



**HAL**  
open science

# Co-conception et évaluation ex ante de trois systèmes de culture agroécologiques permettant une réduction forte de l'usage des produits phytosanitaires en Bretagne

Jeanne Angot

## ► To cite this version:

Jeanne Angot. Co-conception et évaluation ex ante de trois systèmes de culture agroécologiques permettant une réduction forte de l'usage des produits phytosanitaires en Bretagne. Sciences du Vivant [q-bio]. 2018. dumas-01950001

**HAL Id: dumas-01950001**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01950001>**

Submitted on 10 Dec 2018

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

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

AGROCAMPUS  
OUEST

- CFR Angers  
 CFR Rennes



Année universitaire : 2017 – 2018

Spécialité :

Ingénieur Agronome

Spécialisation (et option éventuelle) :

Agroecology

### Mémoire de Fin d'Études

- d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage  
 de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage  
 d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

# Co-conception et évaluation *ex ante* de trois systèmes de culture agroécologiques permettant une réduction forte de l'usage des produits phytosanitaires en Bretagne

Par : Jeanne ANGOT



**Soutenu à**      **RENNES**      **le 12/09/2018**

#### **Devant le jury composé de :**

Président : Edith LE CADRE

Maître de stage : Aurélien DUPONT

Enseignant référent : Guénola PERES

Autres membres du jury (Nom, Qualité)

Matthieu CAROF (Agrocampus Ouest/INRA)

*Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST*

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation  
«Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France»  
disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>





## Remerciements

Avant tout je tiens à remercier mon maître de stage, Aurélien Dupont (CRAB), pour avoir toujours été présent pour répondre à mes questions, me conseiller et me donner un avis constructif, tout en me laissant une autonomie dans la conduite de mon stage. Un grand merci également à Jeanne Pourias (CRAB) pour les relectures de mon mémoire et les conseils qui m'ont été d'une grande utilité. Merci à mon enseignant référent, Guénola Pérès (Agrocampus Ouest), pour sa disponibilité et ses conseils.

Je remercie également tous les permanents et non permanents de la station de Kerguéhennec. Merci à Patrice Cotinet (CRAB) pour avoir répondu à mes (nombreuses) questions, à Tanguy Pommeret et David Meallet (CRAB) pour m'avoir aidée à y voir plus clair sur les outils agricoles, à Yvon Lambert (CRAB) pour avoir pris le temps de me présenter la station et les sites expérimentaux, à Caroline Cocoual et Jean-Luc Giteau (CRAB).

Parce que la station de Kerguéhennec ne serait pas la même sans eux, je remercie tous les stagiaires, Maïwenn Gilbert, Augustine Laboury, Johan Le Botlan, Léa Louvet, Clémentine Meunier et Ludivine Paugam. Je remercie en particulier Ludivine Paugam pour les échanges de nos expériences respectives sur les logiciels CRITER, DEXi et IZIEVAL.

Enfin, je remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué ponctuellement à mon étude : Lionel Quere (CRAB), Remy Ballot (INRA), Christian Bockstaller (INRA). J'adresse un remerciement spécial à Floriane Bouard (CRAB), pour ses nombreux conseils et ses relectures de mon rapport.



## Table des matières

Glossaire

Liste des abréviations

Liste des figures et tableaux

Liste des annexes

<b>Introduction</b> .....	1
<b>1. Etat de l'art et contexte de l'étude</b> .....	2
1.1. <u>Contexte territorial</u> .....	2
1.2. <u>Nécessité d'une approche systémique et participative</u> .....	2
1.2.1. <i>Une approche système pour aborder la complexité</i> .....	2
1.2.2. <i>Une approche participative pour mobiliser les compétences</i> .....	3
1.3. <u>Etat de l'art des méthodes de co-conception et évaluation ex ante de SdC</u> .....	3
1.3.1. <i>Des méthodes de conception diversifiées mais une approche commune</i> .....	3
1.3.2. <i>L'évaluation ex ante, indispensable avant l'expérimentation au champ</i> ....	4
1.4. <u>Le projet SYNO'PHYT, une expérimentation système DEPHY EXPE 2</u> .....	5
1.4.1. <i>Présentation du projet</i> .....	5
1.4.2. <i>Concepts mobilisés dans le cadre du projet SYNO'PHYT</i> .....	6
1.4.3. <i>Leviers mis en œuvre pour la conception des SdC</i> .....	6
1.4.4. <i>Objectifs, Hypothèse et déroulé du stage</i> .....	7
<b>2. Matériel et Méthodes</b> .....	7
2.1. <u>Cadrage initial de l'expérimentation système</u> .....	7
2.1.1. <i>Système de référence régional</i> .....	7
2.1.2. <i>Contraintes et contexte de l'expérimentation</i> .....	7
2.2. <u>Co-conception de SdC innovants en ateliers</u> .....	8
2.3. <u>Evaluation ex ante des prototypes de SdC avec l'outil MASC 2.0</u> .....	9
2.3.1. <i>Choix d'un outil d'évaluation multicritère : MASC 2.0</i> .....	9
2.3.2. <i>Paramétrage de MASC 2.0 et de CRITER 5.4</i> .....	10
2.3.2.1. <i>Paramétrage de MASC 2.0</i> .....	10
2.3.2.2. <i>Paramétrage de CRITER 5.4</i> .....	10
2.3.3. <i>Présentation des critères de MASC</i> .....	11
2.3.3.1. <i>Critères de la dimension économique</i> .....	11
2.3.3.2. <i>Critères de la dimension sociale</i> .....	11
2.3.3.3. <i>Critères de la dimension environnementale</i> .....	12
<b>3. Résultats</b> .....	13
3.1. <u>Prototypes candidats proposés à l'issue de la co-conception</u> .....	13
3.1.1. <i>Prototypes candidats pour l'essai SdC maïs-blé 50%</i> .....	13
3.1.2. <i>Prototypes candidats pour l'essai SdC 75%</i> .....	13
3.1.3. <i>Prototypes candidats pour l'essai SdC AB</i> .....	13
3.2. <u>Evaluation multicritère des prototypes</u> .....	14
3.2.1. <i>Comparaison des performances des prototypes SdC maïs-blé 50%</i> .....	14
3.2.1.1. <i>Evaluation économique des prototypes SdC 50%</i> .....	14
3.2.1.2. <i>Evaluation sociale des prototypes SdC 50%</i> .....	15
3.2.1.3. <i>Evaluation environnementale des prototypes SdC 50%</i> ....	15



3.2.2.	<i>Comparaison des performances des prototypes SdC 75%</i> .....	16
3.2.2.1.	Evaluation économique des prototypes SdC 75%.....	16
3.2.2.2.	Evaluation sociale des prototypes SdC 75%.....	16
3.2.2.3.	Evaluation environnementale des prototypes SdC 75%....	17
3.2.3.	<i>Comparaison des performances des prototypes SdC AB</i> .....	18
3.2.3.1.	Evaluation économique des prototypes SdC 75%.....	18
3.2.3.2.	Evaluation sociale des prototypes SdC 75%.....	18
3.2.3.3.	Evaluation environnementale des prototypes SdC 75%.....	19
3.3.	<u>Capacité des prototypes candidats à répondre aux objectifs d'expérimentation</u> .....	19
<b>4.</b>	<b>Discussion</b> .....	20
4.1.	<u>Vérification de l'hypothèse de stage</u> .....	20
4.2.	<u>Choix et optimisation des prototypes à expérimenter au champ</u> .....	20
4.2.1.	<i>Choix et optimisation du prototype prometteur pour l'essai maïs-blé 50%</i> .....	20
4.2.2.	<i>Choix et optimisation du prototype prometteur pour l'essai SdC 75%</i> .....	21
4.2.3.	<i>Choix et optimisation du prototype prometteur pour l'essai SdC AB</i> .....	22
4.3.	<u>Critiques méthodologiques</u> .....	22
4.3.1.	<i>Limites de la méthode de co-conception et de l'évaluation ex ante</i> .....	22
4.3.2.	<i>Critique de l'outil employé et analyse de sensibilité du modèle</i> .....	23
<b>5.</b>	<b>Perspectives</b> .....	24
5.1.	<u>Mise en place de l'essai</u> .....	24
5.2.	<u>Etablissement des règles de décision des prototypes</u> .....	25
5.3.	<u>Suivi de l'essai et diffusion des résultats</u> .....	25
	<b>Conclusion</b> .....	26
	Références Bibliographiques.....	28
	English Abstract.....	34
	Annexes.....	40



## **Glossaire**

*Les mots ou expressions définis ici sont suivis d'un astérisque \* pour le premier terme apparaissant dans le corps du texte*

**Agroécosystème** : écosystème dont la gestion a principalement pour but de produire des denrées agricoles. Unité spatiale et fonctionnelle d'espaces cultivés et non cultivés dans lesquels interagissent des composants vivants et non vivants (Yiridoe et Weersink 1997).

**Auxiliaire** : ennemis naturels des bioagresseurs des cultures, parasites ou prédateurs, qui contribuent à la régulation des populations de nuisibles (Attoumani-Ronceux et al. 2011).

**Bioagresseurs** : organismes pouvant engendrer des dommages sur cultures. Il peut s'agir d'agents pathogènes responsables de maladies, de ravageurs ou de plantes adventices (Attoumani-Ronceux et al. 2011).

**Biocontrôle** : ensemble de méthodes de protection des végétaux, basées sur l'utilisation de mécanismes naturels. Ils comprennent en particulier les macro-organismes et les produits phytopharmaceutiques composés de micro-organismes, de phéromones et de kairomones, ou de substances naturelles (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation 2018a).

**Critère** : variable dont une ou des valeurs permettent l'interprétation par rapport à un objectif. Un ou des indicateurs permettent de mesurer ou d'estimer un critère (Lairez et al. 2015 in Millet 2016).

**DEPHY EXPE** : réseau regroupant en France des projets d'expérimentation pour concevoir, tester et évaluer des SdC fortement économes en produits phytosanitaires, avec une méthodologie d'expérimentation système (Ecophyto 2018).

**Dérobée** : culture implantée entre deux cultures principales de la rotation, mais se distinguant d'une culture intermédiaire par un objectif de valorisation de la production (Troussard et al. 2012).

**Désherbage mixte** : gestion des adventices associant un désherbage chimique et mécanique, successifs ou simultanés (Attoumani-Ronceux et al. 2011).



**Développement durable** : développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs (Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'Organisation des Nations Unies, 1987).

**Indicateur** : variable qualitative ou quantitative permettant de décrire de manière simplifiée à partir de mesures, d'observations, de modélisation, un phénomène complexe ou difficile à mesurer ou estimer (Lairez et al. 2015 in Milet 2016).

**Indice de Fréquence de Traitement phytosanitaire** : nombre de doses homologuées de produits phytosanitaires appliqués à l'hectare (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation 2018b).

**Itinéraire technique** : combinaison logique et ordonnée des techniques mises en œuvre sur une parcelle agricole en vue d'obtenir une production (Attoumani-Ronceux et al. 2011).

**Médiane** : nombre réel qui partage en deux parties d'égale fréquence les éléments d'une distribution statistique.

**Méthode alternative** : moyen de contrôle autre que la lutte chimique : contrôle génétique, contrôle cultural, lutte biologique ou lutte physique (Attoumani-Ronceux et al. 2011).

**Prophylaxie** : ensemble des mesures physiques, variétales, culturales... tendant à empêcher l'apparition de bioagresseurs ou à en minimiser les effets (Attoumani-Ronceux et al. 2011).

**Service écosystémique** : services rendus par l'écosystème pouvant être séparés en 4 catégories : approvisionnement, régulation, culture et support (Millenium Ecosystem Assessment 2005).

**Substance active** : molécule entrant dans la composition d'un produit phytosanitaire (Hirschy et al. 2015).

**Techniques culturales sans labour travail superficiel** : travail du sol compris entre 5 et 15 cm, mobilisant des outils tels que la herse rotative, le rotalabour, le déchaumeur à disques indépendants, le cultivateur, le vibroculteur ou le cover-crop (Heddadj et al. 2014).



## **Liste des abréviations**

Analyse de sensibilité : AS

Agriculture Biologique : AB

Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne : CRAB

Culture Intermédiaire Piège à Nitrates : CIPAN

Indice de Fréquence de Traitement phytosanitaire : IFT

Institut National de la Recherche Agronomique : INRA

Itinéraire technique : ITK

Marge semi-nette : MSN

Méthode d'aide à la décision multicritère : MCDA

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

Nitrates : NO<sub>3</sub>

Prototype 1 : P1

Prototype 2 : P2

Règle de Décision : RdD

Réseau Mixte Technologique « Systèmes de culture innovants » : RMT SdCi

Techniques culturales sans labour : TCSL

Système de culture : SdC

Système de culture innovant : SdCi



## **Liste des figures et tableaux :**

*NB : Les figures, tableaux et annexes pour lesquels aucune source n'est citée sont issus de mon travail personnel.*

Figure 1 : Les résidus phytosanitaires dans les eaux de surface en Bretagne

Figure 2 : Les 6 étapes de la démarche systémique appliquée à l'expérimentation agronomique

Figure 3 : Les différentes étapes des ateliers de co-conception

Figure 4 : Typologie des outils d'évaluation multicritères issue du projet PLAGE

Figure 5 : Organisation du projet SYNO'PHYT

Figure 6 : Positionnement des différents leviers de gestion des bioagresseurs

Figure 7 : Etapes à suivre au cours du stage

Figure 8 : Le réseau de 6 stations expérimentales de la CRAB

Figure 9 : Atelier de co-conception de SdC avec le jeu Mission Ecophyt'eau

Figure 10 : Leviers agronomiques utilisés en production intégrée à l'échelle de la rotation

Figure 11 : Présentation de l'arborescence de MASC 2.0 (encart rouge : pondération livrée par défaut, encart orange : pondération modifiée)

Figure 12 : Exemple de l'estimation du critère « conservation de la macrofaune du sol » grâce à un arbre satellite agrégeant l'effet du travail du sol, des apports de matière organique et l'IFT Insecticides

Figure 13 : Echelle de couleurs utilisée pour l'analyse des résultats

Figure 14 : Détail des composantes de l'arbre satellite « maîtrise de l'état structural »

Figure 15 : Détail des composantes de l'arbre satellite « maîtrise des maladies et ravageurs »

Figure 16 : Comparaison des pertes d'azote sous forme NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>3</sub> et N<sub>2</sub>O entre les SdC 50%

Figure 17 : Détail des composantes de l'arbre satellite « maîtrise de l'érosion »

Figure 18 : Détail des composantes de l'arbre satellite « conservation de la macrofaune du sol »

Figure 19 : Produit grain et paille, charges de mécanisation, charges opérationnelles et marge semi-nette en moyenne à l'échelle des SdC 75%

Figure 20 : Qualité sanitaire des produits de chaque culture

Figure 21 : Comparaison des pertes d'azote sous forme NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>3</sub> et N<sub>2</sub>O entre les SdC 75%

Figure 22 : Détail de l'arbre satellite « maîtrise de l'érosion » - SdC 75%

Figure 23 : Détail de l'arbre satellite « diversité floristique » - SdC 75%

Figure 24 : Détail de l'arbre satellite « maîtrise de l'état structural » - SdC AB

Figure 25 : Détail de l'arbre satellite « maîtrise des adventices » - SdC AB

Figure 26 : Comparaison de la répartition du temps de travail entre les différentes cultures des SdC AB P1 et P2

Figure 27 : Détail des composantes de l'arbre satellite « maîtrise de l'érosion » - SdC AB



Figure 28 : IFT des prototypes SdC 50% et SdC 75%

Figure 29 : prototype retenu pour l'essai SdC -75%

Figure 30 : prototype retenu pour l'essai agriculture biologique -100%

Figure 31 : Résultats de l'analyse Monte Carlo du modèle MASC après modification des pondérations livrées par défaut

Figure 32 : Indices de sensibilité des critères basiques du modèle MASC après modification des pondérations livrées par défaut

Figure 33 : Vue aérienne des dispositifs expérimentaux des trois essais du projet SYNO'PHYT

Tableau 1 : IFT Herbicide, Hors Herbicide, Traitement de semences et IFT moyen total à atteindre pour chaque essai

Tableau 2 : Contraintes fixées en amont de la conception des prototypes

Tableau 3 : Valeurs seuils modifiées à partir des références locales et des gammes de valeur des SdC évalués

Tableau 4 : Détail de la méthode de calcul des indicateurs basiques de la dimension économique

Tableau 5 : Détail de la méthode de calcul des indicateurs basiques de la dimension sociale

Tableau 6 : Leviers de gestion des bioagresseurs mis en œuvre dans les 6 prototypes

Tableau 7 : Comparaison des critères de durabilité économique – SdC 50%

Tableau 8 : Comparaison des critères de durabilité sociale – SdC 50%

Tableau 9 : Comparaison des critères de durabilité environnementale – SdC 50%

Tableau 10 : Comparaison des critères de durabilité économique – SdC 75%

Tableau 11 : Comparaison des critères de durabilité sociale – SdC 75%

Tableau 12 : Comparaison des critères de durabilité environnementale – SdC 75%

Tableau 13 : Comparaison des critères de durabilité économique – SdC AB

Tableau 14 : Estimation du nombre d'outils supplémentaires mobilisés – SdC AB

Tableau 15 : Comparaison des critères de durabilité sociale – SdC AB

Tableau 16 : Comparaison des critères de durabilité environnementale – SdC AB

Tableau 17 : Comparaison de la contribution au développement durable des prototypes proposés par rapport au SdC de référence breton

Tableau 18 : Synthèse des avantages, inconvénients et critères à améliorer des prototypes proposés

Tableau 19 : Comparaison des résultats de l'évaluation ex ante avec les pondérations adaptées et avec les pondérations livrées par défaut par les concepteurs de MASC

Tableau 20 : Types de support permettant de communiquer sur les essais systèmes



## **Liste des annexes :**

Annexe I : Comparaison de méthodes de co-conception de SdCi rencontrées dans la littérature (tableau non exhaustif)

Annexe II : Comparaison des méthodes d'évaluation de la durabilité, à l'échelle du SdC en grandes cultures (liste non exhaustive)

Annexe III : Itinéraire technique synthétisé du système de référence régional

Annexe IV : Données pédologiques issues des analyses de sol des parcelles prévues pour les essais

Annexe V : Ajustement des rendements proposés lors des ateliers de co-conception (P = prototype)

Annexe VI : Détail des composantes des arbres satellites

Annexe VII : Détail des valeurs seuils appliquées lors de la discrétisation des indicateurs

Annexe VIII : Données météorologiques de l'année climatique utilisée pour le paramétrage de CRITER 5.4.

Annexe IX : Méthode de calcul de l'indicateur « Surcharge de travail »

Annexe X : Détail du calcul des indicateurs environnementaux

Annexe XI : Détail des itinéraires techniques de chacun des prototypes après ajustement des rendements

Annexe XII : Comparaison des sorties DEXi des prototypes -50%

Annexe XIII : Comparaison des sorties DEXi des prototypes -75%

Annexe XIV : Comparaison des sorties DEXi des prototypes AB

Annexe XV : L'interface Izi-Eval, un complément aux fonctionnalités de DEXi

Annexe XVI : Perspectives pour une gestion différenciée des bords de champ

Annexe XVII : Ex ante assessment results for the 50% CS

Annexe XVIII : Ex ante assessment results for the 75% CS

Annexe XIX : Ex ante assessment results for the Organic CS



## Introduction

L'agriculture française telle qu'elle s'est développée depuis les années 50 fait aujourd'hui face à des défis qui dépassent le simple cadre de la production agricole. Si nourrir une population croissante reste un enjeu majeur, la société attend aussi une agriculture compétitive et source d'emplois, capable de réduire sa dépendance à l'énergie fossile et aux intrants et de maîtriser ses impacts sur l'environnement (Meynard 2012). La montée de ces préoccupations remet en cause les fondamentaux de l'agriculture issue de la Révolution Verte, dont l'usage intensif des produits phytosanitaires. Cela s'accompagne d'une volonté de développer des systèmes de culture (SdC) répondant aux exigences de la durabilité, sur les plans économique, environnemental et social, impliquant de concilier un nombre important d'objectifs parfois contradictoires (Craheix et al. 2011a). Ces nouveaux enjeux s'accompagnent de paradigmes émergents, comme l'agroécologie, proposant une approche systémique pour concevoir des SdC répondant à ces défis de l'agriculture (Berthet et al. 2016).

Les politiques publiques se réorientent pour répondre à ces attentes. Le plan Ecophyto 2018 visait une réduction de 50% du recours aux produits phytosanitaires, si possible, mais s'est soldé par un constat d'échec, avec une augmentation de 5% du recours à ces produits entre les périodes 2009-2011 et 2011-2013. Le plan Ecophyto 2025 (Ecophyto 2) appelle donc à une mutation profonde des SdC et mobilise de nouveaux leviers en s'inscrivant dans le projet agro-écologique pour la France (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation 2015). Ce mémoire s'inscrit dans l'action 1 du projet SYNO'PHYT, «Evaluer des systèmes grandes cultures très économes en produits phytosanitaires», porté par la Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne (CRAB) et répondant à l'appel à projet DEPHY EXPE\* 2, réseau d'expérimentation d'Ecophyto 2. Ce projet a pour but d'établir des références économiques, sociales et environnementales sur trois SdC présentant un gradient de réduction de l'indice de fréquence de traitements phytosanitaires\* (IFT) de 50%, 75% et 100% par rapport à un SdC de référence breton.

Cette étude vient initier le projet SYNO'PHYT avec pour objectif de **concevoir et évaluer ex ante les trois essais systèmes de ce projet**. La problématique est la suivante : **Quels systèmes de culture et quels itinéraires techniques\* (ITK) peuvent répondre aux objectifs de réduction de l'usage des produits phytosanitaires, sans dégrader la durabilité globale par rapport à un SdC de référence breton ?** Ce mémoire a pour but d'identifier trois SdC prometteurs à mettre en place, un pour chacun des trois essais.

La première partie de ce rapport présente le contexte et l'état de l'art sur l'approche système. La méthodologie suivie est décrite en deuxième partie. Les résultats de la conception et de l'évaluation *ex ante* sont présentés en troisième partie, puis discutés dans une quatrième partie. Les perspectives pour la mise en place des essais sont envisagées en dernière partie.



## **1. Etat de l'art et contexte de l'étude**

### **1.1. Contexte territorial**

L'agriculture bretonne repose sur l'intensification des productions animales, fourragères et légumières (Agreste 2017). A l'échelle nationale, elle occupe la première place notamment pour la production laitière, ainsi que pour la production de porcs et volailles hors sol. Cette étude porte sur les surfaces bretonnes en grandes cultures, majoritairement dédiées à l'alimentation animale, avec une rotation maïs-blé qui occupe près de 50% de la sole bretonne (Giteau 2017), bien qu'on assiste à une diversification des céréales et une intégration d'oléoprotéagineux (dont 88% de colza) (Agreste 2017).

En Bretagne, les eaux superficielles fournissent 80% de l'eau potable et sont très vulnérables, au contact direct de pollutions potentielles liées au lessivage de l'azote et des produits phytosanitaires (fig.1). En 2015, 158 molécules (dont 92% de glyphosate) ont été quantifiées dans ces eaux (Agreste 2017). Un fort enjeu environnemental existe pour l'agriculture bretonne, comme en témoignent les objectifs de la Directive Nitrates et du plan Ecophyto, qui imposent une maîtrise des pertes en azote et une réduction de l'usage des produits phytosanitaires. En parallèle, et notamment sous l'impulsion du Grenelle de l'Environnement de 2007, de plus en plus d'exploitations bretonnes se convertissent à l'agriculture biologique (AB), avec plus de 2000 fermes en 2015 (Agreste 2017). Pour accompagner cette transition vers l'AB et répondre aux objectifs environnementaux, il est nécessaire de repenser les SdC bretons notamment ceux associés aux systèmes porcs ou volailles, représentatifs de la région, en concevant des systèmes plus durables et moins consommateurs en intrants.

### **1.2. Nécessité d'une approche systémique et participative**

Un **système de culture** est «l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique» (Sebillote 1992). Il est défini par la nature des cultures et leur succession ainsi que par les ITK appliqués. Concevoir des SdC plus durables implique d'inclure dans leurs performances des objectifs économiques, environnementaux et sociaux. En effet, le concept de **durabilité** s'appuie sur une approche multidimensionnelle, respectueuse de l'environnement tout en étant économiquement viable et socialement acceptable (Sadok et al. 2009). Cela impose d'adopter une nouvelle approche de l'innovation, à la fois systémique pour appréhender la complexité de l'écosystème, et participative pour hybrider connaissances scientifiques et locales (Berthet et al. 2016).

#### *1.2.1. Une approche système pour aborder la complexité*

**L'approche système** en expérimentation agronomique est une nouvelle façon de prototyper, d'expérimenter et d'évaluer des SdC innovants (SdCi) pouvant répondre aux enjeux multiples de la durabilité (Mollier 2012). Cette approche considère la cohérence d'un SdC,

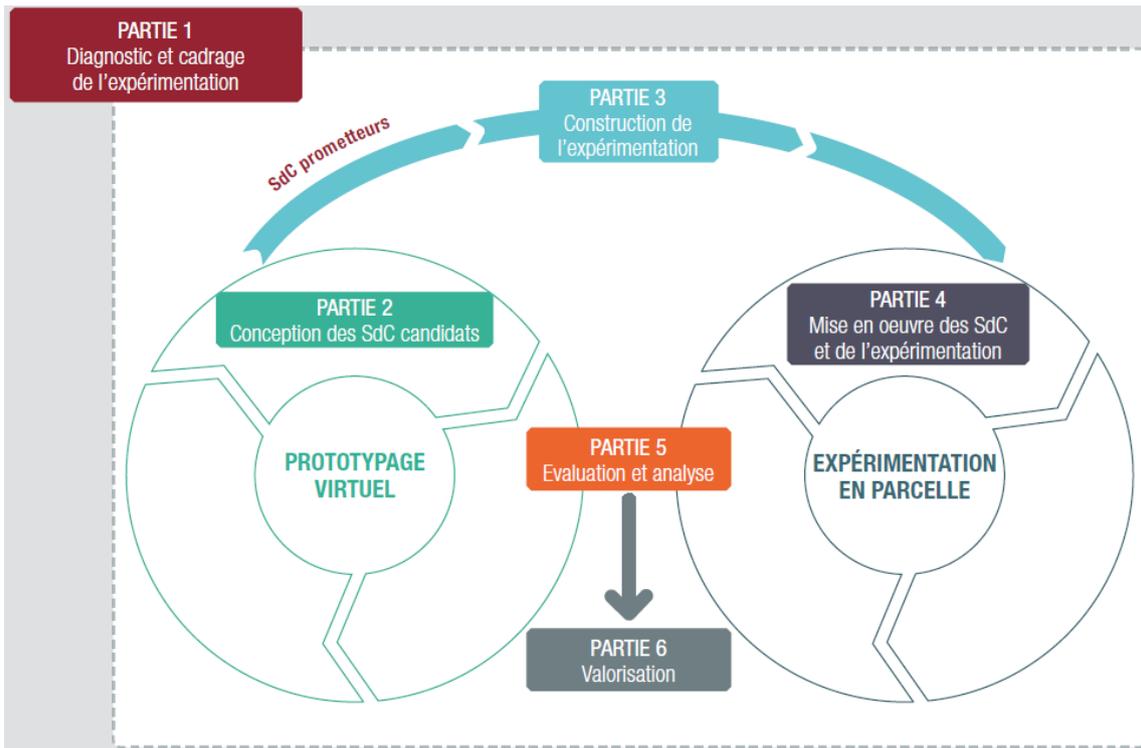


Figure 2 : Les 6 étapes de la démarche systémique appliquée à l'expérimentation agronomique – *The 6 steps of systemic approach in agronomic research* (Havard et al. 2017)

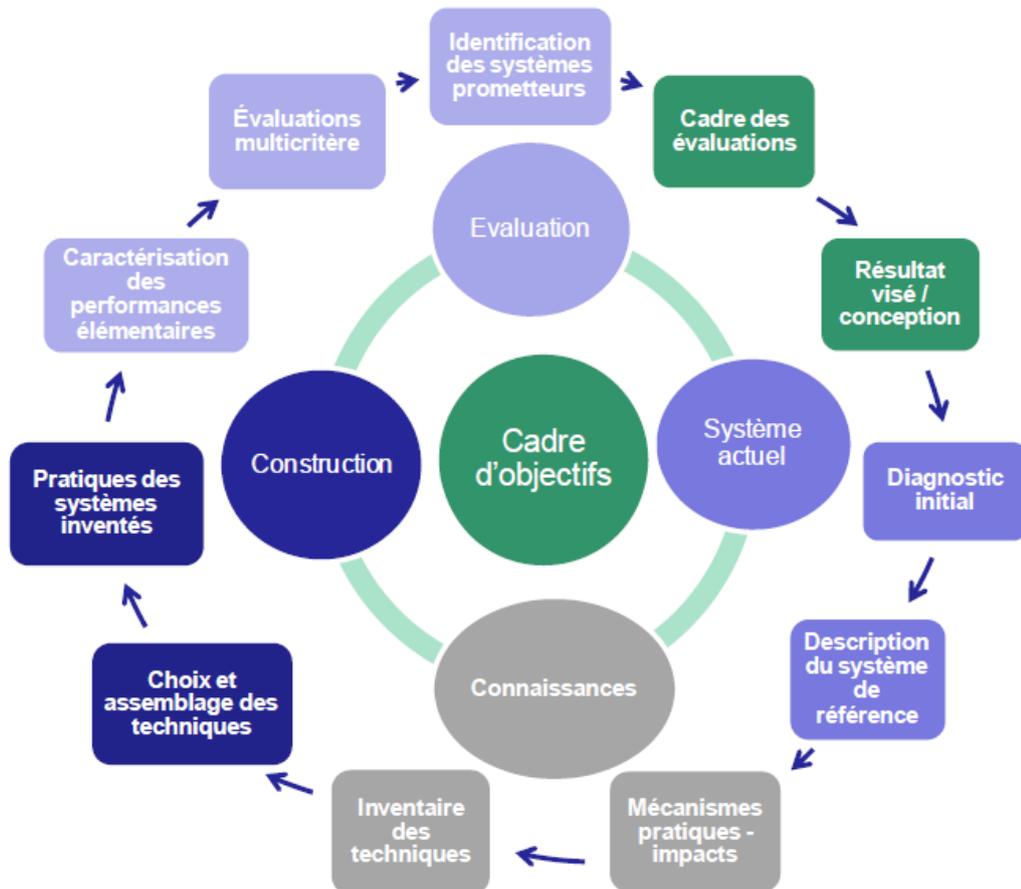


Figure 3 : Les différentes étapes des ateliers de co-conception – *Different steps of co-conception workshops* (Reau et al. 2012)

en appréhendant son fonctionnement comme un ensemble d'éléments en interaction dans un environnement précis (Havard et al. 2017). Elle comporte deux phases : le **prototypage virtuel** (concevoir et évaluer *ex ante* des prototypes de SdC), qui est l'objet de ce mémoire, et **l'expérimentation au champ** des SdC prometteurs avec évaluation *a posteriori* (Deytieux et al. 2012). La démarche complète se fait en six étapes (Havard et al. 2017) résumées figure 2. Le prototypage virtuel peut être réalisé «pas à pas», en transition progressive vers des SdCi, ou *de novo*, en rupture avec l'existant (Meynard 2012). L'objectif de l'approche système diffère de l'approche factorielle car on évalue à quelle fréquence les objectifs visés sont atteints (Debaeke et al. 2009) et si les performances du SdC sont liées à la gestion du système ou au hasard (Deytieux et al. 2012). Ainsi, le SdC est défini comme un jeu de Règles de Décision (RdD) cadrant le raisonnement des techniques en faisant correspondre un ensemble de choix techniques possibles à différents contextes (Nolot 2002).

### 1.2.2. *Une approche participative pour mobiliser les compétences*

L'étape de conception de SdC complexes aux enjeux multiples exige des compétences et des disciplines très variées, difficiles à mobiliser par une personne seule (Réau et al. 2012), et fait donc appel à l'intelligence collective (Meynard et al. 2012). L'innovation se construit via le partage des connaissances et compétences entre plusieurs catégories d'acteurs aux logiques, outils et expériences différents (Mischler et al 2008). Le travail de conception peut être partagé au cours de séances mobilisant une diversité d'acteurs, les ateliers de conception. On parle alors de **co-conception**, qui peut associer ou non des agriculteurs au processus (Reau et al. 2012). Lorsque l'expérimentation vise à concevoir des SdC applicables par les agriculteurs, leur point de vue doit être pris en compte pour que l'innovation soit un succès (Wijnands et al. 1999). Cela maintient leur motivation à adopter les pratiques innovantes et accélère le processus d'apprentissage (Cardoso et al. 2001). Dans les stations expérimentales se développe une forme de recherche «semi-confinée», au sens où elle implique de plus en plus les acteurs du monde agricole dans les processus d'expérimentation (Cardona et al.2018).

## 1.3. Etat de l'art des méthodes de co-conception et évaluation *ex ante* de SdC

### 1.3.1. *Des méthodes de conception diversifiées mais une approche commune*

Le but de l'étape de conception est de proposer des **prototypes**, c'est-à-dire des SdC théoriques, non mis en œuvre jusqu'alors sur l'exploitation, pouvant répondre à des objectifs précis via des ITK et des rotations (Peigné et al. 2015). La première méthode de prototypage adaptée aux SdC a été formalisée par Vereijken aux Pays Bas en 1997. Depuis, plusieurs méthodes ont été proposées, avec des améliorations comme l'intégration d'une plus grande diversité d'acteurs et d'une phase d'évaluation *ex ante* (Reau et al. 2012). Ces méthodes de conception diffèrent par leurs objectifs, la composition des groupes et la durée du processus (Annexe I). Le projet SYNO'PHYT s'appuie fortement sur le Réseau Mixte Technologique SdCi

Échelle Dimensions prises en compte	Parcelle ou Système de Culture	Exploitation	Filière / Produit / Atelier	Territoire
Les 3 dimensions : environnementale, économique, sociale	<a href="#">CASSIOPÉE Performance</a> <a href="#">MASC/CRITER</a> <a href="#">PERSYST</a> <a href="#">SYSTERRE</a> <a href="#">DEXiFruits</a>	<a href="#">DAESE</a> <a href="#">Diaq agro-éco</a> <a href="#">Diagnostic Agriculture Paysanne</a> <a href="#">Grille RAD</a> <a href="#">IDEA</a> <a href="#">IndicIADes</a> <a href="#">SYSTERRE</a>	<a href="#">CAP'2ER niveau 2</a> <a href="#">CASSIOPÉE Performance</a> <a href="#">DIAMOND</a> <a href="#">S+Durable?</a>	<a href="#">CASSIOPÉE Performance</a>
Durabilité environnementale (plus de 3 thématiques)	<a href="#">DAEG</a> <a href="#">INDIGO</a>	<a href="#">DAEG</a> <a href="#">Dialecte</a> <a href="#">SOLEO</a> <a href="#">Xpert environnement</a>	<a href="#">CAP'2ER niveau 1</a> <a href="#">ENGELE</a>	
Durabilité environnementale (1 à 3 thématiques)	<a href="#">AQUAPLAINE</a> <a href="#">ARTHUR</a> <a href="#">EGES</a> <a href="#">MERLIN</a> <a href="#">SIMEOS</a> <a href="#">Syst'N</a> <a href="#">PHYTO'AIDE</a>	<a href="#">AQUASITE</a> <a href="#">Diaphyt</a> <a href="#">DIATERRE</a> <a href="#">Methasim</a>	<a href="#">GEEP</a>	<a href="#">AQUAVALLÉE</a> <a href="#">CLIMAGRI</a> <a href="#">Territ'eau</a>

Figure 4 : Typologie des outils d'évaluation multicritères issue du projet PLAGE – *Typology of multicriteria assessment tools from the PLAGE project* (RMT ERYTAGE 2014 d'après Bockstaller et al. 2008)

(RMT SdCi), réseau de partenaires de la recherche, du développement et de la formation, dont la CRAB. Ce réseau propose des éléments pour guider la démarche de conception de SdC, et notamment le déroulé des ateliers de co-conception (Reau et al. 2012) (fig.3) :

- **Un diagnostic initial** du SdC actuel complété par la description du SdC de référence
- **Un cadrage initial** pour préciser le contexte, les contraintes et les objectifs d'expérimentation et proposer des critères d'évaluation (Lançon et al. 2008).
- **Un point sur les connaissances** et techniques disponibles pour répondre aux objectifs.
- **La construction de SdC** : propositions de stratégies générales puis description précise et opérationnelle de prototypes candidats, formulés en RdD tenant compte de leur faisabilité (Debaeke et al. 2009 ; Nolot et Debaeke 2003).
- **L'évaluation ex ante** des prototypes candidats pour identifier les plus prometteurs.

