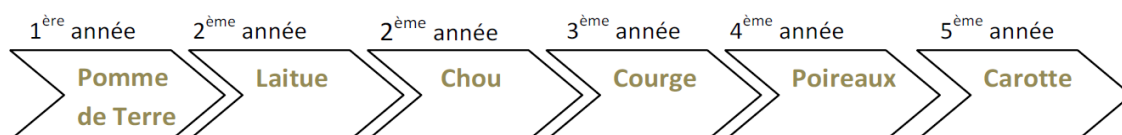


Figure 3: succession culturale envisagée sur le dispositif expérimental SEFerSol (Année 1 = 2015 pour SEFerSol 1 et 2016 pour SEFerSol 2).

L'expérimentation a démarré en 2015 sur la parcelle SEFerSol 1 tandis qu'elle a démarré en 2016 sur la parcelle SEFerSol 2. Les mêmes successions culturales ont été répétées sur les parcelles avec un an d'écart afin d'atténuer l'influence météorologique sur les SdC testés. Avant d'entrer dans le dispositif, les parcelles étaient conduites en maraîchage diversifié biologique, comme le reste de l'exploitation. Une culture de poireaux a été implantée en 2014. Les pratiques de l'exploitation correspondent à du maraîchage biologique assez intensif : la fertilisation et le travail du sol y sont répétés, les cultures s'enchaînent rapidement.

Pour chaque système de culture de la parcelle SEFerSol 1, quatre planches (de 50m x 1.50m) sont conduites de la même façon. Pour des questions de place, SEFerSol 2 possède uniquement trois planches (50m x 1.50m) par SdC. La figure 4 présente le dispositif expérimental ainsi que les zones de mesure A,B,C. Les photos des parcelles sont présentées en Annexe 3.

Au démarrage de l'expérimentation, des profils de sols et analyses chimiques ont été réalisés sur chaque système de cultures sur SEFerSol 1 et 2. Pour les deux parcelles, le terrain est assez homogène. L'état initial du sol est caractérisé par une texture limono-sableuse jusqu'à 30cm de profondeur, puis sablo-limoneuse jusqu'à 70cm de profondeur. Le taux de cailloux est d'environ 40 %, SEFerSol 2 présente cependant un gradient de cailloux plus important au niveau des zones de mesures « C ». Les sols des deux parcelles sont dépourvus de calcaire et n'ont pas de pente.

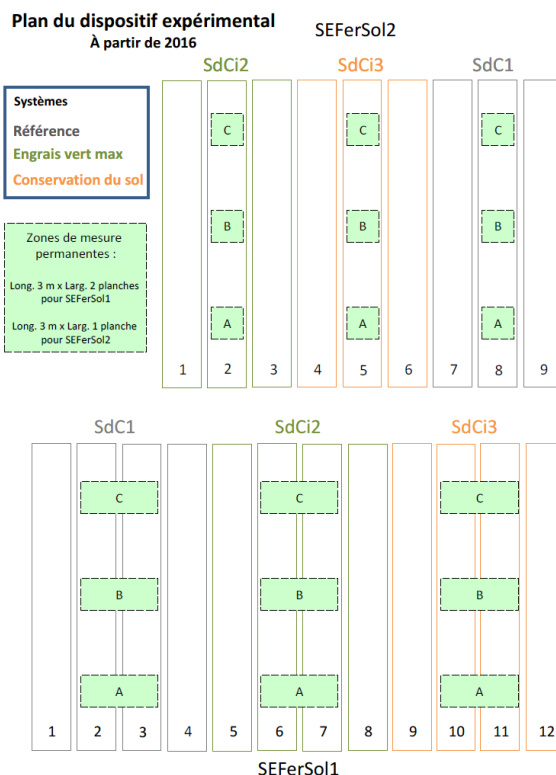


Figure 4: plan d'expérimentation du dispositif SEFerSol

I.3. Conduite des Systèmes de Culture

Même si les principes qui définissent les SdC sont systématiquement respectés, la conduite du SdC peut varier d'une année à l'autre étant donné que la culture n'est pas la même, que les conditions climatiques sont différentes et que l'expérience acquise précédemment améliore la conduite des SdC. Les Annexes 4.1, 4.2, 4.3 montrent les différentes opérations culturales sur SdC 1, 2 et 3 en 2015 sur SEFerSol1. L'annexe 4.4, montre les opérations culturales réalisées sur SdC 2 parcelle SEFerSol 1 en 2016. La comparaison de l'Annexe 4.2 à l'Annexe 4.4, donne un exemple des différences qui peuvent exister pour un même SdC entre deux années.

II. Mesures expérimentales

II.1. Collecte des échantillons

Les indicateurs qui nécessitent des mesures au champ, sont échantillonnés sur trois placettes A, B et C pour chaque SdC (figure 4). Les placettes sont positionnées sur les planches centrales du système de culture, pour s'affranchir de l'effet de bordure. Comme la parcelle SEFerSol 1 possède 2 planches centrales, les prélèvements sur une placette sont répartis sur les deux planches. Pour des questions de coûts d'analyse, certains prélèvements sont issus du mélange des échantillons des trois placettes. Pour ces mesures (listées plus loin paragraphe II.2) il n'y a donc pas de répétitions.

II.2. Indicateurs du projet SEFerSol

❖ Indicateurs de la fertilité du sol

Les indicateurs de fertilité, ainsi que les méthodes utilisées et leurs fréquences sont listés dans le tableau suivant. Les analyses ont été réalisées par les laboratoires RITMO (Colmar), Celesta Lab (Mauguio) et SADEF (Aspach le haut).

Tableau 2: indicateurs de la fertilité du sol

Sous-critères	Indicateurs	Méthodes de mesure	Fréquence de mesure
Activité biologique	biomasse bactérienne (ng/g sol)	PCR quantitative (dosage ADNr 16 ou 18s)	1 à 2 fois par an (printemps puis automne) Répétitions A,B,C
	biomasse fongique (ng/g sol)		
	Activité microbienne (respirométrie, mg O ₂ /g MS)	Dispositif Oxitop NF EN ISO 16072	
	population de vers de terre (nombre/m ²)	protocole moutarde Université de Rennes	
Valorisation des MO	MO (%)	Méthode Anne NF ISO 14235	annuelle Pas de répétition
	fraction MO libre (%)	Celesta Lab d'après (Feller 1994)	tous les deux ans (au printemps) Pas de répétition
	fraction MO liée (%)		
	C/N MO libre		
	C/N MO liée	Norme FD-ISO 14240-2 Celesta Lab	annuelle Pas de répétition
	C minéralisé (mg/kg/28j)		
Disponibilité en nutriments	N minéralisé (mg/kg/28j)		
	P ₂ O ₅ (g/kg)	Méthode Dyer NF X 31-160	annuelle Pas de répétition
	pH	pH de l'eau NF ISO 10390	
	K ₂ O (g/kg)	NF X 31-108	
	Ca ²⁺ /CEC (%)	CEC Metson à pH 7 NF X 31-130	
	K ₂ O/MgO	NF X 31-108	
Propriétés physiques	structure du sol	Test à la bêche selon Görbing	annuelle Pas de répétition
	stabilité structurale (%)	D'après (Kemper et Rosenau 1986) tamisage à l'eau	annuelle Répétitions A,B,C
	Infiltrabilité (L/h)	Adaptation méthode Beerkan	2 fois par an Répétitions A,B,C

❖ Indicateurs de l'impact sur la qualité de l'eau

Actuellement, le projet dispose de mesures de reliquats azotés dans les 25 premiers centimètres du sol pour évaluer ce critère. Des bougies poreuses devraient être disposées d'ici la fin de l'année afin de mesurer la quantité d'azote qui transite sous l'horizon racinaire.

Tableau 3: indicateurs de l'impact sur la qualité de l'eau

Indicateur	Méthode de mesure	Fréquence de mesure
Reliquats azotés (KgN/ha)	ISO/TS 14256-2 Extraction puis colorimétrie	Toutes les 6 semaines de Février à Novembre pas de répétitions
Drainage (mm)	Calcul du bilan hydrique	mensuelle
[NO3-] potentiellement lixivié	Calcul de l'indice de Burns	mensuelle

La méthodologie utiliser pour le calcul du bilan hydrique et l'indice de Burns est détaillée en Annexe 5.

❖ Indicateurs de résultats technico-économique et sociaux et d'autonomie vis-à-vis des intrants

Les indicateurs technico-économiques et sociaux utilisés sont listés dans le tableau 4 et ceux d'autonomie vis-à-vis des intrants dans le tableau 5 ci-dessous.

Tableau 4: Indicateurs de résultats

Sous-critères	Indicateurs
Organisation du travail	temps de travail pendant la période de surcharge (h/are)
	temps de travail total (h/are)
	temps de travail lié au désherbage (h/are)
Résultat technique	Rendement commercialisable (Kg/are)
Résultats économiques	coût total du travail (euros/are)
	marge directe (euros/are)

Tableau 5: Indicateurs d'autonomie

Sous-critère	Indicateurs
Energies fossiles	quantité carburant (L/are)
	quantité plastique jetable (Kg/are)
Ressource en eau	quantité irrigation (mm)
Quantités de traitements	IFT*
Quantité de fertilisants	Quantité d'azote apportée Unité N/ha

*L'IFT, indicateur de traitements phytosanitaires autorisés en agriculture biologique.

III. Méthode d'analyse des résultats

III.1. Evaluation critère par critère des performances des SdC

III.1.1 Analyse statistique des indicateurs

Les analyses statistiques sont effectuées avec le logiciel R studio. Le seuil de confiance est fixé à 90% pour toutes les analyses. Un individu est un SdC, sur une parcelle donnée, une année donnée (SEFerSol*SdC*Année).

Pour des raisons pratiques inhérentes aux expérimentations de type « système », le dispositif expérimental SEFerSol ne prévoit pas de répétitions randomisées des SdC. De ce fait, les conditions pour réaliser une analyse de variance (ANOVA) sur les indicateurs ne sont pas remplies. De plus, étant donné qu'il y a peu, voire pas de répétitions pour certaines mesures, la normalité des résidus ne peut pas être vérifiée. Dans ces conditions, une comparaison de moyenne par test paramétrique (test de Student) ne peut pas être appliquée.

Pour analyser statistiquement les résultats, on appliquera donc deux types de tests non paramétriques :

- ❖ **Le test de Kruskal Wallis.** Ce test est réalisé sur chaque variable. L'hypothèse initiale H_0 est que la variabilité intra-système est du même ordre de grandeur que la variabilité inter-système, l'effet des systèmes est peu probable.
- ❖ **Le test de Wilcoxon-Mann Whitney.** Lorsque l'hypothèse H_0 est rejetée à la suite du test de Kruskal Wallis, le test de Wilcoxon est réalisé pour identifier deux à deux les différences. L'objectif est de savoir comment l'indicateur se situe par rapport à la valeur du SdC 1 « référence »

La parcelle SEFerSol 2 est conçue pour être une répétition de la parcelle SEFerSol 1, il est donc pertinent de la considérer comme telle dans l'évaluation. Dans cette étude, les tests ont été réalisés :

- par parcelle et par année
- en observant l'ensemble des années d'une parcelle comme des répétitions
- en prenant l'ensemble des années et des parcelles comme des répétitions.

Cette analyse à plusieurs niveaux permet d'avoir une évaluation agronomique à l'échelle de l'année et par parcelle, ce qui est intéressant étant donné les variations d'itinéraires techniques entre SEFerSol 1 et 2. Elle permet également de regarder les SdC plus globalement, sur l'ensemble des données en considérant l'échelle pluriannuelle et les deux parcelles comme des répétitions.

Pour l'instant, on compte uniquement deux années de résultats pour SEFerSol 1 et une année de résultats pour SEFerSol 2. Dans cette étude, certains résultats de l'année 2017 (année 3 pour SEFerSol 1 et année 2 pour SEFerSol 2) ont pu également être pris en compte.

Etant donné la faible quantité de données dont on dispose pour l'instant, les analyses pluriannuelles sont limitées.

III.1.2 Analyse des performances des systèmes par critères

Le tableau 6 suivant résume la méthode qui est employée pour analyser les performances des SdC sur chaque critère.

Tableau 6: Méthode d'analyses des performances des SdC par critère

Critère	Méthode d'analyse
Fertilité du sol	Une ACP (Analyse en Composante Principale) permet d'observer les proximités entre SdC et la variabilité principale qui les différencie. Des corrélations entre variables peuvent ensuite être observées.
Impact sur la qualité de l'eau	L'objectif est de déterminer une concentration théorique de nitrates lixiviés dans la lame d'eau drainante. La méthode consiste à corréliser l'évolution des reliquats azotés avec le drainage et les pratiques culturales. L'indice de Burns a ensuite été calculé, la méthode est détaillée en Annexe 5.
Résultats technico-économiques et sociaux	Pour chacun de ces deux critères, on obtient une vue d'ensemble des performances en affichant les résultats des indicateurs sur des radars.
Autonomie vis-à-vis des intrants	

Le détail de la justification des choix méthodologiques et des représentations des résultats est présenté en Annexe 6.

III.2. Evaluation multicritère des indicateurs de performances des SdC

III.2.1 Construction d'un tableau de bord relatif aux objectifs des SdC

Par le biais de l'évaluation multicritère, on souhaite évaluer les performances des SdC par rapport à leurs objectifs initiaux :

- Performances fertilité du sol SdCi > Performances SdC REF
- Performances impact qualité de l'eau SdCi > Performances SdC REF
- Performances résultats technico-économique et sociaux SdCi >= Performances SdC REF
- Performances autonomie vis-à-vis des intrants SdCi > Performances SdC REF

Pour savoir si les objectifs ont été atteints, chaque indicateur des SdC innovants a été transformé en pourcentage de variation par rapport aux valeurs des indicateurs du SdC REF. A partir de ces données, un tableau de bord des performances des SdCi relatives aux performances du SdC REF, a été construit sur chaque critère. Ce tableau de bord permet de visualiser si les objectifs initiaux sont atteints. Un code couleur permet de visualiser si la valeur de l'indicateur est au-dessus de celle de l'indicateur du SdC REF (vert), équivalente (orange) ou en dessous (rouge). On considère une différence comme significative à partir de 15% de variation. Ce seuil a été choisi par rapport aux incertitudes qui caractérisent les indicateurs.

Le cas des résultats technico-économiques est particulier, on souhaite que les SdC innovants soient au moins équivalents au SdC de référence sur ce critère. Lorsqu'il n'y a pas de différence significative sur ces indicateurs, on affiche toujours la couleur orange, mais l'objectif initial est considéré atteint.

Au même titre que les analyses statistiques, les tableaux de bord sont réalisables à tous les niveaux d'analyses : par parcelle, par année, à l'échelle pluriannuelle, en prenant les parcelles comme des répétitions. Dans cette étude, les tableaux de bord ont été réalisés en prenant la moyenne des valeurs des deux parcelles, puis des deux années d'étude. Cela permet de prendre en compte les résultats à l'échelle pluriannuelle et de considérer les deux parcelles comme des répétitions. Ce choix de représentation permet d'obtenir un tableau qui synthétise les performances des SdC innovants.

III.2.2 Schéma de la méthode d'analyse de l'étude

La figure 5 suivante résume la méthodologie utilisée dans cette étude pour analyser les résultats du projet SEFerSol. Ce schéma sera complété suite à la discussion et à l'identification des différentes limites de la méthode.

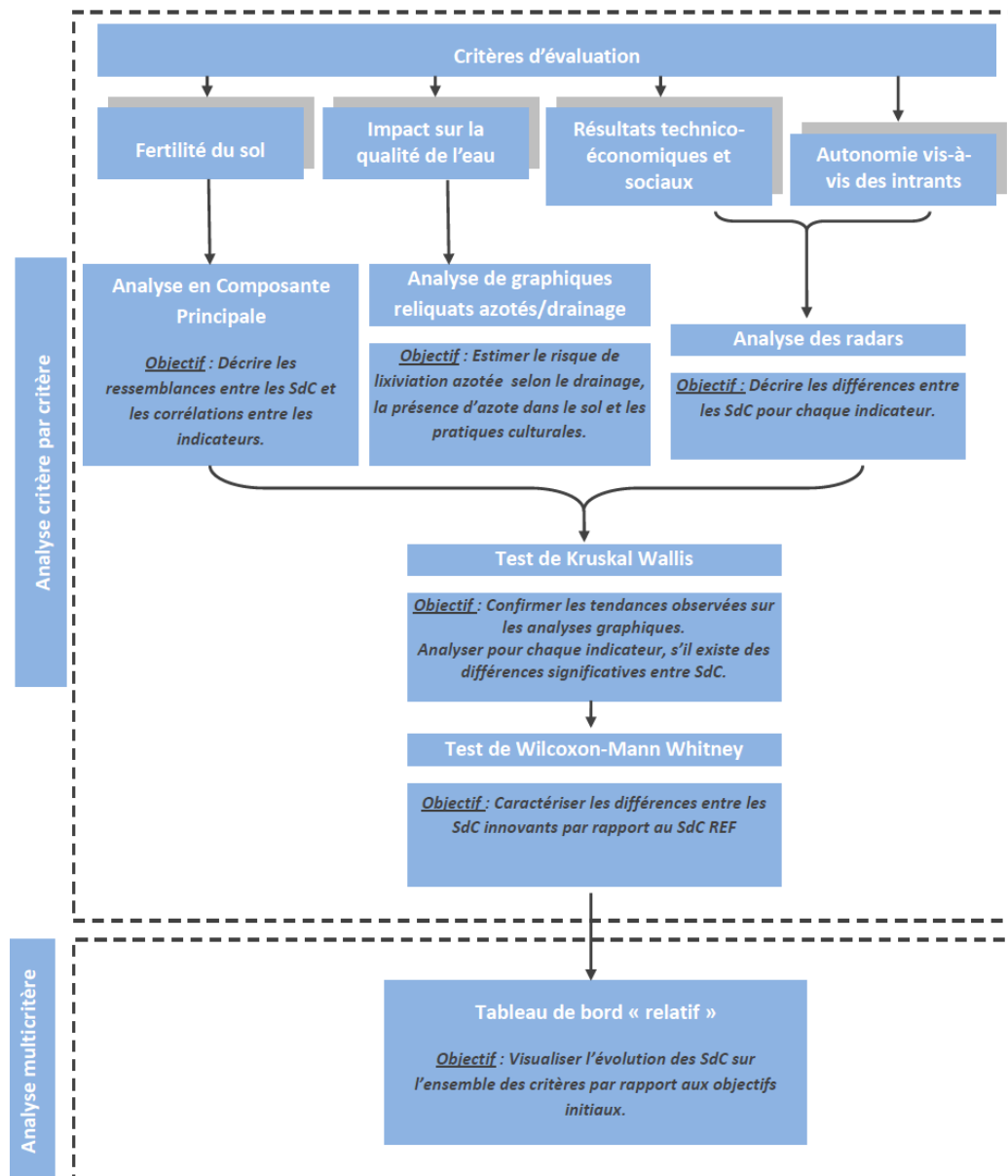


Figure 5: Schéma de la méthode utilisée dans le cadre de l'étude

Partie 3 : Résultats

I. Critère de fertilité du sol

I.1 Variabilité inter-systèmes par années et parcelles

L'analyse statistique a été conduite sur l'ensemble des indicateurs qui composent les sous-critères de la fertilité du sol. Les résultats des tests et les p-value obtenues pour tous les critères sont résumés dans les tableaux de l'Annexe 7.

❖ Biomasse et activité biologique

Les systèmes ne présentent aucune différence significative sur les mesures de biomasse bactérienne (Annexe 7). En revanche, on observe une variabilité inter-système sur les mesures de biomasse fongique, de consommation en oxygène du sol et de vers de terre.

Sur la parcelle SEFerSol 1 en année 2 (culture de salade puis de choux), le SdC 3 « conservation du sol » obtient des valeurs de biomasse fongique plus grandes que sur les SdC1 et SdC2 au mois d'octobre (médiane à 110 ng d'ADN/g de sol). Le test ne permet pas de différencier le système « référence » par rapport au système « Engrais vert max » et le seuil de confiance considéré est faible (p value = 0.14, Figure 6(A))

Sur la parcelle SEFerSol 2 en année 1, on constate que le système « Référence » a une consommation en oxygène plus faible (médiane à 0.65 mgO₂/gMS) que les deux systèmes innovants (p value=0.06) au mois de Juin. Le test ne différencie pas les SdC innovants entre eux (Figure 6 (B)).

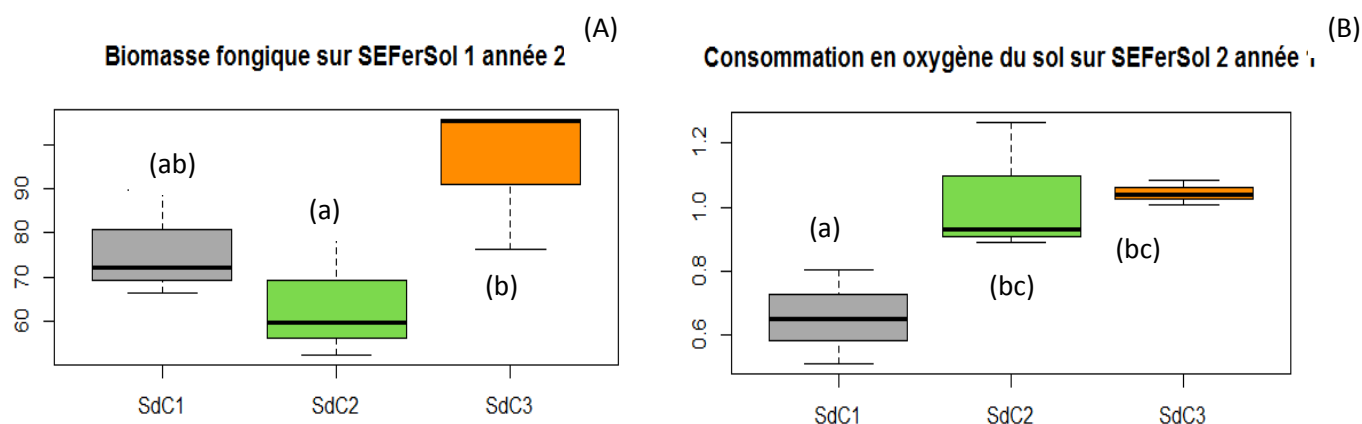


Figure 6 : Biomasse fongique exprimée en ng d'ADN/g de sol sur SEFerSol 1 en année 2(A) et consommation en oxygène du sol en mg O₂/g de MS en sur SEFerSol 2 pour l'année 1(B)

La figure 7 présente les différents types de vers de terre identifiés sur les trois systèmes de cultures sur SEFerSol 1. Les résultats présentent une grande variabilité d'une année de mesure à l'autre. Au printemps les résultats des années 2016 et 2017 présentent des différences significatives. Avec la méthode du test à la moutarde utilisée, il y a moins de vers de terre (6 individus) qui sont remontés à la surface sur le système « conservation du

sol » en 2016 (p value = 0.06). A l'inverse, en 2017 il y a plus de vers de terre (23 individus) qui sont remontés à la surface sur le système « conservation du sol » (p value = 0.09) par rapport aux autres SdC. Sur ces deux années, aucun vers endogés n'a été dénombré. Les systèmes « référence » et « engrais vert max » présentent essentiellement des vers anéciques. Sur le système « conservation du sol », on note la présence de vers épigés et de vers anéciques.

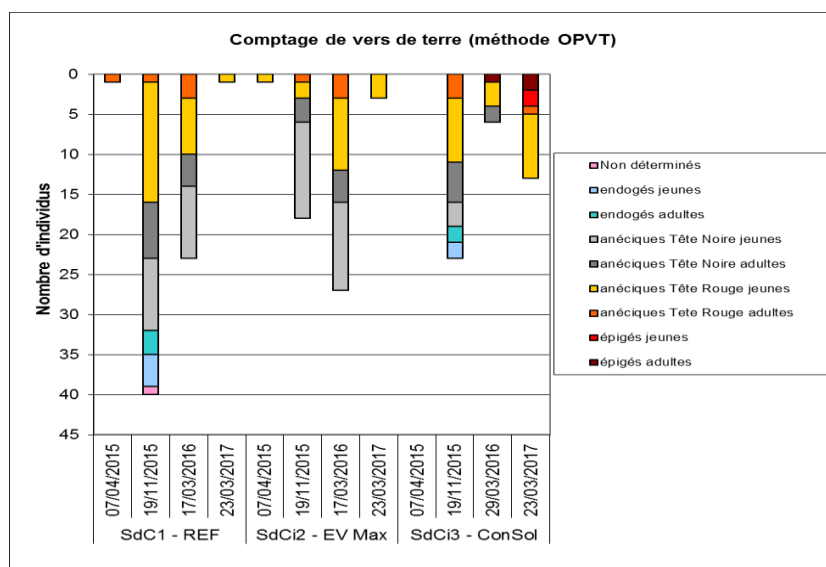


Figure 7: Nombre de vers de terre dénombrés et composition par classe déterminées pour chacun des 3 SdC sur 3 ans.

A l'échelle du système de culture, c'est-à-dire en prenant l'ensemble des années comme des répétitions, sur SEFerSol 1 ou SEFerSol 2, aucun système ne semble se différencier significativement sur les indicateurs d'activité biologique du sol.

❖ Propriétés physiques

L'indicateur de structure du sol (test bêche) n'est pas répété sur les SdC lorsqu'il est réalisé. Le test statistique n'a donc de sens qu'à l'échelle des années. Pour l'instant, aucun système ne tend à se différencier significativement par sa structure au bout de deux ans. On note cependant que sur SEFerSol 2 en année 2 (2017), le SdC « conservation du sol » présentait beaucoup de résidus non dégradés dans les 10 premiers centimètres du sol avec des filaments mycéliens visibles. En 2017, ce système présente également une zone plus dense à partir de 20 cm de profondeur, avec une porosité très faible et pas de racines présentes. Le test bêche est présenté en Annexe 8.

Certains systèmes se différencient sur les mesures d'infiltration d'eau dans le sol. Sur SEFerSol 1 en année 1, le système « référence » possède un débit plus élevé que le système « Engrais vert max » (p value = 0.08). Sur SEFerSol 2 en année 2, c'est le système « conservation du sol » qui semble avoir un débit plus élevé que les systèmes « référence » et « engrais vert max » (p value= 0.06, Figure 8).

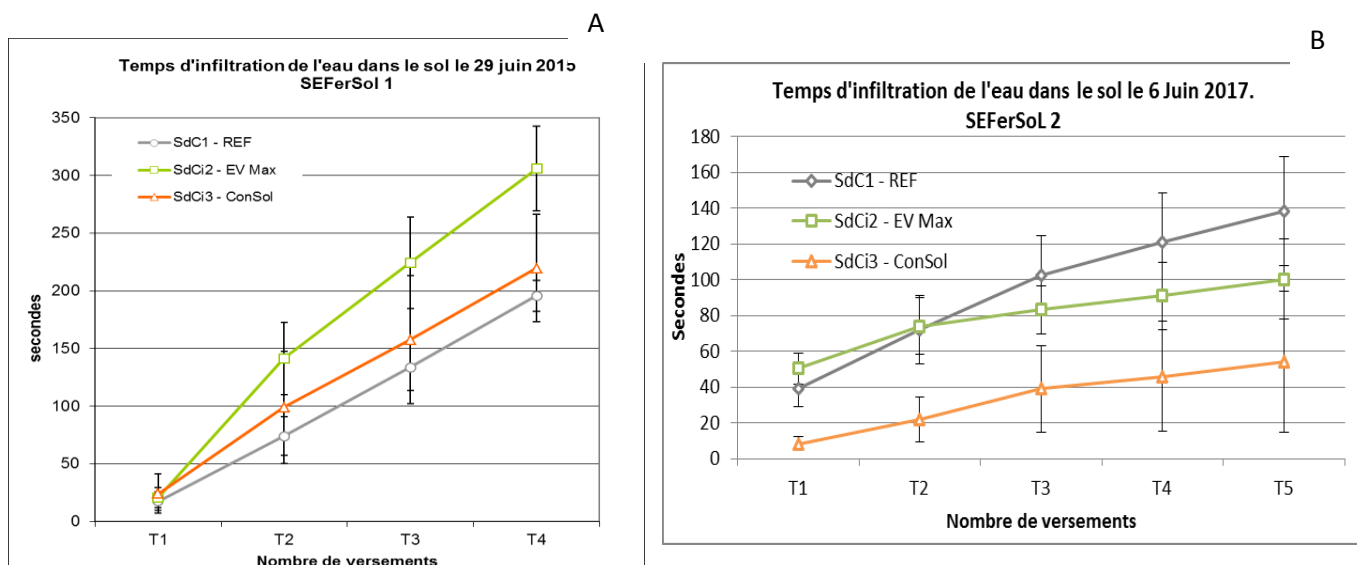


Figure 8 : Temps d'infiltration de l'eau dans le sol en Juin sur SEFerSol 1 en année 1 (A) et sur SEFerSol 2 en année 3 (B).

L'étude de la stabilité des agrégats révèle que sur SEFerSol 1 en année 2, les agrégats sur les deux systèmes innovants semblent plus stables (médiane > 35%) que sur le système « référence » (p value = 0.05). On ne peut cependant pas différencier les SdC innovants entre eux. Sur SEFerSol 2 en année 1, on observe que le système « Engrais vert max » est significativement plus stable (médiane > 60%) que le système « référence » (p value = 0.08). A l'échelle des deux années, aucune différence n'est confirmée (Figure 9).

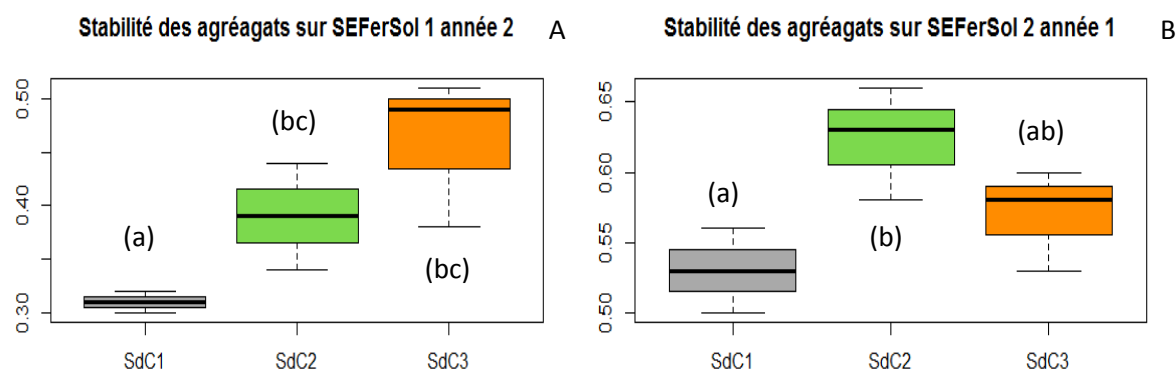


Figure 9 : Quantité d'agrégats stables à l'eau (indice entre 0 et 1) sur SEFerSol 1 année 2 (A) et SEFerSol 2 année 1 (B)

❖ Valorisation des matières organiques

Les SdC révèlent des valeurs proches pour les indicateurs suivants : taux de MO, MO libre, C/N des MO libres et liées. En revanche, les quantités d'azote ou de carbone minéralisés permettent de différencier les systèmes, année par année. Les résultats sont très variables d'une année à l'autre et d'une parcelle à l'autre, ils ne permettent pas de dégager une tendance significative sur l'ensemble des 2 ou 3 années. On remarque cependant que

sur SEFerSol 1 ou 2 en année 2, le carbone minéralisé est presque deux fois plus élevé sur le système « conservation du sol » par rapport au système « Référence » (p value= 0.02) Les graphiques sont présentés en Annexe 9.

❖ Disponibilité en éléments nutritifs

Le test statistique a été mené à l'échelle du système de culture puisqu'il n'y a pas de répétitions pour ces indicateurs (une mesure par SdC). Aucun des indicateurs ne permet de différencier les systèmes de culture qui semblent donc équivalents.

1.2 Analyse multivariée de la fertilité du sol

L'ACP a été conduite sur les indicateurs pour lesquels des différences significatives ont été observées. Etant donné la variabilité des mesures, on garde les répétitions des placettes (A,B, C) comme des individus (Figure 10).

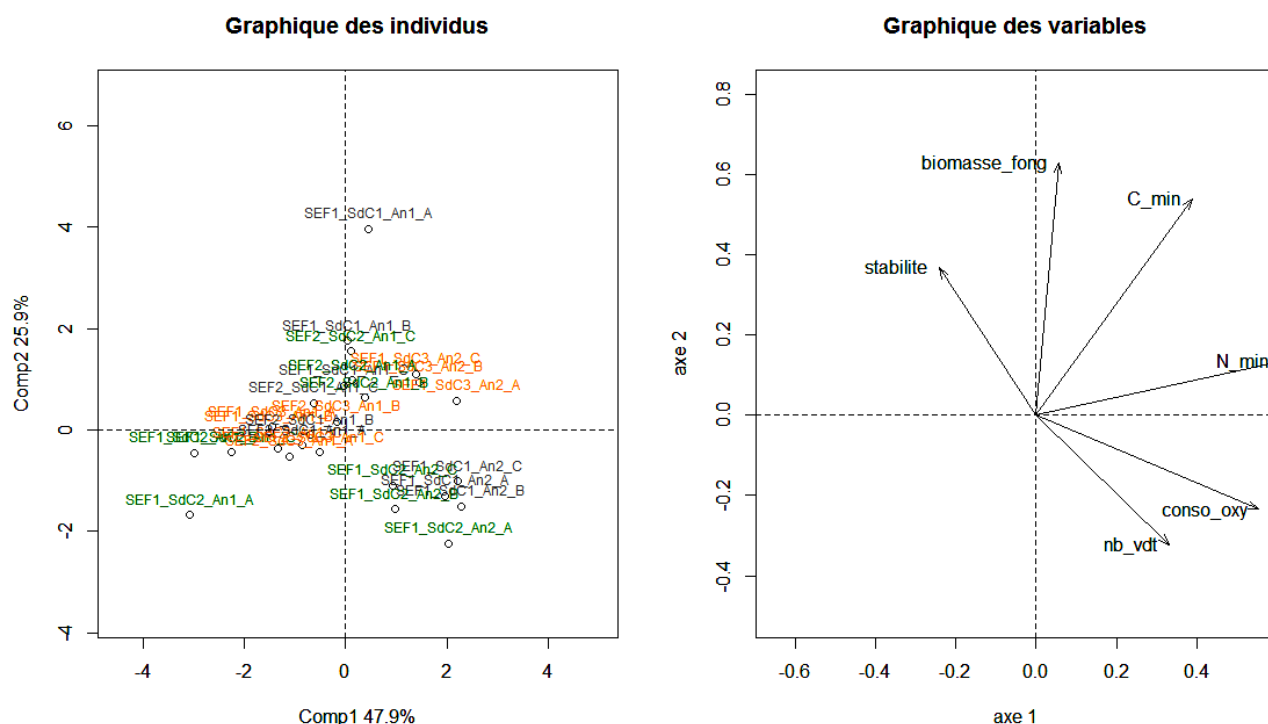


Figure 10 : Graphique des individus (A) et des variables (B) sur les indicateurs de la fertilité du sol.
Le « biplot » de l'ACP est présenté en Annexe 9.

Les deux premiers axes de l'ACP permettent de résumer 75% de la variabilité : 48% de la variabilité est expliquée par la composante 1, tandis que la composante 2 en explique 27 %. Sur la figure 11 (A), on remarque que la répartition des individus le long de la composante 1 semble influencée par l'année (c'est-à-dire le type de culture implantée). Les individus de l'année 2 sont répartis à droite de l'axe tandis que les individus de l'année 1 sont plutôt répartis à sa gauche. Le long de la composante 2, on remarque que les SdC 1 et 2 de l'année 1 sur SEFerSol 1 s'opposent. Les individus qui représentent le système « Conservation du sol », légende en orange, sont plutôt regroupés au centre du graphique des individus.

Sur le graphique des variables (figure 10 (B)), on observe que la biomasse fongique explique majoritairement la variabilité suivant l'axe 2 tandis que la consommation en oxygène du sol et l'azote minéralisé expliquent la variabilité suivant l'axe 1. De plus, la consommation en oxygène du sol et le nombre de vers de terre sont des variables qui semblent plutôt proches mais inversement corrélés à la stabilité des agrégats.

D'après ces figures et le graphique des variables et individus superposés en Annexe 9, on peut identifier un groupe composé des systèmes « Référence » et « Engrais vert max » en année 2 sur la parcelle SEFerSol 1 qui semble se différencier par des valeurs élevées en consommation en oxygène du sol et en nombre de vers de terre.

L'analyse pluriannuelle et en prenant les parcelles comme des répétitions, révèle que les SdC ne semblent pas se différencier sur les indicateurs de la fertilité du sol.

II. Critère de l'impact sur la qualité de l'eau

II.1 Evolution des reliquats azotés

A l'échelle du système de culture, l'évolution des reliquats azotés sur le système « Engrais vert max » est significativement plus faible que l'évolution des reliquats azotés sur les systèmes « Référence » et « Conservation du sol ». La figure 11 présente l'évolution des reliquats azotés sur SEFerSol 1 pour les 3 premières années d'expérimentation. En prenant les deux parcelles comme des répétitions et à l'échelle pluriannuelle, la tendance observée se confirme statistiquement. Le système « conservation du sol » possède également des reliquats azotés plus faibles que le système « Référence ».

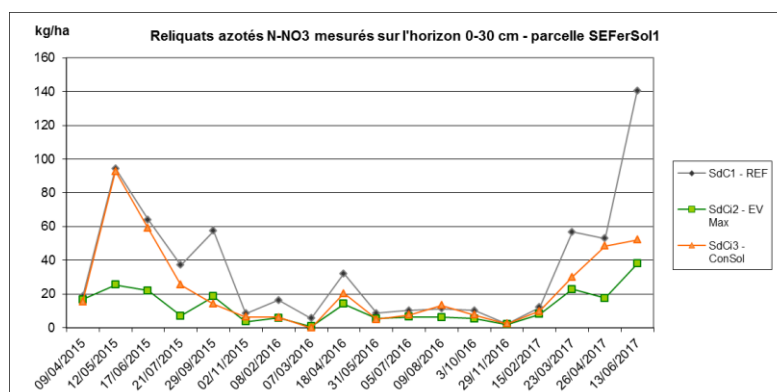


Figure 11 : Evolution des reliquats azotés sur la parcelle SEFerSol 1 (trois années)

Les reliquats azotés du système « Référence » sont particulièrement élevés aux printemps 2015 et 2017, jusqu'à 140 kg/ha. Sur le système « conservation du sol », les reliquats atteignent 90 kg/ha au printemps 2015 et environ 50 kg/ha au printemps 2017. Les tests statistiques ne permettent pas de différencier l'évolution des reliquats entre les systèmes « Conservation du sol » et « Référence ». En revanche, en septembre 2015, le système de référence présente des reliquats de 60 kg/ha contre environ 20 kg/ha pour les deux systèmes innovants.

La figure 12 présente l'évolution des reliquats azotés sur la parcelle SEFerSol 2 pour les deux premières années. Les tests statistiques ne révèlent pas de différence significative,

entre les systèmes. Les reliquats azotés du système « conservation du sol » au printemps 2015 sont particulièrement élevés (plus de 80 kg/ha).

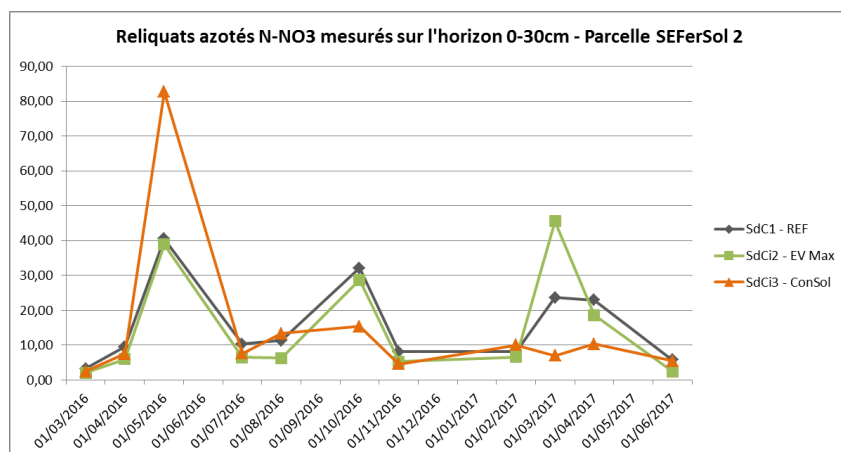


Figure 12 : Evolution des reliquats azotés sur la parcelle SEFerSol 2 (deux années)

Sur les deux parcelles, les reliquats azotés ont tendance à être plus élevés entre les mois d’Avril et de Juin, ainsi qu’entre les mois de Septembre et d’Octobre.

II.2 Evolution du drainage

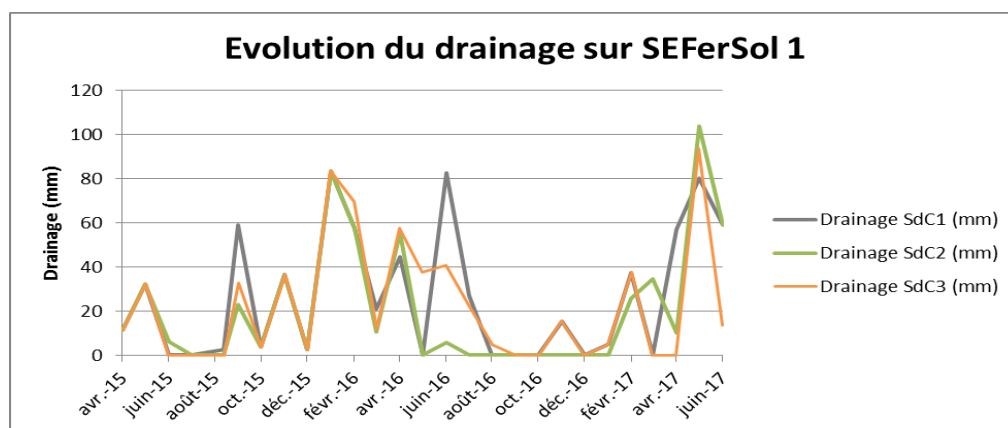


Figure 13 : quantité d’eau drainée en (mm) sur SEFerSol 1 (3 années)

Sur la parcelle SEFerSol 1, trois périodes témoignent d’un drainage plus élevé : l’entrée d’hiver 2015 (septembre et octobre), les printemps 2016 et 2017 (de Février à Juin). En Juin 2016, le drainage sur le système « Référence » s’élève à 80 mm alors qu’il est presque nul sur le système « Engrais vert max » et de 40 mm sur « Conservation du sol ». En Juin 2017 les trois systèmes présentent un drainage supérieur à 80 mm (Figure 13).