### 1.3.2. *L'évaluation ex ante, indispensable avant l'expérimentation au champ*

La démarche de conception de SdC est une boucle de progrès avec des allers retours entre les étapes, ceux-ci étant permis par l'évaluation *ex ante*, étape majeure du processus (Debaeke et al. 2008). L'évaluation est dite *ex ante* ou *a priori* quand elle porte sur des prototypes qui ne sont pas encore mis en œuvre au champ (Peigné et al. 2015), à partir de leur version la plus opérationnelle (Lançon et al. 2008). Cette évaluation globale a pour but d'une part de caractériser la capacité du SdC à répondre aux objectifs collectivement définis (Loyce et al. 2008), en évaluant des performances économiques, sociales et environnementales, et d'autre part d'estimer la durabilité globale des SdCi par agrégation de ces critères (Reau et al. 2012). Cela permet de classer chaque SdC suivant une note globale et d'identifier les plus prometteurs pour le test au champ (Lançon et al. 2008), mais aussi d'identifier les faiblesses et de revenir sur la conception pour les améliorer (Peigné et al. 2015).

Evaluer la durabilité nécessite des méthodes d'aide à la décision multi-critères (MCDA), prenant en compte des objectifs multiples (Sadok et al. 2009). Les méthodes «mixtes» basées sur une approche qualitative semblent être les plus adaptées pour l'évaluation *ex ante* (Sadok et al. 2008), où les données quantitatives ne sont pas toujours disponibles et nécessitent parfois de mobiliser des experts (Craheix et al. 2012). Le choix d'une méthode peut se faire en considérant plusieurs paramètres, par exemple le type de systèmes à évaluer, l'échelle de l'évaluation, le nombre de dimensions de la durabilité que l'on souhaite évaluer, les acteurs concernés et/ou les sorties de visualisation attendues (Carof et al. 2013). Pour évaluer la durabilité en grande culture à l'échelle du SdC, l'outil SYSTERRE développé par ARVALIS, l'outil PERSYST (paramétré en Bourgogne et Eure et Loir) et la méthode MASC (Multi-attribute Assessment of the Sustainability of Cropping systems) développée par l'INRA pour l'évaluation multicritère des performances de SdC peuvent convenir (RMT ERYTAGE 2014) (fig.4). A cette classification on peut ajouter le modèle DEXiPM, destiné à évaluer les performances des SdC

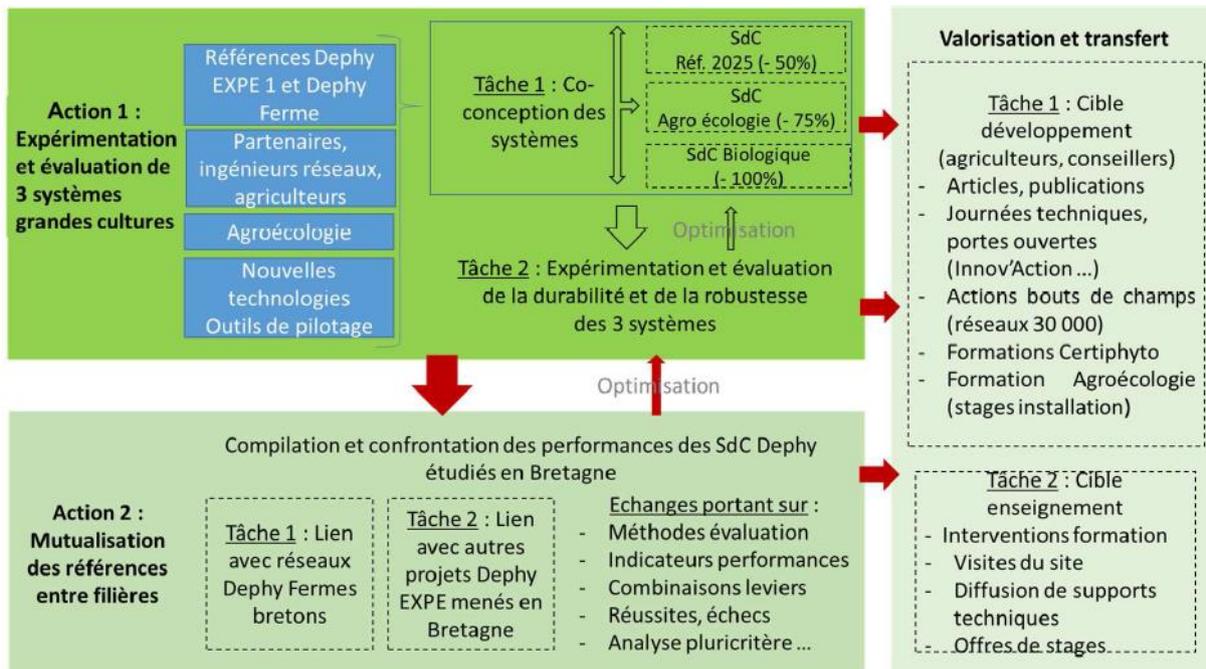


Figure 5 : Organisation du projet SYNO'PHYT – Organisation of the SYNO'PHYT project (Giteau 2017)

intégrés (Pelzer et al. 2012), et la méthode ROTOR, spécifique pour évaluer des SdC en agriculture biologique (Bachinger et Zander 2007) (Détail des méthodes en Annexe II).

#### 1.4. Le projet SYNO'PHYT, une expérimentation système DEPHY EXPE 2

##### 1.4.1. *Présentation du projet*

Une des missions majeures de la CRAB est d'anticiper les évolutions en innovant et en diffusant des références à destination des acteurs du monde agricole, via son réseau de recherche, développement et formation. La station expérimentale de la CRAB située à Kerguéhennec (56) est un dispositif de recherche appliquée, membre du réseau DEPHY EXPE\*, action majeure du plan Ecophyto. Depuis 2012, trois essais systèmes ont été menés conjointement sur les sites de Kerguéhennec et Crécom (22) pour étudier la possibilité de réduire les IFT de 50% par rapport à un SdC de référence breton, si possible, sans pénaliser la rentabilité et les conditions de travail, afin de répondre aux exigences de la durabilité. Aujourd'hui, ces essais s'achèvent et de nouveaux essais plus en rupture avec les SdC actuels vont être mis en place par le projet SYNO'PHYT 2018-2025 (fig.5). Les essais précédents n'ont pas pénalisé la rentabilité et le temps de travail par rapport à un SdC de référence breton, mais la réduction de 50% des IFT n'a pas été atteinte, à l'exception de l'essai AB (Bouard 2017). Le projet SYNO'PHYT doit donc d'une part permettre d'atteindre cette réduction de 50%, mais aussi accompagner la transition vers des SdC agroécologiques en proposant des SdC très économes en intrants. Ainsi, l'objectif de limiter fortement l'usage des produits phytosanitaires est fixé avec obligation de résultats, et on souhaite en évaluer les conséquences sur les performances environnementales, économiques et sociales et donc sur la durabilité globale des SdC.

Trois essais systèmes, reposant sur un gradient de réduction des produits phytosanitaires par rapport à l'IFT d'un SdC de référence breton, sont à concevoir dans le cadre de ce mémoire :

- Un SdC conventionnel à rotation fixée (maïs-blé) dit «**SdC 50%**», présentant une réduction d'IFT de 50% par rapport à un SdC de référence régional. Dans la suite du projet, le SdC 50% sera la référence locale du projet SYNO'PHYT, afin d'anticiper une réglementation plus contraignante sur l'usage des produits phytosanitaires d'ici 2025. Les performances des SdC 75% et AB seront donc évaluées par la suite par rapport à celles du SdC 50%.
- Un SdC conventionnel dit «**SdC 75%**», présentant une réduction d'IFT de 75% par rapport à un SdC de référence régional et alliant pratiques agroécologiques et agriculture de précision. Le choix de la rotation pour ce SdC est libre.
- Un SdC biologique dit «**SdC AB**», présentant une réduction d'IFT de 100% par rapport à un SdC de référence régional et mobilisant de nouveaux leviers (couverts, robotique et systèmes de guidage, interventions géolocalisées) pour lever les freins qui limitent son déploiement. Le choix de la rotation pour ce SdC est libre.

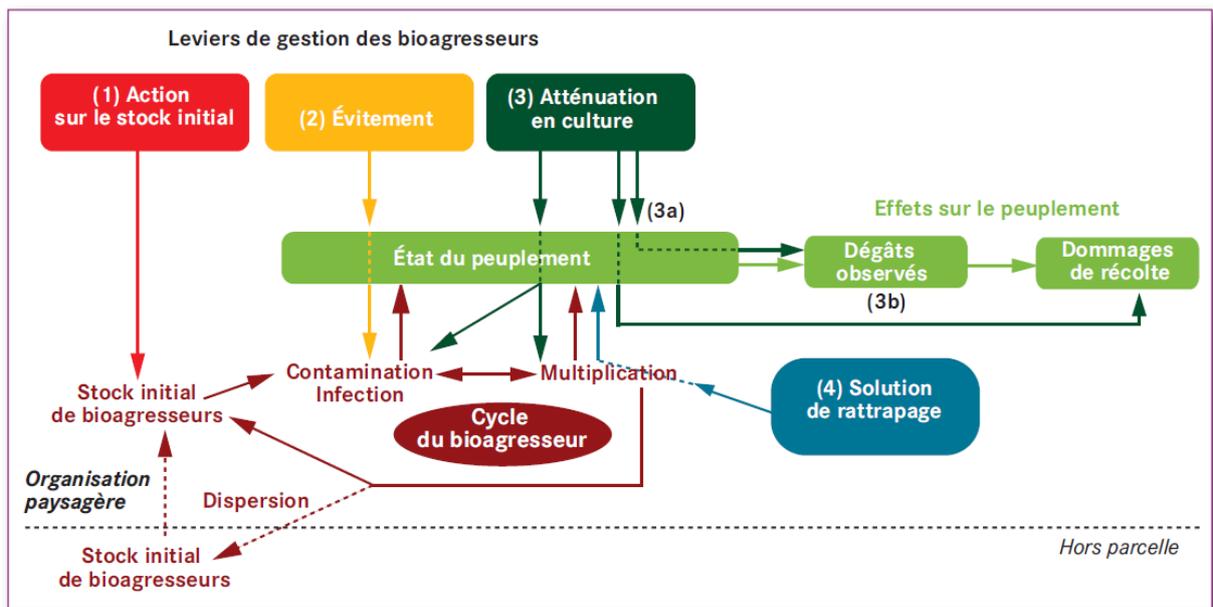


Figure 6 : Positionnement des différents leviers de gestion des bioagresseurs – *Classification of pest management levers* (Attoumani-Ronceux et al. 2011)

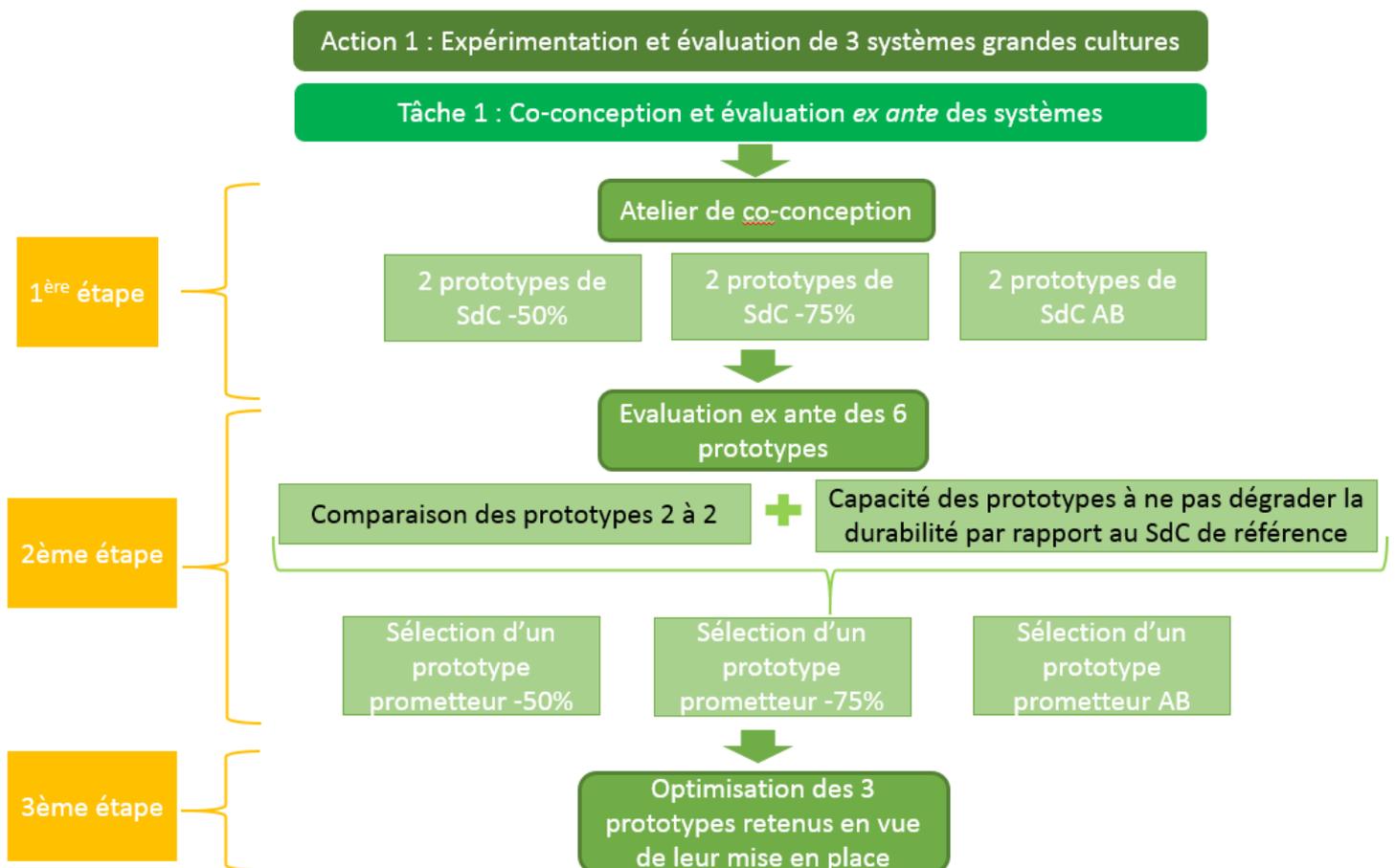


Figure 7 : Etapes à suivre au cours du stage – *Methodological framework of the internship*

#### 1.4.2. Concepts mobilisés dans le cadre du projet SYNO'PHYT

Les SdC à concevoir sont dits **innovants**, c'est-à-dire conçus en vue d'atteindre des objectifs orientés vers des enjeux émergents et évalués sur les priorités des agriculteurs, des filières et de la société (Meynard 2012). Les SdC conçus devront répondre aux exigences de la **durabilité** définie précédemment. Par ailleurs, le SdC AB répondra au cahier des charges de **l'agriculture biologique**, mode de production excluant l'usage des produits chimiques de synthèse et des organismes génétiquement modifiés, et favorisant le recours à des pratiques culturales soucieuses du respect des équilibres naturels (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2017). Les SdC à concevoir mobilisent le concept d'**agroécologie**, qui réfère à la fois à une science, un ensemble de pratiques ou un mouvement. Ici, on considérera l'agroécologie comme un ensemble de pratiques agricoles nouvelles, modifiées ou adaptées, contribuant à améliorer la durabilité des agroécosystèmes en se basant sur des processus écologiques (Wezel 2014). Le SdC 50% et le SdC 75% sont des systèmes dits en **production intégrée**, c'est-à-dire qu'ils privilégient la mise en œuvre de moyens agronomiques préventifs pour limiter les impacts environnementaux du SdC, avec un emploi des produits phytosanitaires réservé en dernier recours (Mischler et al. 2008).

#### 1.4.3. Leviers mis en œuvre pour la conception des SdC

L'objectif commun aux trois SdC est la réduction des produits phytosanitaires. Une stratégie économe en produits phytosanitaires résulte de la combinaison de la lutte chimique, physique et biologique, ainsi que du contrôle cultural et génétique. Les méthodes agroécologiques alternatives\* à la lutte chimique seront privilégiées (fig.6). En amont, des méthodes préventives (prophylaxie\*) peuvent être mobilisées pour agir sur le stock initial de bioagresseurs\* (ex : adaptation des rotations, du travail du sol, biocontrôle\*, conservation des habitats pour favoriser les auxiliaires\*). Au cours du cycle de développement des cultures, les méthodes mobilisables sont les stratégies d'évitement (ex : raisonnement des dates de semis) et d'atténuation (ex : associations d'espèces ou variétés résistantes). En aval, les solutions de rattrapage permettent de limiter les dégâts (désherbage mécanique, lutte chimique) (Attoumani-Ronceux et al. 2011). Les pratiques mises en œuvre seront basées sur les principes agroécologiques de maximisation des services écosystémiques\*, de prise en compte des interactions entre les compartiments de l'agroécosystème\* et de valorisation de la biodiversité. Le potentiel des nouvelles technologies sera valorisé via l'agriculture de précision, dont le principe est de moduler les interventions (fertilisation, semis, traitements phytosanitaires) en tenant compte de l'hétérogénéité de la parcelle (Guérif et King 2007). Les traitements localisés sur le rang ou au niveau des foyers d'infestation, grâce à la télédétection et la cartographie, permettent de réduire les quantités de produits appliquées à l'hectare.

Tableau 1 : IFT Herbicide, Hors Herbicide, Traitement de semences et IFT moyen total à atteindre pour chaque essai – *TFI Herbicides, Exclusive of Herbicides, Seed Treatments and total average TFI to achieve for each trial* (Agreste 2016)

	Blé tendre	Mais grain	Moyenne rotation Mais-blé (SdC de référence breton)	-50%	-75%
IFT moyen Herbicide	1.46	1.37	1.42	0.71	0.35
IFT moyen Hors Herbicide sans traitement de semences	2.07	0	1.04	0.52	0.26
IFT moyen traitement de semences	0.94	0.95	0.95	0.47	0.24
IFT moyen total	4.47	2.32	3.40	1.70	0.85
IFT moyen hors traitement de semences	3.53	1.37	2.45	1.23	0.61

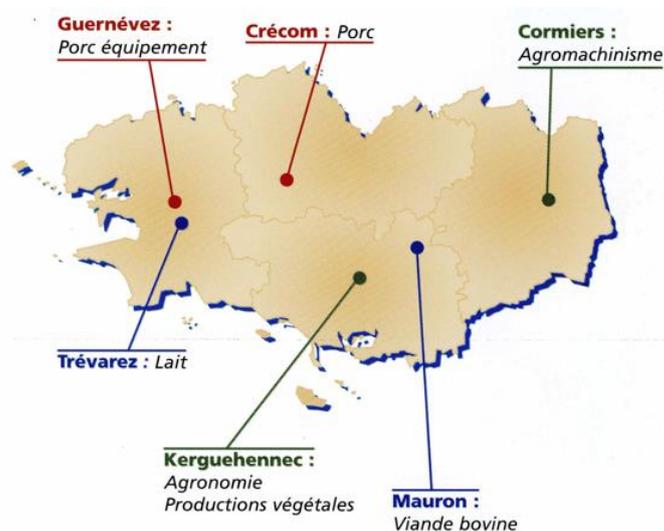


Figure 8 : Le réseau de 6 stations expérimentales de la CRAB – *The 6 experimental stations network of the CRAB* (Document interne)

Tableau 2 : Contraintes fixées en amont de la conception des prototypes – *Constraints established before prototyping*

Cultures autorisées	Recherche de complémentarité avec les projets RésOPest, BreizHECOleg, Sys'M-OR	Grandes cultures uniquement (ni pérennes, ni légumes), intégration de protéagineux
	Systèmes représentatifs de filières hors sol : - exploitation avec atelier porc pour les SdC conventionnels - exploitation avec atelier volaille pour les SdC Bio	
	Débouchés cohérents avec les besoins de la filière (représentée par Triskalia), prioritairement alimentation animale et recherche d'amélioration de l'autonomie protéique	
Fertilisation	SdC conventionnels : Fertilisation organique représentative d'une exploitation porcine. A dire d'experts, un SdC avec atelier porc moyen est excédentaire en azote	Fertilisation lisier de porc, quantité non limitante
	SdC Bio : Fertilisation organique représentative d'une exploitation avec un atelier volaille en AB. A dire d'experts, un SdC AB avec atelier volaille, représentatif de l'évolution de la filière, correspond à 9000 poules pondeuses = 2673 UN maîtrisable pour une SAU moyenne de 80ha. Cela correspond à une fertilisation de 1t/ha de fumier à 35UN/t.	Fertilisation fientes de volailles, pool d'azote disponible : 35 uN / terme de la rotation

#### 1.4.4. Objectifs, hypothèse et déroulé du stage

Ce stage vient initier le projet SYNO'PHYT, et doit aboutir à la mise en place des trois essais systèmes présentés (SdC 50%, 75% et AB). Pour répondre à la problématique présentée en introduction, on fait l'hypothèse suivante : **A partir d'un objectif de réduction d'IFT fixé, il est possible, en suivant une démarche de co-conception entre experts de sphères différentes, de concevoir des SdC qui maintiennent ou améliorent la contribution au développement durable\* par rapport à un SdC de référence breton.**

Le stage comptera trois étapes distinctes (fig.7) :

- Une étape de co-conception de deux prototypes pour chacun des trois essais
- Une étape d'évaluation *ex ante* des 6 prototypes afin de comparer leurs performances économiques, sociales et environnementales et d'évaluer leur durabilité globale par rapport à un SdC de référence breton.
- Selon les résultats de l'évaluation, une étape d'optimisation des trois SdC les plus prometteurs pour l'expérimentation au champ.

## 2. Matériels et Méthodes

### 2.1. Cadrage initial de l'expérimentation système

#### 2.1.1. *Système de référence régional*

Un SdC de référence breton est nécessaire pour cette étude, afin de fixer les objectifs de réduction des IFT, de fixer des valeurs seuils pour chaque indicateur\*, permettant de discriminer les SdC deux à deux, ainsi que pour évaluer le positionnement des SdC conçus en termes de durabilité globale par rapport à ce SdC de référence. Ce SdC théorique, déjà utilisé lors des essais précédents, a nécessité une mise à jour. Le SdC de référence régional a été établi pour une rotation maïs-blé, à dire d'experts et en se basant sur les pratiques considérées comme représentatives en Bretagne. Pour traduire au mieux la variabilité des pratiques, la rotation est répétée sur 8 ans en faisant varier les produits utilisés, le travail du sol et la fertilisation (Annexe III). L'IFT du SdC de référence correspond à la moyenne des IFT régionaux 2014 du maïs et du blé (Agreste 2016) (Tableau 1).

#### 2.1.2. *Contraintes et contexte de l'expérimentation*

*Objectifs* : Le calcul des IFT à atteindre pour chacun des trois essais a été réalisé par rapport à l'IFT du SdC de référence breton (Tableau 1). Les IFT figurant dans le tableau devront être atteints en moyenne à l'échelle de l'assolement, et la réduction de 50%, 75% et 100% devra être atteinte pour chaque poste d'IFT (herbicide, hors herbicide et traitement de semences).

*Echelle d'étude* : Pour tester les performances d'une succession culturale, l'expérimentation nécessite *a minima* une rotation (Havard et al. 2017), et l'échelle spatiale est l'ilot de parcelles, intégrant la gestion des bords de champ (Reau et al. 2012).

*Contraintes* : La station de Kerguéhennec s'inscrit dans un réseau de six stations



Figure 9 : Atelier de co-conception de SdC avec le jeu Mission Ecophyt'eau – *Co-design workshops of cropping systems with the role play Mission Ecophyt'eau* (Chambre d'Agriculture de Ploërmel, 13/04/18) (Crédits photo : J.Angot)

Diversifier familles et espèces dans la rotation pour rompre le cycle des maladies en tenant compte des délais de retour et des précédents possibles  
 Diversifier familles et espèces dans la rotation pour obtenir une rupture parasitaire vis-à-vis des ravageurs en tenant compte des délais de retour et des précédents possibles  
 Diversifier familles et espèces dans la rotation pour déspecialiser la flore adventice  
 Mettre en place 1 année sur 3 une interculture longue pour permettre le travail du sol

Introduire au moins une légumineuse dans la rotation  
 Implanter au moins une année sur 3 une culture à grain(e)s restituant les pailles  
 Faire suivre les légumineuses par des cultures d'hiver exigeantes en azote, ou à défaut par une culture intermédiaire<sup>8</sup>  
 Alternier les cultures exigeantes en phosphate et en potasse avec des cultures peu exigeantes

■ Leviers permettant de contrôler les bioagresseurs

Figure 10 : Leviers agronomiques utilisés en production intégrée à l'échelle de la rotation – *Agronomic levers used in integrated production at the scale of crop rotation* (Attoumani-Ronceux et al. 2011)

expérimentales bretonnes complémentaires, et est spécialisée en grandes cultures (fig.8). Le choix a donc été fait de concevoir des SdC représentatifs de filières avec un assolement en grandes cultures, la filière porcine pour les SdC conventionnels et la filière volaille pour le SdC AB, les exploitations porcines étant moins fréquentes en AB. Les contraintes de cultures et de fertilisation qui en découlent sont résumées tableau 2.

*Contexte* : Le climat est océanique, doux et humide, avec une température moyenne de 11.7°C et une pluviométrie de 1011.2mm (moyenne 1993-2016). Les sols sont limono-sablo-argileux sur micaschiste, de profondeur moyenne de 80cm, sains et acides (pH 6 à 6.5). Les données pédologiques des parcelles prévues pour les essais sont disponibles en Annexe IV.

## 2.2. Co-conception de SdC innovants en ateliers

La méthode retenue pour la conception est celle du RMT SdCi, décrite par Reau et al. 2012. L'intégration du projet SYNO'PHYT au plan Ecophyto a permis de mobiliser un outil ludique et participatif, le jeu Mission Ecophyt'eau, pour concevoir en groupes de 5-6 personnes des SdCi (fig.9). Les ateliers ont compté 34 participants, issus de la CRAB, de l'INRA, des réseaux techniques, ainsi que des agriculteurs, répartis en 5 groupes, afin d'obtenir 2 prototypes pour chaque essai, à comparer pour n'en retenir qu'un pour l'expérimentation. 3 séances ont été nécessaires :

- *1<sup>ère</sup> séance : construction des rotations en ateliers de co-conception* : les rotations des SdC 75% et AB ont été construites selon les principes de base de la production intégrée (fig.10). A l'issue de cette séance, les 6 prototypes proposés ont été caractérisés par une rotation et des choix de pratiques mobilisant les leviers énoncés précédemment (cf 1.1.1).
- *2<sup>ème</sup> séance : Collecte des données manquantes avec les animateurs de chaque groupe* : la description précise des ITK de chaque rotation est indispensable pour le calcul des indicateurs de l'évaluation. Les doses d'intrants, les dates d'interventions et les outils et produits utilisés ont été précisés avec les animateurs de chaque groupe, sur la base des ITK pratiqués habituellement sur les essais systèmes de Kerguéhennec. Un ajustement des objectifs de rendement proposés s'est avéré nécessaire, dans le but de relativiser la faisabilité des propositions initiales et d'accorder ces objectifs aux ITK proposés, compte tenu du contexte de production de la station de Kerguéhennec (Annexe V).
- *3<sup>ème</sup> séance : Restitution aux participants des résultats de l'évaluation et réflexion sur les modifications à apporter aux prototypes* : l'objectif étant de ne conserver qu'un seul prototype par essai, l'évaluation *ex ante* doit permettre de discriminer les prototypes de chaque essai l'un par rapport à l'autre. Les résultats de cette évaluation ont été présentés lors d'un second atelier, mettant en évidence les 3 prototypes les plus prometteurs pour chaque essai parmi les 6 initialement proposés. Les participants ont travaillé dans un second temps à optimiser les ITK des prototypes retenus.

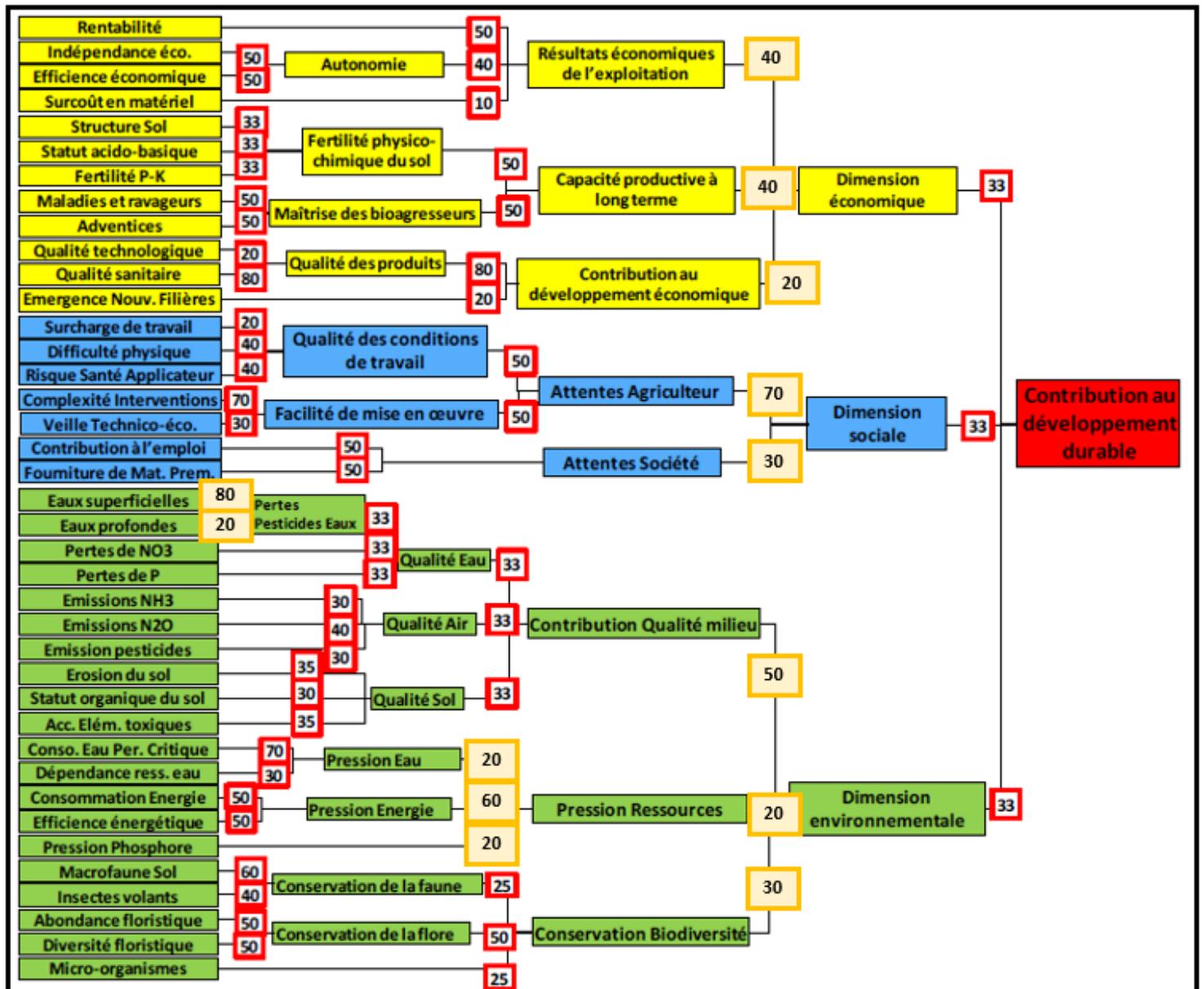


Figure 11 : Présentation de l'arborescence de MASC 2.0 (encart rouge : pondération livrée par défaut, encart orange : pondération modifiée) – Presentation of the MASC 2.0 tree (red square : default weight, orange square : adapted weight) (Craheix et al. 2011)

## 2.3. Evaluation ex ante des prototypes de SdC avec l'outil MASC

### 2.3.1. *Choix d'un outil d'évaluation multicritère : MASC 2.0*

Parmi les outils et méthodes d'évaluation présentés précédemment, MASC 2.0 a été retenu pour cette étude. MASC 2.0 est un outil d'évaluation multicritère des performances des SdC, en termes de contribution au développement durable. Il a été développé sur un logiciel d'aide à la décision DEXi, qui décompose un problème décisionnel complexe en sous problèmes plus faciles à résoudre (Craheix et al. 2012). Cette méthode mixte conduite à l'échelle du SdC est adaptée à l'évaluation *ex ante*, étant fondée sur la description des pratiques planifiées (Sadok et al. 2008). MASC 2.0 combine une approche globale couvrant les trois dimensions de la durabilité, tout en permettant de focaliser sur une dimension et de comparer différents prototypes entre eux (Bockstaller et al. 2008). De plus, MASC 2.0 est rentré dans l'usage dans la méthode du RMT SdCi, son utilisation facilite donc la communication sur les résultats et l'intégration à un réseau de référence national (Reau et al. 2012).

Le cœur du modèle MASC 2.0 est un arbre de décision décomposant l'évaluation de la durabilité en trois dimensions (économique, sociale et environnementale) (fig.11). La durabilité est décomposée en 39 critères\* basiques renseignés grâce à des indicateurs, et en 26 critères agrégés regroupant pas à pas l'information des critères basiques, via l'utilisation de fonctions d'agrégation (Craheix et al. 2012). Celles-ci combinent toutes les classes possibles des critères basiques pour obtenir celles du critère agrégé, via des RdD du type **SI critère<sub>1</sub>=valeur<sub>1</sub> ET critère<sub>2</sub>=valeur<sub>2</sub> ... ET critère<sub>n</sub>=valeur<sub>n</sub> ALORS critère agrégé=valeur** (Bohanec 2015). Les fonctions d'agrégation pondèrent entre eux les critères selon l'importance qu'on souhaite leur accorder. Le procédé d'évaluation implique le calcul des indicateurs basiques, leur homogénéisation en classes qualitatives (ex: faible, moyen, élevé) pouvant être entrées dans le modèle et l'agrégation progressive de l'information jusqu'au critère racine «Contribution au développement durable» (Sadok et al.2009). Les indicateurs nécessaires pour renseigner les critères basiques peuvent être :

- **Estimés à dire d'experts** : en mobilisant des expertises et des références locales
- **Indirectement renseignés par des arbres satellites** décomposant le calcul en différents postes qualitatifs directement agrégés par DEXi. Ils permettent d'évaluer des domaines de préoccupation complexes, ne pouvant pas être évalués par calcul direct ou par expertise. Le détail des arbres satellites utilisés est présenté en Annexe VI.
- **Calculés** : Le logiciel CRITER 5.4 a été développé parallèlement à MASC 2.0 afin de calculer un certain nombre d'indicateurs sous une seule interface d'entrée (Reau et al. 2012). CRITER calcule directement 21 indicateurs basiques sur les 39 de l'arbre de MASC, et 14 indicateurs utiles au renseignement des arbres satellites (Hirschy et al. 2015).

Tableau 3 : Valeurs seuils modifiées à partir des références locales et des gammes de valeur des SdC évalués – *Threshold values adapted according to local references and value range of the assessed prototypes*

Critère	Valeurs seuils
MSN Rentabilité	Valeurs seuils basées sur la MSN avec aides du SdC de référence breton : <b>très faible</b> ≤ 800 €/ha/an < <b>faible à moyenne</b> ≤ 950 €/ha/an < <b>moyenne à élevée</b> ≤ 1100 €/ha/an < <b>très élevée</b>
EFF Efficience économique	<b>très faible</b> ≤ 100 % < <b>moyenne à faible</b> ≤ 150 % < <b>moyenne à élevée</b> ≤ 200 % < <b>très élevée</b>
MAT Surcout en matériel	<b>faible</b> (pas d'outils supplémentaires par rapport au SdC de référence) ; <b>moyen</b> (entre 1 et 5 outils supplémentaires) ; <b>élevé</b> (plus de 5 outils supplémentaires)
CIC Complexité des interventions culturelles	<b>très faible</b> ≤ 1.6 < <b>faible à moyenne</b> ≤ 2.1 < <b>moyenne à élevée</b> ≤ 2.6 < <b>très élevée</b>
SDT Surcharge de travail	<b>élevée</b> (un ou plusieurs pics à plus de 60h par décade) ; <b>moyenne</b> (un ou plusieurs pics entre 40 et 60h par décade) ; <b>faible</b> (pics à moins de 40h par décade)
EMP Contribution à l'emploi	<b>très faible</b> ≤ 4 h/ha/an < <b>faible à moyenne</b> < 5 h/ha/an ≤ <b>moyenne à élevée</b> < 6h/ha/an ≤ <b>très élevée</b>
MAET Maitrise de l'accumulation des éléments toxiques	<b>faible à moyenne</b> : produit organique apporté plus d'un an sur deux ; <b>moyenne à élevée</b> : produit organique apporté moins d'un an sur deux

## 2.3.2. Paramétrage de MASC 2.0 et de CRITER 5.4

### 2.3.2.1. Paramétrage de MASC 2.0

Le modèle MASC présente une flexibilité de paramétrage, qui permet notamment de modifier le poids accordé aux critères d'entrée des critères agrégés pour mieux refléter les spécificités du contexte local et les attentes des utilisateurs par rapport aux SdC évalués. Dans cette étude, certains critères proposés par MASC ne sont pas pertinents car non adaptés au contexte local, et leur poids doit donc être modifié pour ne pas biaiser la note finale des prototypes. Les pondérations appliquées sont présentées fig.11. D'une manière générale, le choix a été fait de privilégier les attentes de l'agriculteur par rapport aux attentes de la société sur les dimensions économiques et sociales. Cela est lié au statut de structure de conseil de la CRAB, qui implique que l'expérimentation doit pouvoir être adoptée par les agriculteurs. La pondération des critères de la dimension environnementale a été raisonnée en lien avec les problématiques locales. De plus, le choix des valeurs seuils, permettant de discrétiser les indicateurs basiques en classes qualitatives à entrer dans le logiciel DEXi, doit être adapté lors du paramétrage de MASC, pour tenir compte de la variabilité des performances des SdC évalués et améliorer le pouvoir discriminant des indicateurs (Craheix et al. 2011a).

L'adaptation des valeurs seuils a été débattue entre experts, en considérant la gamme de valeurs prises par les SdC évalués, et en se rapprochant des références locales, représentées par le SdC de référence régional. Les critères dont les valeurs seuils ont été modifiées figurent en tableau 3, l'ensemble des valeurs seuils est disponible en Annexe VII.

### 2.3.2.2. Paramétrage de CRITER 5.4

CRITER a nécessité une saisie exhaustive des ITK pour le calcul des indicateurs, mais également un paramétrage précis des valeurs utilisées pour ces calculs, par vérification des valeurs paramétrées par défaut. Les prix de vente et de semences de chaque culture ont été estimés par une moyenne de données nationales sur minimum 5 ans. Le coût d'utilisation des outils a été mis à jour à partir du barème d'entraide 2017. Les prix des produits phytosanitaires sont ceux pratiqués à la station, et les doses homologuées ont été vérifiées dans l'index phytosanitaire ACTA 2017. Le prix des engrais organiques est nul, considérant qu'on s'adosse à un atelier d'élevage. L'adaptation au contexte local a été faite par le paramétrage des données pédo-climatiques. Les données pédologiques ont été paramétrées à partir des analyses de sol des parcelles prévues pour les essais (Annexe IV). Les données climatiques doivent être représentatives du climat à Kerguéhennec. Le choix a été fait de construire une année climatique à partir de la médiane\* des cumuls de pluie mensuels sur la période 1994-2016. Les mois médians ont été sélectionnés pour former l'année climatique (Annexe VIII).

Tableau 4 : Détail de la méthode de calcul des indicateurs basiques de la dimension économique –  
*Detail of the calculation method for the basic indicators of the economical dimension*

Critère	Indicateurs basiques	Méthode
Rentabilité	Marge semi-nette (€/ha/an)	$MSN = (PB + AD) - (CO + CM)$ Avec : Produit Brut (PB) : Rdt x prix (Agreste, FNAB) Charges opérationnelles (CO) : Semence, engrais, phytosanitaires, séchage, coût de carburant, coût de main d'œuvre occasionnelle Charges de mécanisation (CM) : $\sum[(Coût\ horaire\ outil/performance\ outil) \times fréquence\ intervention]$ (Barème d'entraide BCMA 2017)
Indépendance économique	Indépendance économique (%)	$IND = (1 - AD/MSN) \times 100$ Avec AD : Total des aides perçues (DPU Morbihan 277€/ha + aides légumineuses 100€/ha, à dire d'expert)
Efficience économique	Efficience économique (%)	$EFF = PB/CT \times 100$ Avec CT = CO + CM
Surcoût en matériel	Surcoût en matériel (sans unité)	Nombre d'outils supplémentaires par rapport à un SdC de référence breton
Maîtrise de l'état structural du sol	Proportion de cultures récoltées en mauvaises conditions (%), Equipements limitant le tassement, Aptitude du sol à la fissuration, Fréquence et profondeur de travail du sol.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Proportion de cultures récoltées en mauvaises conditions : <math>CRMC = (CRMC_i/NC) \times 100</math></li> <li>Aptitude du sol à la fissuration : selon triangle de texture</li> </ul>
Maîtrise du statut acido-basique	Statut acido-basique initial, CEC, Effet des pratiques acidifiantes et des amendements basiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>Statut acido-basique et CEC : Analyse de sol</li> <li><math>EPA = UEA + BA + PLR + EXC</math> Avec : UEA indice d'utilisation d'engrais acidifiants, BA indice de balance azotée, PLR indice d'effet de la proportion de légumineuses, EXC indice d'effet des exportations des cultures</li> <li>Amendements basiques fixés à "chaulage d'entretien moyen à élevé"</li> </ul>
Maîtrise de la fertilité phospho-potassique	Etat de fertilité initiale P et K, Bilan cultural annuel P et K moyen (kg/ha/an), Recyclage du P et K par les résidus de culture (kg/ha/an), Pouvoir tampon du sol	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>BCAP_{P,K} = [\sum_i (Q_{apport_i} P, K - (Rdt_i \times Teneur_i P, K))] / n</math>                Avec : <math>Q_{apport_i}</math> : Quantité de P et K apportée (kg/ha/an) pour la culture i, <math>Rdt_i</math> : Rendement culture i, <math>Teneur_i</math> : Teneur P et K des produits exportés pour la culture i</li> <li><math>RI_{P, K} = [\sum_i (QRES_i \times Teneur_i P, K)] / n</math>                Avec : <math>QRES_i</math> : Quantité de résidus de récolte en tonnes/ha pour la culture i,</li> </ul>
Maîtrise des maladies et ravageurs	Effet de la diversité des familles cultivées (DFC), des méthodes de lutte (EML) et du travail du sol	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>DFC = 1 / [\sum_i (ni/N)^2]</math> avec ni nombre de cultures de la famille i</li> <li><math>EML = (\sum CG_i + LB_i + LC_i) / n</math> avec CG indice de contrôle génétique, LB indice de lutte biologique et LC indice de lutte chimique, sur la culture i</li> </ul>
Maîtrise des adventices	Effet de la diversité des périodes d'implantation (EPI), du labour et des méthodes de lutte (EML)	<ul style="list-style-type: none"> <li>EPI = nombre de périodes de semis comptabilisées dans la rotation</li> <li><math>EML = (\sum Lp_i + Lc_i + ICC_i) / n</math> avec LP indice de lutte physique, LC indice de lutte chimique, ICC indice de contrôle par le couvert, pour la culture i.</li> </ul>
Qualité technologique et esthétique	Qualité technologique et esthétique (QTE)	$QTE = \sum_i Q_i / n$ avec $Q_i$ coefficient caractérisant le risque de ne pas atteindre l'objectif de qualité pour la culture i (à dire d'experts, $Q_i$ fixé à 2 pour tous les SdC)
Qualité sanitaire des produits	Qualité sanitaire des produits (QSP)	$QSP = (\sum_i IS_i) / N$ avec $IS_i$ indice de risque de contamination par les mycotoxines pour les cultures sensibles (fonction du précédent, de la présence ou non de labour et de la sensibilité de la variété à la fusariose)
Contribution à l'émergence de nouvelles filières	Contribution à l'émergence de nouvelles filières (CENF)	$CENF = [\sum_i CENF_i] / n$ avec $CENF_i$ : Indice de contribution à l'émergence de nouvelles filières pour la culture i (établi localement à dire d'experts)

\*N : nombre de cultures de la rotation \*n : durée de la rotation en années

### 2.3.3. *Présentation des critères de MASC*

#### 2.3.3.1. *Critères de la dimension économique*

La durabilité économique d'un système dépend des cultures choisies et de leur rentabilité, mais également des pratiques menées sur la rotation. L'ensemble des critères économiques et leur méthode de calcul sont résumés Tableau 4.

**Résultats économiques** : ce critère est composé de la rentabilité (dont l'indicateur est la marge semi-nette (MSN)), de l'autonomie du système (indépendance aux aides et efficience par rapport aux intrants) et du surcoût en matériel engendré, estimé à dire d'experts sur la base du nombre d'outils supplémentaires nécessaires par rapport au SdC de référence breton.

**Capacité productive à long terme** : ce critère estime l'évolution à moyen et long terme de la capacité productive des parcelles, qui impacte le rendement. Cela se traduit par deux critères :

- La maîtrise de la fertilité physico-chimique : dans ce critère sont évalués l'état structural du sol, son statut acido-basique et la fertilité phospho-potassique (Annexe VI).
- La maîtrise des bioagresseurs : Les adventices, les maladies et les ravageurs peuvent avoir un fort impact sur le rendement et donc sur la dimension économique. Leur maîtrise est évaluée à partir des méthodes de lutte mises en place, des pratiques de travail du sol, de la diversité des familles cultivées et des périodes d'implantation.

**Contribution au développement économique** : ce critère considère simultanément la qualité sanitaire, technologique et esthétique des produits et la contribution à l'émergence de nouvelles filières. La qualité technologique et esthétique a été fixée comme «élevée» pour tous les SdC, du fait que leurs débouchés sont en alimentation animale dont le cahier des charges est moins exigeant que pour l'alimentation humaine.

Le choix a été fait de réduire le poids de la contribution au développement économique à 20% contre 40% pour les résultats économiques et la capacité productive.

#### 2.3.3.2. *Critères de la dimension sociale*

Un système sera durable du point de vue social s'il est compatible avec les attentes de l'agriculteur ainsi qu'avec les attentes de la société. Le choix a été fait de réduire le poids des attentes de la société à 20% contre 80% pour les attentes de l'agriculteur.

**Attentes de l'agriculteur** : elles sont représentées par la facilité de mise en œuvre du système et la qualité des conditions de travail. La facilité de mise en œuvre dépend d'une part de la complexité des ITK et d'autre part du temps nécessaire pour s'approprier les connaissances sur les cultures moins maîtrisées comme les associations culturales. La qualité des conditions de travail comporte la surcharge de travail induite par le SdC, le risque de toxicité pour l'applicateur et la difficulté physique des opérations sur les cultures. La difficulté physique est restreinte à la manutention de charges lourdes comme les sacs de semences,

Tableau 5 : Détail de la méthode de calcul des indicateurs basiques de la dimension sociale –  
*Detail of the calculation method for the basic indicators of the social dimension*

Critère	Méthode
Surcharge de travail (SDT)	Estimation des pics de travail à plus de 60h par décade : Somme par décade des débits horaires des outils utilisés sur chaque culture, pondérés par la fréquence d'intervention. La somme du temps de travail par décade et par culture est ensuite ramenée à une exploitation de 60ha.
Difficulté physique (DIFF)	$DIFF = \sum_i DIFF_i / n$ , avec $DIFF_i$ : Nombre de contraintes physiques rencontrées pour l'année $i$ (1 mélange variétal ou 1 association = 0.5 pt)
Risque pour la santé de l'applicateur (TOX)	$TOX = (\sum_i PPI) / n$ avec $PPI$ : Nombre de passages avec le pulvérisateur contenant au moins un produit classé Xn, T ou t+ sur une année culturale $i$
Complexité des interventions culturales (CIC)	$CIC = [\sum_i (K_i)] / n$ avec $K_i$ : Coefficient de complexité affecté à chaque année culturale $i$
Temps de veille technico-économique (TVTE)	TVTE = nombre de cultures différentes dans la rotation
Contribution à l'emploi (EMP)	$EMP = [\sum_i NHi] / n$ avec $NHi$ : Nombre d'heures de travail/ha effectuées pour l'année $i$ par de la main d'oeuvre interne ou externe à l'exploitation
Fourniture de Matières Premières (FMP)	$FMP = [\sum_i (IRA_i / IRI_i) * 100] / n$ avec $IRA_i$ : rendement attendu ou obtenu pour la culture $i$ , $IRI_i$ : rendement permis en conduite intensive pour la culture $i$

\*N : nombre de cultures de la rotation

\*n : durée de la rotation en années

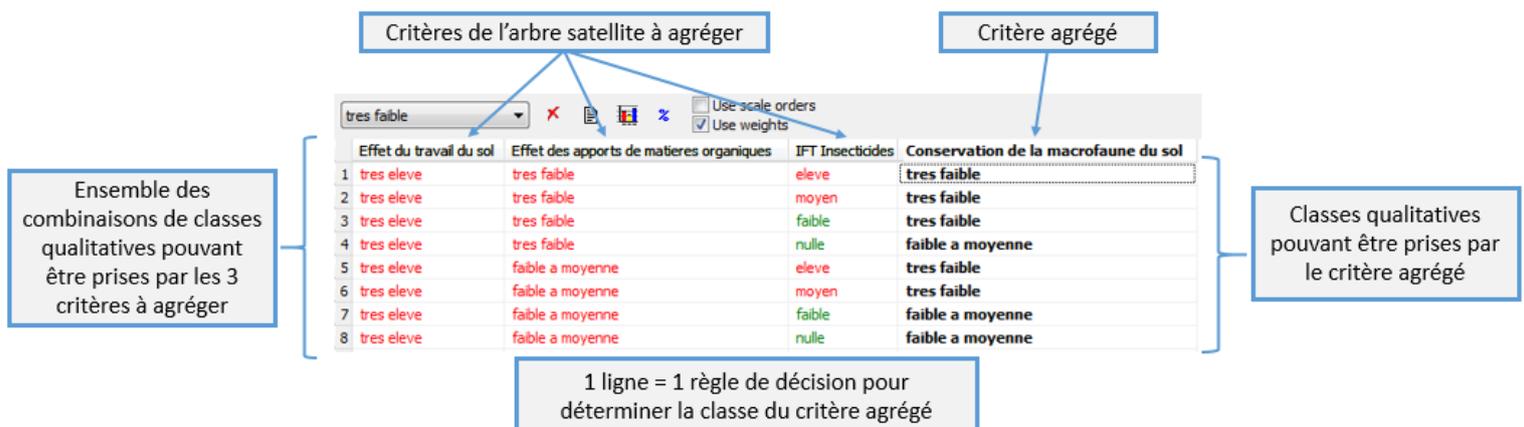


Figure 12 : Exemple de l'estimation du critère « conservation de la macrofaune du sol » grâce à un arbre satellite agrégeant l'effet du travail du sol, des apports de matière organique et l'IFT Insecticides – *Example of calculation of «macrofauna conservation» thanks to a satellite decision tree aggregating soil preparation effect, organic matter inputs and TFI Insecticides* (figure inspirée de Craheix et al. 2011)

dans le cas d'une association ou d'un mélange variétal, les autres contraintes physiques proposées par MASC n'étant pas discriminantes dans nos systèmes (Herpin 2009). La surcharge de travail a été estimée par le nombre de pics de travail à plus de 60h par décade sur l'année, ramené à 60 ha (exploitation bretonne moyenne, Agreste 2017). 60h par décade correspond à un temps de travail maximal incluant les congés annuels (détail en Annexe IX).

**Attentes de la société** : il s'agit de la contribution à l'emploi et de la fourniture en matières premières (pas forcément représentative de la réalité dans le cas de l'évaluation *ex ante*).

Le détail du calcul des critères sociaux est présenté Tableau 5.

#### 2.3.3.3. Critères de la dimension environnementale

La durabilité environnementale d'un SdC dépend de trois critères agrégés :

**Contribution à la qualité du milieu** : Ce critère se traduit par la qualité de l'eau (pertes de pesticides, de nitrates (NO<sub>3</sub>) et de phosphore), de l'air (pertes de pesticides, de NH<sub>3</sub> et de N<sub>2</sub>O) et du sol (accumulation d'éléments toxiques, maîtrise de l'érosion et maîtrise du statut organique). Les indicateurs basiques utilisés sont principalement issus de la méthode INDIGO. L'indicateur I-Phy permet d'estimer les pertes de pesticides dans les eaux superficielles, profondes et dans l'air grâce à un système d'arbre décisionnel. L'indicateur I-N se décompose en différents postes quantifiant les pertes de NO<sub>3</sub> dans l'eau et les pertes d'ammoniac (NH<sub>3</sub>) et de protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) dans l'air. L'indicateur I-MO traduit la maîtrise du statut organique du sol à partir des apports en matière organique, pondérés par le type de travail du sol, sa profondeur, la fréquence de fertilisation et la gestion des résidus (Bockstaller et Girardin 2008). Les critères non estimés par INDIGO le sont par des arbres satellites (Annexe VI). L'accumulation d'éléments toxiques a été estimée à dire d'experts (Annexe X).

**Pression sur les ressources abiotiques** : La pression sur les ressources abiotiques est composée de la pression sur l'eau, sur l'énergie et sur la ressource en phosphore. Les critères sont estimés grâce à l'indicateur I-EN d'INDIGO®, ou via l'utilisation d'arbres satellites.

**Conservation de la biodiversité** : elle est composée de la conservation de la faune (macrofaune et insectes volants), de la flore et des microorganismes. Les critères nécessaires sont renseignés grâce à l'utilisation des arbres satellites (fig.12) (Annexe VI).

Du fait des préoccupations majeures sur la qualité de l'eau en Bretagne, un poids plus important (50%) sera accordé à la qualité du milieu. Par ailleurs, afin de ne pas biaiser l'évaluation, un poids moins important (20%) est attribué à la pression sur les ressources abiotiques, car les systèmes ne sont pas irrigués et n'utilisent pas d'engrais phosphatés. Pour tous les SdC, la pression sur l'eau et la pression phosphore sont évaluées comme «très faibles». Le détail du calcul des critères environnementaux est présenté en Annexe X.

Tableau 6 : Leviers de gestion des bioagresseurs mis en œuvre dans les 6 prototypes – Pest management levers used in the 6 prototypes

	Action sur le stock initial/l'inoculum	Evitement	Atténuation en culture	Rattrapage
SdC -50%	(Labour)	Semis tardifs	Couvert étouffant	Désherbage mécanique
	Broyage des résidus de maïs		Mélange variétal Blé	Désherbage chimique
			Densité de semis réduite (maladies)	Fongicide
SdC -75% P1	Déchaumage précoce	Alternance des familles	Mélanges variétaux	Désherbage mécanique
	Faux semis	Alternance cultures de printemps/d'hiver	Variétés tolérantes	Désherbinage
	Labour en alternance avec travail superficiel	Semis hiver tardifs	Association de cultures	Désherbage chimique
	Lutte biologique	Semis colza et printemps précoces	Couvert étouffant	Fongicides
	Broyage des résidus de maïs			
SdC -75% P2	Labour en alternance avec travail superficiel et semis direct	Alternance des familles	Semis sous couvert	Désherbage mécanique
	Lutte biologique	Alternance cultures de printemps/d'hiver	Couvert étouffant	Herbisemis
		Semis d'hiver tardifs	Association de cultures	Désherbage chimique
	Broyage des résidus de maïs	Semis colza précoce	Mélanges variétaux	Fongicides
SdC AB P1	Déchaumage précoce	Alternance des familles	Association de cultures	Désherbage mécanique
	Faux semis	Semis d'hiver tardifs	Mélanges variétaux	Ecimage
	Lutte biologique	Semis colza précoce	Semis dense (adventices)	
	Broyage des résidus de maïs			
SdC AB P2	Faux semis	Alternance des familles	Couverts étouffants	Désherbage mécanique
	Labour	Alternance cultures de printemps/d'hiver	Association de cultures	
	Broyage des résidus de maïs	Semis d'hiver tardifs	Mélanges variétaux	
		Semis tardifs fin de printemps	Semis dense (adventices)	

Basé sur la classification d'Attoumani-Ronceux et al. 2011

### 3. Résultats

Nous décrirons dans cette partie les prototypes proposés lors des ateliers de co-conception, puis les résultats de l'évaluation *ex ante* seront présentés.

#### 3.1. Prototypes candidats proposés à l'issue de la co-conception

Pour chacun des prototypes, le détail des ITK de chaque culture figure en Annexe XI.

##### 3.1.1. *Prototypes candidats pour l'essai maïs-blé 50%*

Les deux prototypes proposés pour l'essai «SdC 50%» sont identiques sur tous les aspects d'ITK à l'exception du travail du sol. Le premier prototype (SdC 50% P1) est labouré chaque année, alors que le second prototype (SdC 50% P2) est conduit en techniques culturales sans labour, avec canadien et covercrop (TCSL travail superficiel\*). La réduction d'IFT de 50% est atteinte en réduisant l'IFT sur la conduite du maïs (sans fongicides ni insecticides et avec un désherbage mixte\*). Le blé est plus consommateur en fongicides et herbicides mais est en partie désherbé mécaniquement, et un mélange de 4 variétés résistantes doit permettre de limiter la pression maladies. Le passage de covercrop après maïs sera réalisé en profondeur pour enfouir les résidus et limiter la pression maladies. Une culture intermédiaire pièges à nitrates (CIPAN), étouffante et structurante, est implantée avant maïs.

##### 3.1.2. *Prototypes candidats pour l'essai SdC 75%*

- Le premier prototype proposé (SdC 75% P1) est une rotation sur 7 ans :

**Colza (+ plantes compagnes) – Blé – (CIPAN) – Maïs grain – Association Orge/Féverole Printemps – (Couvert court) – Blé – (CIPAN) – Lupin Printemps – Orge Hiver**

La stratégie principale est l'alternance de cultures d'hiver et de printemps pour une rupture du cycle des bioagresseurs. L'utilisation de produits phytosanitaires est basée sur des RdD visant à piloter les traitements entre les cultures selon les besoins, sans utilisation d'insecticides. Le labour n'est pas systématique (environ une année sur deux).

- Le second prototype proposé (SdC 75% P2) est une rotation sur 5 ans :

**Colza – Blé – (CIPAN) – Maïs grain – Association Triticale/ Féverole Hiver – (Dérobée\* Ray gras) - Association Orge/Pois Printemps**

La stratégie principale est la couverture maximale du sol, via un semis de trèfle sous couvert de colza, suivi d'un semis direct de blé sous couvert de trèfle, d'une interculture couvrante avant maïs et de deux associations pour une meilleure couverture du sol, avec intégration d'une dérobée\*. Le pilotage des traitements phytosanitaires se fait par sélection des cultures à protéger (Colza, Blé et Maïs), sans utilisation d'insecticides. Le labour est présent environ un an sur deux, les autres cultures sont conduites en travail du sol simplifié ou en semis direct.

##### 3.1.3. *Prototypes candidats pour l'essai AB*

- Le premier prototype proposé (SdC AB P1) est une rotation sur 6 ans :



Figure 13 : Echelle de couleurs utilisée pour l'analyse des résultats – *Color scale used for data analysis*

Tableau 7 : Comparaison des critères de durabilité économique – *Comparison of economical sustainability – SdC 50%*

	SdC 50% P1	SdC 50% P2
<b>Durabilité totale</b>	Green with diagonal lines	Green with diagonal lines
<b>Durabilité économique</b>	Green with diagonal lines	Yellow
<b>..Résultats économiques</b>	Green	Green
...Rentabilité	Green	Green
...Autonomie économique	Green	Green
...Indépendance économique	Green	Green
...Efficience économique	Green	Green
...Surcoût en matériel	Yellow	Yellow
<b>..Capacité productive à long terme</b>	Green	Red
...Fertilité physico-chimique	Green	Yellow
...Maîtrise de l'état structural du sol	Yellow	Red
...Maîtrise du statut acido-basique	Green	Green
...Maîtrise de la fertilité phospho-potassique	Green	Green
...Maîtrise des bioagresseurs	Yellow	Red
...Maîtrise des adventices	Yellow	Yellow
...Maîtrise des maladies et ravageurs	Yellow	Red
<b>..Contribution au développement économique</b>	Red	Red
...Qualité des produits	Red	Red
...Qualité technologique et esthétique	Green	Green
...Qualité sanitaire	Red	Red
...Emergence de filières	Red	Red

### Maîtrise état structural

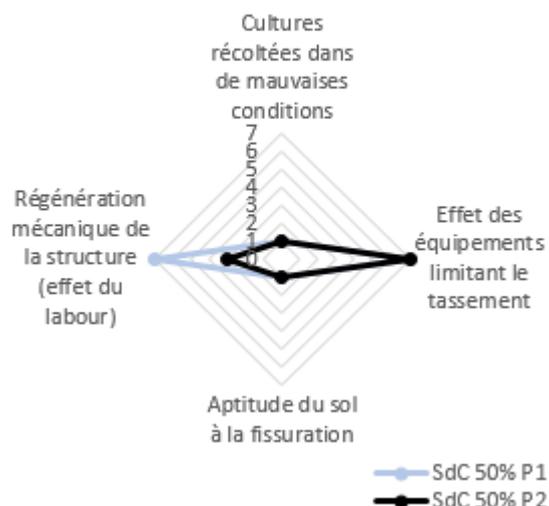


Figure 14 : Détail des composantes de l'arbre satellite «maîtrise de l'état structural» - *Detail of the satellite decision tree «soil structure control»*

### Maîtrise des maladies et ravageurs

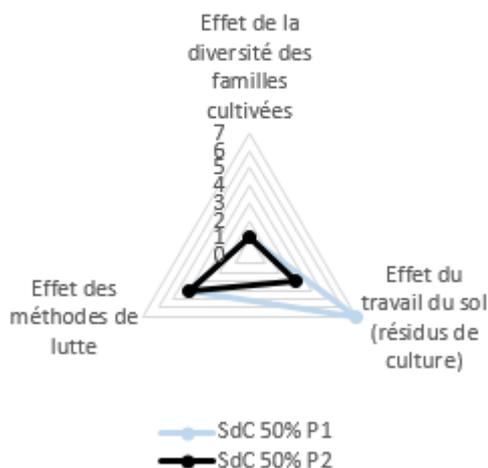


Tableau 8 : Comparaison des critères de durabilité sociale – *Comparison of social sustainability – SdC 50%*

	SdC 50% P1	SdC 50% P2
<b>Durabilité sociale</b>	Green with diagonal lines	Green with diagonal lines
<b>..Attentes de l'agriculteur</b>	Green	Green
...Qualité des conditions de travail	Yellow	Yellow
...Surcharge de travail	Red	Red
...Difficulté physique	Green	Green
...Risque santé applicateur	Yellow	Yellow
...Facilité de mise en œuvre	Green	Green
...Complexité des interventions	Green	Green
...Temps de veille technico-économique	Green	Green
<b>..Attentes de la société</b>	Green	Green
...Contribution à l'emploi	Green	Green
...Fourniture de matières premières	Green	Green

Figure 15 : Détail des composantes de l'arbre satellite «maîtrise des maladies et ravageurs» - *Detail of the satellite decision tree «pests control» - SdC 50%*

## **Colza Hiver – Association Triticale/Pois Fourrager Hiver – (CIPAN) – Maïs grain – Blé – Orge Hiver – (Dérobée sarrasin) – Féverole Hiver (+Avoine)**

La stratégie principale est la diversification des familles cultivées et la recherche de débouchés économiques à haute valeur ajoutée, avec l'intégration d'un colza et d'un sarrasin en dérobée\*. Ce SdC est conduit en non labour 5 années sur 6.

- Le second prototype proposé (SdC AB P2) est une rotation sur 5 ans :

### **Féverole Printemps – (Couvert court) – Epeautre – (CIPAN) – Maïs grain – Association Triticale/Pois Protéagineux Hiver – (CIPAN) – Sarrasin – (CIPAN)**

La stratégie principale est l'utilisation de couverts végétaux pour étouffer les adventices, ainsi qu'une diversification des familles cultivées et une alternance de cultures de printemps ou d'hiver pour rompre le cycle des bioagresseurs. Ce SdC est labouré 4 années sur 5.

Le tableau 6 reprend les leviers de gestion des bioagresseurs de chaque prototype.

### 3.2. Evaluation multicritère des prototypes

Dans cette partie, les résultats de l'évaluation multicritère avec le modèle MASC 2.0 sont présentés. L'accent est mis ici sur les différences entre les SdC afin de les discriminer deux à deux mais les résultats complets sont disponibles en Annexes XII à XIV.

Pour plus de lisibilité, les classes qualitatives sont représentées par des couleurs (fig.13). De plus, pour chacun des radars présentés, la valeur 1 correspond à la classe la plus défavorable pour le critère considéré, et la valeur 7 correspond à la classe la plus favorable.

#### *3.2.1. Comparaison des performances des prototypes SdC maïs-blé 50%*

Le SdC 50% P1 présente une durabilité **élevée** et le SdC 50% P2 une durabilité **assez élevée**.

##### 3.2.1.1. Evaluation économique des prototypes SdC 50%

Sur la dimension économique, le SdC 50% P1 a une performance «élevée», alors que le SdC 50% P2 a une performance «moyenne».

Les **résultats économiques** sont identiques et «très élevés» pour les deux SdC, avec une rentabilité «moyenne à élevée», une autonomie économique «très élevée» et un surcoût en matériel «moyen», lié à l'utilisation d'outils de désherbage mécanique (tab.7).

La **capacité productive à long terme** est le critère discriminant entre les SdC, «moyenne à élevée» pour le P1 (prototype 1) et «très faible» pour le P2 (prototype 2). Cela s'explique par deux critères, la maîtrise de l'état structural du sol et la maîtrise des maladies et ravageurs, «très faibles» pour le P2 (tab.7). La maîtrise de l'état structural est estimée par un arbre satellite (fig.14) dans lequel on voit que les deux SdC entraînent une dégradation de la structure du sol par le risque de récolte du maïs en conditions humides. Le sol limoneux de la station présente une faible aptitude à la fissuration, et les TCSL mises en œuvre dans le P2 ont tendance à moins contribuer à limiter le tassement que le labour régulier du P1 (Craheix

Tableau 9 : Comparaison des critères de durabilité environnementale – *Comparison of environmental sustainability* – SdC 50%

	SdC 50% P1	SdC 50% P2
<b>Durabilité environnementale</b>		
<b>..Contribution à la qualité du milieu</b>		
...Qualité de l'eau		
...Maîtrise pertes de pesticides dans les eaux		
....Eaux profondes		
....Eaux superficielles		
...Maîtrise pertes de NO3-		
...Maîtrise pertes de Phosphore		
...Qualité de l'air		
...Maîtrise émissions NH3		
...Maîtrise émissions N2O		
...Maîtrise émissions de pesticides dans l'air		
...Qualité du sol		
...Maîtrise de l'érosion		
...Maîtrise du statut organique		
...Maîtrise accumulation éléments toxiques		
<b>..Pression sur les ressources</b>		
...Pression sur l'eau		
...Pression sur l'énergie		
...Consommation en énergie		
...Efficience énergétique		
...Pression sur le phosphore		
<b>..Conservation de la biodiversité</b>		
...Conservation de la faune		
...Macrofaune du sol		
...Insectes volants		
...Conservation de la flore		
...Abondance floristique		
...Diversité floristique		
...Conservation des microorganismes		

Pertes d'azote sous forme NO3, NH3 et N2O

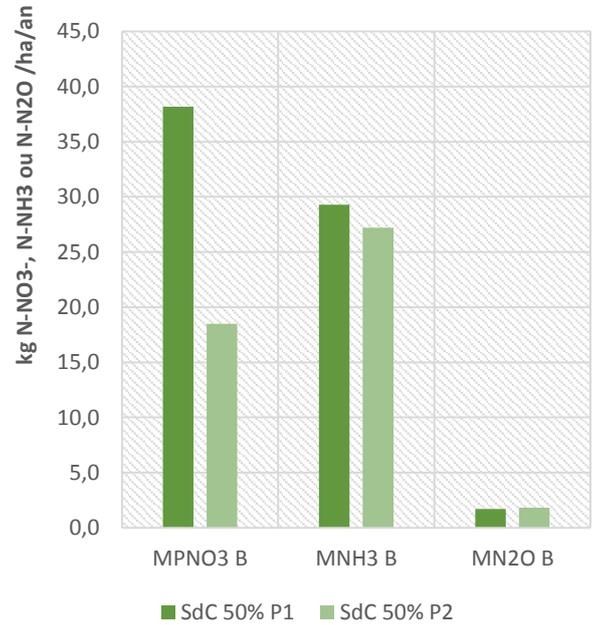


Figure 16 : Comparaison des pertes d'azote sous forme NO3-, NH3 et N2O entre les SdC 50% - *Comparison of NO3 losses, NH3 and N2O emissions between the SdC 50%*

Maîtrise de l'érosion

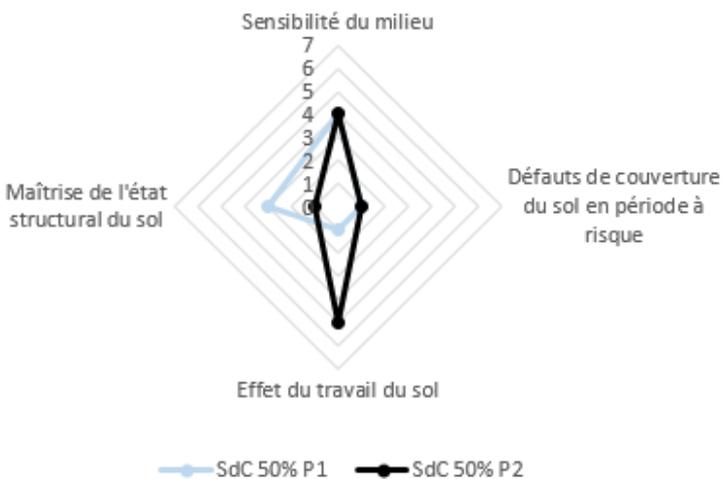


Figure 17 : Détail des composantes de l'arbre satellite «maîtrise de l'érosion» - *Detail of the satellite decision tree «erosion control» - SdC 50%*

Conservation de la macrofaune du sol

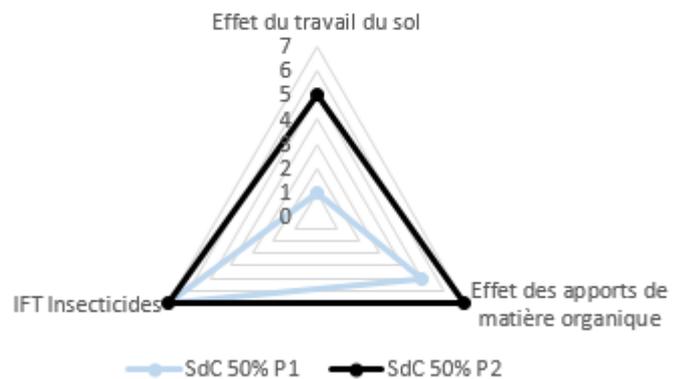


Figure 18 : Détail des composantes de l'arbre satellite «conservation de la macrofaune du sol» - *Detail of the satellite decision tree «soil macrofauna conservation» - SdC 50%*

et al. 2011b). La maîtrise des bioagresseurs est assez faible dans les deux SdC, mais la maîtrise des maladies et ravageurs est pénalisée dans le P2, le modèle considérant que le risque de conservation de l'inoculum dans les résidus est plus élevé en TCSL (fig.15).

La **contribution au développement économique** des prototypes est «très faible», du fait d'une qualité sanitaire des produits «faible» et d'une faible contribution à l'émergence de filières (tab.7), ces critères étant liés à un manque de diversité des cultures de la rotation.

#### 3.2.1.2. Evaluation sociale des prototypes SdC 50%

Les deux prototypes sont identiques sur tous les critères de la dimension sociale (tab.8), qui est «élevée». La **satisfaction des attentes de la société** est «très élevée» et la **satisfaction des attentes de l'agriculteur** «moyenne à élevée». Cette dernière est légèrement pénalisée par un risque de toxicité «moyen» et une surcharge de travail «élevée». Les pics de travail à plus de 60h/décade sont en avril (destruction du couvert et fertilisation), en mai (implantation du maïs) et en août (récolte du blé et implantation du couvert). L'arrêt du labour permet de réduire le pic de travail du mois de mai, sans être discriminant pour autant (Annexe IX).

#### 3.2.1.3. Evaluation environnementale des prototypes SdC 50%

L'agrégation par le modèle mène à une performance environnementale «élevée» pour les deux prototypes, mais le détail des critères dévoile certains points à améliorer.

La **contribution à la qualité du milieu** est «moyenne à élevée» pour les deux SdC :

- La qualité de l'eau est «très élevée», avec une maîtrise des pertes de pesticides dans les eaux «très élevée». La maîtrise des pertes de phosphore est «faible à moyenne», les lisiers n'étant pas incorporés après l'épandage. Le P2 a une meilleure maîtrise des pertes de NO<sub>3</sub>, étant moins fertilisé suite à la révision des rendements (fig.16).
- La qualité de l'air est «moyenne à élevée» pour les deux SdC, avec une maîtrise «très élevée» des pertes de pesticides dans l'air et «moyenne à élevée» des émissions de N<sub>2</sub>O, qui compensent la maîtrise «faible à moyenne» des émissions de NH<sub>3</sub> (tab.9).
- La qualité du sol est «faible à moyenne» pour les deux systèmes. Cela s'explique par une maîtrise de l'érosion et de l'accumulation des éléments toxiques «faible à moyenne» dans les deux systèmes (tab.9). La maîtrise de l'érosion est principalement pénalisée par un fort défaut de couverture du sol en automne/hiver par la céréale d'hiver. L'effet positif des TCSL sur la maîtrise de l'érosion est compensé dans l'agrégation par la meilleure maîtrise de l'état structural du sol du P1, ce qui explique que la maîtrise de l'érosion soit considérée comme similaire et «faible à moyenne» dans les deux SdC (fig.17). La maîtrise du statut organique est «très élevée» dans le P2, car le calcul valorise l'effet de la réduction du labour sur ce critère, mais cet avantage ne ressort pas à l'issue de l'agrégation.