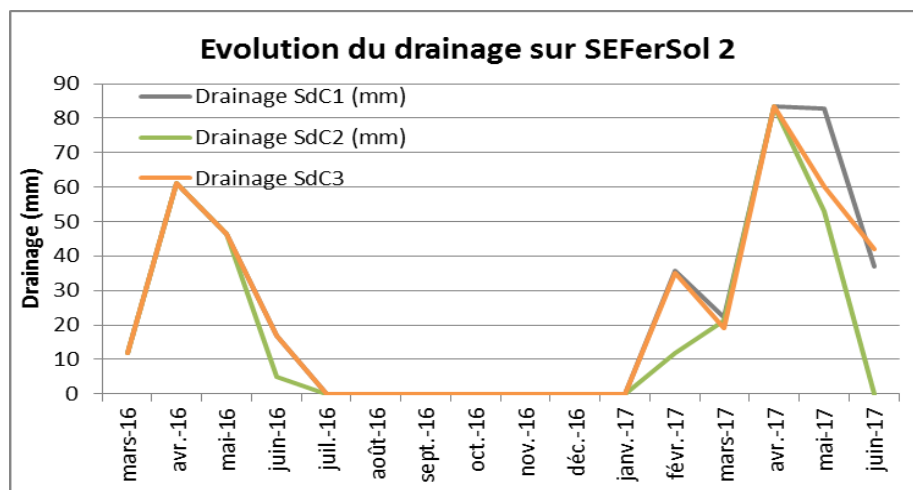


Figure 14 : Quantité d'eau drainée en mm sur SEFerSol 2 (2 années)

Sur la parcelle SEFerSol 2, le drainage est élevé au printemps (entre 60 et 90 mm) Les systèmes semblent surtout se différencier au mois de Mai 2017 où le système de référence atteint plus de 80 mm de drainage tandis que les systèmes innovants présentent des valeurs autour de 50 mm (Figure 14).

II.3 Estimation du risque de lixiviation azotée

Le suivi mensuel du drainage a permis de calculer l'indice de Burns (présenté en Annexe 5). Cet indice a ensuite été pondéré par la quantité de reliquats azotés, afin d'estimer la quantité de nitrates qui transite dans la lame d'eau drainante pour chaque SdC (Figure 16).

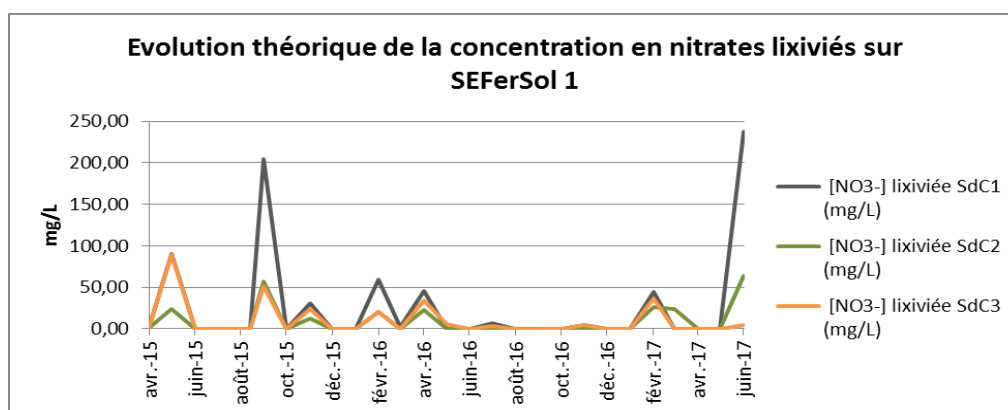


Figure 15 : Concentration de nitrates potentiellement lixivié dans la lame d'eau drainante sur SEFerSol 1 (3 années)

De manière générale, le système « Engrais vert max », (SdC 2) possède des concentrations en nitrates dans la lame d'eau drainante plus faibles que les autres systèmes. Le système « Référence », (SdC 1) présente des valeurs au-dessus de 50 mg/L (le seuil de potabilité) en Mai 2015, Septembre 2015 (200 mg/L), Février 2015 et Mai 2017 (250 mg/L). Les systèmes innovants dépassent 50 mg/L à deux reprises mais restent en dessous de 100 mg/L (Figure 15). Sur la parcelle SEFerSol 2, pour l'instant aucune tendance ne se dégage significativement entre les systèmes sur les deux premières années. Au printemps 2016 tous

les systèmes dépassent le seuil de potabilité en nitrates. Le système « Conservation du sol » présente une concentration particulièrement élevée par rapport aux systèmes innovants : 120 mg/L (Figure 16).

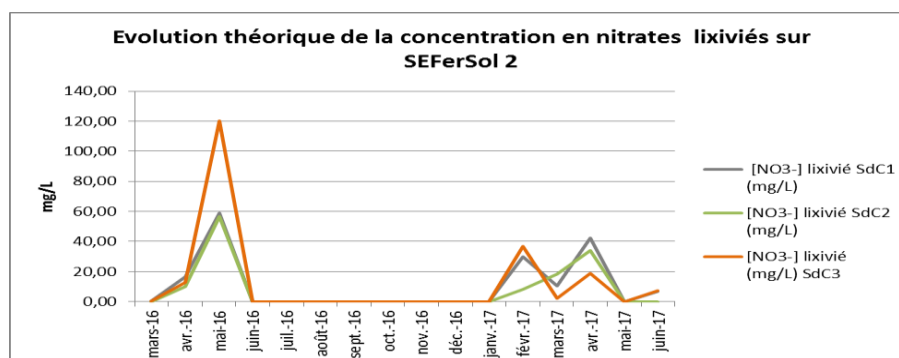


Figure 16 : Concentration de nitrates potentiellement lixivie dans la lame d'eau drainante sur SEFerSol 2 (2 années)

L'annexe 10 présente l'évolution du drainage, des reliquats azotés et de la quantité des nitrates dans la lame d'eau drainante, pour chaque SdC en fonction des dates de cultures et couverts végétaux implantés.

III. Critère basé sur les résultats technico-économiques et sociaux

Les résultats des tests de Kruskal Wallis pour les résultats technico-économiques et sociaux sont présentés dans l'Annexe 9. Il ressort qu'en année 2 (cultures de salades puis choux) sur SEFerSol 1, mais aussi à l'échelle des deux années, le rendement est significativement inférieur sur le système « conservation du sol ». En revanche en année 1 (culture de pomme de terre) sur SEFerSol 2, le rendement est significativement supérieur sur le système « conservation du sol ».

Les figures 17 et 18 présentent l'ensemble des performances technico-économiques et sociales en moyenne sur les deux ans pour SEFerSol1 et sur la première année pour SEFerSol2. Les valeurs obtenues sont transformées en pourcentage de variation par rapport au système de référence. Pour le rendement, on a au préalable réalisé des moyennes des échantillons par SdC.

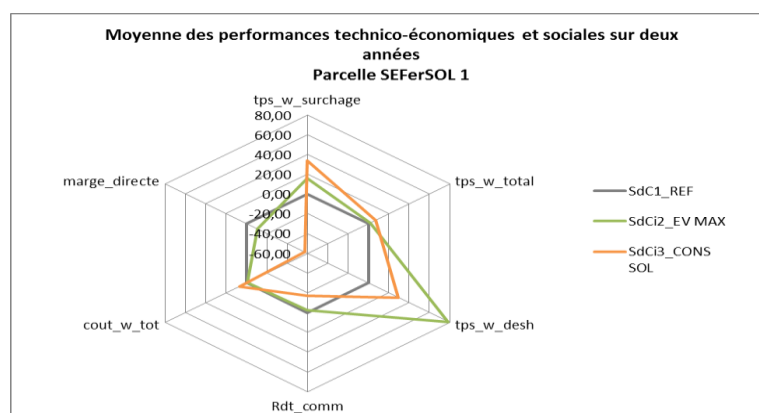


Figure 17 : Performances technico-économiques et sociales de la parcelle SEFerSol 1 (moyenne sur les deux premières années, exprimée en pourcentage de variation par rapport à SdC 1).

Au bout de deux ans sur SEFerSol 1, on observe que le système « Engrais vert max » se différencie par un temps de désherbage de plus de 50% supérieur à celui du système de référence. Le système « conservation du sol » augmente également le temps de travail lié au désherbage (Tps_W_desh) de plus de 20 %. Sur ce système la marge directe baisse de 50% par rapport aux systèmes « Référence » et « Engrais vert max ». On note également que le rendement commercialisable (Rdt_comm) sur le système « conservation du sol » est légèrement plus faible que sur les deux autres systèmes et que le temps de travail pendant la période de surcharge est plus élevée.

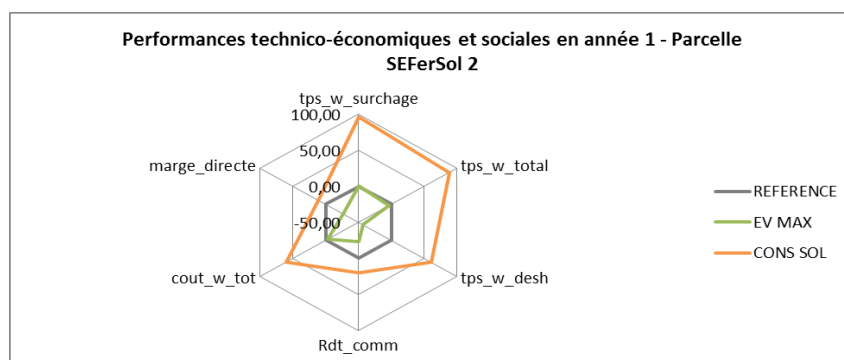


Figure 18 : Performances technico-économiques et sociales de la parcelle SEFerSol 2 (année 1, valeurs exprimées en pourcentage de variation par rapport à SdC 1).

Sur SEFerSol 2, on observe que la première année d'expérimentation (culture de pomme de terre) se caractérise par une augmentation de tous les paramètres pour le système de conservation du sol. En effet, la marge directe et le rendement commercialisable augmentent de 25 % mais les temps de travaux et leur coût s'élèvent à plus de 50% des valeurs du système de référence. Le système « engrais vert max » en revanche, se caractérise par un temps de désherbage, une marge directe et un rendement commercialisable plus faible que sur les autres systèmes. On observe que la tendance des résultats est différente de celle observée sur SEFerSol 1. Plus globalement, les résultats ne montrent aucune différence significative à l'échelle pluriannuelle et en prenant les deux parcelles comme des répétitions.

IV. Critère d'autonomie vis-à-vis des intrants

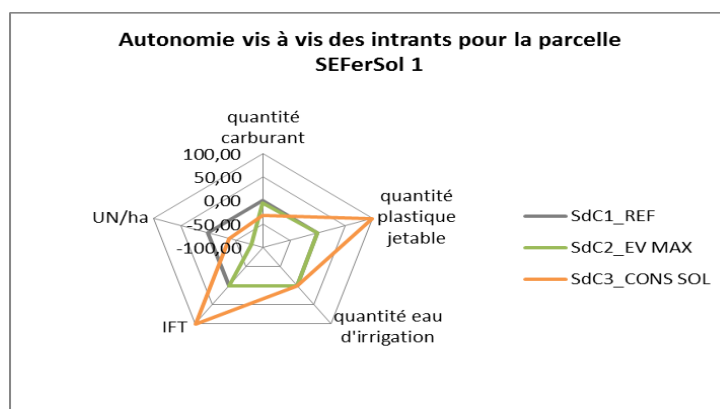


Figure 19 : Performances d'autonomie vis-à-vis des intrants de la parcelle SEFerSol 1 (moyenne sur les deux premières années, exprimée en pourcentage de variation par rapport à SdC 1).

Le système « Conservation du sol » a été traité contre les insectes et couvert avec du plastique, pour détruire le couvert végétal et gérer l'enherbement. Ceci le différencie fortement des deux autres systèmes sur le critère d'autonomie vis-à-vis des intrants au bout de deux ans (Figure 19). En revanche, la quantité de carburant est légèrement plus faible que sur les deux autres systèmes. Le système « Engrais vert max » ne se différencie pas du système « Référence » au bout de deux ans. La quantité d'azote utilisée retranscrit le gradient de fertilisation volontairement appliqué pour différencier les systèmes. Le système d'irrigation actuel ne permet pas d'irriguer séparément les systèmes, cet indicateur n'est donc pour l'instant pas discriminant.

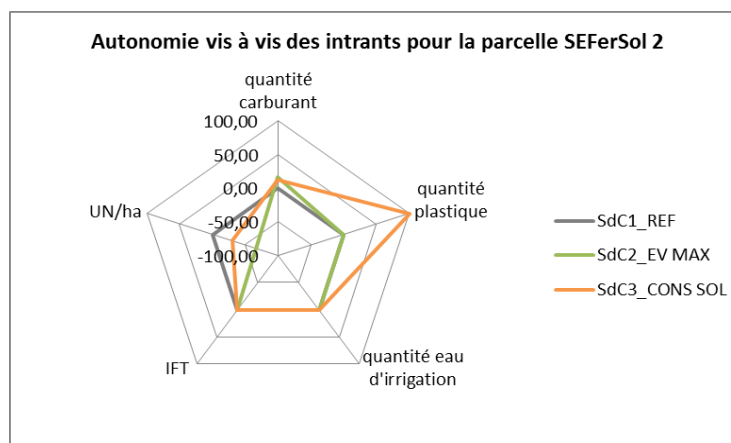


Figure 20 : Performances d'autonomie vis-à-vis des intrants de la parcelle SEFerSol 2 (année 1, exprimée en pourcentage de variation par rapport à SdC 1).

Sur la parcelle SEFerSol 2 (Figure 20), le système « conservation du sol » consomme effectivement plus de plastique que les autres systèmes. Cette dernière tendance est confirmée à l'échelle pluriannuelle et en prenant les deux parcelles comme des répétitions. En revanche ce SdC ne se différencie pas sur la quantité de pesticides appliquée (IFT) ou sur la quantité de carburant comme sur SEFerSol 1.

Partie 4 : Discussion

I. Analyse des résultats

I.1 Impacts des SdC sur la fertilité du sol

Les résultats concernant la fertilité du sol sont pour l'instant variables. On note des résultats significatifs à l'échelle d'une année, mais lorsqu'on se place à l'échelle de la succession culturale (au bout de 2 ans), aucune différence n'apparaît comme significative entre les SdC. En effet, sur une même parcelle, un système peut avoir des valeurs supérieures aux autres une année donnée, puis inférieures l'année d'après, comme par exemple le nombre de vers de terre sur SEFerSol 1. Les différences entre les systèmes de cultures sont également variables d'une parcelle à l'autre, comme par exemple l'infiltration de l'eau dans le sol. Ceci indique que pour l'instant, les différences observées entre les systèmes de cultures semblent surtout liées à l'année étudiée.

Plusieurs éléments peuvent cependant être discutés au regard des analyses précédentes. La biomasse fongique sur le système « conservation du sol » sur SEFerSol 1 en année 2, est significativement supérieure aux autres systèmes à 89 % de confiance. Une mesure sur les trois répétitions est particulièrement faible par rapport aux deux autres, ce qui empêche d'avoir un résultat tout à fait fiable. Ce système était couvert avec du BRF (Bois Raméal Fragmenté) en année 1 qui a été ensuite mélangé dans les 10 premiers centimètres du sol. Ce type de pratiques favorise l'augmentation de champignons dans le sol au détriment de la biomasse bactérienne (Hoorman 2011). On ne peut cependant pas confirmer que la biomasse bactérienne a bien diminuée.

La consommation en oxygène du sol est supérieure sur les systèmes innovants sur la parcelle SEFerSol 2 en année 1. La mesure a été faite au mois de Juin 2016, ceci semble donc indiquer que l'activité biologique s'est rapidement améliorée sur les systèmes innovants dès la première année d'expérimentation. On ne peut pas mettre en évidence la même tendance sur SEFerSol 1. De plus, cette mesure représente un potentiel d'activité biologique car c'est la respiration induite qui est mesurée en laboratoire. On ne peut donc pas être sûr que le potentiel est bien atteint dans le sol. Il est cependant possible que les actions combinées de la réduction du travail du sol, de l'apport de compost et de l'ajout d'engrais verts ou de mulch aient rapidement favorisés le développement de micro-organismes et d'une faune car les pratiques culturales précédentes étaient plus intensives.

De manière générale, la quantité de vers de terre observés sur SEFerSol est faible, par rapport à un sol de prairie où on peut en trouver plus d'une centaine au mètre carré. Dans les sols cultivés où le travail du sol est régulier, il est normal d'observer moins de vers, d'autant plus en maraîchage où les rotations sont rapides. Les vers sont sensibles à la sécheresse et préfèrent les conditions humides (Pelosi 2008). Il est donc cohérent d'en trouver moins dans des sols sableux superficiels et séchant, comme celui de SEFerSol. De plus, la méthode « moutarde » ne permet pas de faire remonter tous les vers, notamment lorsqu'ils sont en dormance. Tous ces éléments peuvent expliquer les faibles valeurs observées sur l'ensemble des années et la variabilité des mesures sur un système donné. Au printemps 2016 on observe plus de vers qu'au printemps 2015, ceci peut être dû à l'hiver particulièrement sec en 2015. Il est difficile d'expliquer les différences observées entre les systèmes. On pourrait penser que puisque le sol n'est pas travaillé sur le système « Conservation du sol », on trouverait plus de vers anéciques. Ces vers transitent de la surface, pour chercher leur source de nourriture : la matière organique, vers la profondeur du sol, en creusant des galeries qui favorisent la porosité du sol. Or le travail répété du sol casse ces galeries et participe à la fuite des vers anéciques. Cette hypothèse est vérifiée en 2017, le système « conservation du sol » possède plus de vers anéciques que les autres, mais c'est l'inverse en 2016. On remarque cependant que sur SEFerSol 1, seul le système « conservation du sol » présente des épigés. Ces vers restent à la surface des sols où ils se nourrissent de la matière organique (Pelosi 2008). Un sol couvert, avec de nombreux résidus et non travaillé favorise probablement leurs conditions de vies.

Bien qu'aucune différences entre ne soit observée, les systèmes sur la plupart des indicateurs relatifs à la valorisation des matières organiques, on peut noter que pour tous les systèmes le taux de MO est élevé: environ 3.5 %. Ce n'est donc pas un facteur limitant. L'équilibre entre la MO libre et la MO liée pour un sol sableux est conseillé autour de 60%

pour la MO liée et 40% pour la MO libre (Barbot 2015). Or les analyses ont montré que les deux parcelles se situent autour de 50 % pour les deux types de MO. Les valeurs de MO liée sont donc un peu faibles ce qui peut pénaliser la stabilité structurale du sol et sa capacité à fixer et échanger les nutriments. Il semble que les pratiques culturales sur les systèmes innovants ont tendance à améliorer la stabilité des agrégats sur SEFerSol 1 et 2. Ceci peut être une conséquence directe de la réduction du travail du sol, mais aussi de l'implantation de couverts végétaux qui augmentent la quantité de carbone organique dans le sol (Garcia-Franco et al. 2015).

En termes de structure, un léger tassement sur le SdC 3 a été observé en 2017 sur SEFerSol 2, c'est pourtant le système qui infiltre le mieux l'eau dans le sol à cette date. Le tassement observé lors du test bêche est donc à confirmer ou non les années suivantes. Le tassement structural des sols non travaillés est en effet un phénomène connu (Peigne et al. 2009). Pour cette même année, le système « engrais verts max » possède la meilleure note au test bêche. Il se différencie par sa bonne porosité avec la présence de nombreuses racines et agrégats grumeleux, effet probable des racines structurantes des engrais verts.

Pour les valeurs de carbone et d'azote minéralisés, les différences entre les systèmes de cultures sont variables d'une année à l'autre. La forte quantité de carbone minéralisé sur les deux parcelles en année 2 sur le système « Conservation du sol », est l'effet probable et combiné de l'apport de mulch et de la biomasse fongique qui joue son rôle de décomposition de la lignine et de la cellulose (Hoorman 2011).

L'analyse en composante principale révèle que la variabilité principale est pour l'instant expliquée par l'année (le type de culture), il faut plus de donnée pour atténuer cette variable. Les éléments précédents semblent indiquer que les systèmes de culture sont dans une phase de transition et qu'il est trop tôt pour conclure. Il est difficile d'émettre un jugement global sur la fertilité du sol d'après ces éléments, car les mécanismes sont à analyser dans l'ensemble de leurs interactions, qu'il n'y a pas assez d'éléments pour le faire et que les mesures sont variables.

I.2 Impacts des systèmes de cultures sur la qualité de l'eau

I.2.1 Fertilisation et dynamique des reliquats azotés dans le sol

L'analyse des reliquats azotés montre que l'azote est présent pour des valeurs élevées (au-dessus de 40 unités N/ha) dans les 30 premiers centimètres du sol à la sortie d'hiver (février, mars) et au printemps (avril à juin).

Chaque année, 30 à 60 tonnes de compost sont épandues au mois de mai sur tous les systèmes de culture. La quantité d'azote présente dans ce compost aura probablement tendance à se minéraliser rapidement dans les mois qui suivent, puisque dès les mois de mars-avril les températures augmentent, favorisant la reprise de l'activité biologique du sol. Les mesures d'activité biologique ou de minéralisation de l'azote ne permettent pas de vérifier cette hypothèse puisqu'il n'y a qu'une à deux mesures par an. De plus, l'ajout de fertilisant organique à l'implantation des cultures sur SdC1 et SdC3 joue probablement sur la quantité d'azote retrouvée dans le sol au printemps. En effet, l'apport est fractionné et peut s'élever à plus de 100kg d'azote par hectare selon les cultures, pour le SdC

de référence. Or à ce moment, les cultures sont faiblement développées, leur capacité d'absorption est limitée.

Le système « engrais vert max » présente significativement moins de reliquats azotés sur les deux ans sur SEFerSol 1. Cette observation peut trouver une explication dans le cumul des facteurs suivants : (1) le SdC ne reçoit aucune fertilisation organique, (2) des engrais verts sont systématiquement insérés avant les cultures et fixent l'azote, (3) les engrais verts intercalaires renforcent ce phénomène lorsqu'ils sont utilisés.

Sur la parcelle SEFerSol 2, aucune différence significative entre les SdC n'est observée. Le système « référence » semble se comporter comme le système « engrais vert max », à l'exception de 2017 où les reliquats sur « engrais vert max » sont plus élevés que sur les deux autres systèmes. On remarque cependant que le système « Conservation du sol » a des valeurs de reliquats azotés élevées au printemps 2015 puis très faibles au printemps 2016, comme sur SEFerSol 1. Sur SEFerSol2, au début du printemps 2016, le système « Conservation du sol » a été bâché après apport du compost, des engrais et plantation des pommes de terre. On peut émettre l'hypothèse que la bâche a favorisée une augmentation de la température du sol et accéléré la minéralisation de l'azote. Par la suite le système a été débâché et les pommes de terre ont été recouvertes d'un mulch de BRF qui a ensuite été incorporé au sol à l'automne. Au printemps suivant les cultures avaient plusieurs semaines de retard dans leur cycle de développement par rapport aux autres systèmes. Les cultures ont probablement souffert d'une faim d'azote à cause d'une trop grande quantité de mulch incorporée dans le sol l'année précédente. Cette hypothèse semble se confirmer puisque la quantité de carbone minéralisée est significativement plus grande sur ce système l'année qui suit (année 2) et la quantité d'azote minéralisé faible.