La **pression sur les ressources** est «faible à moyenne», légèrement pénalisée par une consommation d'énergie «moyenne» correspondant surtout au séchage du maïs.

Tableau 10 : Comparaison des critères de durabilité économique  
– Comparison of economical sustainability – SdC 75%

	SdC 75% P1	SdC 75% P2
<b>Durabilité totale</b>		
<b>Durabilité économique</b>		
<b>..Résultats économiques</b>		
...Rentabilité		
...Autonomie économique		
...Indépendance économique		
...Efficience économique		
...Surcoût en matériel		
<b>..Capacité productive à long terme</b>		
...Fertilité physico-chimique		
...Maîtrise de l'état structural du sol		
...Maîtrise du statut acido-basique		
...Maîtrise de la fertilité phospho-potassique		
...Maîtrise des bioagresseurs		
...Maîtrise des adventices		
...Maîtrise des maladies et ravageurs		
<b>..Contribution au développement économique</b>		
...Qualité des produits		
...Qualité technologique et esthétique		
...Qualité sanitaire		
...Emergence de filières		

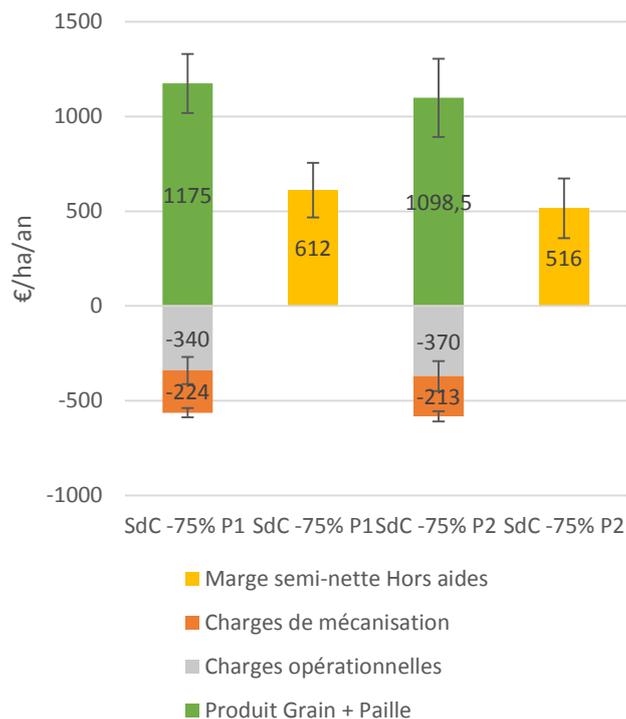
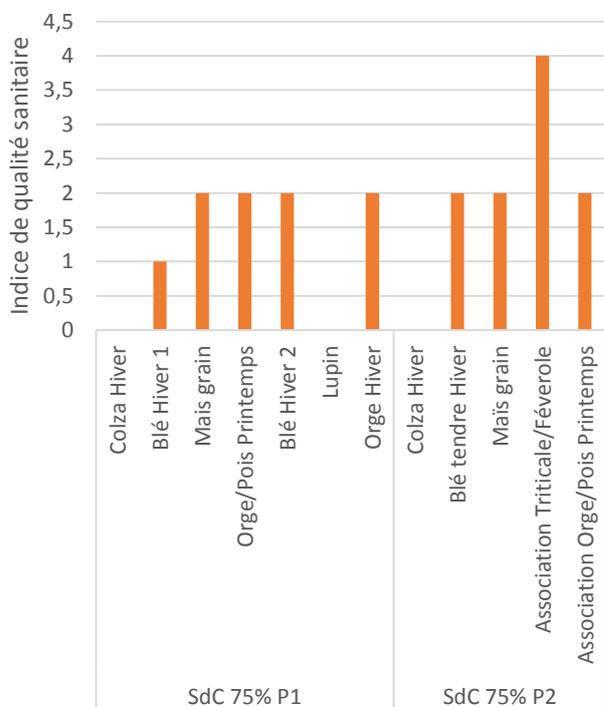


Figure 19 : Produit grain et paille, charges de mécanisation, charges opérationnelles et marge semi-nette en moyenne à l'échelle des SdC 75% -  
Economic product, machinery use cost, operating costs and semi-net margin in average for the SdC 75%

Qualité sanitaire des produits



■ Qualité sanitaire (0 : qualité élevée ; 5 : qualité faible)

Figure 20 : Qualité sanitaire des produits de chaque culture – Sanitary quality of products for each crop

Tableau 11 : Comparaison des critères de durabilité sociale –  
Comparison of social sustainability – SdC 75%

	SdC 75% P1	SdC 75% P2
<b>Durabilité sociale</b>		
<b>..Attentes de l'agriculteur</b>		
...Qualité des conditions de travail		
...Surcharge de travail		
...Difficulté physique		
...Risque santé applicateur		
...Facilité de mise en œuvre		
...Complexité des interventions		
...Temps de veille technico-économique		
<b>..Attentes de la société</b>		
...Contribution à l'emploi		
...Fourniture de matières premières		

L'agrégation ne différencie par les SdC sur la **conservation de la biodiversité** («moyenne à élevée»), bien que le détail des critères (tab.9) montre une meilleure conservation de la macrofaune du sol dans le P2, liée à la suppression du labour (fig.18).

### 3.2.2. Comparaison des performances des prototypes SdC agroécologiques 75%

Le SdC 75% P1 a une durabilité **assez élevée** et le SdC 75% P2 une durabilité **moyenne**.

#### 3.2.2.1. Evaluation économique des prototypes SdC 75%

Le SdC 75% P1 a une durabilité économique élevée, celle du SdC 75% P2 est moyenne.

Le P1 présente des meilleurs **résultats économiques** que le P2. La rentabilité du P2 est «très faible» en partie du fait des associations de culture, à l'origine d'un produit très faible car non valorisé au prix de l'AB, ce qui conduit à une marge plus faible et plus variable à l'échelle du SdC (fig.19). Les faibles marges sur certaines cultures du P1 sont compensées par des cultures plus rentables comme les céréales d'hiver. L'indépendance aux aides est «très élevée» pour les deux SdC, mais le P2 a une efficacité économique plus faible («moyenne à élevée») (tab.10), les charges étant plus élevées pour un produit plus faible. Le surcoût en matériel est «élevé» (utilisation d'outils de désherbage, de déchaumage, semoir semis direct). La **capacité productive à long terme** est identique et «moyenne à élevée» pour les deux prototypes, malgré le fait que la maîtrise des maladies et ravageurs soit «très élevée» dans le P1 et seulement «moyenne à élevée» dans le P2 (tab.10). Cela s'explique par un meilleur effet des méthodes de lutte mises en œuvre et une plus grande diversité des familles cultivées dans le prototype 1. Les deux SdC ont une faible maîtrise de la fertilité phospho-potassique (tab.10) et en particulier la fertilité potassique est «très faible». L'intégration de légumineuses non fertilisées entraîne une diminution des apports de potassium via le lisier. Le déséquilibre du bilan potassique est accentué par l'exportation des pailles de céréales.

La **contribution au développement économique** est pénalisée («très faible») dans le P2, car la qualité sanitaire des produits est «faible». Dans ce SdC, la succession d'associations non labourées et contenant des céréales après maïs induit un risque accru de contamination par les mycotoxines, de même pour l'absence de labour sur blé (fig.20).

#### 3.2.2.2. Evaluation sociale des prototypes SdC 75%

La dimension sociale est «élevée» pour le SdC 75% P1 et «moyenne» pour le SdC 75% P2. La satisfaction des **attentes de la société** est «faible à moyenne» pour les deux prototypes : la contribution à l'emploi est «moyenne à élevée», les SdC sont donc consommateurs en temps de travail. La fourniture de matières premières est «très faible», les rendements prévus étant très inférieurs aux rendements potentiels en conduite intensive (tab.11). La satisfaction des **attentes de l'agriculteur** est discriminante, «très élevée» pour le P1 et «moyenne à élevée» pour le P2. Cela s'explique par une surcharge de travail plus élevée dans le P2, mais surtout par une complexité des interventions plus élevée dans le P2, du fait des cultures

Tableau 12 : Comparaison des critères de durabilité environnementale – *Comparison of environmental sustainability – SdC 75%*

	SdC 75% P1	SdC 75% P2
<b>Durabilité environnementale</b>	Yellow	Green with diagonal lines
<b>..Contribution à la qualité du milieu</b>	Yellow	Green
...Qualité de l'eau	Yellow	Green
...Maîtrise pertes de pesticides dans les eaux	Green	Green
....Eaux profondes	Yellow	Green
....Eaux superficielles	Green	Green
...Maîtrise pertes de NO3-	Yellow	Green
...Maîtrise pertes de Phosphore	Yellow	Green
...Qualité de l'air	Green	Green
...Maîtrise émissions NH3	Green	Green
...Maîtrise émissions N2O	Green	Green
...Maîtrise émissions de pesticides dans l'air	Green	Green
...Qualité du sol	Red	Yellow
...Maîtrise de l'érosion	Yellow	Green
...Maîtrise du statut organique	Yellow	Green
...Maîtrise accumulation éléments toxiques	Yellow	Green
<b>..Pression sur les ressources</b>	Green	Green
...Pression sur l'eau	Green	Green
...Pression sur l'énergie	Green	Green
....Consommation en énergie	Green	Green
....Efficacité énergétique	Green	Green
...Pression sur le phosphore	Green	Green
<b>..Conservation de la biodiversité</b>	Green	Green
...Conservation de la faune	Yellow	Green
....Macrofaune du sol	Yellow	Green
....Insectes volants	Green	Green
...Conservation de la flore	Yellow	Green
....Abondance floristique	Yellow	Green
....Diversité floristique	Green	Green
...Conservation des microorganismes	Green	Green

### Maîtrise de l'érosion

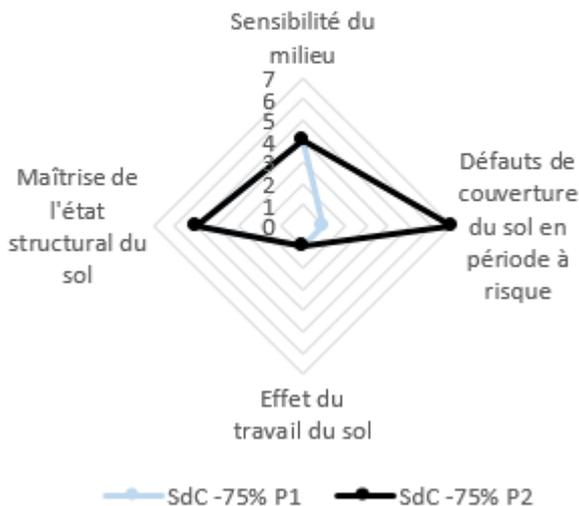


Figure 22 : Détail de l'arbre satellite «maîtrise de l'érosion» - *Detail of the satellite decision tree «erosion control» - SdC 75%*

### Pertes d'azote sous forme NO3-, NH3 et N2O

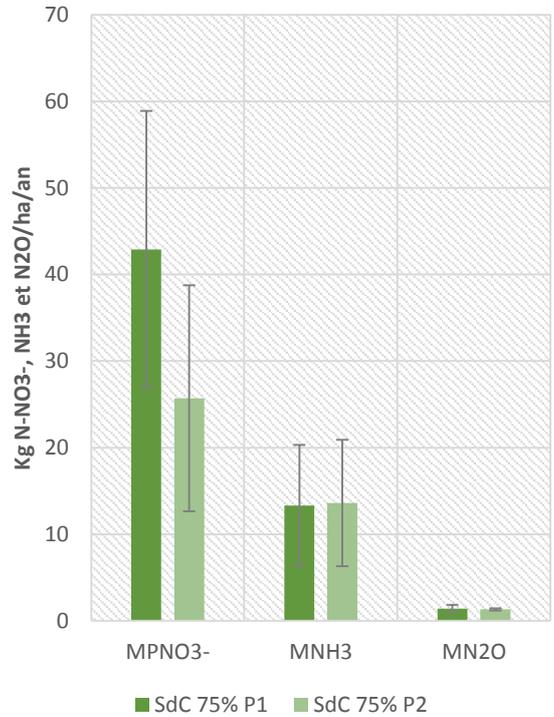


Figure 21 : Comparaison des pertes d'azote sous forme NO3-, NH3 et N2O entre les SdC 75% - *Comparison of NO3 losses, NH3 and N2O emissions between the SdC 75%*

### Diversité floristique

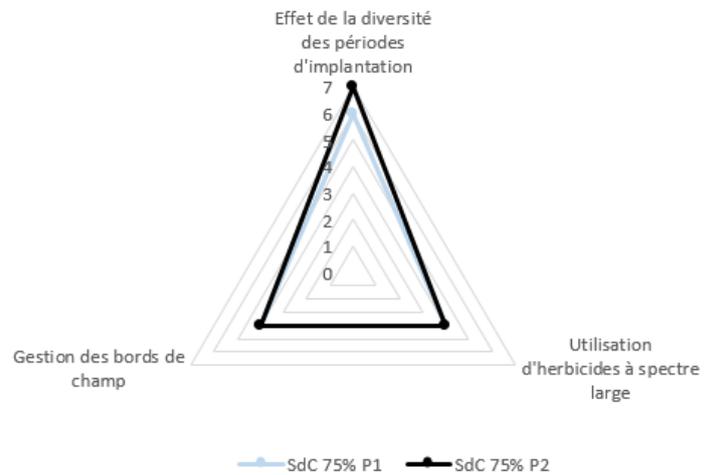


Figure 23 : Détail de l'arbre satellite «diversité floristique» - *Detail of the satellite decision tree «flora diversity» - SdC 75%*

associées et du semis direct sous couvert (tab.11). La réduction de l'usage des produits phytosanitaires permet d'avoir un risque de toxicité «très faible» dans les deux SdC.

### 3.2.2.3. Evaluation environnementale des prototypes SdC 75%

La dimension environnementale est «moyenne» pour le SdC 75% P1 et «élevée» pour le SdC 75% P2, plus performant sur la contribution à la qualité du milieu.

La **contribution à la qualité du milieu** est discriminante, «faible à moyenne» pour le P1 et «moyenne à élevée» pour le P2.

- La qualité de l'eau est meilleure pour le P2, avec une meilleure maîtrise des pertes de NO<sub>3</sub> et de phosphore. Les pertes de NO<sub>3</sub> sont un peu plus importantes dans le P1 (fig.21), où l'association orge/pois de printemps suit un maïs sans CIPAN. Les fortes pertes entre le colza et le blé (plus de 80 kg NO<sub>3</sub> lessivés/ha) et entre le lupin et l'orge peuvent s'expliquer par une faible absorption par les céréales en début de cycle, avec un sol nu avant le semis des céréales (Arvalis 2017). Le lessivage est fortement réduit pour le deuxième blé, pour lequel un couvert a été mis en place. Dans le P2, on retrouve un lessivage important entre colza et blé (62.2 kg NO<sub>3</sub>/ha), mais réduit par rapport au P1 du fait de l'implantation de trèfle sous colza. Les associations n'étant pas fertilisées, le risque de lessivage est réduit sur le P2. La maîtrise des pertes de phosphore est meilleure pour le P2 (moyenne à élevée) par rapport au P1 (faible à moyenne), grâce à une meilleure maîtrise de l'érosion. La maîtrise des pertes de pesticides dans les eaux est «très élevée» pour les deux systèmes.
- Le P1 contribue plus à la qualité de l'air, avec une meilleure maîtrise des pertes de pesticides dans l'air (tab.12). Cela est très lié aux caractéristiques de la substance active\* (risque de volatilisation, toxicité, etc.), la différence s'explique donc par les produits utilisés.
- La qualité du sol est meilleure pour le P2 qui présente une maîtrise du statut organique et de l'érosion «moyenne à élevée» alors que ces deux critères sont classés «faible à moyenne» pour le P1 (tab.12). La maîtrise du statut organique est favorisée par la fertilisation organique, mais le lisier apporte peu d'humus (8 kg/m<sup>3</sup>), aussi la différence se fait ici sur les restitutions des résidus de récolte et d'intercultures, plus importantes dans le P2. La maîtrise de l'érosion est pénalisée dans le P1 du fait d'un défaut de couverture du sol en période à risque (pas de CIPAN avant l'association orge/pois de printemps et nombreuses céréales d'hiver peu couvrantes à l'automne) (fig.22). Le P2 a misé sur la couverture du sol, avec le semis sous couvert et l'implantation de dérobées.

La **pression sur les ressources** est «très faible» pour les deux SdC, la consommation en énergie étant réduite par une faible utilisation de produits phytosanitaires et un coût de séchage du maïs dilué par les autres cultures.

La **conservation de la biodiversité** est «moyenne à élevée» pour les deux SdC, mais les critères basiques sont différents. Le P2 est moins performant concernant la conservation de

Tableau 13 : Comparaison des critères de durabilité économique – *Comparison of economic sustainability* – SdC AB

	SdC AB P1	SdC AB P2
<b>Durabilité totale</b>		
<b>Durabilité économique</b>		
<b>..Résultats économiques</b>		
...Rentabilité		
...Autonomie économique		
...Indépendance économique		
...Efficience économique		
...Surcoût en matériel		
<b>..Capacité productive à long terme</b>		
...Fertilité physico-chimique		
...Maîtrise de l'état structural du sol		
...Maîtrise du statut acido-basique		
...Maîtrise de la fertilité phospho-potassique		
...Maîtrise des bioagresseurs		
...Maîtrise des adventices		
...Maîtrise des maladies et ravageurs		
<b>..Contribution au développement économique</b>		
...Qualité des produits		
...Qualité technologique et esthétique		
...Qualité sanitaire		
...Emergence de filières		

### Maîtrise de l'état structural

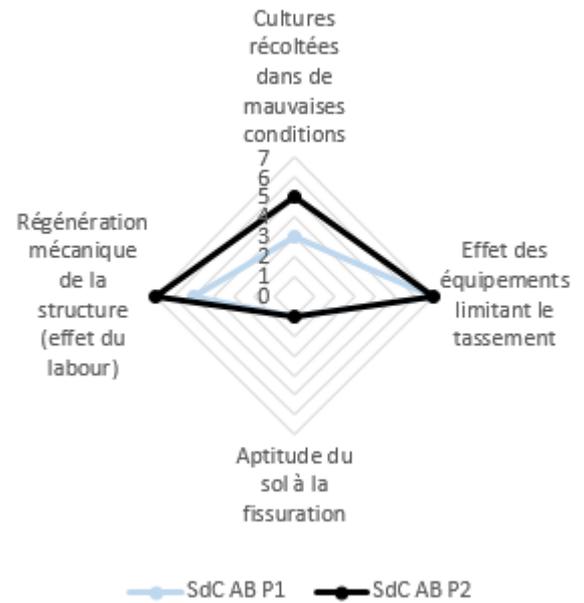


Figure 24 : Détail de l'arbre satellite «maîtrise de l'état structural» - *Detail of the satellite decision tree «soil structure control»* - SdC AB

Tableau 14 : Estimation du nombre d'outils supplémentaires mobilisés – *Assessment of the additional tools needed* – SdC AB

	Outils supplémentaires par rapport au SdC de référence breton	Outils économisés par rapport au SdC de référence breton	Total Outils supplémentaires
SdC AB P1	9	2	7
SdC AB P2	7	3	4

### Maîtrise des adventices

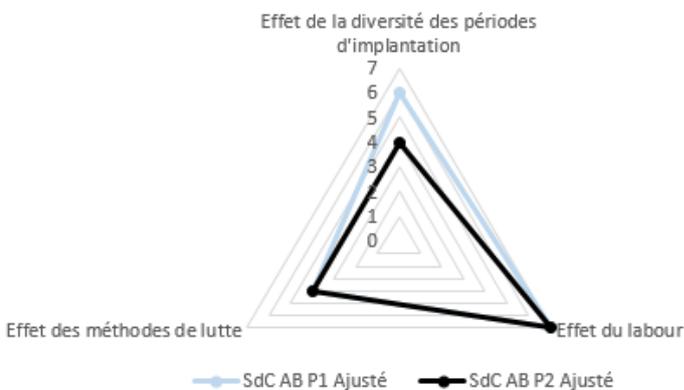


Figure 25 : Détail de l'arbre satellite «maîtrise des adventices» - *Detail of the satellite decision tree «weeds control»* - SdC AB

Tableau 15 : Comparaison des critères de durabilité sociale – *Comparison of social sustainability* – SdC AB

	SdC AB P1	SdC AB P2
<b>Durabilité sociale</b>		
<b>..Attentes de l'agriculteur</b>		
...Qualité des conditions de travail		
...Surcharge de travail		
...Difficulté physique		
...Risque santé applicateur		
...Facilité de mise en œuvre		
...Complexité des interventions		
...Temps de veille technico-économique		
<b>..Attentes de la société</b>		
...Contribution à l'emploi		
...Fourniture de matières premières		

la faune car moins de familles différentes sont cultivées. Par contre, la diversité floristique est meilleure du fait de la diversité des périodes d'implantation de ce SdC (fig. 23).

### 3.2.3. Comparaison des performances des prototypes SdC AB

Le SdC AB P1 présente une durabilité **moyenne** et le SdC AB P2 une durabilité **élevée**.

#### 3.2.3.1. Evaluation économique des prototypes SdC AB

La durabilité économique du SdC AB P1 est «élevée» et celle du SdC AB P2 est «très élevée». Les **résultats économiques** du P2 sont meilleurs («très élevés») que ceux du P1 («moyens à élevés»). La rentabilité est identique et «moyenne à élevée» (tab.13) : dans le P1, le maïs, le sarrasin en dérobée et le colza contribuent fortement à la MSN globale, du fait d'un prix de vente très élevé compensant les faibles marges des céréales d'hiver, dont le rendement est très faible. Dans le P2, la MSN est plus stable, avec le maïs, l'association triticale/pois et le sarrasin qui contribuent fortement à la MSN globale. L'efficacité et l'indépendance économique sont «très élevées» pour les deux SdC. La différence sur les résultats économiques s'explique par un surcoût en matériel «élevé» dans le P1, avec la mobilisation de nombreux outils de désherbage (écimeuse, bineuse étroite et large, rotoétrille) (tab.14)

La **capacité productive à long terme** est «très élevée» pour les deux SdC, malgré une différence de maîtrise de l'état structural du sol, «très élevée» pour le P2 et «moyenne à élevée» pour le P1. La récolte de la dérobée et du maïs en automne dans ce SdC peut dégrader la structure du sol, qui est par ailleurs moins régénérée que dans le P2, le P1 étant conduit quasiment sans labour (fig.24). Les deux SdC ont une maîtrise des maladies et ravageurs «très élevée», favorisée par une importante diversité des familles cultivées, et une maîtrise des adventices «moyenne à élevée», même si le détail de l'arbre satellite révèle que le P2 présente moins de diversité dans ses périodes de semis (fig.25). Le labour n'est pas discriminant entre les deux SdC car sa fréquence n'est pas prise en compte.

La **contribution au développement économique** est «très élevée» pour les deux SdC. La contribution à l'émergence de filières est «très élevée», avec introduction d'épeautre et de colza, rares en AB. Cependant la qualité sanitaire du P2 est «élevée» alors qu'elle est «moyenne» pour le P1 (tab.13), étant pénalisée par le non-labour et la succession de céréales.

#### 3.2.3.2. Evaluation sociale des prototypes SdC AB

Le SdC AB P1 et le SdC AB P2 ont tous les deux une durabilité sociale «moyenne». Les deux SdC présentent une faible fourniture de matières premières, mais le P1 contribue moins à l'emploi (tab.15), ce qui discrimine les prototypes sur la **satisfaction des attentes de la société** : «très faible» dans le P1 et «faible à moyenne» dans le P2. Cependant, un nombre d'heures travaillées inférieur correspond mieux aux attentes des agriculteurs. Ici, le P2 est très consommateur en temps sur la conduite du maïs (fig.26) La **satisfaction des attentes des agriculteurs** est «moyenne à élevée». Les deux SdC ne sont pas faciles à mettre en œuvre,

Temps de travail par culture (en h/ha) - SdC AB P1

Temps de travail par culture (en h/ha) - SdC AB P2

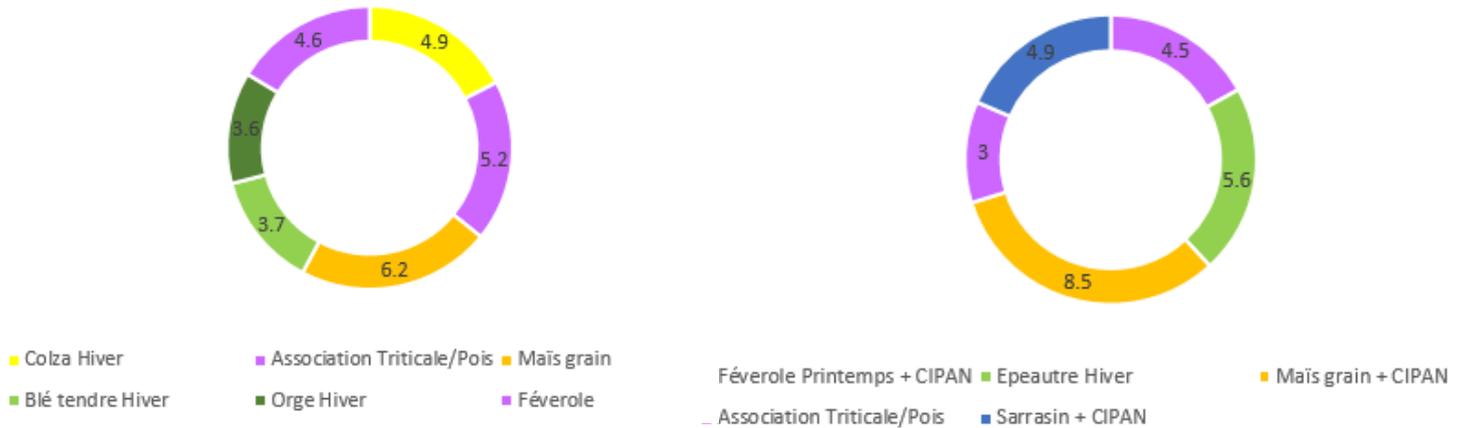


Figure 26 : Comparaison de la répartition du temps de travail entre les différentes cultures des SdC AB P1 et P2 – *Distribution of working time between SdC AB P1 and P2 crops*

Tableau 16 : Comparaison des critères de durabilité environnementale – *Comparison of environmental sustainability – SdC AB*

	SdC AB P1	SdC AB P2
<b>Durabilité environnementale</b>		
<b>..Contribution à la qualité du milieu</b>		
...Qualité de l'eau		
....Maîtrise pertes de pesticides dans les eaux		
.....Eaux profondes		
.....Eaux superficielles		
...Maîtrise pertes de NO3-		
...Maîtrise pertes de Phosphore		
...Qualité de l'air		
....Maîtrise émissions NH3		
....Maîtrise émissions N2O		
....Maîtrise émissions de pesticides dans l'air		
...Qualité du sol		
....Maîtrise de l'érosion		
....Maîtrise du statut organique		
....Maîtrise accumulation éléments toxiques		
<b>..Pression sur les ressources</b>		
...Pression sur l'eau		
...Pression sur l'énergie		
....Consommation en énergie		
....Efficience énergétique		
...Pression sur le phosphore		
<b>..Conservation de la biodiversité</b>		
...Conservation de la faune		
....Macrofaune du sol		
....Insectes volants		
...Conservation de la flore		
....Abondance floristique		
....Diversité floristique		
...Conservation des microorganismes		

### Maîtrise de l'érosion

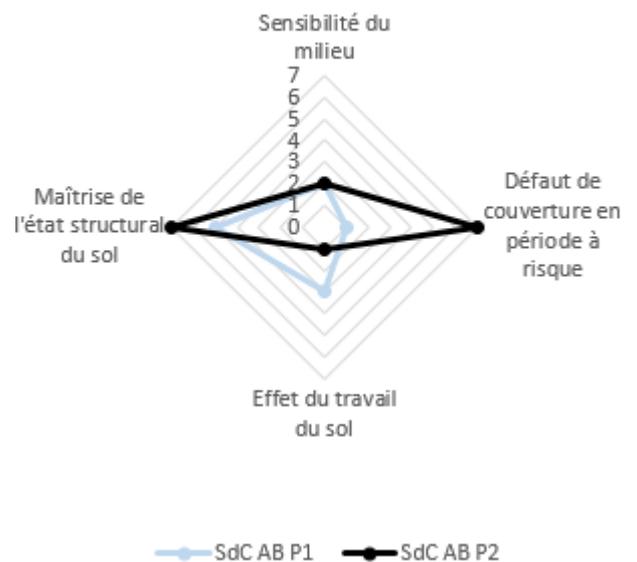


Figure 27 : Détail des composantes de l'arbre satellite «maîtrise de l'érosion» - *Detail of the satellite decision tree «erosion control» - SdC AB*

avec une complexité «moyenne à élevée» et un temps de veille «moyen», mais offrent de bonnes conditions de travail (surcharge de travail «moyenne», risque pour la santé de l'applicateur «faible» et difficulté physique «faible»).

### 3.2.3.3. Evaluation environnementale des prototypes SdC AB

La dimension environnementale est «moyenne» pour le SdC AB P1 et «élevée» pour le SdC AB P2. La **contribution à la qualité du milieu** est meilleure pour le P2 (tab.16) :

- La qualité de l'eau est similaire et «moyenne à élevée» pour les deux SdC. Il n'y a pas de pertes de pesticides et la maîtrise des pertes de NO<sub>3</sub> est «moyenne à élevée», les SdC étant peu fertilisés. Le point faible est la maîtrise des pertes de phosphore, «faible à moyenne», ce qui est lié à une faible maîtrise de l'érosion.
- La qualité de l'air est «très élevée», il n'y a pas de pertes de pesticides et peu de fertilisation donc peu d'émissions de NH<sub>3</sub> et de N<sub>2</sub>O (tab.16).
- La qualité du sol est «très faible» dans le P1 et «faible à moyenne» dans le P2. La maîtrise du statut organique est «faible à moyenne» dans les deux SdC, qui sont très peu fertilisés, mais la différence se fait au niveau de la maîtrise de l'érosion, «très faible» dans le P1 (tab.16). Le P1 présente un défaut de couverture en période à risque, mieux géré dans le P2 avec l'intégration de nombreuses intercultures. Cependant la fréquence de labour du P2, associé à une parcelle en pente, fait que la maîtrise de l'érosion est seulement «faible à moyenne» pour ce SdC (fig.27).

La **pression sur les ressources** est «très faible», les SdC sont peu consommateurs en énergie, n'utilisant ni produits phytosanitaires ni engrais de synthèse.

La **conservation de la biodiversité** est équivalente et «moyenne à élevée». L'effet du travail du sol dans le P2 n'est pas discriminant pour le critère de la conservation de la macrofaune du sol. La diversité des dates de semis conduit à une diversité floristique plus élevée dans le P1, sans que cela se répercute dans l'agrégation (tab.16).

### 3.3. Capacité des prototypes proposés à répondre aux objectifs d'expérimentation

L'objectif principal d'expérimentation étant la réduction d'IFT, celle-ci a été imposée comme contrainte lors de la conception afin de s'assurer de la mise en place de prototypes répondant à ce cahier des charges. Tous les ITK proposés permettent donc d'atteindre la réduction d'IFT (fig.28). Par ailleurs, l'évaluation du SdC de référence breton conduit à une contribution au développement durable «moyenne». Ainsi, tous les SdC proposés permettent de maintenir ou d'améliorer la contribution au développement durable par rapport à cette référence (tab.17). Les SdC proposés améliorent tous au moins un des trois piliers du développement durable par rapport au SdC de référence.

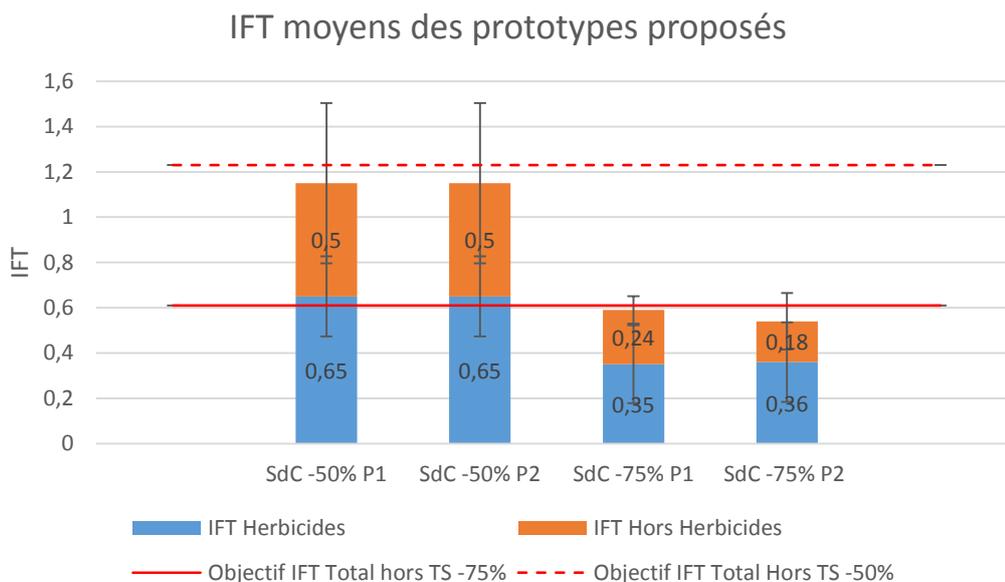


Figure 28 : IFT des prototypes SdC 50% et SdC 75% - *TFI of SdC 50% and SdC 75% prototypes*

Tableau 17 : Comparaison de la contribution au développement durable des prototypes proposés par rapport au SdC de référence breton – *Comparison of the global sustainability between the prototypes and the breton reference system*

	Contribution au développement durable	Dimension économique	Dimension sociale	Dimension environnementale
SdC de référence Bretagne	<b>moyenne</b>	<b>moyenne</b>	<b>moyenne</b>	<b>moyenne</b>
SdC -50% P1	<b>élevée</b>	<b>élevée</b>	<b>élevée</b>	<b>élevée</b>
SdC -50% P2	<b>assez élevée</b>	<b>moyenne</b>	<b>élevée</b>	<b>élevée</b>
SdC -75% P1	<b>assez élevée</b>	<b>élevée</b>	<b>élevée</b>	<b>moyenne</b>
SdC -75% P2	<b>moyenne</b>	<b>moyenne</b>	<b>moyenne</b>	<b>élevée</b>
SdC AB P1	<b>moyenne</b>	<b>élevée</b>	<b>moyenne</b>	<b>moyenne</b>
SdC AB P2	<b>élevée</b>	<b>très élevée</b>	<b>moyenne</b>	<b>élevée</b>

## 4. Discussion

### 4.1. Vérification de l'hypothèse de stage

La démarche de co-conception suivie a abouti à six prototypes présentant des ITK permettant de répondre à la réduction d'IFT, sans dégrader la contribution au développement durable par rapport au SdC de référence breton, d'après l'évaluation *ex ante*. Ainsi, l'hypothèse de stage est validée.

Tous les prototypes sont potentiellement en mesure de répondre aux objectifs de l'expérimentation. Il faut donc parvenir à les discriminer, à partir des résultats de l'évaluation *ex ante* présentés précédemment.

### 4.2. Choix et optimisation des prototypes à expérimenter au champ

La note finale agrégée «Contribution au Développement Durable» est discriminante entre les prototypes deux à deux, ce qui est une aide à la décision pour choisir un prototype. Elle doit être complétée par l'analyse du détail des critères pour comparer leurs points forts et points faibles (tab.18). Les trois prototypes prometteurs choisis ont fait l'objet d'un deuxième atelier de co-conception, afin d'obtenir des prototypes optimisés présentés ici également.

#### 4.2.1. *Choix et optimisation du prototype prometteur pour l'essai maïs-blé 50%*

L'évaluation des SdC 50% est discriminante en faveur du SdC 50% P1, très performant sur toutes les dimensions de la durabilité (tab.17). Le SdC 50% P2 est pénalisé au niveau économique par la maîtrise des maladies et ravageurs et par la maîtrise de l'état structural. Les TCSL peuvent favoriser certains pathogènes, mais cet impact est très lié au climat, aux ITK et à la rotation pratiquée. Le non labour a plutôt un effet d'accentuation des bioagresseurs présents, ce qui peut donc être évité par des mesures comme le broyage et l'enfouissement des résidus, un choix de variété résistante aux maladies et l'utilisation de fongicides efficaces (Labreuche et al. 2007). Le modèle considère que le risque de tassement est accru en TCSL travail superficiel, ce qui paraît réducteur. Certaines études montrent au contraire que le labour contribue à compacter le sol (Bronick et Lal 2005), et l'activité biologique (notamment des lombriciens), renforcée en TCSL, peut créer de la porosité efficacement, ce qui n'est pas pris en compte dans le modèle (Labreuche et al.2007).

Le modèle paraît manquer de sensibilité pour différencier, entre deux SdC proches, l'effet de l'abandon du labour sur les dimensions sociale et environnementale. L'effet du remplacement du labour par des TCSL sur le temps de travail est irrégulier, mais peut conduire à des gains de temps significatifs sur une rotation maïs blé (Heddadj et al. 2014). La pression sur l'énergie, incluant la consommation de carburant, n'est pas discriminante entre les SdC. Or, par rapport au labour et sur une rotation maïs-blé, un ITK avec TCSL permet une économie moyenne de 20 L/ha/an dans des sols limoneux (Labreuche et al. 2011). Les ITK proposés ici ne sont pas

	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>	<b>Critères à améliorer</b>
SdC 50% P1	Labour comme levier de gestion des adventices Maintien des rendements	Perturbation du sol : effet sur la biomasse microbienne, la macrofaune	Maîtrise des pertes de NO3 Maîtrise du statut organique Conservation de la macrofaune du sol
SdC 50% P2	TCSL comme levier de conservation de la biodiversité, de réduction de l'érosion	Salissement potentiellement supérieur et rendements revus à la baisse Risque de maladies supérieur Risque de tassement à court terme	Efficience économique Maîtrise de l'état structural du sol Maîtrise des maladies et ravageurs
SdC 75% P1	Stabilisation des marges par l'intégration de cultures rentables Diversité des familles de culture permettant une bonne gestion des maladies et ravageurs Intégration de lupin Faux semis pour lutter contre les adventices	Défaut de couverture en période à risque entre le maïs et l'association de printemps	Maîtrise des pertes de NO3 Maîtrise des pertes de P Maîtrise du statut organique Maîtrise de l'érosion Diversité floristique
SdC 75% P2	Test d'une technique innovante Labour non systématique Bonne couverture du sol favorisant la dimension environnementale (pertes de NO3, érosion) Valorisation économique du Ray gras possible selon développement	Cultures à faible rentabilité, succession favorable au développement de mycotoxines, risque de salissement dû au trèfle	Rentabilité Efficience économique Maîtrise des maladies et ravageurs Qualité sanitaire Complexité des ITK Surcharge de travail Maîtrise des émissions de pesticides dans l'air Conservation des insectes volants
SdC AB P1	Intégration de colza et de sarrasin (diversification des familles et débouchés économiques) Alternance d'outils de désherbage Intégration de non labour	Succession de deux céréales d'hiver (défaut de couverture du sol, baisse des rendements, augmentation du risque de maladies)	Surcoût en matériel Maîtrise de l'état structural du sol Qualité sanitaire des produits Maîtrise de l'érosion
SdC AB P2	Stratégie d'étouffement des adventices Alternance cultures de printemps/d'hiver Faux semis pour lutter contre les adventices	Labour sur une parcelle en pente = risque d'érosion	Plus consommateur en temps de travail Diversité floristique inférieure

Tableau 18 : Synthèse des avantages, inconvénients et critères à améliorer des prototypes proposés – *Synthesis of strenghts, weaknesses and criteria to improve for the prototypes*

assez distincts pour mener à une réelle différence en termes de temps de travail et de consommation de carburant. La conservation de la macrofaune du sol est meilleure dans le P2, par contre le labour n'entre pas dans l'estimation de la conservation des microorganismes, alors que les TCSL agissent positivement sur la biomasse des microorganismes et leur activité (Heddadj et al. 2014 ; Zuber et Villamil 2016). Si cela avait été pris en compte, la conservation de la biodiversité aurait pu être favorisée dans le P2. L'agrégation semble diluer l'effet positif du non labour sur la conservation de la biodiversité. Enfin, dans le contexte breton, la meilleure maîtrise des pertes de NO<sub>3</sub> du P2 joue en sa faveur.

Ainsi, le choix du prototype prometteur devrait se porter sur le SdC 50% P1, qui a une meilleure contribution au développement durable, mais le détail des critères et les limites de l'agrégation conduisent à choisir un SdC intermédiaire au labour non systématique : le labour sur maïs sera à raisonner en fonction de la présence de vivaces et de l'humidité du sol.

#### *4.2.2. Choix et optimisation du prototype prometteur pour l'essai SdC 75%*

L'évaluation des SdC 75% est discriminante en faveur du SdC 75% P1, plus performant économiquement et socialement (tab.17). La stratégie de couverture du sol du SdC 75% P2 favorise plusieurs critères environnementaux, dont la maîtrise de l'érosion et des pertes en NO<sub>3</sub>. Une couverture du sol de 30% permet de diminuer de moitié le ruissellement en protégeant le sol des impacts de pluie, et de 50 à 80% les pertes en terre par érosion (Labreuche et al. 2007). Au niveau social, le P2 est pénalisé par sa complexité. Le semis direct sous couvert de trèfle nécessite une bonne technicité pour que le trèfle n'envahisse pas le SdC, ce qui est complexifié par la réduction drastique des IFT Herbicides. Les TCSL et en particulier le semis direct peuvent favoriser le développement des espèces à faible dormance et des espèces vivaces (Chauvel et al. 2011), ce qui serait problématique dans le cadre du projet. Une bonne technicité et une protection intégrée peuvent permettre de maîtriser ce risque, mais les références manquent dans le contexte de Kerguéhenec pour inclure cette technique dans un essai système. Au niveau économique, la rentabilité «très faible» du P2, additionnée à une qualité sanitaire «faible» qui sera difficile à gérer dans le cadre d'une réduction d'IFT, le pénalisent aussi dans notre choix. Dans le contexte breton, la moins bonne maîtrise des pertes de NO<sub>3</sub> et de phosphore (ces dernières étant dues à une moins bonne maîtrise de l'érosion), dans le SdC 75% P2 est problématique. Cependant ces faiblesses sont surtout liées au défaut de couverture entre le maïs grain et l'association de printemps, ce qui peut se corriger. C'est donc le SdC 75% P1 qui sera retenu pour l'expérimentation, avec une nécessité d'améliorer l'aspect environnemental et en particulier la maîtrise des pertes de NO<sub>3</sub>. Le point faible de ce SdC étant l'association orge/pois de printemps qui pénalise la dimension environnementale, l'optimisation de ce prototype a conduit à revoir la rotation. L'association

Prototype retenu pour l'essai -75%

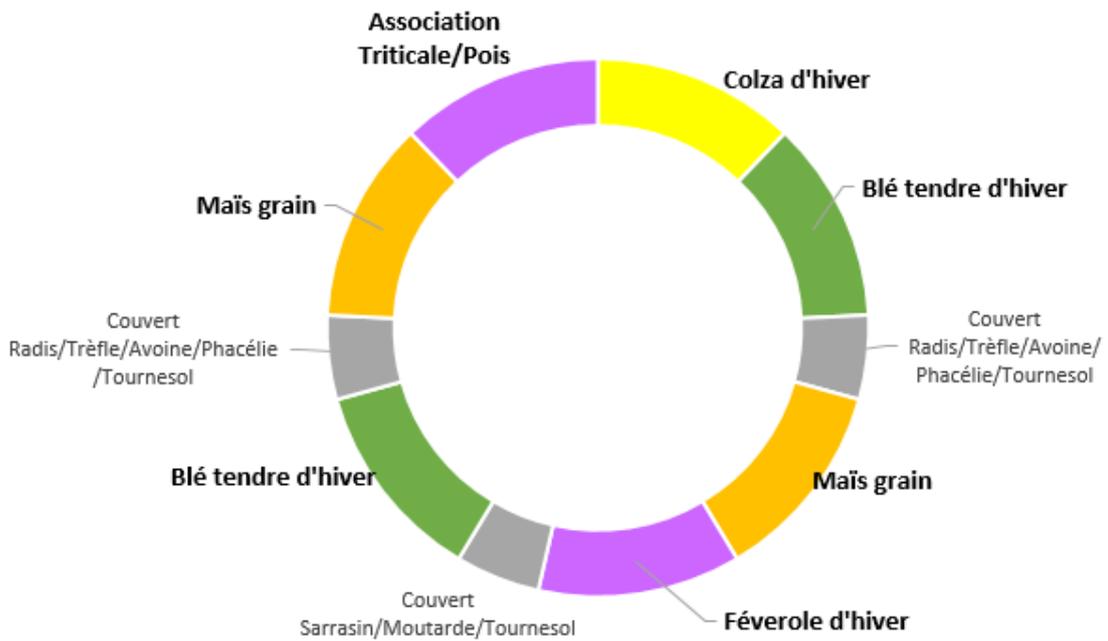


Figure 29 : prototype retenu pour l'essai SdC -75% - *prototype selected for the trial -75%*

Prototype retenu pour l'essai Agriculture Biologique

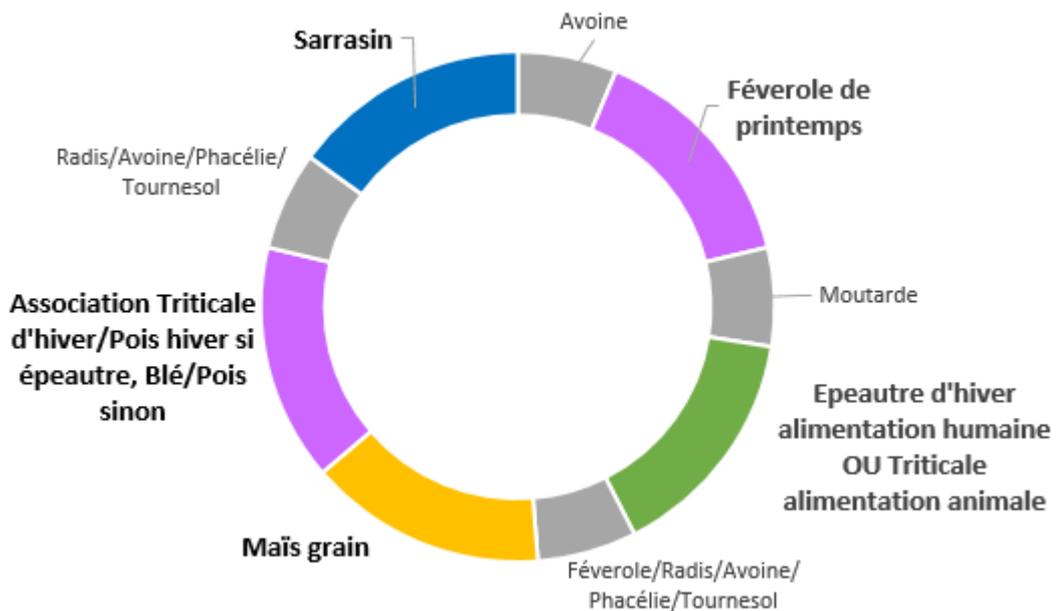


Figure 30 : prototype retenu pour l'essai agriculture biologique -100% - *prototype selected for the organic trial -100%*

de printemps a été remplacée par une féverole d'hiver, le lupin par un second maïs pour respecter le délai de retour des légumineuses ainsi que pour des raisons économiques, et l'orge d'hiver par une association triticale/pois afin de maintenir une proportion de légumineuses satisfaisante dans la rotation (fig.29).

#### 4.2.3. *Choix et optimisation du prototype prometteur pour l'essai AB*

L'évaluation des SdC AB est discriminante en faveur du SdC AB P2, plus performant sur les dimensions économique et environnementale (tab.17). En particulier, le milieu étant sensible à l'érosion avec une parcelle en pente, la maîtrise insuffisante de l'érosion par le SdC AB P1 le rend non adapté au contexte local d'expérimentation. La succession des deux céréales d'hiver non fertilisées est pénalisante pour le SdC AB P1. Cela conduit à une forte perte économique du fait de la baisse des rendements, et les céréales d'hiver sont partiellement responsables du défaut de couverture du sol en période d'érosion. La suppression d'une des deux céréales aurait permis au P1 d'augmenter sa note finale. L'intégration de colza en AB, proposée par le P1, favorise la diversification des familles cultivées et des périodes de semis, et présente des débouchés intéressants car la production actuelle ne permet pas de satisfaire la demande en huile et tourteaux. Mais le colza nécessite une bonne maîtrise technique, étant sensible à de nombreux ravageurs et maladies (Leroy et al. 2007). De plus, en lien avec la pression des adventices, les méthodes de lutte mises en œuvre dans le SdC AB P2 paraissent plus adaptées, même si le modèle n'est pas discriminant sur ce point. C'est donc le SdC AB P2 qui sera retenu pour l'expérimentation.

Le P2 a été optimisé en lien avec les ITK pratiqués sur l'essai AB actuel de Kerguéhenec. La modification notable est la suppression du labour sur maïs, remplacé par deux passages de vibroculteur. De plus, l'épeautre sera maintenu dans la rotation à condition d'être valorisé en alimentation humaine. Si les débouchés sont insuffisants, il sera remplacé par un triticale pour l'alimentation animale, au rendement supérieur (fig.30).

### 4.3. Critiques méthodologiques

#### 4.3.1. *Limites de la méthode de co-conception et de l'évaluation ex ante*

La méthode de co-conception utilisée présente l'avantage d'être participative et ludique. La limite principale a été le temps consacré à la co-conception. Les participants n'ont pas eu le temps d'approfondir les ITK en détail, ce qui introduit un biais pour l'évaluation, les données manquantes ayant dues être complétées. L'innovation aurait pu être mieux stimulée, en ne donnant pas de contraintes initiales (méthode Lefèvre et al. 2014, Annexe I) ou en utilisant les «concept projectors» de la méthode Knowledge-Concepts-Projectors (Annexe I), des propositions inattendues visant à faire réfléchir les participants sur de nouveaux leviers



(Berthet et al. 2016). Mais en comparaison avec d'autres méthodes, celle du RMT SdCi est un bon compromis entre une méthode mobilisant uniquement des experts et une méthode conçue pour les agriculteurs, réalisable dans le temps imparti pour les ateliers.

L'évaluation *ex ante* implique de formuler des hypothèses pour combler le manque de données, sur les ITK comme sur les performances des SdC. Le paramétrage de CRITER nécessite de prendre des décisions sur les produits, variétés, dates d'intervention, qui ne sont pas toujours représentatives de la réalité en cours d'expérimentation. L'estimation des rendements et de la qualité des récoltes est complexe et ne prend pas en compte différents scénarios de variations de prix (Meynard 2012). L'évaluation *ex ante* ne prend pas en compte l'effet des RdD sur les performances des SdC, par l'adaptation des ITK aux conditions météorologiques ou aux seuils de nuisibilité. Pour augmenter la pertinence des résultats, des experts ayant une connaissance des essais actuels de Kerguéhennec ont été sollicités.

#### 4.3.2. Critique de l'outil employé et analyse de sensibilité du modèle

La souplesse de la structure du modèle MASC le rend facilement adaptable au contexte local et efficace dans la discrimination des prototypes. Mais la possibilité d'extrapolation des résultats est limitée, notamment le choix des valeurs seuils a un très fort impact sur l'évaluation. Il n'y a pas un lien unique entre la valeur d'un indicateur basique et la classe qualitative qui y est associée, cela dépend du choix de la valeur seuil (Sadok et al. 2009).

Le mode d'estimation de certains critères peut être discutable, et il aurait fallu adapter le calcul de certains arbres satellites. L'arbre satellite «maîtrise de l'état structural» pourrait intégrer la conservation de la macrofaune pour mieux valoriser l'effet du non labour. Le manque de lien entre les pratiques et les critères de conservation de la biodiversité conduit à un manque de discrimination du modèle, en particulier pour les SdC 50%. Le modèle DEXiPM (Annexe II), en cours de développement, est basé sur une description exclusivement qualitative du contexte et du SdC permettant d'évaluer la Contribution au Développement Durable. Ainsi, les critères liés à la conservation de la biodiversité sont plus liés aux pratiques que dans MASC, notamment avec la prise en compte des faux-semis (Pelzer et al. 2012). Ces critères peuvent être des perspectives d'amélioration pour la branche biodiversité du modèle MASC.

Le choix des pondérations est fondamental dans l'analyse des résultats. Avec une pondération différente, les résultats auraient été différents. Les pondérations mises en œuvre dans cette étude sont influencées par l'intégration des essais au réseau des Chambres d'Agriculture, qui les oriente vers la réponse aux besoins des agriculteurs. La robustesse de l'évaluation peut être évaluée en modifiant les pondérations et en observant l'impact sur la note globale des SdC : les prototypes robustes se différencient des prototypes plus spécifiques

	Contribution au développement durable (pondérations adaptées)	Contribution au développement durable (pondérations par défaut)
SdC de référence Bretagne	<b>moyenne</b>	<b>assez faible</b>
SdC -50% P1	<b>élevée</b>	<b>assez élevée</b>
SdC -50% P2	<b>assez élevée</b>	<b>moyenne</b>
SdC -75% P1	<b>assez élevée</b>	<b>élevée</b>
SdC -75% P2	<b>moyenne</b>	<b>assez faible</b>
SdC AB P1	<b>moyenne</b>	<b>assez élevée</b>
SdC AB P2	<b>élevée</b>	<b>élevée</b>

Tableau 19 : Comparaison des résultats de l'évaluation ex ante avec les pondérations adaptées et avec les pondérations livrées par défaut par les concepteurs de MASC – *Comparison of the results of ex ante assessment with adapted weight and with default weight*

### Distribution des résultats de l'analyse MonteCarlo pour la Contribution au Développement Durable

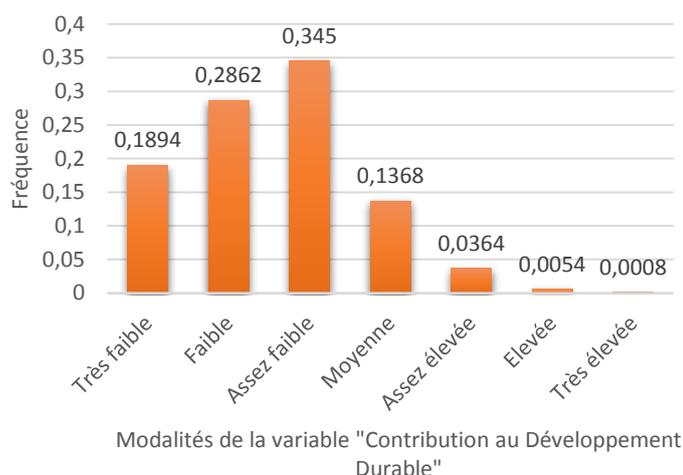


Figure 31 : Résultats de l'analyse Monte Carlo du modèle MASC après modification des pondérations livrées par défaut – *Results of the Monte Carlo analysis of the MASC model after adaptation of the default weights*

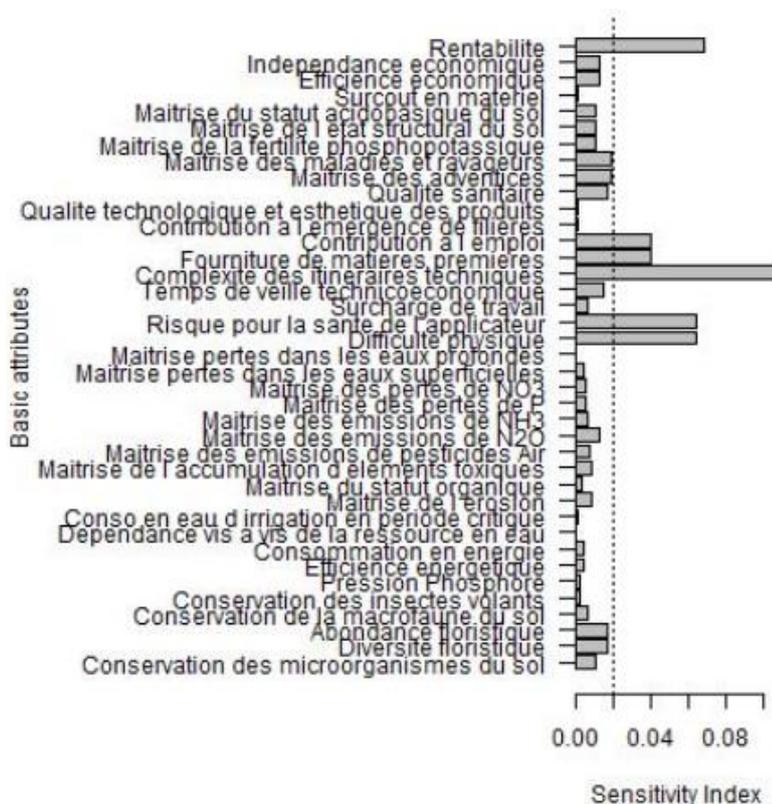


Figure 32 : Indices de sensibilité des critères basiques du modèle MASC après modification des pondérations livrées par défaut – *Sensitivity index of basic criteria of the MASC model after adaptation of the default weights*

par une note plus régulière (Lançon et al. 2008). L'évaluation avec les pondérations par défaut du modèle MASC 2.0 conduit au même classement des prototypes deux à deux (tab.19), mais le SdC AB P2 est le seul à obtenir la même note.

Une analyse de sensibilité (AS) est nécessaire avant l'utilisation d'un modèle, afin d'identifier les critères influençant le plus les sorties, ainsi que le pouvoir discriminant du modèle. L'AS du modèle MASC 1.0 a déjà été réalisée, mais dans notre étude la modification des pondérations impose de réaliser une nouvelle AS (Carpani et al. 2012) à l'aide de l'interface IZI-EVAL développée par l'INRA (Annexe XV). Deux analyses ont été réalisées : L'**analyse Monte Carlo** pour le critère Contribution au Développement Durable calcule la fréquence d'occurrence de chacune des classes finales de durabilité (Craheix 2012). Ici, les classes les plus fréquentes sont «Faible» et «Assez Faible». Les classes prises par nos SdC sont moins fréquentes, le modèle discrimine donc bien nos scénarios (fig.31). L'**indice de sensibilité**, calculé pour chaque critère basique, indique l'impact de ce critère sur le résultat final. Un indice élevé indique un impact élevé. Les critères basiques de la dimension sociale sont ceux qui impactent le plus la note finale, avec la rentabilité (fig.32). Les critères basiques environnementaux impactent peu la note finale, ce qui est cohérent avec le manque de discrimination du modèle sur la conservation de la biodiversité. D'après Carpani et al. 2012, plus un critère est éloigné du critère racine «Contribution au Développement Durable» et plus son influence sur la note finale est réduite. Cela explique aussi l'effet de dilution des différences entre critères basiques lors de l'agrégation, et confirme la nécessité d'analyser le détail des résultats. Limiter le nombre de ramifications de l'arbre permettrait d'éviter cette minimisation de l'importance de certains critères (Petit et Reau 2010).

## **5. Perspectives**

### 5.1. Mise en place de l'essai

L'essai SdC AB sera conduit sur l'îlot «Penderff», en AB, d'une surface de 4.45 ha et découpé en 6 parcelles en bandes de 0.7ha environ, issues de l'essai précédent sur 6 ans. Le découpage sera maintenu afin de ne pas introduire d'hétérogénéité dans les parcelles. Les essais SdC 50% et SdC 75% seront conduits sur une partie (6.8ha) de l'îlot «Grand Champ», découpé en 9 parcelles de 0.76ha environ (fig.33). Un tel découpage permet d'avoir toutes les cultures chaque année, ce qui permet des répétitions temporelles, facilite l'évaluation intermédiaire et prend en compte la variabilité climatique interannuelle (Havard et al. 2017).

Il est indispensable de réaliser un «point zéro» des parcelles au début de l'expérimentation, pouvant impliquer des analyses de sol, une description morphologique, des relevés faunistiques et floristiques (Herpin 2009). L'historique des pratiques a un impact sur l'homogénéité de la parcelle et donc sur les résultats de l'expérimentation (Havard et al. 2017).

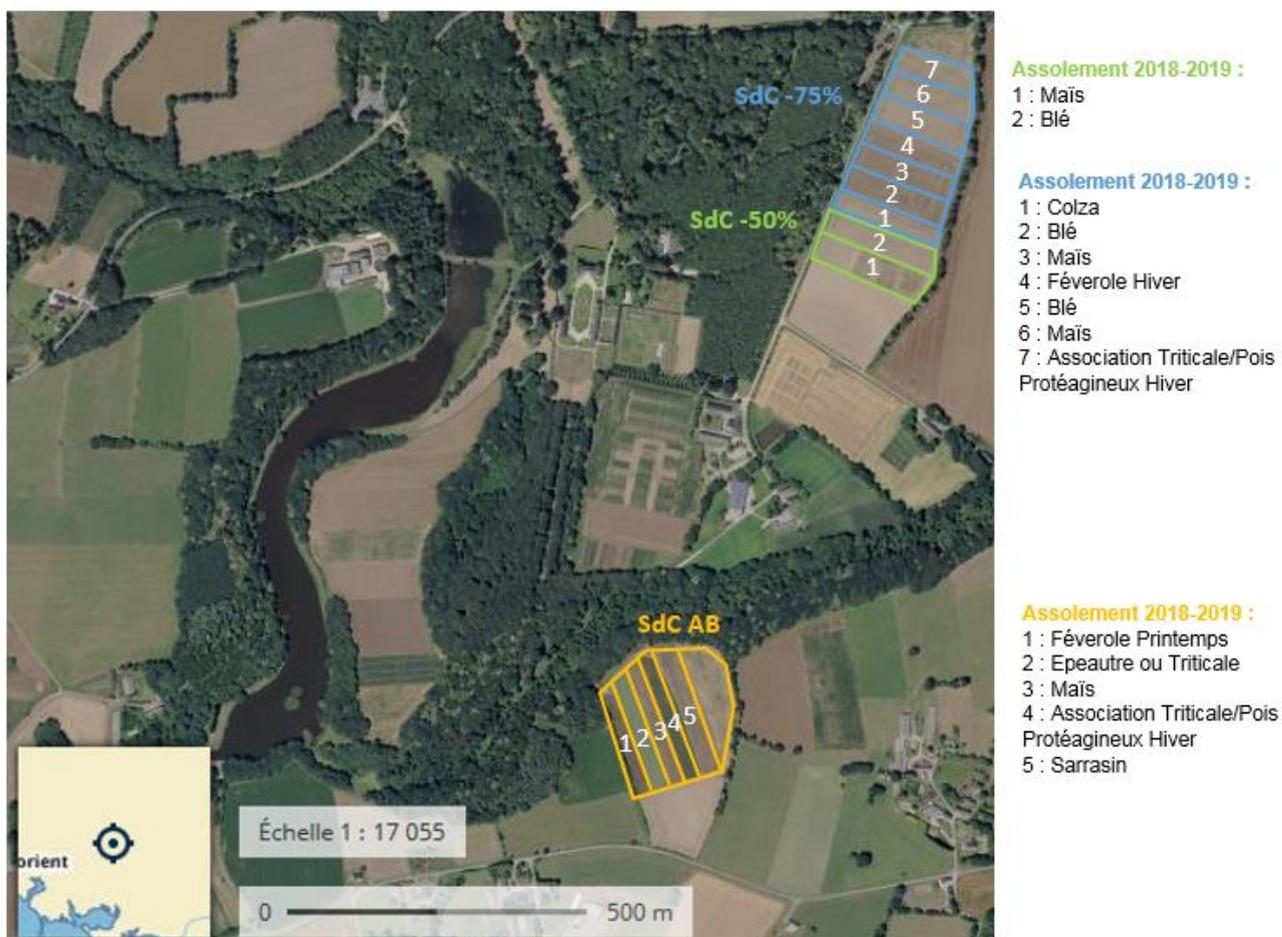


Figure 33 : Vue aérienne des dispositifs expérimentaux des trois essais du projet SYNO'PHYT – Aerial view of the experimental device of the SYNO'PHYT project trials (Geoportail)

Tableau 20 : Types de support permettant de communiquer sur les essais systèmes – Communication mediums for the systemic trials promotion - (adapté d'après Havard et al. 2017)

Type de communication	Type de support
Présentation synthétique du projet	Plaquette, Vidéo, Poster, Présentation, Visite...
Compte rendu annuel	Document et Rapport
Fiche d'identité du SdC	Document, PowerPoint, Poster
Témoignages du pilote sur ses expériences	Oral, Ecrit, Vidéo, Visite
Démonstration	Vidéo, Photographie, Visite
Articles de vulgarisation	Presse agricole, locale, généraliste
Communications scientifiques	Revue, Colloque
Communications techniques	Revue professionnelle, Séminaire, Journées techniques, Formation
Bulletin technique	Document
...	

Dans le cas de l'îlot Grand Champ, cet état initial est d'autant plus important que la parcelle a connu une expérimentation analytique de fertilisation qui a pu augmenter l'hétérogénéité des sols. La question de la gestion des bords de champ doit être approfondie, étant incluse dans le projet SYNO'PHYT. Cela rentre dans les méthodes de lutte biologique par conservation, consistant à modifier l'environnement pour protéger les auxiliaires, afin de réduire l'impact des phytophages (Lhoste-Drouineau 2016). La station se situe dans un milieu boisé, ce qui facilite la mise en œuvre d'une gestion différenciée des bords de champ, mais un diagnostic de biodiversité est à prévoir en amont et en aval des essais (Annexe XVI).

### 5.2. Etablissement des règles de décision des prototypes

Les prototypes à expérimenter au champ doivent être décrits en écrivant les schémas décisionnels pour chaque fonction que le SdC doit remplir (gestion des adventices, nutrition azotée, etc.). Pour chaque fonction, un ensemble de solutions sous forme de RdD est mobilisé. Des RdD stratégiques, portant sur les grandes orientations du SdC, se déclinent en RdD opérationnelles concrètement applicables par le pilote de l'expérimentation (Havard et al. 2017). Au-delà des RdD qui pilotent les décisions à prendre dans la gestion du SdC, un planning des interventions culturales doit être établi pour la mise en œuvre du SdC.

### 5.3. Suivi de l'essai et diffusion des résultats

La finalité du projet SYNO'PHYT est de produire des références sur les performances multicritères, la robustesse et la durabilité des trois essais, en vue d'une diffusion de ces connaissances aux acteurs agricoles bretons (Giteau 2017). Une évaluation *ex post* tout au long de l'essai est donc nécessaire. Cette évaluation intégrera un diagnostic agronomique annuel à l'échelle de la culture pour analyser l'efficacité des combinaisons de leviers et des RdD mises en œuvre, une évaluation annuelle des performances pluricritères des SdC, une analyse de faisabilité technique des interventions, une analyse multicritère de la durabilité des trois SdC en année 4 et 6 du projet et une analyse de robustesse dans différents contextes climatiques et économiques. Pour ces évaluations, des protocoles d'observation et de mesures sont à établir. Les données à collecter peuvent concerner les pratiques culturales (RdD, enregistrement des interventions), l'état de la parcelle (notations de maladies, mesures de biomasse, composantes de rendement, analyses physico-chimiques ou biologiques, comptage d'adventices, etc.) ou le contexte (données météo, prix, etc.) (Havard et al. 2017). La valorisation de l'expérimentation fait partie de la démarche systémique. La communication sur les résultats permet l'acquisition de connaissances et de compétences, mais aussi d'identifier des nouvelles questions de recherche et de créer un dialogue entre les acteurs impliqués (Havard et al. 2017). La communication peut par exemple se faire par des articles techniques, des portes ouvertes ou des actions de conseil (tab.20).



## Conclusion

Trois essais systèmes présentant un gradient de réduction des produits phytosanitaires (-50%, -75% et -100%) vont être mis en place dès août 2018 à la station expérimentale de Kerguéhennec, dans le cadre du plan Ecophyto 2. Concevoir de tels SdC, en mutation profonde par rapport aux SdC actuels, implique de mobiliser des leviers issus de l'agroécologie, prenant en compte la complexité de l'agroécosystème\*. Pour cela, une approche systémique et participative a été privilégiée.

Six prototypes de SdC ont été proposés à l'issue d'une démarche de co-conception (deux prototypes pour chaque essai). L'évaluation *ex ante* avec le modèle MASC 2.0 a montré que tous les prototypes sont en mesure de répondre à la problématique exposée en introduction, puisque leurs ITK permettent de répondre aux objectifs de réduction de l'usage des produits phytosanitaires, sans dégrader la durabilité globale par rapport à un SdC de référence breton. La note globale de contribution au développement durable, combinée à l'analyse détaillée des points forts et points faibles des six prototypes, a permis d'identifier trois prototypes prometteurs répondant aux attentes de la CRAB et qui seront mis en place pour l'expérimentation au champ :

- **SdC 50%** : *maïs – (CIPAN) – blé (rotation fixée), labouré un an sur deux*
- **SdC 75%** : *Colza – Blé – (CIPAN) – Maïs grain – Féverole Hiver – (Couvert court) – Blé – (CIPAN) – Maïs grain – Association Triticale/Pois d'Hiver*
- **SdC AB** : *Féverole Printemps – (Couvert court) – Epeautre OU Triticale – (CIPAN) – Maïs grain – Association Triticale/Pois Hiver – (CIPAN) – Sarrasin – (CIPAN)*

Le modèle MASC s'est avéré adapté pour cette étude, mais une vigilance s'impose par rapport à l'extrapolation des résultats. La modification des pondérations ainsi que l'adaptation des valeurs seuils fait que cette évaluation n'est pas comparable à d'autres évaluations d'essais systèmes.

Ces trois essais permettront de fournir localement des références économiques, sociales et environnementales sur les SdC très économes en intrants. La transition agroécologique implique une prise de risque pour l'agriculteur, et l'adoption de SdC innovants dépendra de l'acceptabilité de cette innovation. C'est pourquoi le projet SYNO'PHYT devra permettre de mettre en évidence les conséquences de la réduction forte des IFT sur les performances des SdC. La diffusion de ces références a pour objectif de contribuer à la diffusion et à l'adoption de pratiques agroécologiques, et pour ambition de répondre aux nouveaux enjeux de l'agriculture.



## Références Bibliographiques

- Agreste Bretagne** (2017). Tableaux de l'agriculture Bretonne. DRAAF Edition 2016. 87p. p.6-7, p.38-39, p.42-47. ISBN: 978-2-11-097757-1.
- Attoumani-Ronceux A., Aubertot J-N., Guichard L., Jouy L , Mischler P., Omon B., Petit M-S., Pleyber E., Reau R., Seiler A.** (2011). Guide pratique pour la conception de systèmes de culture plus économes en produits phytosanitaires. Application aux systèmes de polyculture. Ministères chargés de l'agriculture et de l'environnement, RMT SdCi. 116p.
- Bachinger J. & Zander P. (2007).** ROTOR, a tool for generating and evaluating crop rotations for organic farming systems. In : *European Journal of Agronomy* vol.26 p.130–143.
- Berthet E., Barnaud C., Girard N., Labatut J., Martin G.** (2016). How to foster agroecological innovations? A comparison of participatory design methods. In: *Journal of Environmental Planning and Management*, vol.59 n°2, p.280-301, DOI:10.1080/09640568.2015.1009627.
- Berthier L., Le Bris A-L., Lemerrier B., Moussa I., Walter C.** (2012) Spatialisation de la réserve utile des sols en région Bretagne. 11<sup>ème</sup> Journées d'Etude des Sols, Session 7 Cartographie numérique et analyse spatiale des sols. 31 p.
- Bockstaller C. & Girardin P.** (2008). Mode de calcul des indicateurs agri-environnementaux de la méthode INDIGO®. UMR Nancy-Université -INRA Agronomie et Environnement Nancy-Colmar. 119 p.
- Bockstaller C., Galan M.B., Capitaine M., Colomb B., Mousset J., Viaux P.** (2008) Comment évaluer la durabilité des systèmes en production végétale ? In : *Systèmes de culture innovants et durables, quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?* Educagri éditions, 2008, ISBN 978-2-84444-685-5, p.29-51
- Bohanec M.** (2015) DEXi : Program for Multi-Attribute Decision Making, User's Manual. Institut "Jozef Stefan", Ljubljana, Slovenia. 67 p.
- Bouard F.** (2017) Evaluation des performances de trois systèmes de culture innovants conduits en Bretagne entre 2012 et 2016. Mémoire de fin d'études d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage. Rennes, 12/09/2017. 25p.
- Bos A.P., Groot Koerkamp P.W.G., Gosselink J.M.J., Bokma S.** (2009). Reflexive Interactive Design and its application in a project on sustainable dairy husbandry systems. In: *Outlook in agriculture*, vol.38 n°2, p.137-143 DOI: 10.5367/000000009788632386
- Bronick C.J., Lal R.** (2005) Soil structure and management: a review. In: *Geoderma*, vol.124 p.3-22 DOI 10.1016/j.geoderma.2004.03.005
- Cardona A., Lefèvre A. & Simon S.** (2018) Les stations expérimentales comme lieux de production des savoirs agronomiques semi-confinés. Enquête dans deux stations INRA engagées dans l'agro-écologie, in *Revue d'anthropologie des connaissances* vol.12 n°2, p. 139-170. DOI 10.3917/rac.039.0139
- Cardoso I.M., Guijt I., Franco F.S., Carvalho A.F., Ferreira Neto P.S.** (2001). Continual learning for agroforestry system design: university, NGO and farmer partnership in Minas Gerais, Brazil. In: *Agricultural Systems* vol.69 p.235–257.
- Carof M., Colomb B., Aveline A.** (2013) A guide for choosing the most appropriate method for multi-criteria assessment of agricultural systems according to decision-makers' expectations. In : *Agricultural Systems* vol.115, p.51-62, DOI 10.1016/j.agsy.2012.09.011
- Carpani M., Bergez J.E., Monod H.** (2012) Sensitivity analysis of a hierarchical qualitative model for sustainability assessment of cropping systems. In : *Environmental Modelling & Software*, vol.27-28, p.15-22, DOI 10.1016/j.envsoft.2011.10.002
- Cervek C.** (2012) Intégrer la biodiversité dans les systèmes d'exploitation agricole : le projet IBIS. In : *Innovations Agronomiques*, vol.25 p.143-154.
- Chauvel B., Tschudy C., Munier-Jolain N.** (2011) Gestion intégrée de la flore adventice dans les systèmes de culture sans labour. In : *Cahiers de l'Agriculture*, vol.20 p.194-203, DOI 10.1684/agr.2011.0491

**Craheix D., Angevin F., Bergez J.-E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L., Reau R., Sadok W., Doré T.** (2011a). MASC 2.0, Un outil pour l'analyse de la contribution des systèmes de culture au développement durable. Présentation & principes d'utilisation. INRA – AgroParisTech – GIS GC HP2E, 49 p.