I.2.2 Couverts végétaux et dynamique du drainage

Les périodes où le drainage est particulièrement élevé, correspondent aux périodes où il y a également des reliquats azotés importants dans le sol : entre mars et mai. L'automne peut également être une période sensible en septembre et octobre.

Il n'y a pas de différences significatives sur le drainage entre les SdC. Cependant en considérant un minimum de 10mm d'écart en eau drainée pour exprimer des différences, on observe que le système engrais vert max présente moins de drainage que les deux autres systèmes : en juin 2016 sur SEFerSol 1, en février 2017 et juin 2017 sur SEFerSol 2. En septembre 2015, le système de référence présente un drainage plus élevé que sur les systèmes innovants. Ces différences semblent être dues à l'effet des couverts végétaux intercalaires (en Juin) et en interculture (en février et septembre) (Annexe 10).

I.2.3 Impact des SdC sur la concentration en nitrates dans la lame d'eau drainante

Au printemps 2015, la forte concentration potentielle en nitrates dans la lame d'eau drainante sur les SdC «Référence» et de « Conservation du sol » sur SEFerSol 1, s'explique par des reliquats azotés élevés pour ces deux systèmes alors que le drainage est faible. En octobre 2015, la forte concentration en nitrate sur le SdC de référence sur SEFerSol 1 (200 mgNO₃-/L) est expliquée à la fois par des reliquats azotés un peu élevés (60 kgN/ha) et un drainage assez fort (60 mm). Au printemps 2016, des conditions climatiques

particulièrement pluvieuses ont engendré d'importants drainages sur les SdC étudiés sur les deux parcelles SEFerSol 1 et 2. Sur SEFerSol2 des reliquats azotés particulièrement élevés sur le système de conservation du sol permettent d'expliquer une forte concentration en nitrates dans la lame d'eau drainante (120 mg/L).

On peut également observer les résultats au regard de la norme de potabilité, 50 mg NO_3^-/L , tout en sachant que les calculs de concentration en nitrates sous l'horizon racinaire ne représentent pas exactement ce qui percole réellement. Suivant ce critère, sur SEFerSol 2 il n'y a pas de différences entre les systèmes ; ils sont en même temps supérieurs ou inférieurs à la limite sur une même année.

I.3 Impacts sur les paramètres technico-économiques et sociaux et de l'autonomie vis-à-vis des intrants

I.3.1 Impacts des SdC sur les paramètres technico-économiques et sociaux.

L'analyse des performances technico-économique et sociales sur SEFerSol 1 révèle que le système « engrais vert max » se différencie majoritairement des autres par l'augmentation du temps de travail lié au désherbage en année 2 (2016). Le désherbage sur ce système est surtout maîtrisé par le passage mécanique de la bineuse ce qui permet de ne pas augmenter considérablement le temps de travail total sur ce système. En moyenne le rendement commercialisable est similaire à celui du système « référence », ce qui est confirmé statistiquement, et la marge directe est un peu plus faible que le système « référence ». Le système « conservation du sol » est significativement moins performants que le système « référence » au bout de deux ans sur SEFerSol 1. Le temps de travail lié au désherbage augmente légèrement et la marge directe diminue en moyenne de plus de 50% par rapport au système « référence », à cause d'une baisse de rendement.

Sur SEFerSol 2, les temps de travaux sont beaucoup plus élevés sur le système « conservation du sol » en année 1. Ceci est majoritairement dû au temps de désherbage manuel et surtout à la pose manuelle du mulch de BRF sur ce système. Malgré cela, la marge directe reste plus grande sur ce système que sur le système « référence » car les rendements sont significativement plus élevés. Sur le système « Engrais vert max », le temps de travail lié au désherbage est diminué mais la marge directe et le rendement également (environ 26 %).

I.3.2 Efficience de l'utilisation des ressources pour les SdC innovants

Le système « conservation du sol » consomme plus de plastique que les autres systèmes sur les deux parcelles. Il faudrait également compter la quantité de mulch apportée pour avoir une meilleure idée du besoin en intrants de ce système. On peut également observer l'efficience d'utilisation des intrants des SdC : le rendement produit (en kg/are) par rapport à la quantité d'intrants utilisés.

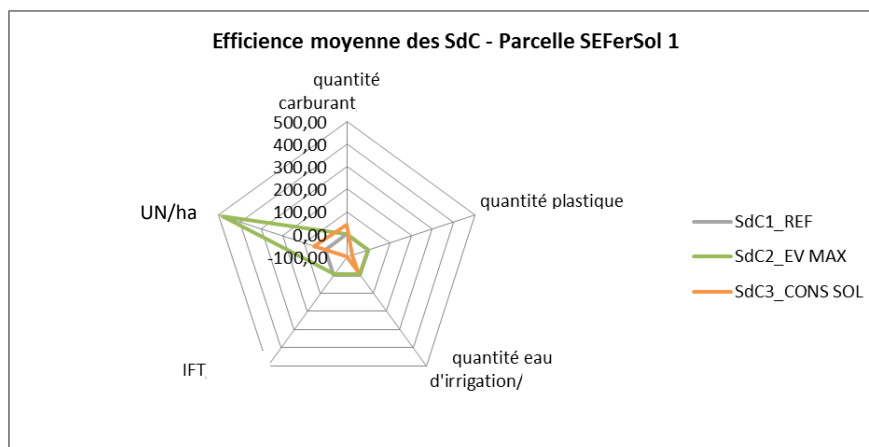


Figure 21 : Efficiences moyennes d'utilisation des intrants sur SEFerSol 1 (2 années). Exprimé en pourcentage de variation par rapport à SdC 1

En moyenne sur la parcelle SEFerSol 1, les systèmes de cultures innovants sont plus efficaces vis-à-vis de la quantité d'azote utilisée (Figure 21), le système de culture « Engrais vert max » est notablement plus efficace. En effet, alors que seul du compost et des engrais verts sont apportés, les rendements sont à priori équivalents à ceux du système « Référence ». De plus, malgré les faibles rendements observés sur le système « Conservation du sol » à l'échelle des deux ans, ce système reste plus efficace que le système de culture « Référence ». Une partie de l'azote pourrait être lixiviée lors des périodes de drainage, ce qui affecterait l'efficacité du SdC 1.

I.4 Les SdC répondent-ils à leurs objectifs initiaux ?

I.4.1 Tableaux de bords des différents critères

En utilisant une méthode d'analyse statistique, très peu de résultats apparaissent comme significatifs au bout de deux ans. Sur le critère de fertilité du sol, les systèmes ont probablement besoin de plus de temps pour se stabiliser et exprimer des différences. La variabilité des résultats est telle d'une année à l'autre, qu'à l'échelle des deux ans aucune tendance ne se dégage statistiquement. Il y a également des résultats qui nécessitent probablement plus de répétitions pour pouvoir exprimer des différences significatives. En effet, certains indicateurs sont seulement mesurés une fois par an. L'essai mis en place a donc une faible puissance statistique, ce qui est souvent le cas des expérimentations de type « système de culture » (Deytieux et al.,). Lorsqu'aucune différence n'est détectée, cela peut être parce qu'il n'y a pas assez d'éléments pour prouver la différence entre les SdC. En se basant uniquement sur ce type d'analyse, on prend donc le risque de manquer des tendances intéressantes à analyser.

Pour analyser les résultats avec plus de sensibilité, des tableaux de bords peuvent être réalisés à plusieurs niveaux : pour une ou plusieurs années, sur une parcelle, ou en prenant la moyenne des deux parcelles. Les tableaux 7,8,9 et 10 suivants présentent les tableaux de bord issus de la moyenne des parcelles SEFerSol 1 et SEFerSol 2 ainsi que des moyennes des années 1 et 2. Ceci permet de traiter la parcelle SEFerSol 2 comme une répétition de la parcelle SEFerSol 1. On peut ensuite transformer les valeurs obtenues en pourcentage de variation par rapport au système de référence. Le classement de ces indicateurs par des

seuils, permet ensuite de prendre plus ou moins de précautions selon les incertitudes qui les caractérisent.

Pour cette étude, on détecte une différence au seuil de 15 % de variation. Pour un indicateur donné, lorsque le pourcentage permet de juger que le SdC innovant est meilleur que sur le SdC « référence », l'objectif est atteint, la couleur affichée est verte. Lorsqu'il n'y a pas de différence entre les SdC, l'objectif n'est pas atteint, la couleur affichée est orange. Lorsque la différence observée permet de juger que le SdC innovant est moins performant que le SdC de référence, la couleur affichée est rouge car l'objectif n'est pas atteint.

Le cas des résultats technico-économiques est particulier, on souhaite que les SdC innovants soient au moins équivalents au SdC de référence sur ce critère. Lorsqu'il n'y a pas de différence significative sur ces indicateurs on affiche toujours la couleur orange, mais l'objectif initial est considéré atteint.

Pour le critère concernant l'impact sur la qualité de l'eau, les moyennes sont faites en prenant la valeur maximale de la concentration en nitrates dans la lame d'eau drainante pour une année donnée. Cette méthode présente des limites, car s'il y a plusieurs pics de concentrations en nitrates lixiviés sur une année, seul le maximum est pris en compte.

Tableau 7 : Tableau de bord du critère « impact sur la qualité de l'eau »

	Impact sur la qualité de l'eau	
	[NO ₃ -] lixivié	
SdC2	🟢	-53,20
SdC3	🟢	-19,88

Tableau 8: Tableau de bord du critère « résultats technico-économiques et sociaux »

	Performances sociales			Performance agronomique	Performances économiques	
	Organisation du travail			Résultat technique	Résultats économiques	
	tps_w_surchage	tps_w_total	tps_w_desh	Rdt_comm	cout_w_tot	marge_directe
SdC2	🔴 18,26	🟡 -0,86	🔴 73,52	🟡 -6,32	🟡 -0,81	🔴 -17,42
SdC3	🔴 37,00	🟡 7,44	🔴 36,04	🟡 -13,69	🟡 6,73	🔴 -47,24

Tableau 9: Tableau de bord du critère « autonomie vis-à-vis des intrants »

	Energies fossiles		Eau	Traitements	Fertilisants
	quantité carburant	quantité plastique jetable	quantité eau d'irrigation	IFT	UN/ha
SdC2	🟡 0,34	🟡 0,00	🟡 0,00	🟡 0,00	🟢 -79,72
SdC3	🟢 -28,28	🔴 29150,00	🟡 0,00	🔴 169,30	🟢 -41,88

Tableau 10: Tableau de bord du critère « fertilité du sol » Pour l'évaluation de la structure du sol, plus la note du test bêche est faible, meilleure est la structure.

	Activité biologique				Valorisation des MO			Disponibilité des éléments nutritifs		Structure	
	biomasse_bact	biomasse_fong	conso_oxy	nb_vdt	taux_MO	C_min	N_min	CA ²⁺ /CEC	K ₂ O	Structure	Stabilité
SdC2	🟡 -9,61	🟡 -11,50	🟢 15,55	🟡 14,93	🟡 -4,35	🟡 -14,43	🔴 -15,81	🟡 -10,00	🔴 -24,03	🟡 -6,72	🟡 14,04
SdC3	🟡 1,61	🔴 -16,30	🟢 19,99	🔴 -52,24	🟡 -5,80	🟡 7,64	🟡 -9,81	🟡 -13,76	🔴 -28,57	🟡 -9,70	🟢 19,78

Pour analyser la fertilité du sol, élaborer un tableau de bord relatif aux objectifs de l'expérimentation est plus délicat. L'objectif initial est l'amélioration globale de la fertilité du sol des systèmes de cultures innovants par rapport au système « référence ». Pour chaque indicateur, on évalue si on augmente ou non la valeur du pourcentage par rapport au SdC « référence ». En revanche, il est plus complexe de juger si l'objectif est atteint sur un indicateur. Par exemple, il est difficile de juger si une augmentation du pH ou du C/N de la MO libre, par rapport au système « référence », est une chose souhaitable ou non. Ce type d'indicateur ne suit pas une fonction linéaire mais possède un optimum (Moebius-Clune 2016). Etre supérieur ou inférieur au système « référence » peut être jugé bon pour la fertilité du sol jusqu'à une certaine limite. L'interprétation de ce type d'indicateurs a donc plus de sens en fonction du comportement de l'indicateur, des différentes valeurs qu'il peut prendre, et non en fonction du système « référence ». Le tableau de l'annexe 11 présente les indicateurs qui ne peuvent pas être interprétés linéairement dans le tableau de bord relatif au système « Référence ».

L'ensemble de ces résultats est à prendre avec certaines précautions car la variabilité des indicateurs sur les moyennes entre les parcelles et les années peut être grande. De plus, on confrontant les résultats statistiques, seule la quantité de plastique utilisée semble discriminant pour le système « conservation du sol ». Il est donc intéressant d'avoir également les tableaux de bords par parcelles et années et d'autre part d'utiliser la méthode sur une durée plus longue que seulement deux ans.

I.4.2 Synthèse des principales tendances

Avec seulement deux années de résultats pour SEFerSol 1 et une année de résultats pour SEFerSol 2, il est trop tôt pour savoir si les systèmes de cultures atteignent leurs objectifs et pour conclure sur leurs performances.

D'après les tableaux de bord, il y a malgré tout des éléments qui permettent de dire qu'en moyenne les systèmes innovants semblent réduire le maximum de nitrates potentiellement lixiviés dans la lame d'eau drainante. Le système « engrais vert max » présente une diminution de 53 % qui est probablement dû à la présence des couverts végétaux et à l'absence de fertilisation organique. Sur ce système de culture, le rendement ne semble pas impacté par l'absence de fertilisation organique. En revanche, les temps de travaux liés au désherbage sont considérablement augmentés (+ 76 %), ce qui pénalise la marge directe et l'autonomie vis-à-vis du carburant, car les outils de désherbage mécanique sont passés plus régulièrement. Il est possible que les difficultés pour maîtriser l'enherbement sur « Engrais vert max » proviennent des adventices qui grainent dans les engrais verts.

Sur le système « conservation du sol » c'est surtout l'augmentation du temps de travail et une légère baisse du rendement commercialisable qui semble pénaliser la marge directe. Le temps de travail est surtout augmenté par la pose manuelle de mulch sur ce système. Le temps de travail lié au désherbage est également plus élevé sur ce système (+36 %) car il est manuel. Les difficultés de maîtrise de l'enherbement peuvent provenir de la composition du mulch apporté (résidus de tontes de l'établissement, paille). L'autonomie vis-à-vis du carburant est meilleure mais par ailleurs, on utilise plus de bâches plastiques et de mulch. Pour estimer l'impact des systèmes sur la ressource en énergie fossile, une agrégation est nécessaire sur ces indicateurs. Il est possible de convertir les indicateurs en quantité de CO₂ dépensée pour la fabrication des bâches et pour l'utilisation du carburant. L'incorporation du mulch sur le système « conservation du sol » engendre probablement une faim d'azote sur les premiers centimètres du sol, avec un retard sur le cycle de développement des cultures. Cette hypothèse reste à confirmer car les prélèvements de terre sont faits en dessous des 10 premiers centimètres du sol. A cette profondeur, il y a probablement de l'azote disponible, mais la culture tout juste implantée, n'a pas le système racinaire assez développé pour y accéder.

Pour les deux systèmes de cultures innovants, on note une tendance à la baisse de la biomasse bactérienne et de la biomasse fongique par rapport au système « Référence ». Ce résultat est étonnant car la consommation en oxygène du sol semble augmentée sur les systèmes innovants. La fiabilité de ces mesures peut être discutée car les valeurs par années sont variables. On note également une augmentation de la stabilité des agrégats pour les systèmes de cultures innovants.

Il faut plus de données pour pouvoir identifier des différences entre les SdC et confirmer statistiquement ou non les tendances observées. En conséquence, les résultats présentés sur une année donnée, ou dans les tableaux de bords ne représentent pas des conclusions sur les SdC, mais de nouvelles hypothèses qui sont à valider ou invalider soit avec le temps, soit avec de nouveaux essais plus puissants. L'expérimentation SEFerSol fait régulièrement l'objet de visites où les maraîchers de la région peuvent se renseigner et prendre connaissance de l'évolution de l'expérimentation. Il est donc important de prendre des précautions quant à la communication des tendances observées sur les SdC innovants.

II Limites de la méthode et améliorations possibles

II.1 Limites de la méthode proposée

II.1.1 Incertitudes et approximations liées aux indicateurs choisis

Il existe des incertitudes liées aux méthodes de mesures des indicateurs, qui n'ont pour l'instant pas été communiquées par les laboratoires d'analyse. Dans la mesure où on cherche à mettre en place une méthode d'évaluation des performances globales, les mesures sont transformées en d'autres indicateurs ou critères et l'incertitude sur une mesure aura tendance à se propager. Une incertitude élevée sur une mesure, abaissera grandement la fiabilité de l'étude, même si les autres mesures sont plus fiables.

La quantification des populations de vers de terre semble être un des indicateurs de terrain les plus incertains. En effet, l'arrosage d'une placette avec de la moutarde ne permet

pas de faire remonter les vers en dormance. Le nombre de vers de terre qui remonte à la surface n'est donc pas révélateur du nombre de vers réels dans le sol si on en détecte peu. Il peut y avoir plus d'une dizaine de vers en dormance dans le sol et aucun vers observé après application de la moutarde (Capowiez, communication personnelle). De plus, le nombre de vers en dormance est fortement conditionné par le climat (temps sec, froid), les mesures observées par cette méthode seront donc très variables d'une année à l'autre. Il pourrait être intéressant de remplacer la méthode de comptage des vers de terre actuelle par un prélèvement de sol à la bêche.

La méthode d'estimation du risque de lixiviation azotée a fait l'objet de plusieurs approximations sur la RU, les coefficients cultureux des couverts végétaux et cultures, l'humidité volumique du sol et la profondeur d'enracinement. Les choix qui ont été faits sont détaillés dans l'annexe 5.

II.1.2 Analyse de la méthode d'évaluation proposée

Le tableau 11 résume les points forts de la méthode utilisée dans l'étude ainsi que les limites qui en découlent.

Tableau 11: Evaluation de la méthodologie proposée pour l'analyse des résultats

Critères d'analyses de la méthodologie (Lairez et al. 2015)	Points forts	Points de vigilance
Pertinence	-Tests statistiques adaptés au dispositif expérimental -La moyenne des résultats permet de prendre en compte les systèmes de culture sur plusieurs années -Les résultats sont comparés par rapport aux objectifs (% de variation du SdC REF)	-On ne sait pas comment se situe le SdC REF globalement. Les résultats doivent être comparés à des références techniques ou scientifiques pour être contextualisés
Sensibilité	-Mise en évidence de différences entre les systèmes -La grande partie des indicateurs sélectionnés est sensible	-Il est possible que les tests statistiques ne soient pas significatifs car il n'y pas assez de données, et non pas car il n'y a pas de différence. D'où l'utilisation du pourcentage de variation. -Certains indicateurs relatifs à la MO peuvent mettre plusieurs années à varier.
Robustesse	-La robustesse de la méthode réside dans la confrontation des analyses statistiques à une analyse du pourcentage de variation	-Selon les seuils fixés dans les

	des indicateurs des SdCi par rapport au SdC REF. La comparaison des résultats issus des deux méthodes permet d'observer des tendances assortie d'une évaluation de leur fiabilité statistique.	tableaux de bord, l'interprétation des indicateurs peut varier -La puissance statistique de l'essai est faible
Atteinte des objectifs de l'évaluation	-La méthode permet de comprendre et analyser les performances des SdC sur les critères à différentes échelles de temps. -Les tableaux de bord permettent une visualisation et communication facilitée des résultats	-La performance globale des SdC n'est pas évaluée. Une démarche d'agrégation est nécessaire pour répondre à cet objectif
Approbation par le groupe d'acteurs	-Une démarche participative a permis de faire intervenir le groupe d'acteur dans les choix méthodologiques à l'échelle des indicateurs individuels et plus globale à l'échelle de chacun des quatre critères.	

II.1.3 Amélioration des indicateurs de performances

En maraîchage, la gestion des adventices nécessite souvent un temps de travail important, susceptible de pénaliser économiquement les systèmes de cultures et d'augmenter la pénibilité du travail. La gestion des adventices est d'autant plus importante lorsqu'on cherche à réduire le travail du sol, à apporter du compost, car ce sont des facteurs susceptibles d'augmenter le stock de graines à la surface du sol. La gestion de l'enherbement représente également un enjeu en maraîchage biologique où le levier d'action chimique n'est pas envisageable. Ainsi, il serait intéressant d'inclure des indicateurs plus précis que le temps de désherbage pris en compte dans la méthode, pour caractériser l'enherbement sur les SdC. Il est notamment envisagé, pour les prochaines années d'expérimentation, de caractériser plus précisément le taux de recouvrement des adventices et leur type sur chaque système à différents stade des cultures.

Afin d'améliorer l'analyse des performances techniques des systèmes de cultures testés, il serait intéressant d'élaborer un indicateur de faisabilité des systèmes de cultures. On pourrait notamment envisager de quantifier l'écart entre ce qui était prévu et ce qui a été effectivement réalisé.

On pourrait également préciser la réussite agronomique des SdC avec des indicateurs autres que le rendement commercialisable. En effet, on a observé que les cultures sur le système de conservation du sol avaient souvent un cycle de croissance plus long, décalant la date de récolte par rapport aux autres systèmes. La durée du cycle de culture pourrait être prise en compte dans les indicateurs de performances agronomiques. L'efficacité d'utilisation des intrants pourrait également être insérée parmi les indicateurs agronomiques.

En plus des analyses détaillées critère par critère évoquées précédemment, une ACP globale sur l'ensemble des indicateurs, permettrait de pointer les variables qui expliquent principalement les différences entre les individus.

II.2 Propositions d'améliorations de la méthode et perspectives pour le projet SEFerSol

II.2.1 Analyser les résultats par rapport à des références « dans l'absolu ».

Pour compléter l'évaluation des SdC, il est possible de situer les valeurs des indicateurs par rapport à des références plus globales, issues de la littérature scientifique, issues de références régionales, ou par rapport aux attentes des agriculteurs. Pour chaque indicateur il faut donc faire des choix de références bibliographiques dont le domaine de validité se rapproche de celui de l'expérimentation. On peut alors définir de nouvelles classes avec des valeurs seuils qui permettent de juger les indicateurs. Cette méthode peut déboucher sur l'élaboration d'un nouveau tableau de bord. Il peut ensuite être intéressant de confronter le tableau de bord « relatif », basé sur la comparaison vis-à-vis du système de référence, au tableau de bord « absolu », basé sur des données nombreuses acquises à un niveau régional permettant d'établir des références plus globales. L'évaluation de la fertilité du sol sous cet angle est de plus en plus recherchée. Des références sont cependant manquantes, notamment en maraîchage biologique.

II.2.2 Synthétiser les performances par l'agrégation

Pour obtenir une note de performance par critère, il est nécessaire de réaliser une agrégation sur les notes des indicateurs. De même, pour obtenir une note de performance globale par SdC, il est nécessaire d'agréger les notes des critères entre elles. L'agrégation doit être faite une fois que les indicateurs ont été analysés et jugés. Cette étape intervient donc après la conception des tableaux de bord. L'agrégation peut être réalisée sur les deux tableaux de bords « relatif » et « absolu ».

Etant donné les nombreux biais que peuvent engendrer les choix faits lors d'une agrégation (pondération, hiérarchisation, règles de décisions) il est nécessaire d'analyser la pertinence de cette méthode au regard des objectifs du projet. La communication de l'information désagrégée est également essentielle. L'agrégation peut être réalisée par une arborescence de type DEXi.

Le schéma méthodologique final proposé pour l'analyse des résultats du projet SEFerSol est présenté en Annexe 12.

II.2.3 Améliorer la méthodologie d'analyse de la fertilité du sol

Au début du projet SEFerSol, les indicateurs de la fertilité du sol ont été organisés en sous-critères selon les caractéristiques du sol: activité biologique, disponibilité en éléments nutritifs, propriétés physiques et valorisation des MO. Or les éléments qui composent ces quatre sous-critères sont en constante interaction. La matière organique par exemple influence l'activité biologique mais également la stabilité des agrégats, la structure du sol et la saturation du complexe argilo-humique. Si l'agrégation est réalisée selon cette disposition segmentaire des indicateurs, elle fera abstraction des corrélations et complexes interactions entre les indicateurs.

Il peut être plus intéressant de ré-organiser les indicateurs selon les fonctions qu'ils expriment. Un indicateur pourra donc apparaître dans plusieurs sous-critères ou fonctions du sol. C'est la redondance des indicateurs qui permettra de donner leur poids dans

l'évaluation de la fertilité du sol. Grâce à cette méthode, on s'affranchirait de l'étape arbitraire de la pondération dans l'agrégation, on gagnerait donc en précision dans l'évaluation et en justesse agronomique. Un travail de bibliographie est cependant nécessaire pour caractériser précisément les relations entre les paramètres de la fertilité du sol.

Conclusion

La méthode d'évaluation proposée dans cette étude a été construite à la suite de réunions techniques avec les partenaires du projet. Elle offre une analyse à différents niveaux et échelles, permettant d'observer les résultats du projet SEFerSol sous de multiples angles. L'association des analyses statistiques et d'une méthode par tableau de bord, permet d'alterner entre des méthodes sensibles (tableau de bord) ou plus précises (statistiques), ce qui permet de prendre des précautions sur l'interprétation et la robustesse des résultats.

A l'issue de l'analyse, on ne peut pour l'instant pas conclure à une amélioration de la fertilité du sol sur les systèmes de cultures innovants. La stabilité des agrégats semble améliorée, en revanche sur les autres paramètres les résultats sont variables. La quantité d'azote potentiellement lixiviée sur les systèmes innovants semble plus faible, notamment sur le système « Engrais Vert Max ». Sur ce système, on ne note pas de différence significative de rendements commercialisables avec le système « Référence » cependant les temps de travaux liés au désherbage augmentent. Le système « conservation du sol » semble également pénalisé par une augmentation du temps de travail à la fois par l'augmentation du temps de désherbage manuel et la pose de mulch.

L'analyse des résultats proposée dans cette étude constitue un test qui permet d'éprouver la méthode proposée. L'analyse a pour l'instant été menée par rapport aux objectifs qui ont été fixés au début du projet : augmenter les performances des systèmes de cultures innovants par rapport au système « Référence ». Or il serait enrichissant de pouvoir comparer les valeurs obtenues sur les systèmes de cultures à des références régionales ou à d'autres études. Une perspective pour le projet SEFerSol est de réaliser une agrégation sur les différents indicateurs pour avoir des notes de performances par critères. Avant de pouvoir réaliser cette étape sur le critère de fertilité du sol, il convient d'obtenir des références pertinentes et d'améliorer la compréhension des paramètres de la fertilité du sol.

Pour la suite du projet SEFerSol, les défis à relever sont de confirmer la faisabilité technique des systèmes de cultures et de cerner d'avantage leurs performances globales. La démarche du projet est exploratoire, peu de références similaires existent en maraîchage biologique pour l'instant. Tester et évaluer des systèmes de cultures qui entretiennent la fertilité du sol est d'actualité, plusieurs projets voient le jour en France. Aux Etats Unis, certains projets se sont récemment heurtés à ces questions méthodologiques (Moebius-Clune 2016). Une perspective intéressante pour le projet SEFerSol est de pouvoir s'insérer pleinement dans cette dynamique d'évaluation de la fertilité du sol, en échangeant avec les acteurs des différents projets qui voient le jour.

Bibliographie

- Acosta-Alba, Ivonne, et Hayo Van der Werf. 2011. « The Use of Reference Values in Indicator-Based Methods for the Environmental Assessment of Agricultural Systems ». *Sustainability* 3
- Acton, D.F. 1994. « A program to assess and monitor soil quality in Canada ». Soil Quality Evaluation Program Summary Report. Ottawa: Centre for Land and Biological Resources Research, Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada.
- Al Majou, Hassan, Ary Bruand, Odile Duval, et Isabelle Cousin. 2007. « Variation of the Water-Retention Properties of Soils: Validity of Class-Pedotransfer Functions ». *Comptes Rendus Geoscience*
- Andrews, S.S, D.L Karlen, et C.A Cambardella. 2004. « The Soil Management Assessment Framework: A Quantitative Soil Quality Evaluation Method »..
- Barbot, C. 2015. « La matière organique dans les sols agricoles. L'optimisation de la gestion organique à court et moyen terme. » présenté à Comité de suivi BRF, SDEA Benfeld.
- Bastida, F., A. Zsolnay, T. Hernández, et C. García. 2008. « Past, Present and Future of Soil Quality Indices: A Biological Perspective ». *Geoderma* 147 (3-4)
- Bockstaller, Christian, Laurence Guichard, David Makowski, Anne Aveline, Philippe Girardin, et Sylvain Plantureux. 2008. « Agri-Environmental Indicators to Assess Cropping and Farming Systems. A Review ». *Agronomy for Sustainable Development* 28 (1)
- Bodiou, Danielle. 2009. « Steve Groff, une stratégie de couverture permanente des sols. » *TCS*, n° 52.
- Cadillon, A, et L Fourrié. 2014. « Fertilité des sols : la gérer maintenant pour mieux produire demain ». *Alter Agri*.
- Carof, M., B. Colomb, et A. Aveline. 2013. « A Guide for Choosing the Most Appropriate Method for Multi-Criteria Assessment of Agricultural Systems According to Decision-Makers' Expectations ». *Agricultural Systems* 115 (février): 51-62.
- Cérémonie, H., D. Cluzeau, D. Cylly, J. F. Vian, J. Peigné, L. Gontier, L. Fourrié, P. A. Maron, E. D'oiron Verame, et L. Ranjard. 2017. « Validation d'un tableau de bord d'indicateurs sur un réseau national de fermes en grande culture et en viticulture pour diagnostiquer la qualité biologique des sols agricoles. » *Innovations agronomiques* 55: 41-54.
- Certu. 2013. « La réserve utile en eau du sol (RU) ». In *Mesure de la consommation d'espace à partir des fichiers fonciers. Qualification des espaces agricoles et naturels consommés ou susceptibles de l'être*, Certu, Fiche 4.3:174-78.
- Chambre régionale d'agriculture du Languedoc-Roussillon. 1997. *Guide des produits organiques utilisables en agriculture en Languedoc-Roussillon-Tome1*.
- Chaussod, R. 1996. « La qualité biologique des sols : Evaluation et implications », Etude et gestion des sols, n° 3: 261-78.
- Clerc, F. 2012. « Efficacité de différents mulchs comme alternative à l'entretien mécanique dans la lutte contre l'enherbement. Suivi de leur évolution après incorporation systématique en fin de culture. », *Echo-MO*, n° 98.

- Craheix, D., F. Angevin, T. Doré, et S. de Tourdonnet. 2016. « Using a Multicriteria Assessment Model to Evaluate the Sustainability of Conservation Agriculture at the Cropping System Level in France ». *European Journal of Agronomy* 76 (mai): 75-86.
- Craheix, Jacques-Eric Bergez, Frédérique Angevin, Christian Bockstaller, Marko Bohanec, Bruno Colomb, Thierry Doré, et al. 2015. « Guidelines to Design Models Assessing Agricultural Sustainability, Based upon Feedbacks from the DEXi Decision Support System ». *Agronomy for Sustainable Development* 35 (4): 1431-47.
- Deytieux, V, C Vivier, S Minette, J-M Nolot, S Piaud, A Schaub, N Lande, et al. 2012. « Expérimentation de systèmes de culture innovants : avancées méthodologiques et mise en réseau opérationnelle », *Innovation Agronomiques*, 20: 49-78.
- Dragon, S, et C Icard. 2010. « Effet d'apport de différents amendements organiques sur les propriétés du sol. Bilan de 15 années d'essai en culture légumière à la SERAI », *Echo-MO*, n° 81.
- Duchaufour, D. 1984. « Pédologie », *Abrégés de Sciences*, 63-63.
- FAO. 2011. *Produire plus avec moins. Guide à l'intention des décideurs sur l'intensification durable de l'agriculture paysanne*.
- Garcia-Franco, N., J. Albaladejo, M. Almagro, et M. Martínez-Mena. 2015. « Beneficial Effects of Reduced Tillage and Green Manure on Soil Aggregation and Stabilization of Organic Carbon in a Mediterranean Agroecosystem ». *Soil and Tillage Research* 153 (novembre): 66-75.
- Gis Sol. 2013. « fiches_RMQS ».
- Gobat, Jean-Michel, Michel Aragno, Willy Mathey, Collectif, et René Bally. 2010. *Le sol vivant: Base de pédologie-biologie des sols*. 3^e éd. Lausanne: PPUR.
- Hoorman, James J. 2011. « The role of soil fungus ». *Agriculture and Natural Resources. SAG-14-11*.
- Huber, Gérald, et Christiane Schaub. 2011. « La fertilité des sols: L'importance de la matière organique ».
- INRA. 2010. « LE SOL, un dossier pour comprendre les enjeux ».
- Karlen, D.L, M.J Mausbach, J.W Doran, et G.E Schuman. 1997. « Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial) ». *ResearchGate*.
- Kemper, W. D., et R. C. Rosenau. 1986. « Aggregate stability and size distribution ».
- Koller, R, A Schaub, et J.P Theau. En cours de préparation. « La fertilité des sols ».
- Lairez, J, P Feschet, J Aubin, Christian Bockstaller, et I Bouvarel. 2015. *Agriculture et développement durable. Guide pour l'évaluation multicritère*. Quae et Educagri.
- Maurizi, Brigitte, et Jean-Louis Verrel. 2002. « Des indicateurs pour les actions de maîtrise des pollutions d'origine agricole ». *Ingénieries-EAT*, n° 30: p-3.
- Mazollier, Catherine, et Hélène Vedie. 2003. « Les engrais verts en maraîchage biologique ». *Alter Agri* 60: 22-25.
- METEO FRANCE. 2017. « METEO COLMAR ». <http://www.meteofrance.com/previsions-meteo-france/colmar/68000>.
- Moebius-Clune, Bianca Nadine. 2016. *Comprehensive Assessment of Soil Health: The Cornell Framework Manual*.
- Morel, R. 1989a. « Analyse des facteurs de la croissance de la plante pour la définition du concept de fertilité des sols », *Fertilità del suolo e nutrizione delle piante*, 57-73.
- Nardo, Michela, Michaela Saisana, Andrea Saltelli, et Stefano Tarantola. 2005. « Tools for composite indicators building ». *European Commission, Ispra* 15: 19-20.

- OCDE. 2001. « Multifonctionnalité, élaboration d'un cadre analytique ».
- Party, Jean-Paul. 2003. *Petite région naturelle n°12 Piémont haut-rhinois et Ochsenfeld*. Guide des sols d'Alsace. Région d'Alsace.
- Peigne, J., H.Vedie, J. Demeusy, M. Gerber, JF Vian, Y. Gautronneau, M. Cannavacciuolo, et al. 2009. « Conservation tillage in organic farming ». *Carrefours de l'Innovation Agronomique* 4: 23–32.
- Pelosi, Céline. 2008. « Modélisation de la dynamique d'une population de vers de terre *Lumbricus terrestris* au champ. Contribution à l'étude de l'impact des systèmes de culture sur les communautés lombriciennes ». AgroParisTech.
- Reau, Raymond, et Thierry Doré. 2008. *Systèmes de culture innovants et durables*. Educagri. Transversales.
- Sadok, Walid, Frédérique Angevin, Jacques-Eric Bergez, Christian Bockstaller, Bruno Colomb, Laurence Guichard, Raymond Reau, Antoine Messéan, et Thierry Doré. 2009. « MASC, a Qualitative Multi-Attribute Decision Model for Ex Ante Assessment of the Sustainability of Cropping Systems ». *Agronomy for Sustainable Development* 29 (3): 447-61.
- Sebillote, M. 1990. « Systeme de culture, un concept operatoire pour les agronomes. » *Un point sur...-INRA Les systèmes de cultures* (165-196).
- SIGES. 2017. « La nappe d'Alsace ». <http://sigesar.brgm.fr/-La-nappe-d-Alsace->. <http://sigesar.brgm.fr/-La-nappe-d-Alsace->.
- Soltner, Dominique. 2000. *Les bases de la production végétale, tome 3. La plante et son amélioration*. 7e édition. Sainte-Gemmes-sur-Loire (Maine-et-Loire): Sciences et Techniques Agricoles.
- Tilman, David, Kenneth G. Cassman, Pamela A. Matson, Rosamond Naylor, et Stephen Polasky. 2002. « Agricultural sustainability and intensive production practices ». *Nature* 418 (6898): 671-77.
- USDA. 1999. « Soil Quality Test Kit Guide ». United States Department of Agriculture , Agricultural Research Service Natural Resources, Conservation Service Soil Quality Institute.
- Vedie, H. 2010. « DOSSIER SPECIAL Fertilisation azotée en maraîchage biologique de plein champ : résultats des essais du GRAB ». *Maraîchage Bio infos*, n° 64.
- Vedie, H, et L Romet. 2008. « Optimisation du travail du sol en AB : Comparaison de deux itinéraires en maraîchage ». GRAB d'Avignon.
- Vedie, Hélène, Fabrice Clerc, Jean-Michel Lhôte, et David Grébert. 2012. « Cultiver sans labourer en maraîchage biologique de plein champ: Quels résultats sur planches permanentes ». *Alter Agri*, n° 116.

ANNEXES

Table des ANNEXES

ANNEXES	61
Annexe 1 : Les outils utilisés pour la technique des planches permanentes.....	62
Annexe 2 : Tableau des différentes méthodes de transformations des indicateurs.....	63
Annexe 3 : Photographies des parcelles expérimentales SEFerSol 1 et 2	64
Annexes 4: Détail des itinéraires techniques sur SEFerSol1 et SEFerSol2	65
Annexe 4.1 : Itinéraire technique sur SEFerSol 1 année 1 SdC 1	65
Annexe 4.2 : Itinéraire technique sur SEFerSol 1 année 1 SdC 2	66
Annexe 4.3 : Itinéraire technique sur SEFerSol 1 année 1 SdC 3	67
Annexe 4.4 : Itinéraire technique sur SEFerSol 2 année 1 SdC 2	68
Annexe 5 : Méthode de calcul de la concentration théorique en nitrates dans la lame d'eau drainante.....	69
Annexe 6 : Choix méthodologiques et représentation des résultats	71
Annexe 7 : Résultats des tests de Kruskal Wallis	75
Annexe 8 : Résultats du test bêche sur SEFerSol 2 en 2017	78
Annexe 9 : Représentation des résultats des analyses statistiques.....	79
Annexe 10 : Graphiques des pratiques culturales corrélées au risque de lixiviation.....	83
Annexe 11 : Tableau de bord des indicateurs de la fertilité du sol.....	86
Annexe 12 : Schéma méthodologique final proposé pour l'évaluation des résultats du projet SEFerSol maraîchage biologique	87

Annexe 1 : Les outils utilisés pour la technique des planches permanentes

La technique des planches permanentes consiste à proposer un itinéraire de travail du sol moins agressif. Les outils rotatifs sont supprimés ainsi que le labour. Les passages de roues sont permanents. Pour ce type de technique, l'outillage doit être adapté. Le projet SEFerSol bénéficie du partenariat avec l'Atelier Paysan, qui lui a permis d'auto-construire les outils nécessaires à la formation des planches permanentes.



Figure 22: Butteuse à planche

La butteuse à planche remplace la charrue et permet l'enfouissement des résidus végétaux sans travail du sol profond, grâce à la formation d'une butte.

La butteuse permet de travailler le sol superficiellement (10cm de profondeur). Elle est composée de 3 paires de disques, un buttoir central et deux pattes d'oies qui travaillent les allées.



Figure 23: Vibroplanche

Le vibroplanche est un outil d'affinage du sol. Il remplace les outils d'affinage pré-semis comme le cultivateur. Il peut être passé après la butteuse ou le cultibutte s'il reste encore trop de mottes.

Le vibroplanche est composé de 7 dents vibrantes, d'une herse, de deux pattes d'oies pour les allées et de deux déflecteurs qui maintiennent la forme de la butte



Figure 24: Cultibutte avec herse

Le cultibutte est un outil qui permet d'entretenir et de façonner la butte. Il est composé d'une partie fixe (deux disques qui reforment la butte) et d'une partie modulable (une herse et deux déflecteurs et ou un rouleau).

L'amplitude de travail du cultibutte est de 0 à 30 cm mais dans une optique de travail superficiel il est utilisé à 10 cm de profondeur.

Annexe 2 : Tableau des différentes méthodes de transformations des indicateurs

Tableau 12 : Méthodes de transformations des indicateurs utiles à leur interprétation (Lairez et al. 2015)

Méthode de transformation	Principes de la transformation	Avantages et limites
Classement	L'indicateur prend la valeur du classement par rapport aux valeurs des autres systèmes étudiés. (par exemple 1, 2, 3)	Permet de comparer facilement des exploitations. Perte d'informations importante comme l'écart entre les systèmes.
Mise en classe	Les valeurs qualitatives ou quantitatives sont mises en classes par rapport à la référence. (Par exemple faible, moyenne, élevée)	On peut prendre en compte les incertitudes liées à l'indicateur. Il peut être difficile d'arbitrer sur les limites des classes. Deux valeurs très proches peuvent être dans des classes différentes, c'est « l'effet de seuil ».
« Scoring »	La valeur de l'indicateur prend la valeur d'un score attribué selon une échelle qui peut être fixe ou variable. La valeur peut également être attribuée selon une fonction mathématique.	En se basant sur une fonction mathématique continue, l'effet de seuil est limité.
Mise en unité commune	Basé sur des modèles mathématiques, il est possible de transformer des indicateurs qui sont liés et de les exprimer en une même unité.	Cette transformation requiert une expertise fine. La validité des modèles utilisés peut faire l'objet de discussions.
Normalisation interne	L'indicateur peut prendre la valeur de sa moyenne, de l'écart type. Il peut être re-calibré en fonction des valeurs extrêmes, ou par un pourcentage de variation par rapport à une référence relative.	Ne permet pas de situer l'indicateur de manière absolue. Les choix de seuils ne sont pas nécessaires. Pour la dernière option, on peut situer facilement le système par rapport à la référence.