**Craheix D., Angevin F., Bergez J.-E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L., Reau R., Sadok W., Doré T.** (2011b). MASC 2.0, Un outil pour l'analyse de la contribution des systèmes de culture au développement durable. Jeu complet de fiches critères de MASC 2.0. INRA – AgroParisTech – GIS GC HP2E, 133 p.

**Craheix D., Angevin F., Bergez J.-E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L., Reau R., Doré T.** (2012). MASC 2.0, un outil d'évaluation multicritère pour estimer la contribution des systèmes de culture au développement durable. In : *Innovations Agronomiques*, vol.20 p.35-48.

**Cros-Cayot S.** (1996) Distribution spatiale des transferts de surface à l'échelle du versant. Contexte Armoricaïn, thèse de doctorat, Sciences de l'environnement, Rennes, 223 p.

**Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'Organisation des Nations Unies** (1987). Notre avenir à tous. P.14.

**Debaeke P., Munier-Jolain N., Bertrand M., Guichard L., Nolot J.M, Faloya V., Saulas P.** (2009) Iterative design and evaluation of rule-based cropping systems: methodology and case studies. A review. In: *Agronomy for Sustainable Development*, Springer Verlag/EDP Sciences/INRA, vol.29 n°1, p.73-86. DOI: 10.1051/agro:2008050.

**Debaeke P., Petit M.S., Bertrand M., Mischler P., Munier-Jolain N., Nolot J.M., Reau R., Verjux N.** (2008) Evaluation des systèmes de culture en stations et en exploitations agricoles : où en sont les méthodes ? In: *Systèmes de culture innovants et durables, quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?* Educagri éditions, 2008, ISBN 978-2-84444-685-5, p.149-168.

**Deytieux V., Vivier C., Minette S., Nolot J-M, Piaud S., Schaub A., Lande N., Petit M-S., Reau R., Fourrié L., Fontaine L.** (2012). Expérimentation de systèmes de culture innovants : avancées méthodologiques et mise en réseau opérationnelle. In: *Innovations Agronomiques* vol.20, p.49-78

**Lanoë E., Alignier A., Roche B., Ferchaud F., Le Coeur D., Thenail C.** (2015). Ecobordure, un indicateur de l'état agroécologique des bordures de champs. *Presented at 3e colloque biennal des Zones Ateliers*, Paris, (2015-10-14 - 2015-10-16). 1 p. <https://prodinra.inra.fr/record/329055>

**Giteau J.L.** (2017). Appel à projet DEPHY EXPE 2017 : Dossier finalisé. Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne (document interne), 20 p.

**Guichard L, Bockstaller C., Loyce C, Makowski D** (2010). PERSYST, a cropping system model based on local expert knowledge. *Proceedings of "Agro2010 the XIth ESA congress"* Wery.J, Shili-Touzi.I, Perrin.A (Eds.), Agropolis international Editions, Montpellier, France, p.827-828

**Havard M., Alaphilippe A., Deytieux V., Estorgues V., Labeyrie B., Lafond D., Meynard J.-M., Petit M.S., Plenet D., Picault S., Faloya V.** (2017). Guide de l'expérimentateur système : concevoir, conduire et valoriser une expérimentation "système" pour les cultures assolées et pérennes. GIS PICleg1, GIS Fruits, Réseau ECOVITI, RMT Systèmes de culture innovants, GIS Relance Agronomique, 119 p.

**Heddadj D. & Leroux L.** (coordination) (2014) Techniques Culturelles Sans Labour. Collaboration CRAB, INRA, Université Rennes 1, Agrocampus Ouest, Université Wageningen-Altera. Edité par les Chambres d'Agriculture de Bretagne, Décembre 2014. 43p.

**Herpin P.** (2009) Evaluation multicritère de systèmes de culture innovants et durables dans le contexte de l'agriculture bretonne, à l'aide de l'outil MASC, 40 p., mémoire de fin d'études, Clermont Ferrand.

**Hirschy M., Ravier C., Lorin M.** (2015). CRITER 5.4 : un outil de caractérisation des performances de systèmes de culture. Manuel d'utilisateur. INRA – RMT SdCi, 139 p.

**Guérif M. & King D.** (2007) Agriculture de précision. Caractérisation spatialisée du milieu physique pour l'agriculture de précision : enjeux et questions de recherche. Edition Quae,

ISBN 978-2-7592-0019-1, p.7-14.

**Labreuche J., Lellahi A., Malaval C., Germon J.C.** (2011) Impact des techniques culturales sans labour (TCSL) sur le bilan énergétique et le bilan des gaz à effet de serre des systèmes de culture. In : *Cahiers de l'agriculture*, vol.20 p.204-15. DOI : 10.1684/agr.2011.0492

**Labreuche J., Le Souder C., Castillon P., Ouvry J.F., Real B., Germon J.C., De Tourdonnet S.** (2007) Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturales Sans Labour (TCSL) en France. Etude ADEME – ARVALIS – Institut du végétal – INRA – APCA – AREAS – ITB – CETIOM – IFVV. 390 p.

**Lançon J., Reau R., Cariolle M., Munier-Jolain N., Omon B., Petit M.S., Viaux M., Wery J.** (2008) Elaboration à dire d'experts de systèmes de culture innovants. In: *Systèmes de culture innovants et durables, quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?* Educagri éditions, 2008, ISBN 978-2-84444-685-5, p.91-109.

**Le Bellec F., Rajaud A., Ozier-Lafontaine H., Bockstaller C., Malezieux E.** (2012). Evidence for farmers' active involvement in co-designing citrus cropping systems using an improved participatory method. In : *Agronomy for Sustainable Development*, vol.32, p.703–714, DOI 10.1007/s13593-011-0070-9

**Lefèvre V., Capitaine M., Peigné J., Roger-Estrade J.** (2014). Farmers and agronomists design new biological agricultural practices for organic cropping systems in France. In: *Agronomy for Sustainable Development*, vol.34 p.623-632 DOI 10.1007/s13593-013-0177-2

**Loyce C., Félix I., Bouchard C., Mischler P., Omont B., Rolland B., Valantin-Morison M.** (2008) Méthodes d'évaluation en réseau d'itinéraires techniques potentiellement innovants : nouveaux acquis opérationnels. In: *Systèmes de culture innovants et durables, quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?* Educagri éditions, 2008, ISBN 978-2-84444-685-5, p.129-148.

**Meynard J.M.** (2012). La reconception est en marche ! Conclusion au Colloque « Vers des systèmes de culture innovants et performants : De la théorie à la pratique pour concevoir, piloter, évaluer, conseiller et former ». In: *Innovations Agronomiques* vol.20, p.143-153.

**Meynard J.M., Dedieu B., Bos A.P.** (2012). Chapter 18: Re-design and co-design of farming systems. An overview of methods and practices. In: *Farming systems research into the 21st century: the new dynamic*, Edition: Springer (I.Darnhofer, D.Gibbon, B.Dedieu) p.405-429 DOI: 10.1007/978-94-007-4503-2\_18

**Millenium Ecosystem Assessment (2005)** Rapport de synthèse de l'Évaluation des Écosystèmes pour le Millénaire. 59 p.

**Milet A.** (2016) Analyse et synthèse des résultats des systèmes en grande culture économes en produits phytosanitaires du réseau DEPHY EXPE sur la période 2012-2015. Mémoire de fin d'études, AgroParisTech. 56p.

**Mischler P., Hocdé H., Triomphe B., Omon B.** (2008) Conception de systèmes de culture et de production avec des agriculteurs : partager les connaissances et les compétences pour innover. In: *Systèmes de culture innovants et durables, quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?* Educagri éditions, 2008, ISBN 978-2-84444-685-5, p.71-90.

**Nolot J.M.** (2002) Systèmes de grande culture intégrés : principes et outils de conception, conduite et évaluation. *Courrier de l'environnement de l'INRA* n°47 p.15-26.

**Nolot J.M. & Debaeke P.** (2003). Principes et outils de conception, conduite et évaluation de systèmes de culture. In: *Cahiers de l'Agriculture* vol.12 p.387-400

**Peigné J., Lefèvre V., Craheix D., Angevin F., Capitaine M.** (2015). Évaluation participative de prototypes de systèmes de culture combinant agriculture de conservation et agriculture biologique. In: *Cahiers de l'Agriculture* vol.24, n°2, p.134-141 DOI : 10.1684/agr.2015.0737

**Pelzer E., Fortino G., Bockstaller C. et al.** (2012) Assessing innovative cropping systems with DEXiPM, a qualitative multi-criteria assessment tool derived from DEXi. In : *Ecological Indicators*, vol.18 p.171-182. DOI :10.1016/j.ecolind.2011.11.019

**Petit M.S. & Reau R.** (2010) Utilisation de MASC dans le cadre du RMT Systèmes de culture innovants. Séminaire MASC « *Le modèle MASC et ses utilisations pour l'évaluation de la durabilité des systèmes de culture* », 9 et 10 mars 2010, Paris.

**Reau R. et Doré T.** (2008) Systèmes de culture innovants et durables, quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ? Educagri éditions, Paris, 2008, 175p., ISBN 978-2-84444-

**Reau R., Monnot L.A., Schaub A., Munier-Jolain N., Pambou I., Bockstaller C., Cariolle M., Chabert A., Dumans P.,** (2012). Les ateliers de conception de systèmes de culture pour construire, évaluer et identifier des prototypes prometteurs. In: *Innovations Agronomiques* vol.20, p.5-33.

**Sadok W., Angevin F., Bergez J.E., Bockstaller C., Colomb B., et al** (2008) Ex ante assessment of the sustainability of alternative cropping systems: implications for using multi-criteria decision-aid methods. A review. In: *Agronomy for Sustainable Development*, vol.28 n°1, p.163-174. Springer Verlag/EDP Sciences/INRA, DOI: 10.1051/agro:2007043

**Sadok W., Angevin F., Bergez J.E., Bockstaller C., Colomb B., et al.** (2009) MASC, a qualitative multi-attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. In: *Agronomy for Sustainable Development*, vol.29 n°3 p.447-461, Springer Verlag/EDP Sciences/INRA, DOI: 10.1051/agro/2009006

**Sebillotte M.** (1992) Pratiques agricoles et fertilité du milieu. In : *Economie rurale* n°208-209 p.117-124. DOI : 10.3406/ecoru.1992.4466.

**Wezel A., Casagrande M., Celette F., Vian J.F., Ferrer A. & Peigné J.** (2014) Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. In : *Agronomy for Sustainable Development*, vol.34 p.1-20, DOI 10.1007/s13593-013-0180-7

**Wijnands F.G., de Haan J.J., Sukkel W.,** (1999). *Methodology for prototyping Integrated and Organic Farming Systems*. Applied Plant Research (PPO), Lelystad, The Netherlands (document interne), 16 p.

**Yiridoe E. & Weersink A.** (1997) A Review and Evaluation of Agroecosystem Health Analysis: The Role of Economics. In : *Agricultural Systems*, vol.55 n°4 p.601-626

**Zuber S.M., Villamil M.B.** (2016) Meta-analysis approach to assess effect of tillage on microbial biomass and enzyme activities. In: *Soil Biology and Biochemistry*, vol.97 p.176-187. DOI 10.1016/j.soilbio.2016.03.011

### Références Sitographiques

**Agreste** (2016) Enquête Pratiques phytosanitaires sur les grandes cultures 2014 - Nombre de traitements et indicateurs de fréquence de traitement - Agreste les Dossiers n°36 [en ligne] (consulté le 10/04/18) Sur : <http://agreste.agriculture.gouv.fr/enquetes/pratiques-culturelles/grandes-cultures-prairies/>

**Arvalis Institut du Végétal** (2017) Interculture : quelle est l'efficacité des cultures intermédiaires pièges à nitrates ? [en ligne] (consulté le 13/07/18) Sur : [https://www.arvalis-infos.fr/\\_plugins/WMS\\_BO\\_Gallery/page/getElementStream.jsp?id=23458&prop=file](https://www.arvalis-infos.fr/_plugins/WMS_BO_Gallery/page/getElementStream.jsp?id=23458&prop=file)

**Craheix D.** (2012) Sensitivity analysis tab of Izi Eval. Wiki INRA, DEXi-MASC website. [en ligne] (Consulté le 27/07/18) Sur : <http://wiki.inra.fr/wiki/deximasc/Interface+IZI-EVAL/Onglet+Analyse+de+sensibilit%C3%A9>

**Direction de l'information légale et administrative** (2018) Durée du travail d'un salarié à temps plein. Service Public.fr. [en ligne] (Consulté le 11/07/18, M.à.j mars 2018) Sur : <https://www.service-public.fr/particuliers/vosdroits/F1911>

**ECOPHYTO** (2018) DEPHY EXPE : un réseau national de projets d'expérimentation "système" réduisant fortement le recours aux pesticides. ECOPHYTO DEPHY [en ligne] (Consulté le 20/02/18) Sur : <http://www.ecophytopic.fr/dephy/dephy-dephy-expe>

**Jouy L.** (2008) Fiche outil SYSTERRE. Evaluation de la Durabilité des Systèmes et des Territoires Agricoles (ERYTAGE). [en ligne] (Consulté le 03/08/18) Sur : [http://www.plage-evaluation.fr/webplage/index.php?option=com\\_flexicontent&view=item&cid=88&id=219&Itemid=124](http://www.plage-evaluation.fr/webplage/index.php?option=com_flexicontent&view=item&cid=88&id=219&Itemid=124)

**Leroyer J., Fontaine L., Audfray J.L., Prieur L., Maurice R. et al.** (2007) Fiche Technique « Cultiver du colza d'hiver en AB ». ITAB Institut Technique de l'Agriculture Biologique. [en ligne] (Consulté le 25/07/18) Sur : [http://www.itab.asso.fr/downloads/Fiches-techniques\\_culture/fiche-colza.pdf](http://www.itab.asso.fr/downloads/Fiches-techniques_culture/fiche-colza.pdf)

**Lhoste-Drouineau A.** (2016) Définition de la lutte biologique par conservation. ECOPHYTOPIC. [en ligne] (Consulté le 07/08/18) Sur : <http://www.ecophytopic.fr/hp/m%C3%A9thodes-de-lutte/contr%C3%B4le-par-auxiliaires-en->

ext%C3%A9rieur/d%C3%A9finition-de-la-lutte-biologique-par

**Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation** (2014) IBEA : Un outil de diagnostic global de l'impact des pratiques agricoles sur la biodiversité, à l'échelle de l'exploitation. ChloroFil. [en ligne] (Consulté le 07/08/18 ; M.à.j 07/11/14) Sur : <https://goo.gl/DPCc6p>

**Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation** (2015) Plan Ecophyto 2. Alim'agri. [en ligne] (Consulté le 13/08/18, M.à.j 30/01/2015) Sur : [http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/151022\\_ecophyto.pdf](http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/151022_ecophyto.pdf)

**Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation** (2017). Qu'est-ce que l'agriculture biologique ? Alim'Agri [en ligne] (consulté le 06/03/18) Sur : <http://agriculture.gouv.fr/lagriculture-biologique-1>

**Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation** (2018) Qu'est-ce que le biocontrôle ? Alim'agri [en ligne] (Consulté le 08/08/18, M.à.j 23/07/2018). Sur : <http://agriculture.gouv.fr/quest-ce-que-le-biocontrole>

**Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation** (2018) Indicateur de Fréquence de Traitements phytosanitaires (IFT). Alim'Agri. [en ligne] (consulté le 06/03/18) Sur : <http://agriculture.gouv.fr/indicateur-de-frequence-de-traitements-phytosanitaires-ift>

**Mollier Pascale** (2012) INRA. Systèmes agricoles innovants : l'expérimentation système. INRA Science and Impact [en ligne] (consulté le 21/02/18, M.à.j 2017) Sur : <https://goo.gl/yiUU3t>

**Réseau CIVAM** (2017) Mission Ecophyt'eau : un outil didactique. Réseau CIVAM Campagnes Vivantes. [en ligne] (Consulté le 02/08/18, M.à.j 05/17) Sur : <http://www.civam.org/index.php/actualites/230-rad-spea/589-mission-ecophyt-eau-un-outil-didactique>

**RMT ERYTAGE** (2014) Aide au choix d'un outil ou d'une méthode. [en ligne] (Consulté le 27/03/18) Sur : <https://goo.gl/SBEYxx>

**Troussard M., Lefèvre V., Schaub A., Ballot R.** (2012) Planter des cultures dérobées ou double-cultures. Réseau Mixte Technologique Systèmes de Culture Innovants. [en ligne] (Consulté le 08/08/18) Sur : <https://goo.gl/Ur3der>

**OEB** (2017). Les résidus phytosanitaires dans les eaux de surface en Bretagne. Portail de l'information environnementale en Bretagne. [en ligne] (consulté le 12/03/18, M.à.j 02/17) Sur : <https://goo.gl/qTwjbN>



## Abstract

### 1. Context and objectives of the internship

Agriculture today has to face major challenges: beyond the production service, it is expected to be competitive, to contribute to employment, to reduce its dependence to fossil energy and chemical inputs and to control its environmental impacts. Agricultural cropping systems (CS) are expected to be sustainable, that is, they will be environmentally sound, economically viable and socially supportive. Especially, the agricultural orientation of the Brittany region makes it very sensitive to environmental issues. That is why the Nitrates Directive and the Ecophyto plan impose a reduction of pesticides use and nitrates leaching, which threaten surface water (fig.1). Moreover, more and more farms in Brittany are converting to organic farming. All this challenges highlight a need to re-design CS to more sustainable ones and to provide references to farmers. In this context, the SYNO'PHYT project, carried out by the Brittany Chamber of Agriculture (CRAB) and included in the Ecophyto plan 2, aims to bring economic, social and environmental references on the performances of 3 CS with a gradient of reduction of phytosanitary treatment frequency index (TFI) of 50%, 75% and 100% (organic agriculture) compared to a regional reference. The main question of this study is: **Which CS and which cropping management practices (CMP) can achieve this TFI reductions, without degrading the overall sustainability compared to a regional reference?**

The crop rotation of the 50% CS will be fixed (Maize – Winter wheat), but the others two CS (75% and Organic) will have no rotation constraints. To answer the TFI reduction objectives, the three CS will have to use a combination of agroecological levers.

If there is a need to re-design CS, there is also a need to change our way of designing CS. While addressing sustainability issues, we need to use a systemic and participative approach which take into account the agroecosystem complexity and use collective intelligence to answer multiple objectives. The systemic approach in agronomic experimentation consists of two main steps: virtual prototyping (co-designing and assessing *ex ante* CS prototypes, which is the object of this study) and field experiment. The *ex ante* assessment step will study the performances and the overall sustainability of the co-designed prototypes before their experimentation, so they can be ranged according to their contribution to overall sustainability, and improved before the field experiments.

To answer the question of the study, we make the hypothesis that, with a given TFI reduction, it is possible to follow a co-design methodology with different experts that will result in prototypes of CS able to maintain or improve the overall sustainability, compared to a regional reference. Three steps are needed (fig.7): a first step is the co-design of two CS for each trial (6 prototypes). A second step is the *ex ante* assessment of this prototypes, to choose one for

field experiment and to check the ability of the prototypes to answer to the project expectations. A last step is the optimization of the selected prototypes for field experiment.

## **2. Materials and Methods**

### *Constraints*

A regional reference CS is needed to calculate the TFI reductions and to assess the ability of the co-designed prototypes to maintain or improve the overall sustainability. This regional reference, a maize – wheat rotation, has been constructed with expert opinions. The TFI reductions to achieve have been calculated from the basis of the TFI of the rotation Maize – Winter wheat in Brittany in 2014 (tab.1). The other constraints are that the prototypes must involve only field crops (no legumes, no perennials) and be representative of specific farming sectors: the pig sector for the conventional CS and the poultry sector for the organic CS (tab.2).

### *Co-design methodology*

A co-design workshop was organized for the conception step, based on a role-playing game in 5 groups. The actors first established the rotations, then the CMP. As the calculation of assessment indicators requires accurate information, we detailed the CMP in another session. A third session was useful to give the assessment results and optimize the selected prototypes.

### *Ex ante assessment methodology*

Several methods are available for *ex ante* assessment (Appendix II), but MASC 2.0, a multi-criteria assessment tool developed on the DEXi software, was selected. It offers a global approach of sustainability but also allows to focus on some points. The MASC model is a decision tree which breaks down sustainability into 39 basic criteria from economic, social and environmental dimensions (fig.11). The DEXi software aggregates progressively the information of this 39 basic criteria into 26 aggregated criteria, until the root criteria “Contribution to overall sustainability”. This aggregation process is realized thanks to utility functions that combine together all the possible classes of basic criteria in order to obtain the class of the aggregated criteria. This functions can give different weights to the criteria, depending on their importance. The assessment process includes the calculation of basic indicators, their conversion into qualitative classes and the aggregation by the software. The basic indicators can be estimated with expert opinions, or with the use of satellite decision tree (which breaks down some basic criteria into several criteria easier to assess) or calculated. CRITER is a software that was developed to calculate 21 basic indicators of MASC 2.0, and was used in this study.

The MASC model’s parameters have to be adapted to the study. The first parameter to adapt is the weight given to each criteria, in order to reflect local specificities or stakeholders expectations. In this study, the choice was made to give more importance to farmer’s satisfaction than to society’s satisfaction, as a consulting structure is conducting the

experiment, so it has to be adopted by farmers. For the environmental dimension, we gave more importance to the environment quality, linked to the issues presented in introduction (fig.11). The second parameter to adapt are the threshold values, which enable to convert the calculated indicators into qualitative basic criteria. They were adapted for some indicators on the basis of local references and of the value range of the assessed prototypes (Appendix VII). The CRITER software also requires an adaptation of the parameters, especially the crop prices, the inputs prices, the climate data and the soil characteristics (Appendix IV and VIII).

### 3. Results

*Co-designed prototypes (Detail of cropping management practices in Appendix XI).*

- The prototypes co-designed for the 50% CS trial were similar on all aspects except for soil tillage. The first prototype (50% P1) is tilled every year and the second prototype (50% P2) is a no-till system (only cultivator and covercrop are used). The TFI reduction is mainly achieved by reducing chemicals inputs on maize thanks to mechanical weeding.
- The first prototype designed for 75% CS trial (75% P1) is a 7-years rotation: *Rapeseed – Winter Wheat – (Cover crop) – Maize – Spring Barley/Faba bean – (Cover crop) – Winter Wheat – (Cover crop) – Spring Lupin – Winter Barley*. The strategy is the alternation between winter and spring crops of different families, to break the pest development lifecycle.
- The second prototype (75% P2) is a 5-years rotation: *Rapeseed – Winter Wheat – (Cover crop) – Maize – Winter Triticale/Faba bean – (Catch crop Ryegrass) – Spring Barley/Pea*. The strategy is to maximize land cover: clover is sowed into rapeseed so that wheat can be sowed in direct seeding into the developed clover. The associations also provide a better land cover.
- The first prototype designed for Organic CS trial (Organic P1) is a 6-years rotation: *Rapeseed – Winter Triticale/Pea – (Cover crop) – Maize – Winter Wheat – Winter Barley – (Catch crop Buckwheat) – Winter Faba bean (+Oat)*. The strategy is to diversify the crops families and the economic opportunities, with the integration of rapeseed and buckwheat. This CS is only ploughed one year upon six.
- The second prototype (Organic P2) is a 5-years rotation: *Spring Faba Bean – (Cover crop) – Spelt – (Cover crop) – Maize – Triticale/Winter Pea – (Cover crop) – Buckwheat – (Cover crop)*. The strategy is the use of dense cover crops that stifle the weeds and the alternation between winter and spring crops of different families. This CS is tilled four years upon five.

*Ex ante assessment of 50% CS prototypes (English results in Appendix XVII)*

The P1 (prototype 1) is more effective than the P2 (prototype 2) on the economic dimension. The difference between the prototypes is due to the long term productive capacity, which is better for the P1. This is due to a better control of soil structure and pests in the P1, because of the presence of tillage. Both prototypes are effective on the social dimension. The society's satisfaction is "very high" but the farmer's satisfaction is only "medium to high" because of the

pesticides use risk and a bad workload repartition. Both prototypes are effective on the environmental dimension. The P2 has a better control of NO<sub>3</sub> losses (fig.16) but phosphorus and NH<sub>3</sub> emissions are badly controlled. Soil erosion control must be improved (fig.17). The model poorly discriminates the positive effect of no-tillage on biodiversity conservation (fig.18).

#### *Ex ante assessment of 75% CS prototypes (English results in Appendix XVIII)*

The P1 is more effective than the P2 on the economic dimension. This is due to a higher profitability of the P1, because in the P2 the combination of crops decrease the semi-net margin (fig.19). The P2 also have a “low” contribution to economic development because of the low sanitary quality of the products (fig.20). The P1 is more effective than the P2 on the social dimension, due to a better farmer’s satisfaction in the P1. Indeed, the P2 is more complex to implement. The P2 is more effective than the P1 on the environmental dimension, due to a better contribution to environment quality in the P2. Especially, the P1 is less controlling the NO<sub>3</sub> losses and soil erosion due to a land cover default between maize and spring barley/faba bean (fig.22).

#### *Ex ante assessment of Organic CS prototypes (English results in Appendix XIX)*

The P2 is more effective than the P1 on the economic dimension. The difference is due to the specific equipment needs of the P1, especially mechanical weeding equipment (tab.14). Both prototypes are “medium” for the social dimension. But the society’s satisfaction is better in P2 which has better contribution to employment. Both prototypes are not easy to implement, but offer good working conditions. The P2 is more effective than the P1 on the environmental dimension, due to a better contribution to environment quality. Especially, soil quality is quite low in both CS but the P1 poorly controls soil erosion, because of a land cover default (fig.27).

#### *Comparison to the regional reference CS*

All co-designed prototypes are able to answer the TFI reduction objectives, as they were designed to do so (fig.28). All co-designed prototypes have an equal or higher contribution to sustainable development compared to the regional reference, which is “medium” (tab.17).

## **4. Discussion**

### *Answer to the hypothesis*

As we saw, the TFI reductions were achieved, and the all the prototypes are able to maintain or improve sustainability compared to a regional reference. The hypothesis is thus verified.

### *Choice of a prototype*

We chose the prototypes to experiment on the basis of their contribution to sustainable development, but also thanks to the highlight of strengths and weaknesses (tab.18).

The 50% P1 has a better overall sustainability than the 50% P2 (tab.17), but the model poorly discriminates the effect of no-till between two close CS. The CMP are not different enough to

show difference in work time, energy consumption or even biodiversity conservation as we could have expected. The limits of aggregation and the comparison to literature lead us to choose an intermediate CS with tillage only performed one year upon two.

The 75% P1 has a better overall sustainability than the 75% P2 (tab.17). But on the environmental dimension, the P2 is better, thanks to the maximization of land cover which contribute to decrease erosion and nitrates losses. Direct seeding under clover would be innovative, but there is a risk of uncontrolled clover. The complexity of this CS is not the main problem, but the low profitability and sanitary quality lead us to prefer the 75% P1, with a need of improvement of the environmental aspect. After optimization, the prototype is described as follow : *Rapeseed – Wheat – (Cover crop) – Maize – Winter Faba bean – (Cover crop) – Wheat – (Cover crop) – Maize – Triticale/Pea association*

The Organic P2 has a better overall sustainability than the Organic P1 (tab.17). The higher risk of erosion is a problem in the P1, as it makes it inadequate for the experimental context. But the P1 would have been better after the suppression of one winter cereal, and the integration of rapeseed was quite innovative and interesting for its agronomic properties. However, the P2 was selected for the trial, as it seems to be more adapted to the context and to the weed pressure with its stifling strategy. After optimization, the rotation is maintained but the P2 reduced tillage frequency and could replace spelt by a triticale if there are few outlets for spelt.

#### *Methodological critics :*

The co-design method was quite adapted to the study, especially for the time devoted to co-design. The *ex ante* assessment presents some limits, as it implies to make hypothesis on the CMP but also on yields and harvest quality. Moreover, decision rules will permit to adapt the CS during the experiment, which is not taken into account.

The MASC model was adapted to the study and clearly discriminated the prototypes. But we have to highlight that the choice of threshold values, and the modification of the weights, is very specific to the study and does not allow to extrapolate the results. Moreover, some criteria are calculated in a way which is not very adapted to our study, and lead to a lack of discrimination for some criteria such as biodiversity conservation.

A sensitivity analysis had to be performed on the model with IZI-EVAL (a tool from the INRA), as we changed the MASC model's ponderations. A Monte-Carlo analysis was performed, in order to highlight the probability of reaching each one of the classes of the root attribute, which give an information on the discriminatory power of the model. A sensitivity index was also calculated for all the basic attributes, in order to see which basic attribute most impact the final result. This two analysis showed that: 1) the model is able to discriminate the prototypes, as the probability of reaching the classes of our prototypes is quite low (fig.31), 2) the social

criteria and the profitability are the criteria which have the highest impact on the final result, whereas the environmental basic criteria poorly impact the final result (fig.32).

## **5. Perspectives**

### *Trial implementation*

The trials will be implemented in plots in order to have all the crops every year on a subplot (fig.33), so that we can have temporal repetitions, make an intermediary evaluation and take into account climatic variability. Before the implementation of the trial, a diagnostic of the initial state of the fields (soil analysis, morphological description, fauna and flora diagnostics) is needed in order to take into account the previous practices and their potential effect on the results. Especially, the field's edge management has to be taken into account.

### *Trial monitoring and diffusion*

The SYNO'PHYT project aims to produce references on multi-criteria results, robustness and sustainability of the trials. That is why an *ex post* assessment is needed. This will include for example agronomic diagnostic, annual assessment of results, sustainability analysis of the CS in the middle and at this end of the project. To do this, data will be collected every year about the CMP, the field state, the context.

The diffusion of the trial is part of the systemic approach. This allow to share knowledge and skills, but also to identify new research questions and create a dialogue between actors. Scientific publications, visits, presentation of the trials... will be performed (tab.20).

## **Conclusion**

To conclude, 3 CS presenting a TFI reduction gradient of 50%, 75% and 100% will be implemented in the Kerguehennec station. 6 prototypes (2 for each trial), mobilizing a combination of agroecological levers, were designed in a co-design workshop. An *ex ante* assessment performed with the MASC model have shown that all the prototypes are able to achieve this TFI reduction without degrading the contribution to sustainable development compared to a national reference. The global assessment of sustainability and the comparison of strengths and weaknesses have discriminated the prototypes and allowed to keep 3 prototypes, one for each trial. The MASC model was discriminatory and useful, but has shown that the results are very dependent on the threshold values and the weight given to criteria, so this study must be analyzed in context. Now this systems will be implemented on field, and several evaluations will be performed until 2025. This project will contribute to study the effects of drastic TFI reductions on the performances of CS, and bring references to accompany farmers in the conversion towards new CS less dependent to inputs and more sustainable.

## Annexes

### Annexe I : Comparaison de méthodes de co-conception de SdCi rencontrées dans la littérature (tableau non exhaustif)

Méthode	Co-conception de SdC biologiques	Méthode de co-conception du RMT SdCi	Elaboration à dire d'experts de SdC innovants
Référence	Lefèvre et al 2014	Havard et al. 2017, Petit et al. 2014, Deytieux et al. 2012, Réau et al 2012	Lançon et al. 2008
Objectifs	Aider les agriculteurs à concevoir des SdC innovants (SdC biologiques préservant le sol)	Concevoir et évaluer un (ou des) système(s) de culture cohérent(s) lors d'ateliers de conception (méthode générale)	Proposer des modes de production plus économes pour le Nord et mieux adaptés à la diversité des contraintes locales au Sud
Acteurs	Groupe d'agriculteurs (6-7) et chercheurs (3)	Acteurs de la recherche, du développement et de l'enseignement agronomique et agricole (5 à 20 personnes)	Experts (scientifiques et praticiens) de la recherche principalement
Déroulé	8 étapes 1. & 2. Recherche des agriculteurs, Institutionalisation du projet 3. Définition des objectifs de chacun 4. Conception de prototypes exploratoires sans autres contraintes que les objectifs 5. Discussion des prototypes entre acteurs, identification des contraintes 6. Etat de l'art des techniques innovantes existantes par les chercheurs 7. Conception de prototypes incluant les contraintes 8. Evaluation ex ante	5 étapes 1. Diagnostic initial du SdC actuel et du contexte 2. Définition de la cible, du cadre d'objectifs et du cadre d'évaluation 3. Partage des connaissances et inventaire des techniques importantes susceptibles d'être utiles 4. Construction de nouveaux systèmes de culture (combinaison de cultures et d'ITK) 5. Evaluation a priori des performances économiques, environnementales et sociales des systèmes	3 étapes 1. Définition du cahier des charges (objectif à atteindre, contraintes, enjeux, critères d'évaluation, SdC référence) 2. Conception de prototypes candidats (partage d'une stratégie commune, inventaire des solutions techniques, élaboration de prototypes d'abord globaux puis opérationnels) 3. Evaluation des prototypes et sélection des prototypes prometteurs
Outils	Objectifs notés sur des post-it et organisés par thème Jeu de rôle en binôme et tableau décrivant le SdC Alternance ateliers jeu de rôle/individuel	Brainstorming de techniques, cultures et synthèse par fonction Jeu de plateau Mission Ecophyt'eau Guide STEPHY d'inventaire des pratiques Agro-PEPS (outil web d'échanges)	Alternance de séances de travail collectif et de séances de réflexion individuelle Travail en sous-groupes aux compétences homogènes puis mise en commun
Durée	15 mois	2 ans	4 séances d'une demie journée pour l'étape 2
Avantages	Pas de contraintes initiales favorise l'innovation et la prise de recul des agriculteurs sur leur situation Stimulation des interactions entre acteurs et de la créativité, l'échange d'expériences	Développement d'apprentissages et de compétences Travail en réseau, nombreuses mises à disposition d'outils, fiches pratiques	Production de prototypes opérationnels et applicables au champ
Limites	Nombreuses étapes et durée prolongée Conçu pour être appliqué par et pour des agriculteurs	Pour les conceptions "prospectives", la cible est fixée sur un futur lointain et les prototypes proposés ne sont pas toujours directement applicables au champ. De plus la co-conception nécessite une phase préalable à l'expérimentation assez longue	Pas d'intégration des agriculteurs dans le processus de conception

Méthode	Méthode KCP (Knowledge - Concepts - Proposals)	Méthode de co-conception DISCS	Méthode RIO (Reflective Interactive Design)
Référence	Berthet et al. 2015	Le Bellec et al. 2012	Bos et al. 2009
Objectifs	Favoriser des procédés d'innovation pour des changements profonds des systèmes actuels : faciliter les avancées cognitives et les changements organisationnels	Focaliser sur un aspect à améliorer dans un SdC et impliquer les acteurs potentiellement affectés par le changement de pratiques	Introduire de manière participative des innovations réalisables dans des systèmes existants, dans le but d'induire des changements signifiants et d'atteindre des objectifs multiples tels que ceux de la
Acteurs	Agriculteurs, naturalistes, chercheurs et techniciens, autorités locales... (20-30 personnes)	Acteurs "professionnels" : agriculteurs, conseillers, techniciens, chercheurs Acteurs "publics" (hors milieu agricole)	Acteurs directement concernés par le système (agriculteurs, représentants d'agriculteurs) et acteurs nécessaires pour la mise en place des solutions (chercheurs, autres experts)
Déroulé	<p>4 étapes</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Interviews initiales avec acteurs locaux, diagnostic et préparation des ateliers</li> <li>2. Atelier : Partage de connaissances et identification des lacunes (phase K)</li> <li>3. Atelier : Exploration de nouveaux concepts (phase C)</li> <li>4. Atelier : construction d'une stratégie de conception collective (phase P)</li> </ol>	<p>5 étapes</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Diagnostic agronomique par des experts présenté à tous les acteurs (réunion publique)</li> <li>2. Définition en commun des objectifs lors d'un atelier</li> <li>3. Conception des prototypes avec les experts uniquement</li> <li>4. Test au champ et réajustement des prototypes</li> <li>5. Présentation des résultats aux acteurs (réunion publique)</li> </ol>	<p>3 étapes</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Analyse du système et des acteurs : identifier les objectifs, les acteurs, leurs besoins</li> <li>2. Conception de nouveaux systèmes : sélection et organisation de fonctions clés pour atteindre le SdC souhaité, identification de solutions pour chaque fonction, combinaison des solutions puis élaboration d'un prototype détaillé</li> <li>3. Ancrage et diffusion de la méthode : établissement d'un réseau d'acteurs autour des solutions utilisées, identification des freins potentiels et propositions pour les éviter</li> </ol>
Outils	Phase K : présentations orales en séance plénière Phase C : organisation en sous groupes (6-8 personnes) et utilisation de "concept projector" (propositions inattendues et contradictoires visant à stimuler l'innovation)	/	Résumé des attentes (Brief of Requirement BoR) pour qualifier et quantifier les besoins
Durée	Plusieurs mois	Au moins 5 ans	Au moins 2 ans
Avantages	Phase K : Identification des "trous de connaissances" et création de références communes Phase C : Projection dans l'inconnu impliquant une double boucle d'apprentissage et du recul sur les points de vue des acteurs	Grande diversité d'acteurs impliqués Implication d'agriculteurs dès le début, favorise la diffusion des nouvelles techniques Démarche multi-échelle (de la parcelle à la région)	Approche participative basée sur les besoins des acteurs, Phase importante consacrée à l'appropriation et à l'ancrage de la méthode (anticipation des freins) Processus itératif permettant de compléter les différentes phases au cours du temps
Limites	Adapté aux systèmes nécessitant des changements drastiques Plus adapté aux systèmes où les acteurs ont des intérêts divergents	Nécessité de compromis entre les acteurs	Approche encore en construction Approche pluridisciplinaire qui complexifie l'évaluation

Annexe II : Comparaison des méthodes d'évaluation de la durabilité, à l'échelle du SdC en grandes cultures (liste non exhaustive)

	MASC 2.0	PERSYST	SYSTERRE	DEXI PM	ROTOR
Méthode	Craheix et al. 2011a	Guichard et al. 2010	Jouy 2008	Peizer et al. 2012	Bachinger et Zander 2007
Référence					
Objectif	Evaluer la durabilité à l'échelle du SdC (grandes cultures)	Evaluer les conséquences des changements de pratiques sur les performances environnementales et les rendements du SdC	Evaluer les performances techniques, économiques et environnementales des productions végétales sur une exploitation de grande culture ou de polyculture-élevage.	Evaluer la durabilité des SdC intégrés	Concevoir et évaluer des rotations pour des SdC en agriculture biologique
Type d'indicateurs	Qualitatifs (discrétisation d'indicateurs économiques, sociaux et environnementaux en classes qualitatives)	Quantitatifs (économiques et environnementaux)	Quantitatifs (20 indicateurs économiques, sociaux et environnementaux)	Qualitatifs (basés sur la description du contexte et des pratiques culturales)	Quantitatifs
Avantages	Possibilité de paramétrage et d'adaptation au contexte local, analyse globale mais possibilité de focaliser sur certains indicateurs	Effet du milieu, de la rotation et des pratiques. Estimation du rendement.	Plusieurs niveaux d'échelle : parcelle, sol, système de culture, exploitation. Caractérisation et comparaison des pratiques à des références locales/régionales/nationales	Développement des piliers social et environnemental, prise en compte du contexte	Simulation de l'effet des pratiques sur la gestion des adventices, les pertes de nitrates... et exclusion des SdC les moins performants par comparaison à des valeurs seuils Prise en compte des caractéristiques du milieu
Inconvénients	Temps nécessaire pour calculer les indicateurs, difficulté d'extrapolation des résultats, dilution de l'information lors de l'agrégation	Opérationnel en Bourgogne et Eure et Loir uniquement	Nécessité de formation payante	Nombreux indicateurs à estimer, manque de sensibilité	Uniquement destiné aux SdC en agriculture biologique Pilier social peu développé Restriction de l'évaluation aux SdC créés par le modèle
Facilité d'utilisation et de diffusion des résultats	Interface DEXI très visuelle, résultats facilement diffusables	Saisie simplifiée, utilisation possible en conseil/information	Outil de dialogue technicien/agriculteur : possibilité de tests de scénarios alternatifs instantanés	Saisie simple, accessible à un grand nombre d'acteurs	Pas de sorties graphiques des résultats

Annexe III : Itinéraire technique synthétisé du système de référence régional (Document interne)

	Maïs grain (obj. de rdmt : 82 q/ha)	Blé tendre d'hiver (obj. de rdmt : 72 q/ha)
Interculture	semis (avec combiné herse rotative) : moutarde, 7kg/ha) (fin août/début septembre)	
	Déchaumage (avec Canadien) (début mars)	
	herbicide (1an/4) (début septembre)	
Préparation du sol et semis	préparation du sol (herse rotative et/ou canadien) (avril)	préparation du sol (Canadien) : 1 an/4 (lorsque pas de labour) (jour du semis)
	labour à 25cm : 3 ans/4 (jour de ferti)	labour à 25cm : 3 ans/4 (lorsque pas de Canadien) (jour du semis)
	semis (avec semoir monograine) : variété Millesim (100 000 gr/m <sup>2</sup> ) (fin avril)	semis (avec semoir combiné herse rotative) : variété Cellule (200 000 gr/m <sup>2</sup> ) (début/mi novembre)
Fertilisation	1 apport lisier de porc : 30 m <sup>2</sup> /ha (fin avril)	3 apports Ammonitrates (33.5%N) : 90 kg/ha (fin février/début mars) + 215 kg/ha (fin mars/avril) + 90 kg/ha (avril)
Régulateur de croissance		C5 : 2 l/ha (2an/4) (mars)
Traitements phytosanitaires: adventices	produits variables (entre fin avril/début juin)	produits variables (mars)
Traitements phytosanitaires: maladies		produits fongicides variables ; mi avril (4ans/4)+ mai (4ans/4) + début juin(2 ans/4)
Traitements phytosanitaires: ravageurs		Karate Zeon 0.06L/ha ; 1an/4 (mi-juin)
Récolte	Moissonneuse : 88 q/ha (début/mi-novembre)	Moissonneuse + round baller : 74 q/ha (début août)

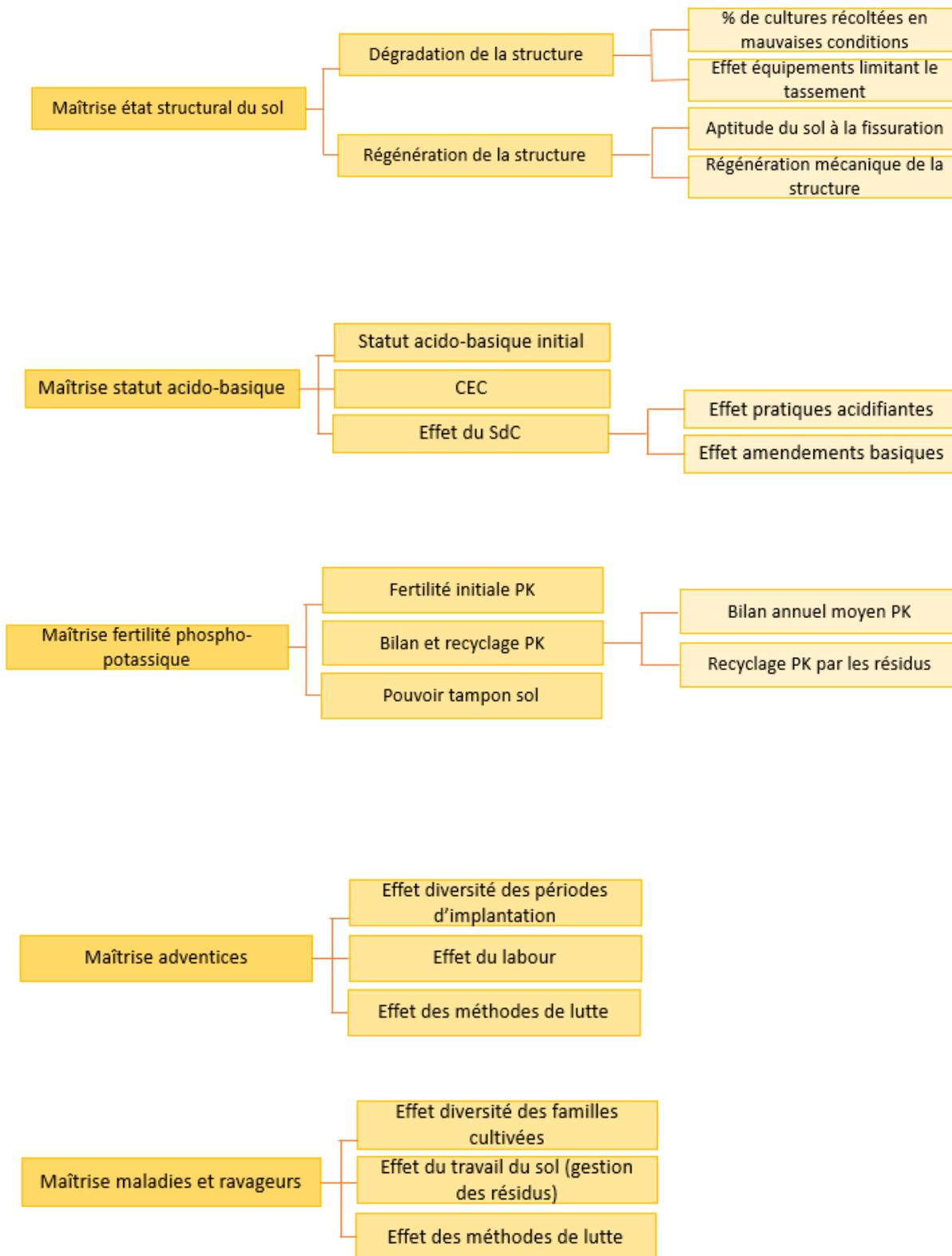
Annexe IV : Données pédologiques issues des analyses de sol des parcelles prévues pour les essais

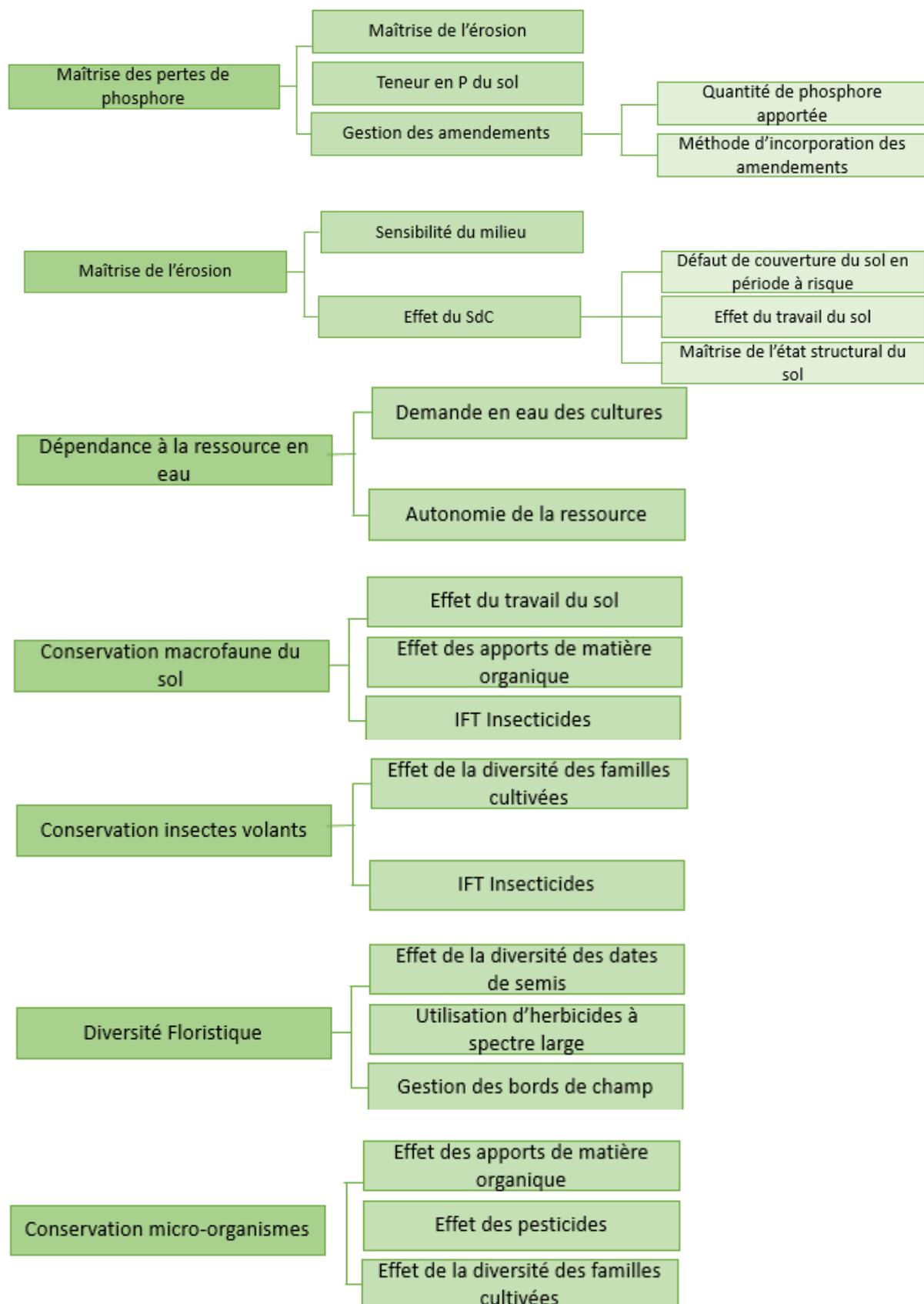
	Essai	Essai Bio		Essais -50% et -75%	
	Parcelle	Penderff		Grand Champ	
Contexte de la parcelle	Surface	4.45		4.8	
	Pente	forte (>5%)	A dire d'experts	faible (0-2%)	A dire d'experts
	Distance d'un cours d'eau	>12m		>12m	
	Largeur de la bande enherbée	0-6m		0-6m	
	Erodibilité	4		4	
Caractéristiques du sol	Texture dominante	limono-sableux	Analyse de sol point 0 de 2013	limono-sableux	Compilation des analyses de sol 2015 et 2017 (Point 0 à faire)
	pH moyen	6.3		6.55	
	% matière organique	4.5%		3.60%	
	% Argile	15.4%		15.40%	
	% Calcaire	0.28%		0.28%	
	% Cailloux	5-10%		5-10%	
	Profondeur réelle (cm)	80 cm		80 cm	
	Densité apparente	1.35	1.35		
	Battance	3	Indice de Rivière (cité par Cros-Cayot 1996)	3	Indice de Rivière (cité par Cros-Cayot 1996)
	Réserve utile (mm)	165	Calcul par la méthode Berthier et al. 2012	161.6	Calcul par la méthode Berthier et al. 2012
Hydromorphie	non	A dire d'experts	non	A dire d'experts	
Sol drainé	non		non		

Annexe V : Ajustement des rendements proposés lors des ateliers de co-conception (P = prototype)

Prototyp e	Culture	Rendement initial	Rendement ajusté	Justification
SdC -50% P1	Blé	90	90	Pas de modification – Rendements cohérents dans notre contexte
	Maïs grain	95	95	
SdC -50% P2	Blé	90	85	Estimation d'une augmentation du risque salissement et maladie = baisse des rendements de 5 q/ha
	Maïs grain	95	90	
SdC -75% P1	Colza	40	37	Cohérence avec SdC -75% P2 et essais actuels
	Blé	75	75	Pas de modification – Rendements cohérents dans notre contexte
	Maïs grain	90	90	
	Orge/Féverole Printemps	40	40	
	Blé	75	75	
	Lupin	25	25	
	Orge Hiver	70	70	
SdC -75% P2	Colza	37	37	Pas de modification – Rendement cohérent dans notre contexte
	Blé	80	80	Inférieur à SdC -75% P1 car moins de protection phytosanitaire
	Maïs grain	100	90	Désherbage uniquement mécanique --> baisse du rendement
	Triticale/Féverole Hiver	40	30	Actuellement 35-40 q/ha en AB avec féverole, donc sans labour et sans aucune intervention = -10 q/ha
	Orge/Pois Printemps	40	35	Actuellement 35-40 q/ha en AB avec féverole, moins de potentiel avec pois = -5 q/ha
SdC AB P1	Colza	20	17.5	Pas de fertilisation ni de labour
	Triticale/Pois fourrager Hiver	45	35	Actuellement 35-40 q/ha avec labour donc -10 q/ha
	Maïs grain	70	70	Pas de modification – Rendement cohérent dans notre contexte
	Blé	40	30	Pas de fertilisation et peu d'effet précédent = -10 q/ha
	Orge Hiver	30	20	Pas de fertilisation ni d'effet précédent en non labour = -10 q/ha
	Féverole Hiver (+Avoine)	35	30	Actuellement en féverole de printemps 25 q/ha avec labour, sans labour = -5 q/ha
SdC AB P2	Féverole Printemps	40	30	Actuellement 25q/ha
	Epeautre	35	30	Manque de référence et de maîtrise sur la culture
	Maïs grain	80	70	Cohérence avec SdC -75% P2 et essais actuels
	Triticale/Pois protéagineux Hiver	35	40	Actuellement 35-40 q/ha avec labour
	Sarrasin	10	15	Actuellement 15q/ha

Annexe VI : Détail des composantes des arbres satellites proposés par Craheix et al. 2011b





Annexe VII : Détail des valeurs seuils appliquées lors de la discrétisation des indicateurs  
(adapté de Craheix et al. 2011b)

Critère	Unité	Valeurs seuils
MSN Rentabilité	€/ha/an	Valeurs seuils basées sur la MSN avec aides du SdC de référence breton : <b>très faible</b> ≤ 800 < <b>faible à moyenne</b> ≤ 950 < <b>moyenne à élevée</b> ≤ 1100 < <b>très élevée</b>
IND Indépendance économique	%	<b>très faible</b> ≤ 20% < <b>faible à moyenne</b> ≤ 40% < <b>moyenne à élevée</b> ≤ 60% < <b>très élevée</b>
EFF Efficience économique	%	<b>très faible</b> ≤ 100 < <b>moyenne à faible</b> ≤ 150 < <b>moyenne à élevée</b> ≤ 200 < <b>très élevée</b>
MAT Surcrot en matériel	%	<b>faible</b> (pas d'outils supplémentaires par rapport au SdC de référence) ; <b>moyen</b> (entre 1 et 5 outils supplémentaires) ; <b>élevé</b> (plus de 5 outils supplémentaires)
CRMC Cultures récoltées en mauvaises conditions	%	<b>très faible</b> = 0% < <b>faible à moyenne</b> ≤ 20% < <b>moyenne à élevée</b> ≤ 40% < <b>très élevée</b>
Effet de l'équipement limitant le tassement	Classe qualitative	<b>faible</b> (absence d'équipements) ou <b>élevé</b> (présence d'équipements)
Aptitude du sol à la fissuration	Classe qualitative	<b>très faible</b> (classe 4 et 5) ; <b>faible à moyenne</b> (classe 3) ; <b>moyenne à élevée</b> (classe 2) ; <b>très élevée</b> (classe 1)
Effet du travail du sol sur la régénération de la structure du sol	Classe qualitative	<b>très faible</b> (semis direct) ; <b>faible à moyenne</b> (travail superficiel + déchaumages) ; <b>moyenne à élevée</b> (travail profond occasionnel) ; <b>très élevée</b> (travail profond régulier)
Statut acido-basique initial	pH	<b>faible</b> ≤ 6 < <b>moyen</b> ≤ 7 < <b>élevé</b>
CEC	méq/100g de sol	<b>faible</b> ≤ 8 < <b>moyenne</b> ≤ 14 < <b>élevée</b>
EPA Effet des pratiques acidifiantes	Indice sans unité	<b>très faible</b> ≤ 3 < <b>faible à moyen</b> ≤ 5 < <b>moyen à élevé</b> ≤ 7 < <b>très élevé</b>
EAB Effet des amendements basiques	Unités neutralisantes/ha/an	<b>très faible</b> ≤ 150 < <b>faible à moyen</b> ≤ 250 < <b>moyen à élevé</b> ≤ 350 < <b>très élevé</b>
BCA Bilan cultural annuel moyen P	kg de P2O5/ha/an	<b>très faible</b> < -30 ≤ <b>faible</b> < -10 ≤ <b>moyen</b> < 10 ≤ <b>élevé</b> < 30 ≤ <b>très élevé</b>
BCA Bilan cultural annuel moyen K	kg de K2O/ha/an	<b>très faible</b> < -50 ≤ <b>faible</b> < -20 ≤ <b>moyen</b> < 20 ≤ <b>élevé</b> < 50 ≤ <b>très élevé</b>
RI Recyclage du P par les résidus de culture	kg de P2O5/ha/an	<b>faible</b> < 30 ≤ <b>moyen</b> < 60 ≤ <b>élevé</b>
RI Recyclage du K par les résidus de culture	kg de K2O/ha/an	<b>faible</b> < 50 ≤ <b>moyen</b> < 90 ≤ <b>élevé</b>
Pouvoir tampon	Classe qualitative	<b>faible</b> (sable, limon sableux) ; <b>moyen</b> (limon léger ou moyen) ; <b>élevé</b> (argile, limon argileux, limon argilo-sableux)
EPI Effet de la diversité des périodes d'implantation	Indice sans unité	<b>très faible</b> = 1 ; <b>faible</b> = 2 ; <b>moyenne</b> = 3 ; <b>élevée</b> = 4 ; <b>très élevée</b> ≥ 5
Effet du labour sur la maîtrise des adventices	Classe qualitative	<b>faible</b> (absence) ou <b>élevé</b> (présence)
EML Effet des méthodes de lutte contre les adventices	Indice sans unité	<b>faible</b> ≤ 4 < <b>moyen</b> ≤ 5 < <b>élevé</b>
DFC Effet de la diversité des familles cultivées sur la maîtrise des maladies et ravageurs	Indice sans unité	<b>faible</b> ≤ 1.7 < <b>moyen</b> ≤ 2.5 < <b>élevé</b>
Effet du travail du sol sur la maîtrise des maladies et ravageurs	Classe qualitative	<b>très faible</b> (semis direct) ; <b>faible à moyen</b> (TCS déchaumage) ; <b>moyen à élevé</b> (labour < 1an/3) ; <b>très élevé</b> (labour > 1an/3)
EML Effet des méthodes de lutte contre les maladies et ravageurs	Indice sans unité	<b>faible</b> < 1.5 ≤ <b>moyen</b> < 2.5 ≤ <b>élevé</b>
QSP Qualité sanitaire des produits	Indice sans unité	<b>élevée</b> ≤ 1 < <b>moyenne</b> < 2 ≤ <b>faible</b>
QTE Qualité technologique et esthétique	Indice sans unité	<b>faible</b> < 1.5 ≤ <b>moyenne</b> < 2 ≤ <b>élevée</b>
CENF Contribution à l'émergence de nouvelles filières	Indice sans unité	<b>nulle</b> = 0 < <b>moyenne</b> ≤ 0.5 < <b>élevée</b>
CIC Complexité des interventions culturales	Indice sans unité	<b>très faible</b> ≤ 1.6 < <b>faible à moyenne</b> ≤ 2.1 < <b>moyenne à élevée</b> ≤ 2.6 < <b>très élevée</b>
TVTE Temps de veille technico-économique	Nombre de cultures de la rotation	<b>faible</b> ≤ 3 < <b>moyen</b> ≤ 6 < <b>élevé</b>
Surcharge de travail	Classe qualitative	<b>élevée</b> (un ou plusieurs pics à plus de 60h par décade) ; <b>moyenne</b> (un ou plusieurs pics entre 40 et 60h par décade) ; <b>faible</b> (pics à moins de 40h par décade)
DIFF Difficulté physique	Nombre de contraintes physiques rencontrées/an	<b>faible</b> ≤ 1 < <b>moyenne</b> ≤ 3 < <b>élevée</b>
TOX Risque pour la santé de l'opérateur	Nombre de passages avec un produit classé Xn, T ou T+/an	<b>faible</b> < 1 ≤ <b>moyen</b> < 2 ≤ <b>élevé</b>
EMP Contribution à l'emploi	h/ha/an	<b>très faible</b> ≤ 4 h/ha/an < <b>faible à moyenne</b> < 5 h/ha/an ≤ <b>moyenne à élevée</b> < 6h/ha/an ≤ <b>très élevée</b>
FMP Fourniture de matières premières	Productivité surfacique ou de la MO	<b>très faible</b> < 70% ≤ <b>faible à moyenne</b> < 80 % ≤ <b>moyenne à élevée</b> < 90 % ≤ <b>très élevée</b>
MPNO3 Maîtrise des pertes en nitrates	Indicateur INDIGO ou Kg NO3- lessivés/ha/an	<b>très élevée</b> ≤ 20 < <b>moyenne à élevée</b> ≤ 40 < <b>faible à moyenne</b> ≤ 60 < <b>très faible</b>
Teneur initiale en phosphore	mg/kg	
Quantité de phosphore apportée en moyenne	Kg de P2O5/ha/an	<b>faible</b> ≤ 40 < <b>moyenne</b> < 100 ≤ <b>élevée</b>
MIA Méthode d'incorporation des amendements phosphatés	Classe qualitative	<b>faible</b> (pas d'apport ou incorporation au semis) ; <b>moyenne</b> (incorporation juste avant le semis) ; <b>élevée</b> (incorporation plus de 3 mois avant le semis)
MPEP Maîtrise des pertes de pesticides dans les eaux profondes	Indicateur INDIGO	<b>très faible</b> < 4 ≤ <b>faible à moyenne</b> < 7 ≤ <b>moyenne à élevée</b> < 9 ≤ <b>très élevée</b>
MPES Maîtrise des pertes de pesticides dans les eaux superficielles	Indicateur INDIGO	<b>très faible</b> < 4 ≤ <b>faible à moyenne</b> < 7 ≤ <b>moyenne à élevée</b> < 9 ≤ <b>très élevée</b>

MNH3 Maitrise des émissions de NH3	Indicateur INDIGO ou Kg NH3 volatilisés/ha/an	très élevée ≤ 7 < moyenne à élevée ≤ 20 < faible à moyenne ≤ 40 < très faible
MNO2 Maitrise émissions de N2O	Indicateur INDIGO ou Kg N2O émis/ha/an	très élevée ≤ 1 < moyenne à élevée ≤ 3 < faible à moyenne ≤ 6 < très faible
MPA Maitrise émissions pesticides air	Indicateur INDIGO	très faible < 4 ≤ faible à moyenne < 7 ≤ moyenne à élevée < 9 ≤ très élevée
MSO Maitrise du statut organique	Indicateur INDIGO	très faible < 4 ≤ faible à moyenne < 7 ≤ moyenne à élevée < 9 ≤ très élevée
SENS Sensibilité du milieu à l'érosion	Classe qualitative	très faible = 1 ; faible = 2 ; moyenne = 3 ; élevée = 4 ; très élevée = 5
DCPR Défaut de couverture en période à risque	Classe qualitative	faible ≤ 20% < moyen ≤ 40% < élevé
ETS Effet du travail du sol sur le risque d'érosion	Classe qualitative	très faible (Semis direct) ; faible à moyen (TCS + déchaumages) ; moyen à élevé (Labour < 1an/3) ; très élevé (Labour > 1an/3)
MAET Maitrise de l'accumulation des éléments toxiques	A fixer	faible à moyenne : produit organique apporté plus d'un an sur deux ; moyenne à élevée : produit organique apporté moins d'un an sur deux
IRCC Consommation d'eau en période critique	A fixer	très élevée : pas d'irrigation
DMEAU Demande en eau des cultures	mm/an	faible < 500 < moyenne < 750 mm/an < élevée
AUTEA Autonomie vis-à-vis de la ressource	%	faible < 75 < moyenne < 85 < élevée < 100 = très élevée
CEN Consommation énergétique	Indicateur INDIGO ou Mj/ha/an	faible ≤ 9000 < moyenne < 16000 ≤ élevée
EEN Efficience énergétique	Indice sans unité	faible < 6 ≤ moyenne < 9 ≤ élevée
PSPH Pression Phosphore	kg P 205 /ha/an	très faible ≤ 20 < faible à moyenne ≤ 40 < moyenne à élevée ≤ 60 < très élevée
Effet du travail du sol sur la macrofaune	Classe qualitative	très faible (Semis direct) ; faible à moyen (TCS + déchaumage) ; moyen à élevé (labour < 1an/3) ; très élevé (labour > 1an/3)
Effet IFT Insecticides sur la macrofaune et les insectes volants	Indice sans unité	nul = 0 < faible ≤ 0,75 < moyen ≤ 1,5 < élevé
EPI Effet de la diversité des périodes d'implantation sur la diversité floristique	Indice sans unité	très faible = 1 ; faible = 2 ; moyenne = 3 ; élevée = 4 ; très élevée ≥ 5
UHSL Effet de l'utilisation d'herbicides à spectre large sur la diversité floristique	Indice sans unité	nulle = 0 < faible à moyenne < 1 ≤ élevée
GBC Gestion des bords de champ	Classe qualitative	faible (Gestion non différenciée) ; moyenne (différenciée et extensive) ; élevée (Mélange multi-espèces adaptées ou couvert naturel spontané)
IFTT Effet des pesticides sur les microorganismes du sol	Indice sans unité	nul = 0 < faible ≤ 3 < moyen ≤ 5 < élevé

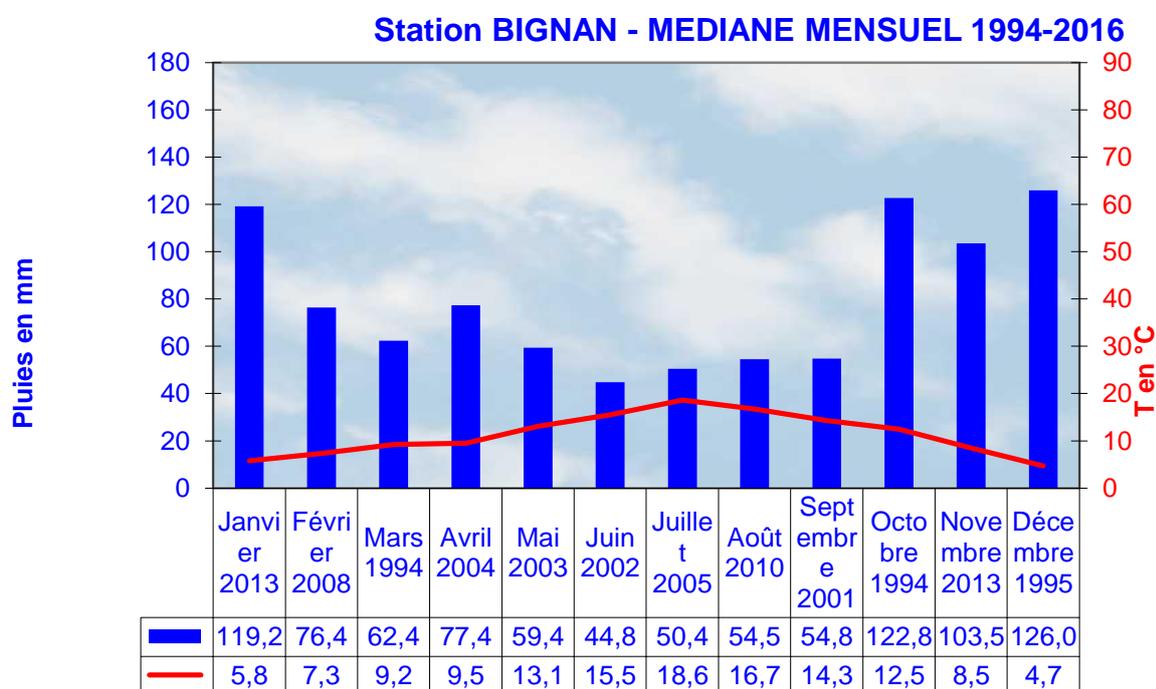
Annexe VIII : Données météorologiques de l'année climatique utilisée pour le paramétrage de CRITER 5.4 (Météo France 1994 à 2016).

Pour le paramétrage de CRITER, il est nécessaire de disposer d'une série climatique. Celle-ci est définie au minimum pour une année climatique (365 jours) et 3 variables au pas de temps journalier sont requises : la hauteur des précipitations, l'évapotranspiration (ETP) et la température moyenne (Hirschy et al. 2015).

Dans une analyse précédente, l'année climatique paramétrée pour CRITER avait été établie jour par jour, en réalisant une moyenne quotidienne des précipitations, des températures et des évapotranspirations (ETP) sur la période 1994-2014. Cependant, la moyenne ayant tendance à lisser les valeurs extrêmes et notamment les épisodes de gel, cette méthode s'est avérée non adaptée.

C'est pourquoi ici il s'est avéré préférable de construire une année climatique à partir de mois réels représentatifs du climat à Kerguéhennec entre 1994 et 2016. Pour cela, la médiane des cumuls de pluie mensuels a été réalisée, permettant de sélectionner douze mois médians considérés comme représentatifs en termes de pluviométrie.

A chacun des mois médians composant l'année climatique, correspond une température et une évapotranspiration réelles. Ces données mesurées ont donc été retenues pour obtenir une série climatique complète et cohérente.



### Annexe IX : Méthode de calcul de l'indicateur « Surcharge de travail »

Ce critère permet d'estimer la surcharge de travail en période de pointe engendrée par le système. Pour ce critère, MASC ne propose pas de méthode de calcul. Il est donc nécessaire de fixer une méthode ainsi que des valeurs seuils permettant de discriminer les systèmes.

Ce critère doit représenter l'accumulation d'un temps de travail important sur une courte période. L'échelle de temps retenue est la décade. Les données d'itinéraire technique permettent de calculer le temps de travail par décade : connaissant la performance de chaque outil en ha/h (barème d'entraide 2017), il est aisé de la convertir en temps de travail en h/ha. Connaissant la date de chaque intervention, on peut ainsi associer un temps de travail à la décade correspondant à l'intervention. On réalise cette opération pour chaque culture :

Culture	CIPAN	Intervention	Intervention	Durée (h/ha)	Fréquence	Date réalisé	JAN			FEV			MAR			
							Décade 1	Décade 2	Décade 3	Décade 4	Décade 5	Décade 6	Décade 7	Décade 8	Décade 9	
Colza d'hiver		Travail du sol	Canadien	0.8	1	05-août										
Colza d'hiver		Biocontrôle	Pulvérisateur	0.17	1	14-août										
Colza d'hiver		Faux semis	Vibroculteur	0.3	1	15-août										
Colza d'hiver		Semis	Combiné HR/semoir	0.7	1	25-août										
Colza d'hiver		Binage	Bineuse céréales	0.66	1	01-oct										
Colza d'hiver		Binage	Bineuse céréales	0.66	1	01-mars						0.66				
Colza d'hiver		Moisson	Moissonneuse	0.8	1	15-juil										
Colza d'hiver		Broyage des résidus	Broyeur	0.7	1	15-juil										
<b>Total interventions par décades</b>								0	0	0	0	0	0	0.66	0	0
<b>Total interventions par mois</b>										0			0			0.66

On somme par décade le temps de travail en h/ha pour chaque culture, pour obtenir le temps de travail en h/ha sur l'exploitation. Pour comparer les SdC entre eux, on ramène ce temps de travail à une exploitation de 60ha (taille d'une exploitation bretonne moyenne, Agreste 2017), composée de 60ha/x par culture, x étant le nombre d'années de la rotation. Cela permet de tenir compte de la dilution de la charge de travail lors de l'allongement de la rotation.