Annexe 3 : Photographies des parcelles expérimentales SEFerSol 1 et 2

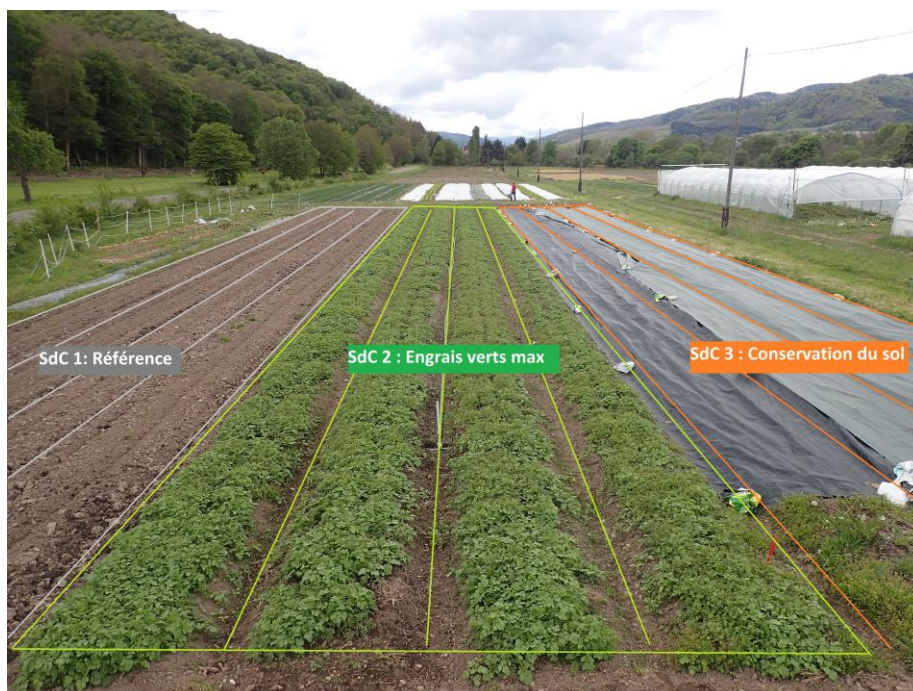


Figure 25: parcelle SEFerSol 1



Figure 26: parcelle SEFerSol 2

Annexes 4: Détail des itinéraires techniques sur SEFerSol1 et SEFerSol2

Annexe 4.1 : Itinéraire technique sur SEFerSol 1 année 1 SdC 1

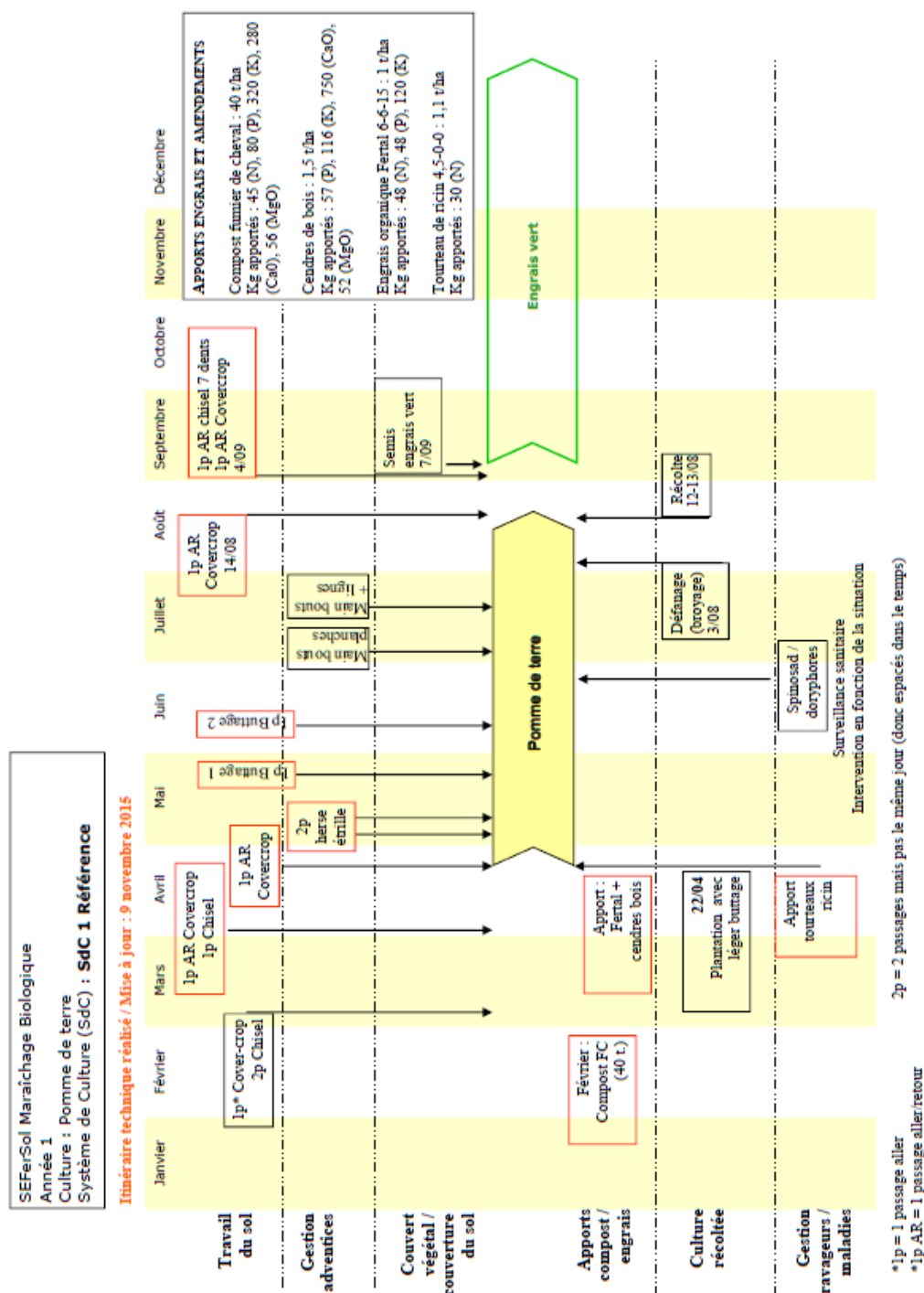


Figure 27: Itinéraire technique sur SEFerSol 1 année 1 SdC 1

Figure 28 : Itinéraire technique sur SEFerSol 1 année 1 SdC 2

Annexe 4.3 : Itinéraire technique sur SEFerSol 1 année 1 SdC 3

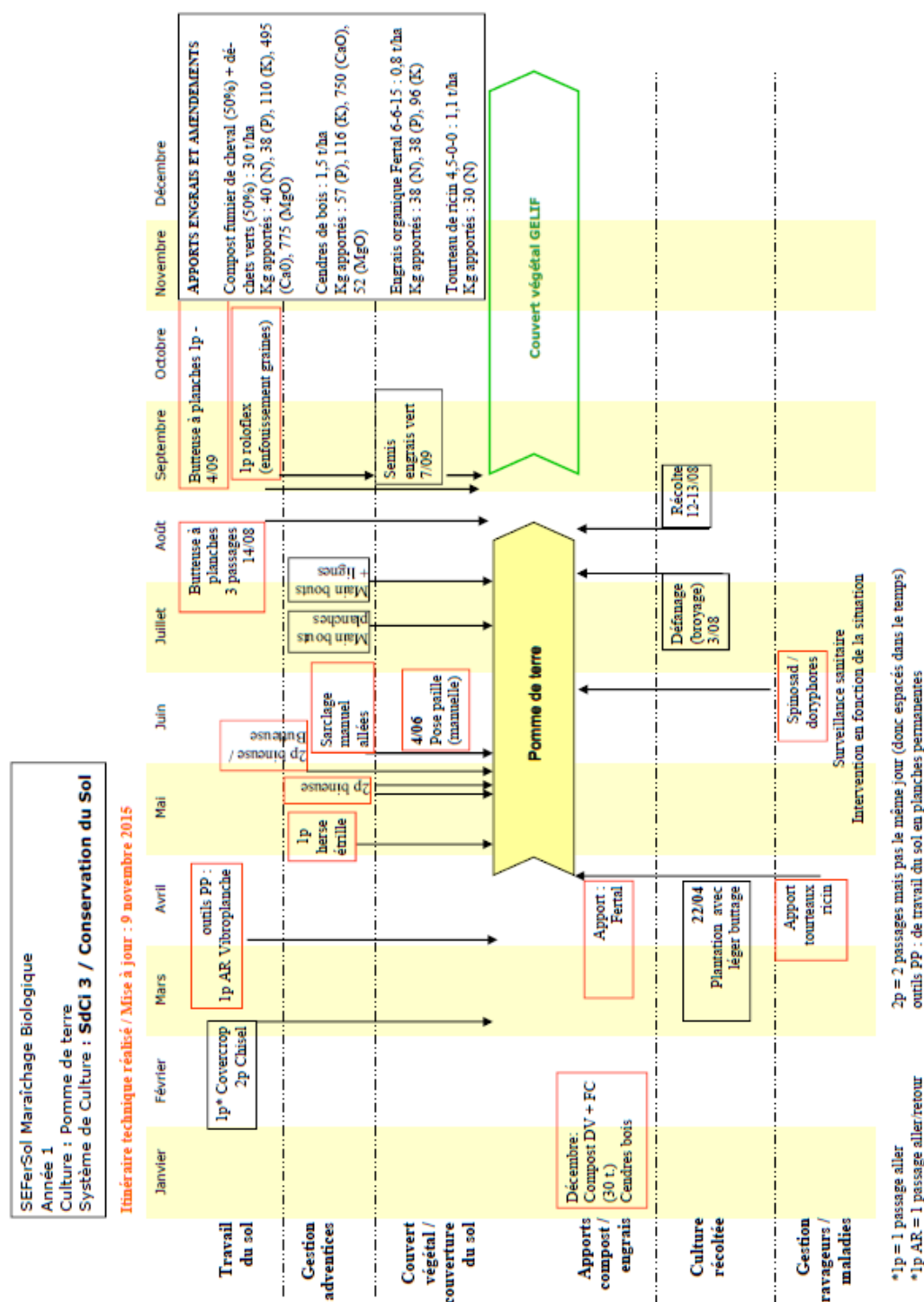


Figure 29: Itinéraire technique sur SEFerSol 1 année 1 SdC 3

Annexe 4.4 : Itinéraire technique sur SEFerSol 2 année 1 SdC 2

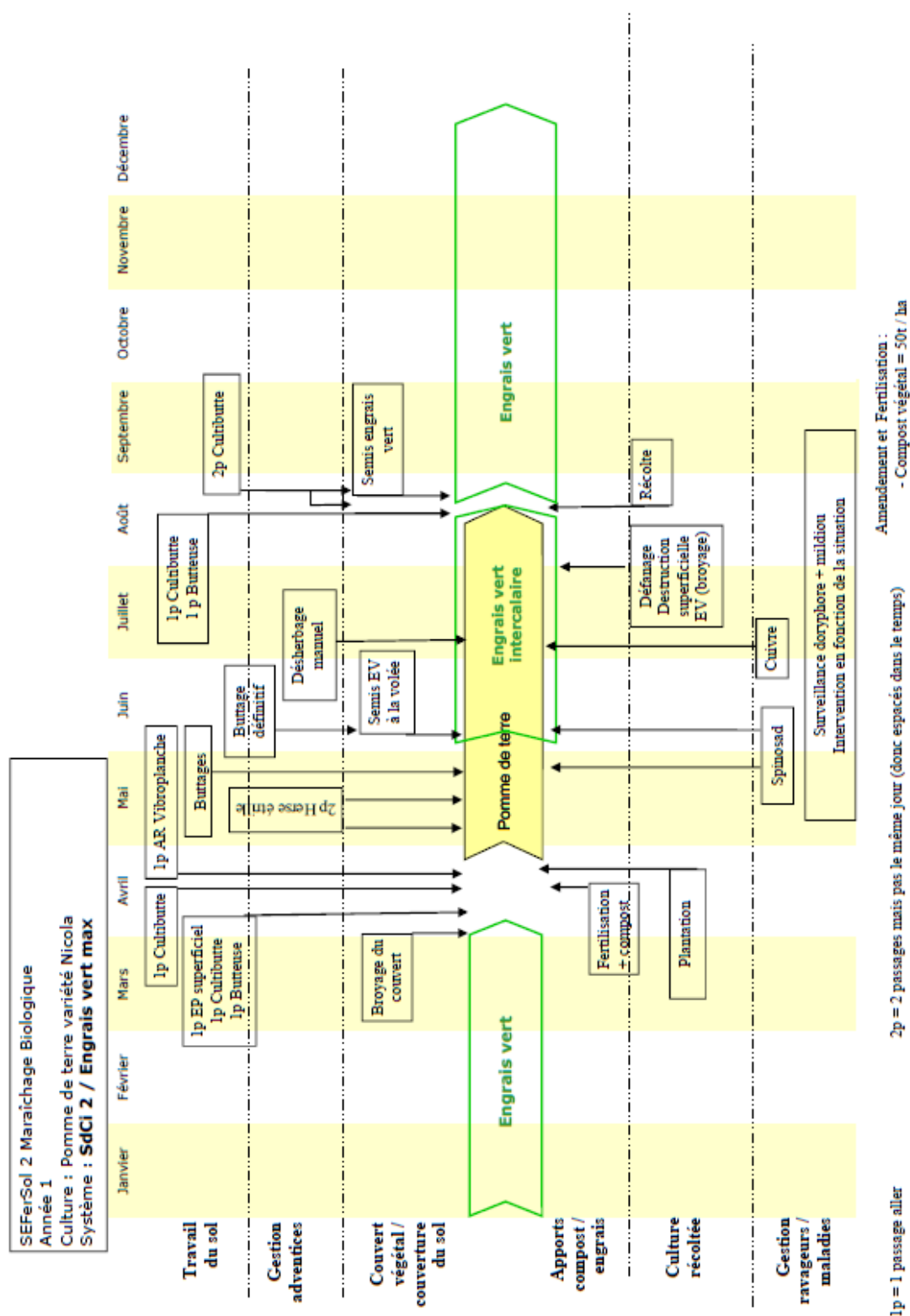


Figure 30: Itinéraire technique sur SEFerSol 2 année 1 SdC 2

Annexe 5 : Méthode de calcul de la concentration théorique en nitrates dans la lame d'eau drainante.

Dans un premier temps, le drainage a été modélisé grâce au calcul d'un bilan hydrique mensuel. Lors du calcul du drainage, la réserve utile (RU) a été estimée selon la texture et le type de strate considéré (Certu 2013; Al Majou et al. 2007). Sur le dispositif SEFerSol, on considère une profondeur de sol de 70 cm, 40 % de cailloux donc 60% de terre fine. Les 30 premiers centimètres sont limono-sableux, d'après (Al Majou et al. 2007) la RU est de 1.62 mm/cm. Les 40 centimètres suivants sont sablo-limoneux, la RU est de 1.16 mm/cm. La RU approximée est donc : $RU = ((30 \times 1.62) + (40 \times 1.16)) \times 0.6 = 57 \text{ mm}$

Le tableau suivant résume la méthode qui a été employée pour calculer l'indicateur « Drainage ». Quatre situations sont possibles selon le bilan hydrique, mais une seule conduit à du drainage : lorsque l'addition des pluies, de l'irrigation et de l'évapotranspiration est plus grande que la capacité de la réserve utile.

Tableau 13: Méthode de modélisation du drainage par calcul du bilan hydrique.

Situations agronomiques possibles	Bilan hydrique = Pluie + irrigation - ETP*kc (mm)	Etat de la RU (mm)	Drainage (mm)
Le bilan hydrique est positif mais ne dépasse pas ou égale la RU	Si > 0 et Si < RU initiale - RU précédente	= RU précédente + Bilan	Il n'y a pas de drainage = 0
Le bilan hydrique est positif et dépasse la RU	Si > 0 et Si > RU initiale - RU précédente	= RU initiale	Il y a du drainage = Bilan - (RU initiale - RU précédente)
Le bilan hydrique est négatif et diminue la RU	Si < 0 et Si bilan < RU précédente	= RU précédente + Bilan	Il n'y a pas de drainage = 0
Le bilan hydrique est négatif et assèche entièrement la RU	Si < 0 et Si bilan > RU précédente	La RU se vide = 0	Il n'y a pas de drainage = 0

Pour le calcul du bilan hydrique, les coefficients culturaux choisis (kc) dépendent du stade de la culture (FAO, 2008). Lorsque le sol était nu, le kc a été estimé équivalent à 0.45. Pour les couverts végétaux, le kc a été estimé équivalent à 1 pour un couvert bien implanté et 0.5 pour un couvert faiblement développé ou mal implanté.

Dans un second temps, l'indice de Burns (1976) a été calculé mensuellement grâce aux valeurs de drainage obtenues. Le modèle de Burns exprime la fraction d'azote nitrique,

répartis sur le profil, qui est entraînée hors de portée des racines, sous l'effet du drainage. L'indice s'exprime de la façon suivante (Party 2003) :

$$f = \left(\frac{P}{P + (V_m/100)} \right)^h$$

f = la fraction d'azote nitrique lixivié en %

P = quantité d'eau drainée dans le sol en cm

V_m = humidité volumique à la capacité au champ en %. Estimée selon la texture sableuse à 30% (Party 2003)

h = hauteur racinaire en cm, considérée = 30 cm dans notre cas. Au printemps on évalue un risque de lixiviation sur la profondeur racinaire h. En revanche en hiver, l'exposant prend la valeur de h/2 car il rend compte d'une répartition uniforme des nitrates dans le profil de sol à l'entrée d'hiver.

Enfin, pour obtenir la concentration en nitrates potentiellement lixivié, un second calcul a été réalisé en prenant en compte la concordance des unités. Par exemple si 50% de pertes sont causées par une lame d'eau drainante de 120 mm :

On perd 5kg de N-NO₃ dans 120 mm d'eau. La concentration en nitrates est donc de **5*4.43/1.2 = 18 mg/L**. Le coefficient 4.43 correspond au calcul de masse molaire qui permet de convertir l'azote nitrique en nitrates.

Annexe 6 : Choix méthodologiques et représentation des résultats

Structure globale de la méthode : Au-delà des choix méthodologiques dans leurs détails, le schéma global de la méthode (analyses graphiques, statistiques, par tableaux de bords, par agrégation) a été choisi pour permettre d'analyser les résultats du projet sous différents angles, afin d'en avoir une vision exhaustive et robuste.

La méthode d'évaluation proposée est caractérisée par deux idées principales :

- Avoir **une image exhaustive** des résultats en alternant analyses détaillées (analyses graphiques et tests de Kruskal Wallis, analyses annuelles) et analyses globales et multicritères (tableaux de bords, ACP, agrégation).
- Avoir **une image robuste** des résultats en comparant les résultats d'analyses statistiques, avec ceux issus des tableaux de bords ou des graphiques.

Les tableaux suivants résument les différents choix de méthodes et de représentation (tableau 1) et les différentes échelles d'analyses utilisables (tableau 2).

Tableau 14 : Justification des analyses utilisées et des choix de représentation

Etapes de la méthode d'évaluation	Méthode utilisée	Pourquoi ce choix ?
Analyses graphiques	Fertilité du sol <u>Analyse par ACP</u>	- Du fait du grand nombre de paramètres et sous-critères étudiés, l'ACP permet une évaluation multicritère. Elle permet de porter, dans un premier temps, un regard global sur ce qui différencie les SdC. - Permet d'analyser les corrélations entre les paramètres étudiés ce qui est un enjeu important sur le critère « fertilité du sol » où les liens entre les variables sont multiples. - L'ACP est réalisée sur les paramètres où on a identifié grâce à des tests statistiques (voir plus bas) qu'il existait des différences significatives. Etant donné la variabilité des mesures sur les placettes A,B,C pour certains indicateurs, la moyenne ne représente pas fidèlement les trois mesures. L'ACP est conduite en prenant en compte les échantillons de chaque placettes comme des individus.
	Qualité de l'eau <u>Analyse</u>	- Comme le nombre d'indicateurs suivis est faible (concentration en nitrates, drainage, reliquats), et que ces indicateurs dépendent

	<u>graphique</u> <u>« classique »</u>	fortement du climat, la représentation la plus judicieuse est le suivi de l'évolution dans le temps de ces indicateurs, par un graphique simple à deux axes. -Le groupe de partenaire a opté pour une analyse quantitative de la concentration en nitrates via la modélisation du bilan hydrique et l'application du modèle de Burns. D'autres méthodes plus qualitatives existent (méthode COMIFER), mais n'ont pas été retenues étant donné la quantité de données (reliquats azotés) que le projet possède et qui permet une évaluation plus fine.
	Autonomie vis-à-vis des intrants <u>Analyse par radars</u>	-Pour ces deux critères, les indicateurs suivis sont multiples et simples d'interprétation. Leurs corrélations sont connues. Une analyse graphique par radars permet d'obtenir une vue d'ensemble de l'évolution des indicateurs sur le même graphique
	Résultats technico-économiques et sociaux <u>Analyse par radars</u>	-Réaliser une ACP est également possible mais présente moins d'enjeux sur ces critères ou on ne cherche pas à connaître les corrélations entre les indicateurs.
Analyses statistiques	Test de Kruskal Wallis	-Le dispositif expérimental SEFerSol présente des « fausses » répétitions. Les mesures sont répétées sur 3 placettes fixes, certaines mesures ne possèdent pas de répétitions. La normalité des résidus n'est donc pas vérifiée. La parcelle SEFerSol 2 permet de répéter les SdC dans un ordre différent, mais la randomisation n'est pas complète. Face à ces éléments, les tests statistiques non paramétriques de Kruskal et Wilcoxon sont les plus adaptés.
	Test de Wilcoxon Mann-Withney	-Le seuil de confiance pour observer des différences significatives a été élargi à 10% (au lieu des 5% usuels) étant donné le caractère variable de certaines mesures sur la fertilité du sol. Un tableau de contingence résume l'ensemble des p-value obtenues.
Analyses par tableaux de bords	Tableau « relatif »	-L'utilisation des tableaux de bords permet une communication facilitée des performances par un jeu de couleur. -Le tableau de bord est l'étape intermédiaire qui permet d'arriver

		ensuite à l'agrégation des notes de performances. - Pour comparer les SdC innovants par rapport au système « référence », un pourcentage de variation par rapport au SdC REF est calculé. -Pour ce tableau de bord, si le pourcentage dépasse 15% de variation, la couleur permettant de juger de l'indicateur change (détails dans matériels et méthode partie III.2.1). Ce seuil est modulable, il représente un compromis entre un seuil plus petit, qui caractérise des résultats dont on est relativement certain, et un seuil plus grand, qui caractérise des résultats avec une faible certitude.
	Tableau « absolu »	-Ce tableau de bord, qui reste à construire, permet également une communication de l'information facilitée par un jeu de couleur -Les SdC innovants sont jugés en fonction de références issues d'études scientifiques, techniques... -Les seuils sont fixés selon des références qui doivent correspondre le plus possible au domaine de validité de l'expérimentation SEFerSol (maraîchage biologique, sol sableux...).
Analyses globales envisagées	Agrégation des notes	-L'étape d'agrégation reste à construire. Elle consiste à synthétiser les couleurs (jugement des indicateurs) par sous-critères, par critères ou pas SdC. L'objectif est d'avoir une image des performances globales des SdC. -L'agrégation est réalisée par un ensemble de règles de décisions (type arborescence DEXi) qui nécessite la réflexion et validation du groupe de partenaires.
	ACP globale	-Une analyse par ACP sur l'ensemble des indicateurs, tous critères confondus, permet d'avoir une image globale des différences entre les SdC et des variables qui caractérisent ces différences.

Tableau 15 : Les différentes échelles d'analyses possibles : comment et pourquoi les utiliser

Echelles d'analyses	Méthode d'analyse	Pourquoi ce choix ?
Par parcelle	Statistique /Tableau de bord	-Les différences d'itinéraires techniques entre les deux parcelles sont parfois marquées. La variabilité des résultats entre les deux parcelles l'est également pour certains indicateurs. Il est donc intéressant d'analyser les résultats par parcelle et de comprendre quelle pratique explique la variabilité observée.
Pluri-parcellaire	Statistique : SEFerSol 2 est utilisée comme une répétition de SEFerSol 1 Tableau de bord : La moyenne entre les deux parcelles est réalisée	-La parcelle SEFerSol 2 a été initialement conçue pour être une répétition de la parcelle SEFerSol 1. L'échelle pluri-parcellaire permet de la considérer comme telle dans l'analyse. Cette échelle permet d'avoir une vision plus globale des SdC étudiés.
Annuelle	Statistique /Tableau de bord	-Cette échelle d'analyse offre une information désagrégée par année. Elle permet de comprendre comment évoluent les systèmes de cultures et le rôle que peut avoir un évènement climatique particulier sur la variabilité des résultats.
Pluriannuelle	Statistique : Les années sont traitées comme des répétitions Tableau de bord : La moyenne sur l'ensemble des années est réalisée	-L'échelle pluriannuelle fournit une information globale moyenne des SdC sur l'ensemble des années d'études.

Annexe 7 : Résultats des tests de Kruskal Wallis

Tableau 16: p value obtenues pour chaque indicateur du critère de fertilité du sol.

	Indicateurs	Parcelle	Année 1	Année 2	Année 3	Pluriannuel	Pluriannuel + SEFerSol 2 en tant que répétition
Propriétés physiques	Structure	SEFerSol1				0,7731	0,4327
		SEFerSol2				0,5647	
	Infiltration de l'eau	SEFerSol1	0,079	0,1931	0,2019	0,6632	0,4148
		SEFerSol2		0,06081			
	Stabilité	SEFerSol1	0,8645	0,05091		0,347	0,6297
		SEFerSol2	0,07868				
Activité biologique	Biomasse bact	SEFerSol1	0,2881	0,4911		0,9054	0,9689
		SEFerSol2	0,9565				
	Biomasse fong	SEFerSol1	0,6703	0,1479		0,7529	0,673
		SEFerSol2	0,1133				
	Conso oxygène	SEFerSol1	0,2982	0,7575		0,9054	0,533
		SEFerSol2	0,06081				
	nombre vdt	SEFerSol1	0,5647	0,0642	0,09294	0,9917	0,8453
		SEFerSol2	0,8038	0,1801		0,7038	
Valorisation des MO	taux MO	SEFerSol1				0,4159	0,1763
		SEFerSol2					
	MO libre	SEFerSol1				0,4159	0,7066
		SEFerSol2					
	C/N MO libre	SEFerSol1				0,4159	0,2696
		SEFerSol2					
	C/N MO liée	SEFerSol1				0,4159	0,9246
		SEFerSol2					
	Cmin	SEFerSol1	0,02651	0,02651	0,2019	0,2634	0,9083
		SEFerSol2	0,0594	0,02413		0,366	
	Nmin	SEFerSol1	0,02732	0,03794	0,05091	0,2803	0,4501
		SEFerSol2	0,03794	0,03794		0,3246	
Disponibilité des éléments nutritifs	P2O5	SEFerSol1				0,3679	0,8371
		SEFerSol2					
	pH	SEFerSol1				0,851	0,9009
		SEFerSol2					
	Ca2+/CEC	SEFerSol1				0,1478	0,5775
		SEFerSol2					

	K2O	SEFerSol1				0,1561	0,2253
		SEFerSol2					
	K2O/MgO	SEFerSol1				0,1667	0,3285
		SEFerSol2					

Tableau 17: p value obtenues pour chaque indicateur du critère de l'impact sur la qualité de l'eau.

Indicateurs	Parcelle	Année 1	Année 2	Année 3	Pluriannuel	Pluriannuel + SEFerSol 2 en tant que répétition
Reliquats azotés	SEFerSol1	0,2126	0,1347	0,1738	0,05965	0,03983
	SEFerSol2	0,4832	0,7351			
Drainage	SEFerSol1	0,973	0,3621	0,8645	0,7986	0,5467
	SEFerSol2	0,9557	0,7451		0,805	
[NO3-]	SEFerSol1	0,5118	0,7529	0,7211	0,9851	0,9421
	SEFerSol2	0,9258	0,8371		0,866	

Tableau 18: p value obtenues pour chaque indicateur du critère basé sur les résultats technico-économiques et sociaux.

Indicateurs	Parcelle	Année 1	Année 2	Année 3	Pluriannuel	Pluriannuel + SEFerSol 2 en tant que répétition
Tps_W_surcharge	SEFerSol1				0,5647	0,6703
	SEFerSol2					
Tps_W_total	SEFerSol1				1	0,9565
	SEFerSol2					
Tps_W_desh	SEFerSol1				0,9639	0,7066
	SEFerSol2					
Rdt_comm	SEFerSol1	0,3679	0,03899		0,03455	0,237
	SEFerSol2	0,03899				
Cout_W_tot	SEFerSol1				0,8669	0,6703
	SEFerSol2					
Marge_directe	SEFerSol1				0,1801	0,4298
	SEFerSol2					

Tableau 19: p value obtenues pour chaque indicateur du critère d'autonomie vis-à-vis des intrants.

Indicateurs	Parcelle	Année 1	Année 2	Année 3	Pluriannuel	Pluriannuel + SEFerSol 2 en tant que répétition
Quantité de carburant	SEFerSol1				0,3679	0,4298
	SEFerSol2					
Quantité de plastique	SEFerSol1				0,3679	0,1054
	SEFerSol2					
Quantité d'eau	SEFerSol1				1	1
	SEFerSol2					
IFT	SEFerSol1				0,3247	0,4062
	SEFerSol2					
UN/ha	SEFerSol1				0,1017	0,04965
	SEFerSol2					

En vert foncé, des différences significatives sont détectées au seuil de 5 % tandis qu'en vert clair, des différences significatives sont détectées pour des p value comprises entre 5 et 10%. A l'échelle pluriannuelle, les valeurs pour un système mais des années différentes, ont été utilisées comme des répétitions c'est-à-dire en les considérant comme éléments d'un même échantillon.

Annexe 8 : Résultats du test bêche sur SEFerSol 2 en 2017

Tableau 20: observations issues du test bêche sur SEFerSol 2 en Juin 2017

Critère de notation	SdC 1 REFERENCE		SdCi2 ENGRAIS VERT MAX		SdCi3 CONSERVATION DU SOL	
	Note	Remarques	Note	Remarques	Note	Remarques
1 – Etat de surface	3	Croûte fine en surface	1.5	Petites fissures, macroporosité fine	1	Bon, 80% de litière
2 – type d'agrégats couche du dessus (0-15)	1.5	Petits agrégats grumeleux	1.5	Meuble, beaucoup de racines fines, agrégats grumeleux	2	Agrégats fins et agrégats grossiers mais sans arrêtes [0.5-1cm].
3 – type d'agrégats couche sous-jacente (15-30)	3	Agrégats entre 2 et 5 cm	2.5	Meuble, agrégats fins mais certains sont plus anguleux. Présence de racines principales mais les racines secondaires sont limitées.	3	Beaucoup de vers et d'acariens blancs. Terre fine et agrégats ~ 1cm
4 – Rupture de densité / transition entre couches	3	Pas de gros blocs. A la sortie du test le bloc ne se tenait pas	2	Bloc facilement effrité, pas d'arrêtes ou d'agrégats tranchants visibles.	3.5	Plusieurs blocs à la sortie de la bêche. Gros bloc assez dense en bas de la bêche.
5 – trous / fentes	3	Nombreuses fentes, peu de trous, pas de vers présents	2	Très nombreuses racines, beaucoup de petites fissures. Moins de fissures entre 15-20cm, plus cohésif.	3.5	Quantité satisfaisante de trous et de fentes jusqu'à 10cm. En revanche absentes entre 20cm et 40cm
6 – Racines, forme, densité	2.5	Beaucoup de racines sur l'horizon de surface, moins présentes au fond de la bêche.	1.5	Beaucoup de racines fines sur l'horizon de surface. Elles ne sont pas coudées. Racines coudées sur l'horizon en bas.	3	Racines coudées le long des blocs.
7 – Résidus de récolte / MO	1	Pas de résidus	1	Pas de résidus	3	Beaucoup de résidus non dégradés dans les 10 premiers cm. Morceaux de bois avec présence de champignons
8 – Engorgement (couleur, odeur)	1	Couleur brune pas de tâches, odeur « normale » de terre.	1	Couleur brune, pas de tâches, odeur « normale » de terre.	1	Couleur brune, pas de tâches, odeur « normale » de terre.
Total	18		13		20	

Annexe 9 : Représentation des résultats des analyses statistiques

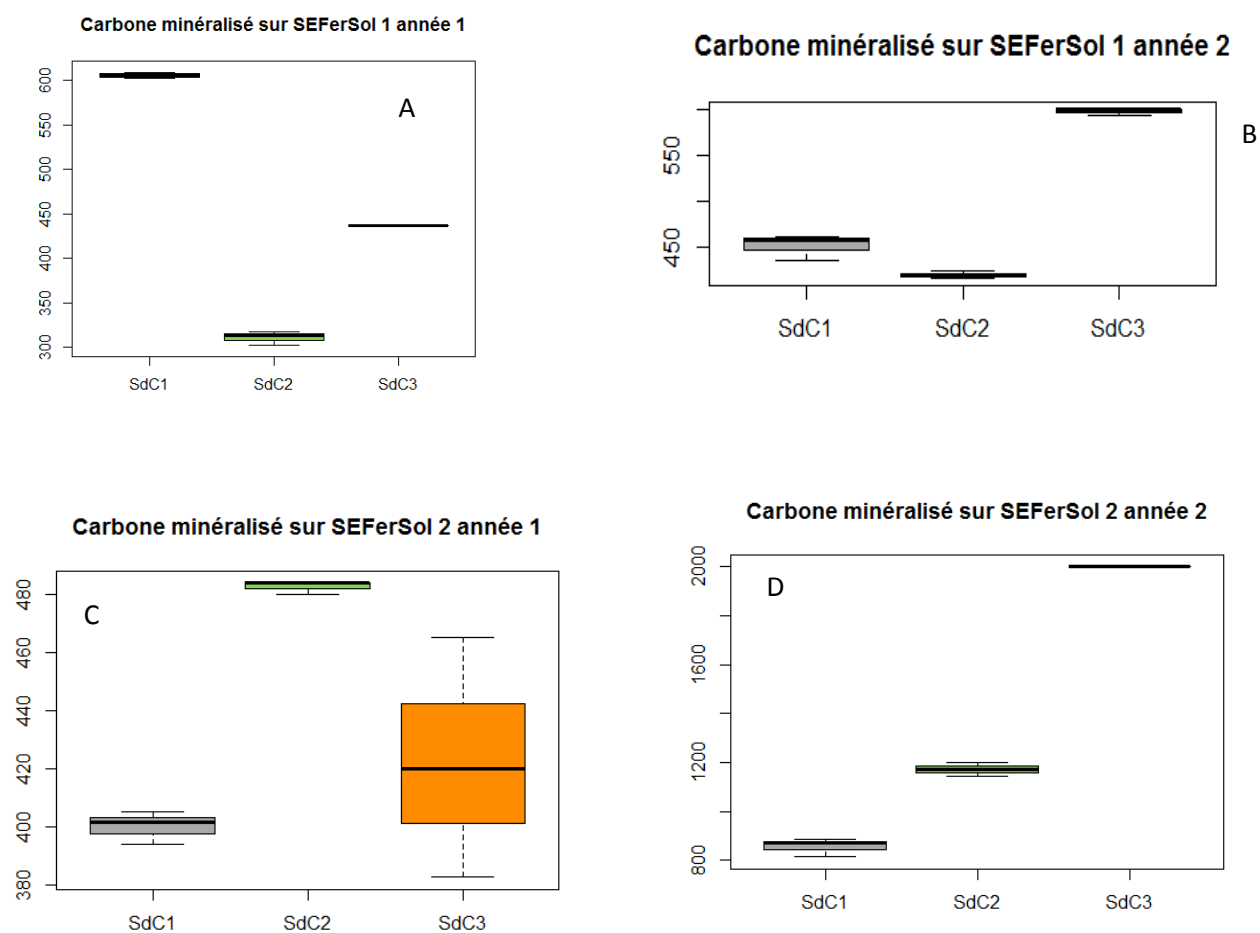


Figure 31 : Carbone potentiellement minéralisé sur SEFerSol 1 année 1 (A) année 2 (B) et SEFerSol 2 année 1 (C) année 2 (D) en mg/kg/28j

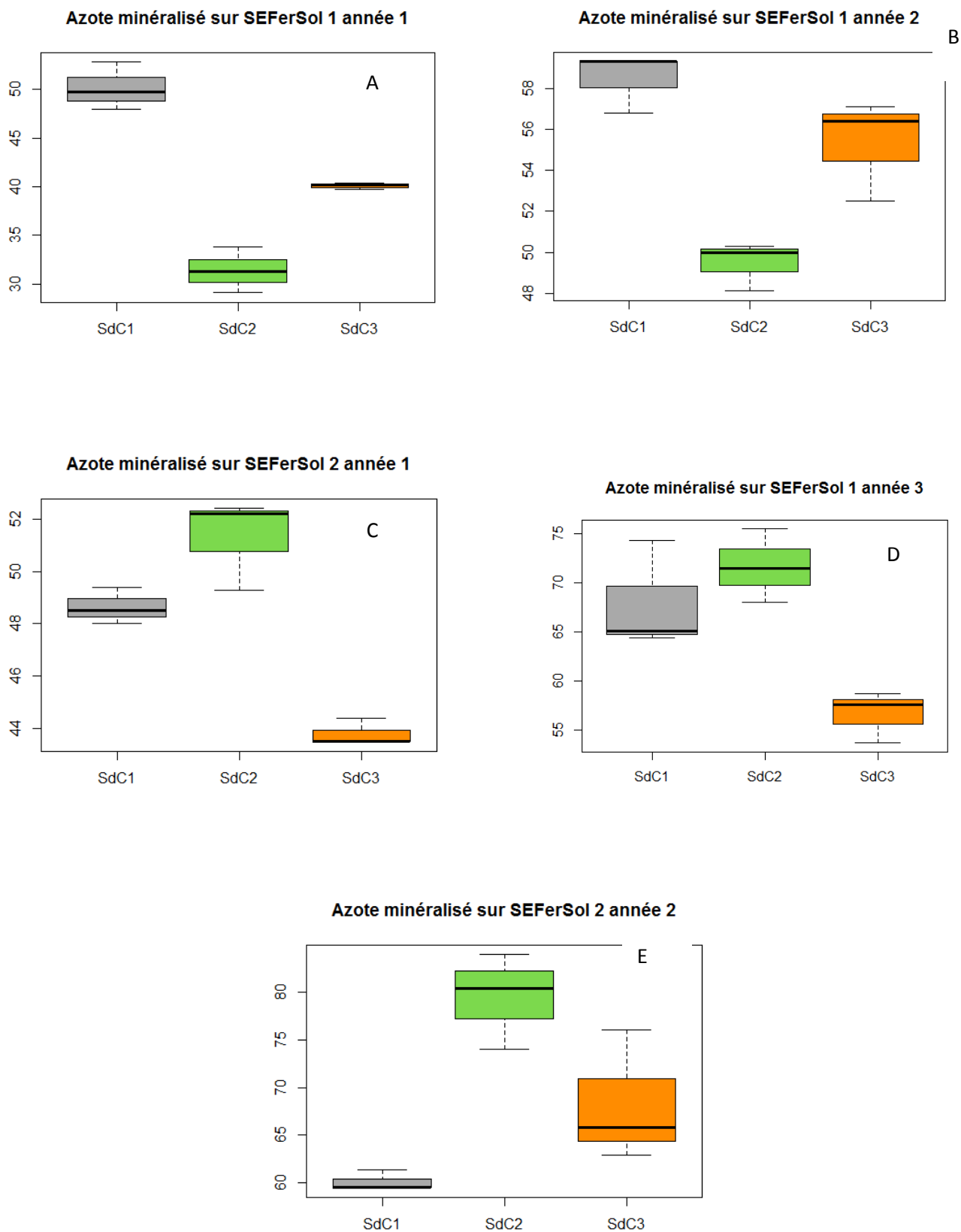
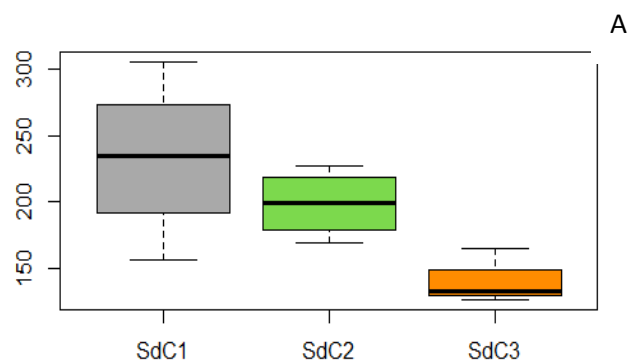
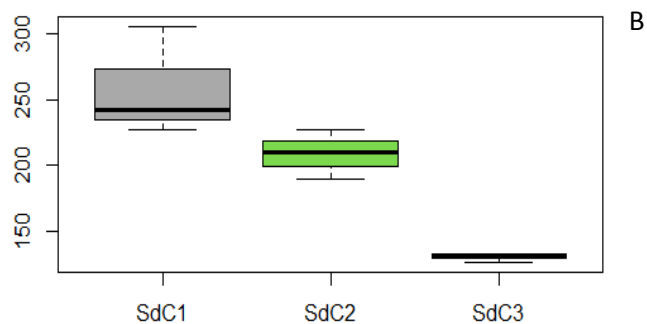


Figure 32 : Azote potentiellement minéralisé sur SEFerSol 1 année 1 (A) année 2 (B), année 3 (C) et SEFerSol 2 année 1 (D) année 2 (E) en mg/kg/28j

Rendement commercialisable sur SEFerSol 1 sur deux années



Rendement commercialisable sur SEFerSol 1 année 2



Rendement commercialisable sur SEFerSol 2 année 1

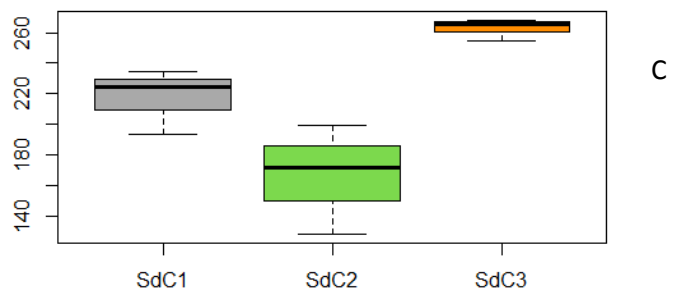


Figure 33: Rendement commercialisable sur SEFerSol 1 pluriannuel (A) année 2 (B) et SEFerSol 2 année 1 (C) en kg/are

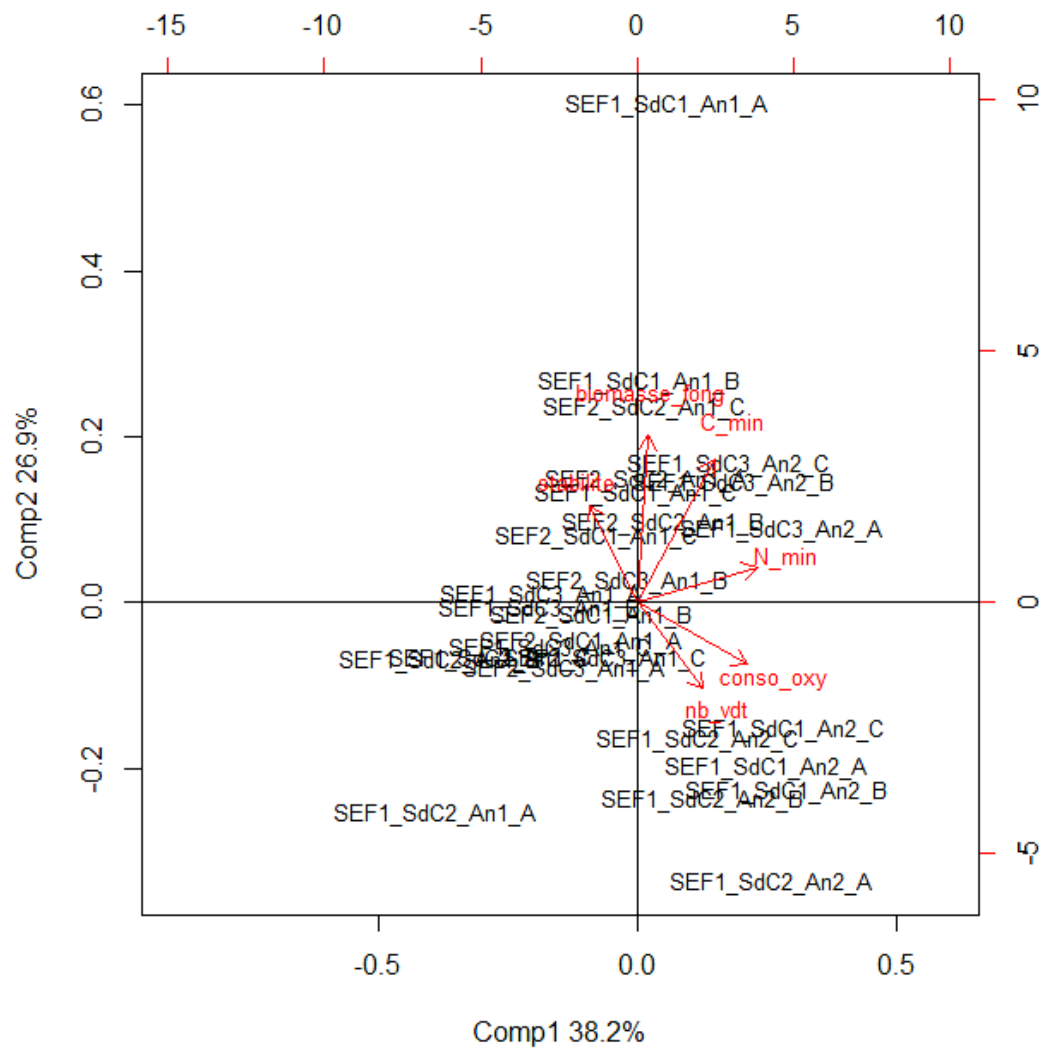
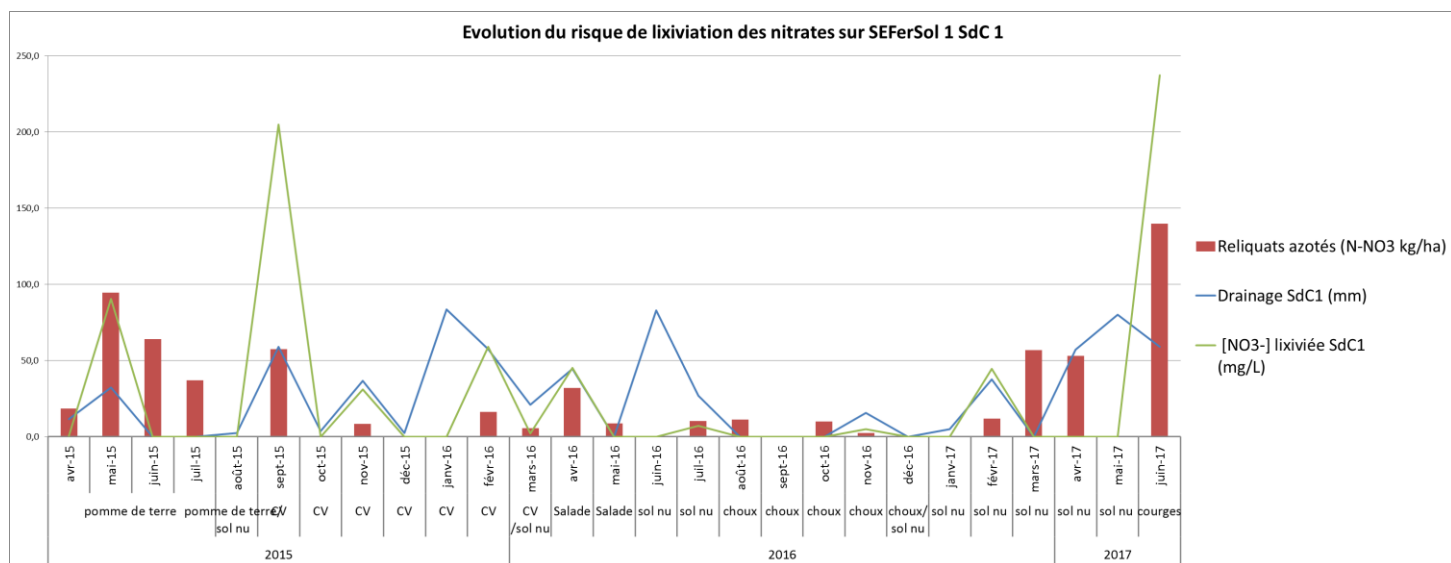
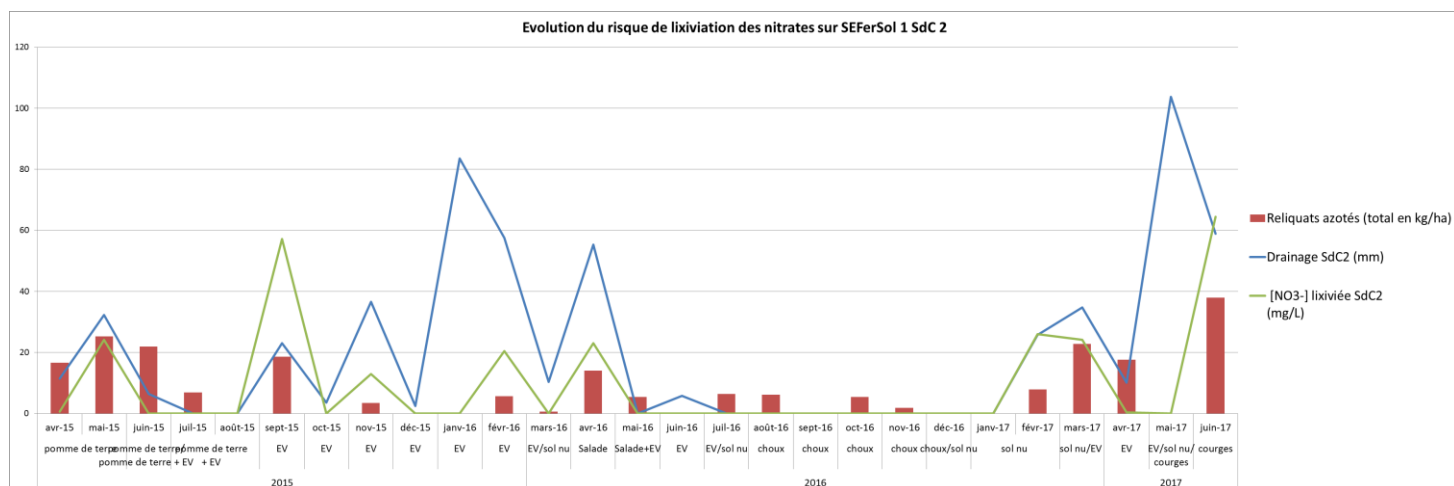


Figure 34 : Analyse en composante principale de l'ensemble des indicateurs de la fertilité du sol, pour lesquelles des différences significatives ont été observées.

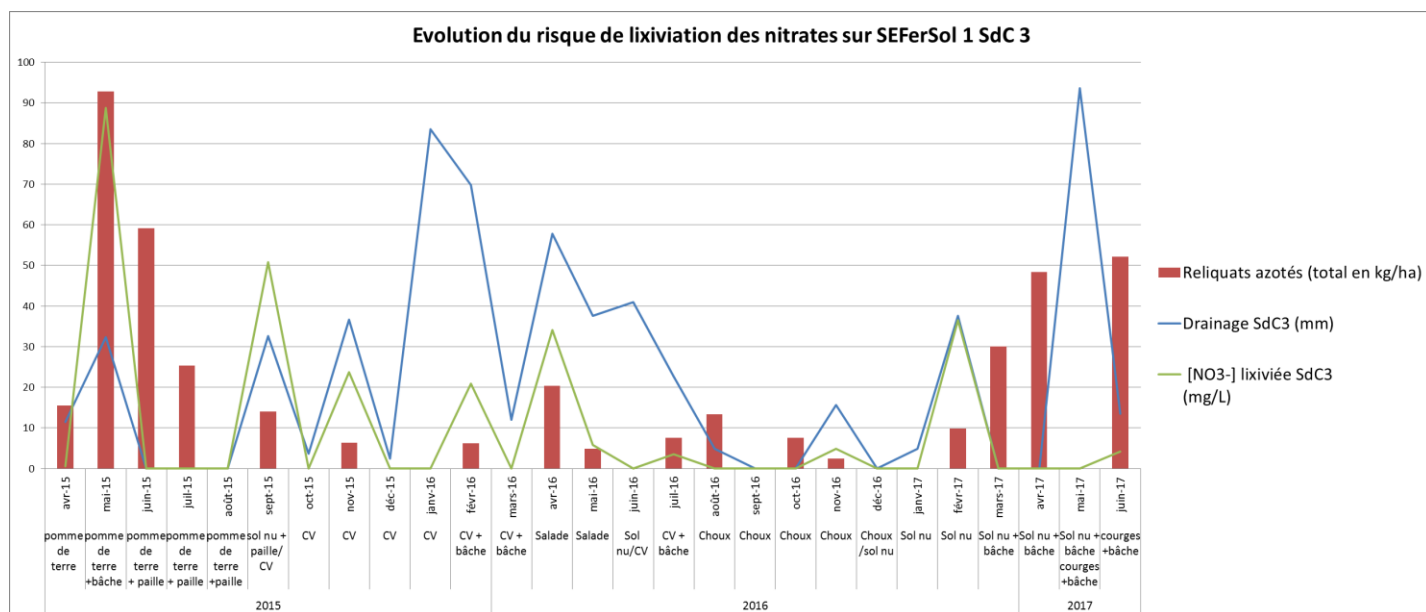
Annexe 10 : Graphiques des pratiques culturales corrélées au risque de lixiviation



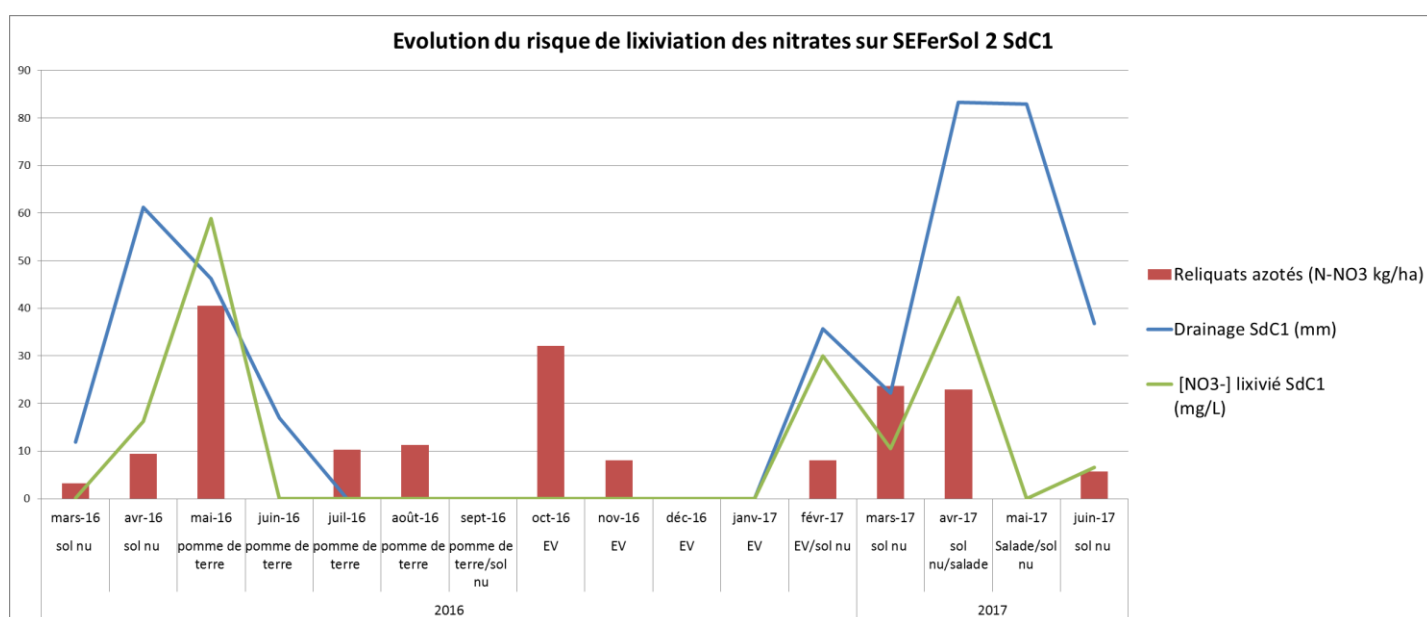
**Figure 35 : Risque de lixiviation des nitrates vis-à-vis des pratiques culturales et du drainage.
SEFerSol 1 SdC 1**



**Figure 36 : Risque de lixiviation des nitrates vis-à-vis des pratiques culturales et du drainage.
SEFerSol 1 SdC 2**



**Figure 37 : Risque de lixiviation des nitrates vis-à-vis des pratiques culturales et du drainage.
SEFerSol 1 SdC 1**



**Figure 38 : Risque de lixiviation des nitrates vis-à-vis des pratiques culturales et du drainage.
SEFerSol 1 SdC 3**

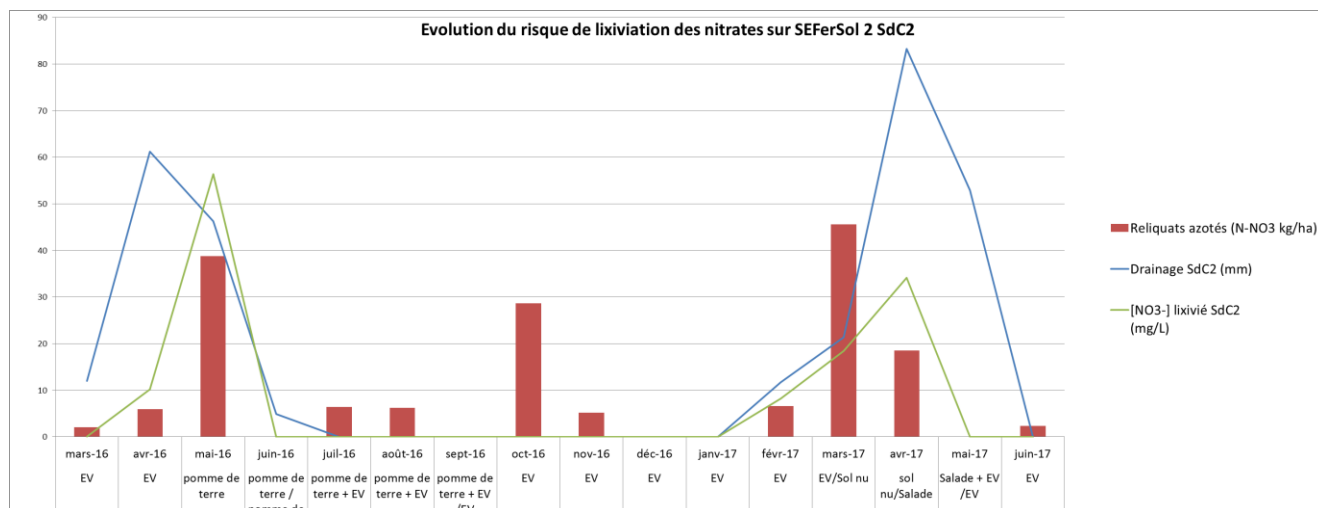


Figure 39 : Risque de lixiviation des nitrates vis-à-vis des pratiques culturales et du drainage.
SEFerSol 2 SdC 1

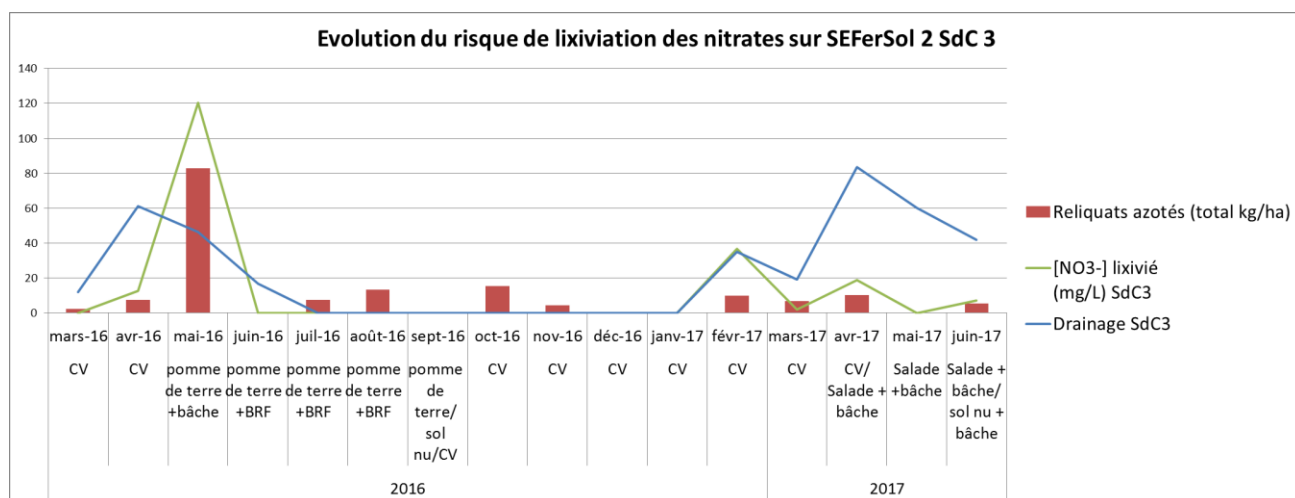


Figure 40 : Risque de lixiviation des nitrates vis-à-vis des pratiques culturales et du drainage.
SEFerSol 2 SdC 2

Annexe 11 : Tableau de bord des indicateurs de la fertilité du sol

Le sens des flèches caractérise un pourcentage plus faible (vers le bas), plus élevé (vers le haut) ou équivalent à celui du système « référence » (horizontal).

Tableau 21: Tableau de bord du critère « fertilité du sol » : indicateurs qui nécessitent une analyse en fonction de leur évolution théorique

	Valorisation des MO			Disponibilité en éléments nutritifs			Structure
	MO_libre	C/N_MO_libre	C/N_MO_liee	P2O5	pH	K ₂ O/MgO	Infiltration
SdC2	⇒ -1,25	⇒ 7,80	⇒ 5,08	↑ 30,13	⇒ -1,10	↓ -31,48	↓ -89,55
SdC3	⇒ -0,80	⇒ 6,78	⇒ 6,21	↑ 28,21	⇒ -2,20	↓ -18,52	↓ -87,49

Annexe 12 : Schéma méthodologique final proposé pour l'évaluation des résultats du projet SEFerSol maraîchage biologique

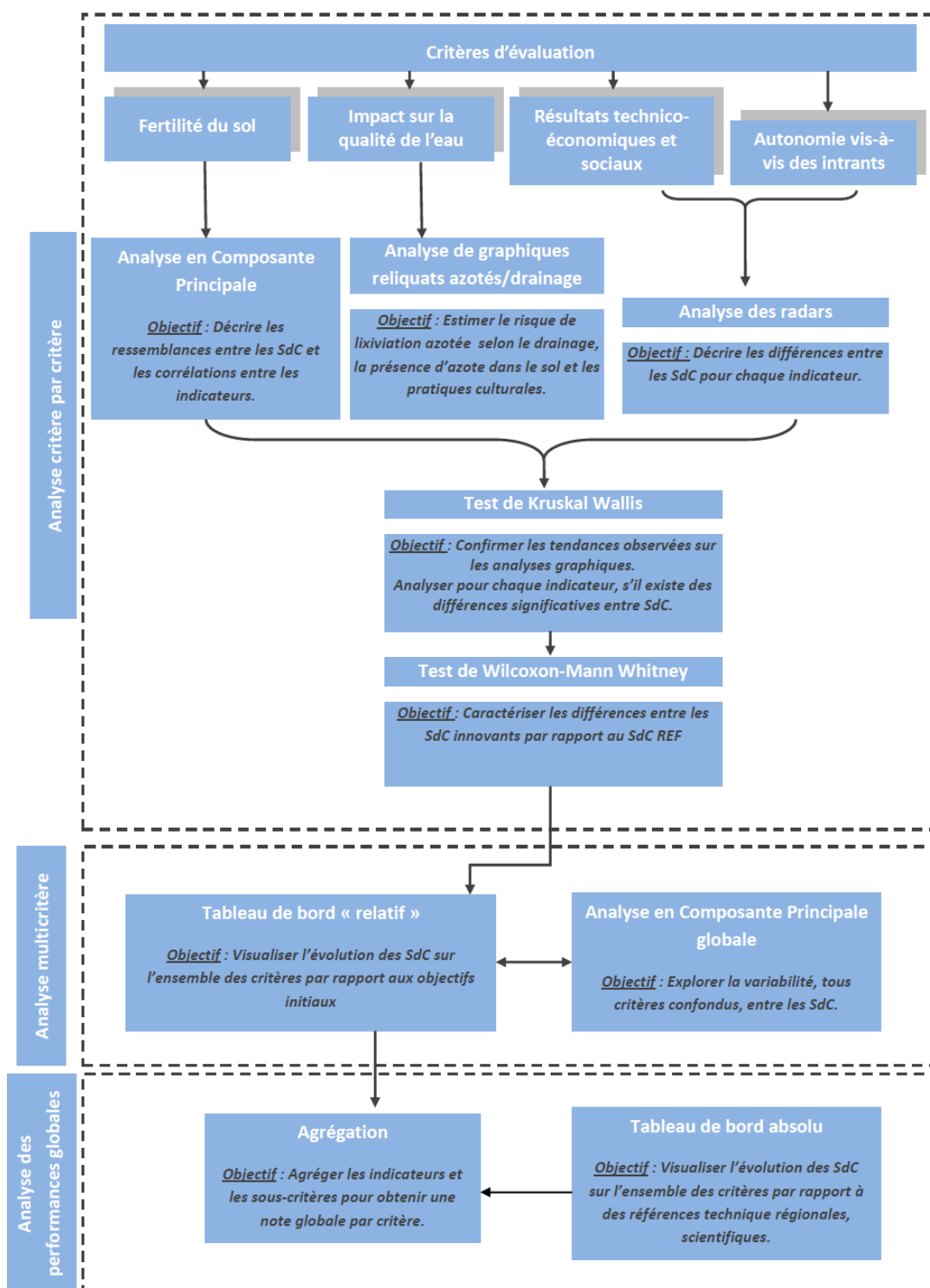


Figure 41 : Schéma méthodologique final pour l'analyse des résultats du projet SEFerSol maraîchage biologique