La fixation des valeurs seuils est réalisée en évaluant le temps de travail normal et le temps de travail maximal sur une décade (Direction de l'information légale et administrative 2018) :

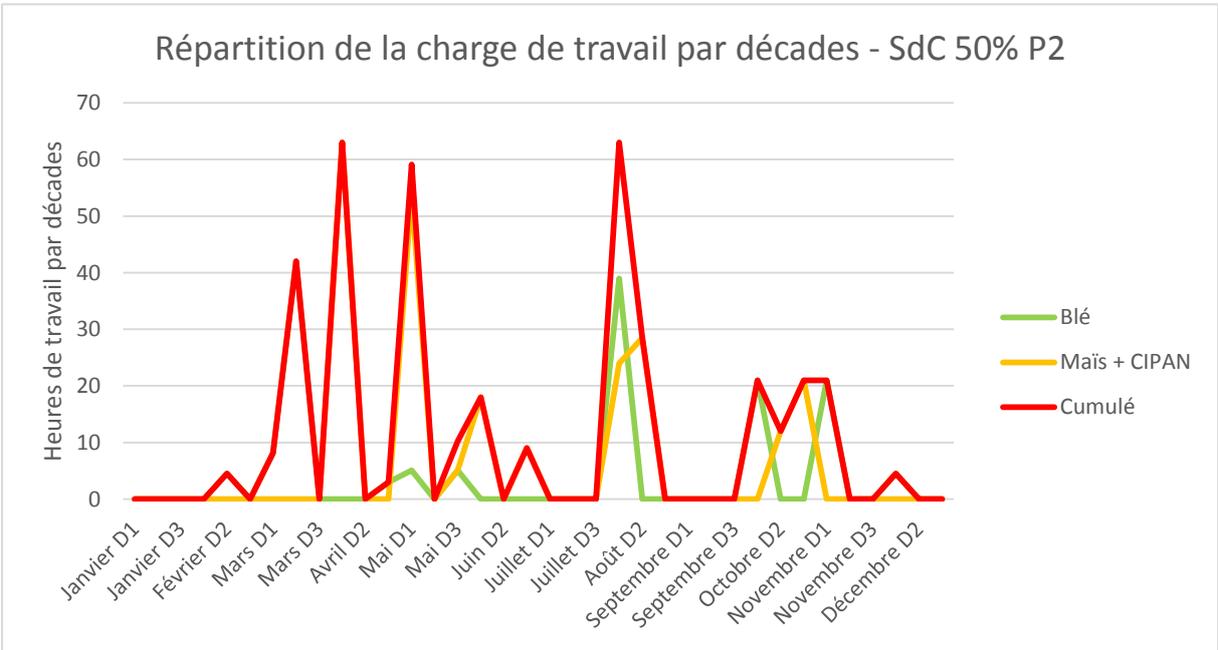
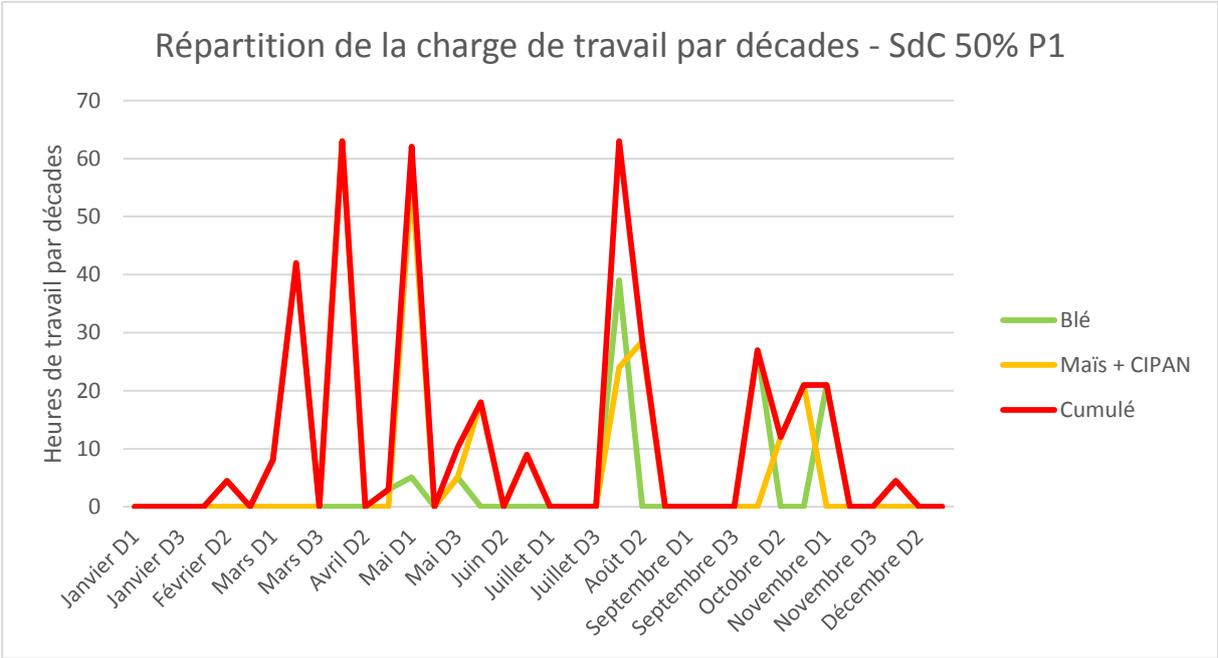
Jours ouvrés	250
Congés obligatoires (jours)	25
Jours travaillés/an	225
Durée légale du travail (h/jour)	7
Durée légale du travail (h/an)	1575
Durée légale du travail (h/décade)	43
Jours travaillés/décade	6
Durée maximale du travail (h/jour)	10
Durée maximale du travail (h/décade)	62

Les valeurs seuils retenues sont donc les suivantes :

- ◆ élevée
- ◇ moyenne
- ◇ faible

- Un ou plusieurs pics à plus de 60h/décade
- Un ou plusieurs pics entre 40 et 60h/décade
- Pics à moins de 40h/décade

La répartition de la charge de travail peut ensuite être représentée sur un graphique, tels que ceux-ci pour les SdC 50% :



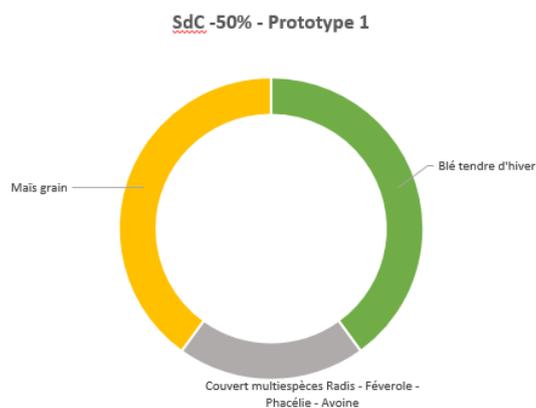
**Annexe X : Détail du calcul des indicateurs environnementaux (Hirschy et al. 2015 ; Craheix et al. 2011b)**

<b>Critère</b>	<b>Indicateurs basiques</b>	<b>Méthode</b>
Maîtrise des pertes de pesticides dans les eaux profondes	Maîtrise des pertes de pesticides dans les eaux profondes (MPEP)	Indicateur I-Phy de la méthode INDIGO® : Détermination d'un risque de perte par matière active, modulé par la dose de produit apportée, la fréquence d'application et la surface traitée. <b>Risque de perte MPEP</b> = f(Dose Journalière Admissible (DJA), potentiel de lessivage, incorporation ou non, couverture du sol) <b>Risque de perte MPES</b> = f(Demi vie, DJA, Aquatox, pourcentage de dérive, potentiel de ruissellement, incorporation ou non, couverture du sol) <b>Risque de perte MPA</b> = f(Demi-vie, constante de Henry, DJA, incorporation ou non, couverture du sol)
Maîtrise des pertes de pesticides dans les eaux superficielles	Maîtrise des pertes de pesticides dans les eaux superficielles (MPES)	
Maîtrise des pertes de pesticides dans l'air	Maîtrise des pertes de pesticides dans l'air (MPA)	
Maîtrise des pertes de NO3	MPNO3 = Lessivage Printanier + Lessivage Hivernal (Calcul proposé par la méthode INDIGO)	<b>LP = Σi Xi *coeff<sub>lessiv</sub> *F</b> , avec Xi dose d'azote de l'engrais i moins les pertes par volatilisation, F fréquence de période humide après l'apport <b>LH = Bilan N<sub>post récolte</sub> *coeff1<sub>lessiv</sub> + Bilan N<sub>drainage</sub> *coeff2<sub>lessiv</sub></b> , Avec : Bilan N <sub>postrecolte</sub> : bilan fournitures - besoins en azote de la récolte au début de la période de drainage (janvier), basé sur l'objectif de rendement coeff1 <sub>lessiv</sub> = coeff de Burns sol nu - consommation en eau hivernale Bilan N <sub>drainage</sub> : Bilan entrée-sortie de l'azote minéral sur la période de drainage (janvier-mars) coeff2 <sub>lessiv</sub> = coeff de Burns/2
Maîtrise des pertes de phosphore	Maîtrise de l'érosion, Teneur en phosphore du sol, quantité de phosphore apportée en moyenne, méthode d'incorporation des amendements	Analyse de sol + Données d'itinéraire technique
Maîtrise des émissions de NH3	Maîtrise des émissions de NH3 (MPNH3 B)	Calcul issu de la méthode INDIGO® <b>MNH3 B = Σi (Quantité * Teneur N * Coefficient volatilisation)</b> , avec Quantité i la quantité d'azote minéral et organique apporté, teneur N i la proportion d'azote de l'engrais i, et le coefficient de volatilisation de l'ammoniac de l'engrais i fonction de la date d'apport.
Maîtrise des émissions de N2O	Maîtrise des émissions de N2O (MN2O)	Calcul issu de la méthode INDIGO® <b>MN2O = (X' * 0,0125 + Nre * 0,0175) * Csol * Ctravailsol * Cmodeapport</b> avec X' : Dose totale d'azote (X) moins les pertes par volatilisation, Csol : facteur de pondération prenant en compte l'effet sol, Ctravailsol : facteur de pondération prenant en compte l'effet du travail du sol, Cmodeapport : facteur de pondération prenant en compte l'effet du mode d'apport. Dans le cas d'une légumineuse : <b>Emis. N2O = 3,0 kg N2O-N/ha</b> <b>DCPR = (NDC / NPR) x 100</b>
Maîtrise de l'érosion	Sensibilité du milieu, Défaut de couverture en période à risque (DCPR), Effet du travail du sol	Avec : NDC : Nombre de fois ou un défaut de couverture du sol est observé dans la rotation sur une période à risque (ici, automne/hiver) NPR : Nombre de périodes à risque comptabilisées sur l'ensemble de la rotation.
Maîtrise du statut organique du sol	Maîtrise du statut organique du sol (MSO)	Indicateur I-MO de la méthode INDIGO® <b>I-MO = 7 * [Ax / (Ar * P)]</b> avec Ax moyenne sur 4 ans des apports d'humus dus aux résidus de culture principale et intermédiaire et à la fertilisation organique, Ar Apport de matière organique nécessaire pour maintenir à long terme une teneur d'équilibre satisfaisante, P coefficient de pondération prenant en compte la profondeur de labour maximale sur 4 ans, la fréquence d'enfouissement des résidus et d'apports organiques et le type de travail du sol.
Maîtrise de l'accumulation des éléments toxiques	Maîtrise de l'accumulation des éléments toxiques (MAET)	RdD à dire d'experts, dépendant de la fréquence d'apport de fertilisant : produit organique apporté plus d'un an sur deux : maîtrise "faible à moyenne" ; moins d'un an sur deux : maîtrise "moyenne à élevée"
Consommation d'eau en période critique	Consommation d'eau en période critique (IRCC)	<b>IRRC = (Σi lpci) / n</b> Avec lpci : Quantité d'eau d'irrigation par décade pour la culture i en période critique.
Dépendance vis-à-vis de la ressource en eau	Demande en eau des cultures, Autonomie de la ressource	<b>•DMEAU = (Σi ETM i) / n</b> Avec ETMi somme des ETM journaliers d'une culture i, du semis à la récolte. ETM = Kc x ETP Avec ETP : Evapotranspiration potentielle quotidienne et Kc coefficient cultural spécifique <b>•AUTEA</b> fixée à "très élevée" en absence d'irrigation
Consommation en énergie	CEN B = CEN Méca B + CEN Ferti B + CEN Phyto B + CEN Séchage B	Indicateur I-EN de la méthode INDIGO® <b>CEN B = [Σi, Consommation carburant i * 0.04] + [Σi, (quantité engrais i * coeff.énergétique,)/1000] + [Σi, (Σk (coeff.énergétique * Dose/10<sup>6</sup>), k) * Dose, * fréquence] + [3.45 * Rdt Brut * ((Humidité Récolte-Humidité réf)/(100-Humidité réf))]</b>
Efficacité énergétique	Efficacité énergétique (EEN)	<b>EEN = [ Σi (EPI / ETi) ] / n</b> Avec EPI : énergie produite l'année i en MJ/ha/an ETi : énergie consommée l'année i en MJ/ha/an
Pression Phosphore	Pression Phosphore (PSPH)	Moyenne sur le système de culture des apports de P2O5 provenant de ressources non renouvelables
Conservation des insectes volants	Effet de la diversité des familles cultivées, IFT Insecticides	<b>• DFC = 1 / [Σi (ni/N)<sup>2</sup>]</b> avec ni nombre de cultures de la famille i <b>• IFT = (DA x ST) / (DH x SP)</b> avec DA : dose appliquée, ST : surface traitée, DH : dose homologuée, SP : surface parcellaire
Conservation de la macrofaune du sol	Effet du travail du sol, Effet des apports de matière organique, IFT Insecticides	Données d'itinéraire technique + Indicateur I-MO de la méthode INDIGO + Calcul IFT
Diversité floristique	Effet de la diversité des périodes d'implantation (EPI), Utilisation d'herbicides à spectre large, Gestion des bords de champ	EPI = nombre de périodes de semis dans la rotation ; IFT herbicides spectre large ; Gestion des bords de champ : "moyenne" pour tous les SdC, ce point devant être étudié dans les mois à venir
Conservation des micro-organismes du sol	Effet des apports de matière organique, des pesticides et de la diversité des familles cultivées	Indicateur I-MO de la méthode INDIGO ; IFT total ; <b>DFC = 1 / [Σi (ni/N)<sup>2</sup>]</b> avec ni nombre de cultures de la famille i

\*N : nombre de cultures de la rotation    \*n : durée de la rotation en années

## Annexe XI : Détail des itinéraires techniques de chacun des prototypes après ajustement des rendements

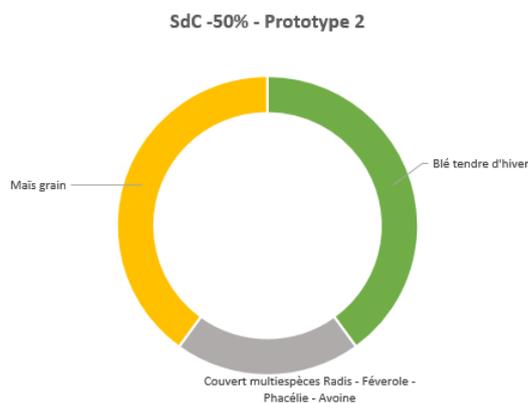
Fertilisation organique 24m3 (10/04)  
 Préparation du sol : Labour 20 cm (01/05)  
 Semis (05/05) 90000 gr/ha, **Obj. 95 qx/ha**  
 Gestion adventices : Herbicide\*2 (Milagro 0.2 + Callisto 0.2) + Binage\*1 ou 2  
 Récolte (20/10) : cannes broyées et enfouies



Couvert étouffant + structurant + apport N  
 Déchaumage 07/08 - Semis et Roulage 15/08 –  
 Destruction cover crop 10/04

Préparation du sol : Labour 20 cm (25/10)  
 Semis combiné HR (10/11) 260gr/m2, **Obj. 90 qx/ha**  
 Gestion adventices : Herse étrille + Herbicide\*2 (Biscoto IFT 0.6 + Starane Gold IFT 0.3)  
 Fertilisation minérale 90 kg/ha (01/03) + organique 25m3 (15/03) + minérale 90 kg/ha (25/04) (Pilotage par drone/Outils d'aide à la décision (OAD))  
 Gestion maladies : Mélange 4 variétés résistantes à la verse, la septoriose et la rouille jaune + Fongicide\*2 (Adexar 0.5 + Prosoaro 0.5)  
 Récolte (01/08) : pailles exportées

Fertilisation organique 24m3 (10/04)  
 Préparation du sol : Canadien (01/05)  
 Semis (05/05) 90000 gr/ha **Obj. 90 qx/ha**  
 Gestion adventices : Herbicide\*2 (Milagro 0.2 + Callisto 0.2) + Binage\*1 ou 2  
 Récolte (20/10) : cannes broyées et enfouies



Couvert étouffant + structurant + apport N  
 Déchaumage 07/08 - Semis et Roulage 15/08 –  
 Destruction cover crop 10/04

Préparation du sol : Cover crop (25/10)  
 Semis combiné HR (10/11) 260gr/m2, **Obj. 85 qx/ha**  
 Gestion adventices : Herse étrille + Herbicide\*2 (Biscoto IFT 0.6 + Starane Gold IFT 0.3)  
 Fertilisation minérale 90 kg/ha (01/03) + organique 25m3 (15/03) + minérale 90 kg/ha (25/04) (Pilotage par drone/Outils d'aide à la décision (OAD))  
 Gestion maladies : Mélange 4 variétés résistantes à la verse, la septoriose et la rouille jaune + Fongicide\*2 (Adexar 0.5 + Prosoaro 0.5)  
 Récolte (01/08) : pailles exportées

Préparation du sol : Labour 15 cm (16/02) + Vibroculteur (25/02)

Semis (01/03) 50 gr/m<sup>2</sup>, Obj. 25 qx/ha

Gestion adventices : Bineuse\*1 + Herbicide (Centium 36S 0.5 + Challenge 600 0.4)

Gestion maladies : Fongicide (Amistar 0.5)

Récolte (01/09) : pailles enfouies

Couvert étouffant + structurant + apport N  
Semis 10/08 – Destruction 15/02

Semis combiné DDI (10/11), 300 gr/m<sup>2</sup>, Obj. 75 qx/ha

Gestion adventices : Interculture + Hersage\*2 + Herbicide (Biscoto 0.5)

Fertilisation (15 et 25/03) minérale 90 kg/ha + organique 10m<sup>3</sup>

Gestion maladies : mélange 4 variétés résistance verse, rouille jaune, septoriose + Fongicide (Osiris Win 0.5)

Récolte (01/08) : pailles exportées

Préparation du sol : DDI\*1 ou 2 (15/09)

Semis (05/11) 280 gr/m<sup>2</sup> Obj. 70 qx/ha

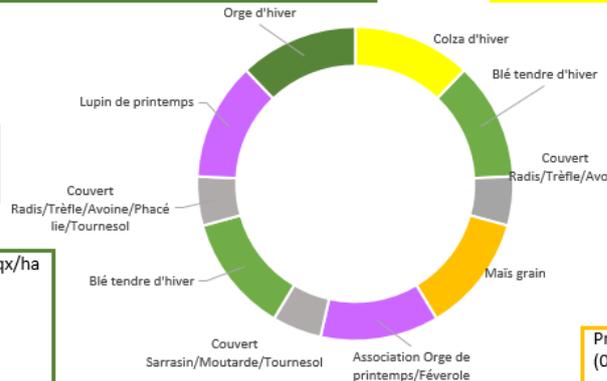
Gestion adventices : Herbicide (Ariane Sel 0.5)

Fertilisation minérale (02/03) 120 kg/ha

Gestion maladies : Fongicide si besoin (Adexar 0.4)

Récolte (10/07) : pailles exportées **SdC -75%**

**Prototype 1**



Préparation du sol : Labour 25 cm (30/01)

Semis combiné HR, précoce (30/01), 200+15 gr/m<sup>2</sup> Obj. 40 qx/ha

Fertilisation minérale 90 kg/ha (01/03)

Gestion adventices : Herse étrille\*1 (01/03)

Gestion maladies : Variétés tolérantes, Fongicide si besoin (Prosaro 0.6)

Récolte (15/08) : pailles enfouies

Préparation du sol + Gestion adventices : DDI\*2 (faux semis) (12/07 et 05/08)

Semis (15/08) 2kg/ha, Mélange variétal (ES Alicia) + Plantes compagnes, **Obj. 37 qx/ha**

Fertilisation organique 15m<sup>3</sup> (10/08) + minérale 135 kg/ha (01/03) (OAD)

Gestion maladies : Biocontrôle CONTANS WG, Fongicide (Prosaro IFT 0.8)

Récolte (20/07) : cannes broyées et enfouies

Préparation du sol (25/07 au 25/10) : DDI\*2 + Vibroculteur + Labour si besoin

Semis combiné DDI (10/11) 300gr/m<sup>2</sup>, Obj. 75 qx/ha

Gestion adventices : Hersage\*2 + Herbicide (Biscoto 0.5)

Fertilisation (15 et 25/03) minérale 90 kg/ha + organique 10m<sup>3</sup>

Gestion maladies : mélange 4 variétés résistance verse, rouille jaune, septoriose + Fongicide (Osiris Win 0.5)

Récolte (01/08) : pailles exportées

Préparation du sol : Labour 15 cm si besoin (15/03) + Canadien (09/05)

Fertilisation organique 21m<sup>3</sup> (15/04)

Semis (10/05) 95000 gr/ha Obj. 90 qx/ha

Gestion adventices : Herse étrille\*2 + Bineuse\*2 ou Désherbinage (Milagro 0.2 + Callisto 0.2 sur le rang)

Récolte (01/11) : cannes broyées et enfouies

Préparation du sol : Labour 15 cm (05/03)

Semis combiné HR (10/03) : 200+45 gr/m<sup>2</sup>, Obj. **35 qx/ha**

Gestion adventices : Herbicide (Prowl 400 0.5)

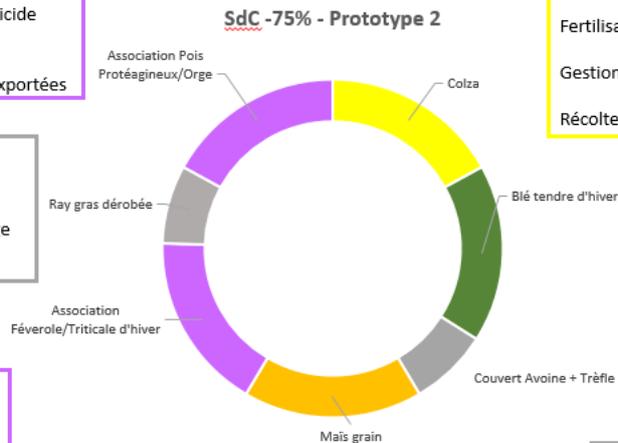
Récolte (01/08) : pailles exportées

Couvert à développement rapide + valorisation économique  
Semis 16/08, Obj. 2 tMS/ha - Enrubannage 01/03

Préparation du sol : Canadien (10/11)

Semis combiné HR (15/11), 200+20 gr/m<sup>2</sup>, Obj. **30 qx/ha**

Récolte (01/08) : pailles enfouies



**SdC -75% - Prototype 2**

Fertilisation organique 21m<sup>3</sup> (15/04)

Préparation du sol : Labour 15 cm (15/04) + Vibroculteur (10/05)

Semis (20/05) : 105000 gr/ha Obj. **90 qx/ha**

Gestion adventices : Herse étrille\*2 + Bineuse\*2

Récolte (01/11) : cannes broyées et enfouies

Préparation du sol : Labour 15 cm (15/08) + Vibroculteur (17/08)

Herbisemis (20/08) : 25 gr/m<sup>2</sup> Mélange variétal (Alicia) Obj. 37 qx/ha

Gestion adventices : Herbisemis (Alabama IFT 1 sur le rang) + Binage + Semis trèfle blanc

Fertilisation (16/08 et 25/02) organique 15m<sup>3</sup> + minérale 60 kg/ha

Gestion maladies : Biocontrôle CONTANS WG, Fongicide (Prosaro 0.5)

Récolte (15/07) : cannes enfouies

Semis : direct sous couvert (01/11), 300gr/m<sup>2</sup> Obj. 80 qx/ha

Gestion adventices : Herbicide (Biscoto 0.8)

Fertilisation (20/02 et 15/03) organique 13m<sup>3</sup> + minérale 90 kg/ha

Gestion maladies : mélange 4 variétés + Fongicide à DFE (Osiris Win 0.4)

Récolte (01/08) : pailles exportées

Couvert étouffant + apport N  
Semis avoine sous couvert de trèfle 10/08 - Broyage 01/03

Préparation du sol (05 et 10/11) : Canadien + Vibroculteur  
 Semis combiné HR (15/11), 40 gr/m<sup>2</sup>, Obj. **30 qx/ha**  
 Gestion adventices : Herse étrille\*2 + Ecimeuse  
 Récolte (01/08) : pailles enfouies

Préparation du sol : Canadien (05/08)  
 Gestion adventices : Vibroculteur (faux semis) + Binage\*2  
 Semis combiné HR (25/08) : Mélange variétal (Alicia), 1 rg sur 2, 2.5kg/ha, Obj. **17.5 qx/ha**  
 Gestion maladies : Biocontrôle CONTANS WG, résistance phoma  
 Récolte (15/07) : cannes enfouies

### SdC Bio - Prototyp 1

Rupture du cycle des bioagresseurs  
 Semis 15/07  
 Récolte 01/11 → Débouché économique

Préparation du sol : Canadien (15/08)  
 Semis combiné HR (01/11) : 300gr/m<sup>2</sup>, Obj. **20 qx/ha**  
 Gestion adventices : Herse étrille\*2 + Ecimeuse  
 Récolte (15/07) : pailles exportées



Préparation du sol : Canadien\*2 (01/08 et 01/09)  
 Semis combiné HR (10/11) : 300+15 gr/m<sup>2</sup>, Obj. **35 qx/ha**  
 Gestion adventices : Hersage\*2 + Ecimage  
 Gestion maladies : mélange variétal + résistance rouille  
 Récolte (01/08) : pailles enfouies

Couvert étouffant + structurant  
 Semis 15/08  
 Roulage 01/02

Préparation du sol : Labour 20 cm (15/11)  
 Semis combiné HR (15/11) : 350 gr/m<sup>2</sup>, Obj. **30 qx/ha**  
 Gestion adventices : Herse étrille\*2 + Ecimeuse  
 Gestion maladies : Mélange variétés tolérantes septoriose rouille jaune  
 Récolte (01/08) : pailles enfouies

Préparation du sol : Vibroculteur (faux semis 01/03) + Vibroculteur (15/04)  
 Fertilisation organique 7t/ha (15/04)  
 Semis (15/05) : 100000 gr/ha, Obj. 70 qx/ha  
 Gestion adventices : Herse étrille (faux semis) + Rotoétrille\*2 + Bineuse\*2  
 Récolte (02/11) : cannes broyées et enfouies

Gestion adventices : Faux semis (Herse rotative + Herse étrille\*2)  
 Semis combiné HR (20/05) : 45kg/ha, Obj. **15 qx/ha**  
 Récolte (25/09) : pailles enfouies

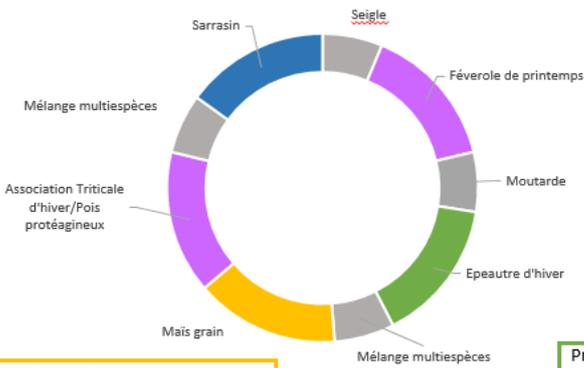
Couvert étouffant + structurant  
 Semis 01/10  
 Broyage 15/02

Couvert étouffant + structurant + apport d'azote  
 Déchaumage 20/07  
 Semis 05/08  
 Broyage 15/02

Préparation du sol : Labour 20 cm (15/02)  
 Semis combiné HR (15/02), 50 gr/m<sup>2</sup>, Obj. **30 qx/ha**  
 Gestion adventices : Herse étrille\*2  
 Gestion maladies : Mélange variétal  
 Récolte (01/09) : pailles enfouies

### SdC Bio - Prototyp 2

Préparation du sol : Labour 20 cm (15/11)  
 Semis combiné HR (15/11) : 200+45 gr/m<sup>2</sup>, Obj. **40 qx/ha**  
 Gestion adventices : Herse étrille\*2  
 Gestion maladies : mélange variétal  
 Récolte (15/07) : pailles enfouies



Couvert étouffant + structurant  
 Déchaumage 05/09  
 Semis 10/09  
 Broyage 01/11

Fertilisation organique 6t/ha (01/04)  
 Préparation du sol : Labour 20 cm (01/04)  
 Gestion adventices : Faux semis (Herse rotative + Herse étrille\*2) + Herse étrille\*2 + Binage\*2  
 Semis + Roulage (20/05), 110000 gr/ha, Obj. **70 qx/ha**  
 Récolte (01/11) : cannes broyées et enfouies

Couvert étouffant + structurant + apport d'azote  
 Déchaumage 10/08  
 Semis 15/08  
 Broyage 15/02

Préparation du sol : Labour 20 cm (15/11)  
 Semis combiné HR (15/11), 350 gr/m<sup>2</sup>, Obj. **30 qx/ha**  
 Gestion adventices : Herse étrille\*3  
 Récolte (01/08) : pailles enfouies

## Annexe XII : Comparaison des sorties DEXi des prototypes -50%

### Comparison of options

Attribute	50% P1	50% P2 Ajusté
<b>Contribution au developpement durable</b>	<i>elevee</i>	<i>assez elev</i>
<b>Dimension economique</b>	<i>elevee</i>	moyenne
<b>Resultats economiques</b>	<i>tres eleve</i>	
Rentabilite	<i>moyenne a</i>	
<b>Autonomie economique</b>	<i>tres eleve</i>	
Independance economique	<i>tres eleve</i>	
Efficiency economique	<i>tres eleve</i>	<i>moyenne a</i>
Surcout en materiel	moyen	
<b>Capacite productive a long terme</b>	<i>moyenne a</i>	<i>tres faibl</i>
<b>Maitrise de la fertilité physico-chimique</b>	<i>moyenne a</i>	<i>faible a m</i>
<b>Maitrise du statut acido-basique du sol</b>	<i>moyenne a</i>	
<b>Maitrise de l etat structural du sol</b>	<i>faible a m</i>	<i>tres faibl</i>
<b>Maitrise de la fertilité phosphopotassique</b>	<i>tres eleve</i>	
<b>Maitrise des bioagresseurs</b>	<i>faible a m</i>	<i>tres faibl</i>
<b>Maitrise des maladies et ravageurs</b>	<i>faible a m</i>	<i>tres faibl</i>
<b>Maitrise des adventices</b>	<i>faible a m</i>	
<b>Contribution au developpement economique</b>	<i>tres faibl</i>	
<b>Qualite des produits</b>	<i>tres faibl</i>	
Qualite sanitaire	<i>faible</i>	
Qualite technologique et esthetique des produits	<i>elevee</i>	
Contribution a l emergence de filieres	nulle	
<b>Dimension sociale</b>	<i>elevee</i>	
<b>Satisfaction des attentes de la societe</b>	<i>tres eleve</i>	
Contribution a l emploi	<i>tres eleve</i>	
Fourniture de matieres premieres	<i>moyenne a</i>	
<b>Satisfaction des attentes de l agriculteur</b>	<i>moyenne a</i>	
<b>Facilite de mise en oeuvre</b>	<i>tres eleve</i>	
Complexite des itineraires techniques	<i>faible a m</i>	
Temps de veille technico-economique	<i>faible</i>	
<b>Qualite des conditions de travail</b>	<i>faible a m</i>	
Surcharge de travail	<i>elevee</i>	
Risque pour la sante de l applicateur	moyen	
Difficulte physique	<i>faible</i>	
<b>Dimension environnementale</b>	<i>elevee</i>	
<b>Contribution a la qualite du milieu</b>	<i>moyenne a</i>	
<b>Contribution a la qualite de l eau</b>	<i>moyenne a</i>	
<b>Maitrise des pertes de pesticides Eaux</b>	<i>tres eleve</i>	
Maitrise pertes dans les eaux profondes	<i>moyenne a</i>	
Maitrise pertes dans les eaux superficielles	<i>tres eleve</i>	
Maitrise des pertes de NO3	<i>moyenne a</i>	<i>tres eleve</i>
<b>Maitrise des pertes de P</b>	<i>faible a m</i>	
<b>Contribution a la qualite air</b>	<i>moyenne a</i>	
Maitrise des emissions de NH3	<i>faible a m</i>	
Maitrise des emissions de N2O	<i>moyenne a</i>	
Maitrise des emissions de pesticides Air	<i>tres eleve</i>	
<b>Preservation de la qualite du sol</b>	<i>faible a m</i>	
Maitrise de l accumulation d elements toxiques	<i>faible a m</i>	
Maitrise du statut organique	<i>moyenne a</i>	<i>tres eleve</i>
<b>Maitrise de l erosion</b>	<i>faible a m</i>	
<b>Pression sur les ressources abiotiques</b>	<i>faible a m</i>	
<b>Pression Eau</b>	<i>tres faibl</i>	
Conso. en eau d irrigation en periode critique	<i>faible</i>	
<b>Dependance vis a vis de la ressource en eau</b>	<i>faible</i>	
<b>Pression Energie</b>	<i>faible a m</i>	
Consommation en energie	moyenne	
Efficiency energetique	<i>eleve</i>	
Pression Phosphore	<i>tres faibl</i>	
<b>Conservation de la biodiversite</b>	<i>moyenne a</i>	
<b>Conservation de la macrofaune</b>	<i>faible a m</i>	<i>moyenne a</i>
<b>Conservation des insectes volants</b>	<i>faible a m</i>	
<b>Conservation de la macrofaune du sol</b>	<i>faible a m</i>	<i>tres eleve</i>
<b>Conservation de la flore</b>	<i>moyenne a</i>	
<b>Abondance floristique</b>	<i>moyenne a</i>	
<b>Diversite floristique</b>	<i>faible a m</i>	
<b>Conservation des micro-organismes du sol</b>	<i>moyenne a</i>	

## Annexe XIII : Comparaison des sorties DEXi des prototypes -75%

### Comparison of options

Attribute	SdC 75 P1 Ajusté	SdC 75 P2 Ajusté
<b>Contribution au developpement durable</b>	<i>assez elev</i>	moyenne
<b>Dimension economique</b>	<i>eleeve</i>	moyenne
<b>Resultats economiques</b>	<i>moyenne a</i>	<i>faible a m</i>
Rentabilite	<i>faible a m</i>	<i>tres faibl</i>
<b>Autonomie economique</b>	<i>tres eleve</i>	
Independance economique	<i>tres eleve</i>	
Efficience economique	<i>tres eleve</i>	<i>moyenne a</i>
Surcout en materiel	<i>eleve</i>	
<b>Capacite productive a long terme</b>	<i>moyenne a</i>	
<b>Maitrise de la fertilité physico-chimique</b>	<i>faible a m</i>	
<b>Maitrise du statut acido-basique du sol</b>	<i>moyenne a</i>	
<b>Maitrise de l etat structural du sol</b>	<i>moyenne a</i>	
<b>Maitrise de la fertilité phosphopotassique</b>	<i>tres faibl</i>	
<b>Maitrise des bioagresseurs</b>	<i>tres eleve</i>	<i>moyenne a</i>
<b>Maitrise des maladies et ravageurs</b>	<i>tres eleve</i>	<i>moyenne a</i>
<b>Maitrise des adventices</b>	<i>moyenne a</i>	
<b>Contribution au developpement economique</b>	<i>moyenne a</i>	<i>tres faibl</i>
<b>Qualite des produits</b>	<i>moyenne a</i>	<i>tres faibl</i>
Qualite sanitaire	moyenne	<i>faible</i>
Qualite technologique et esthetique des produits	<i>eleeve</i>	
Contribution a l emergence de filieres	<i>Moyenne</i>	
Qualite des produits	<i>eleeve</i>	
<b>Dimension sociale</b>	<i>eleeve</i>	moyenne
<b>Satisfaction des attentes de la societe</b>	<i>faible a m</i>	
Contribution a l emploi	<i>moyenne a</i>	
Fourniture de matieres premieres	<i>tres faibl</i>	
<b>Satisfaction des attentes de l agriculteur</b>	<i>tres eleve</i>	<i>moyenne a</i>
<b>Facilite de mise en oeuvre</b>	<i>moyenne a</i>	<i>faible a m</i>
Complexite des itineraires techniques	<i>faible a m</i>	<i>moyenne a</i>
Temps de veille technico-economique	moyen	
<b>Qualite des conditions de travail</b>	<i>tres eleve</i>	
Surcharge de travail	<i>faible</i>	moyenne
Risque pour la sante de l applicateur	<i>faible</i>	
Difficulte physique	<i>faible</i>	
Qualite des conditions de travail	moyenne	<i>eleeve</i>
<b>Dimension environnementale</b>	<i>faible a m</i>	<i>moyenne a</i>
<b>Contribution a la qualite du milieu</b>	<i>faible a m</i>	<i>tres eleve</i>
<b>Contribution a la qualite de l eau</b>	<i>faible a m</i>	<i>tres eleve</i>
<b>Maitrise des pertes de pesticides Eaux</b>	<i>tres eleve</i>	
Maitrise pertes dans les eaux profondes	<i>moyenne a</i>	<i>tres eleve</i>
Maitrise pertes dans les eaux superficielles	<i>tres eleve</i>	
Maitrise des pertes de NO3	<i>faible a m</i>	<i>moyenne a</i>
<b>Maitrise des pertes de P</b>	<i>faible a m</i>	<i>moyenne a</i>
<b>Contribution a la qualite air</b>	<i>tres eleve</i>	<i>moyenne a</i>
Maitrise des emissions de NH3	<i>moyenne a</i>	
Maitrise des emissions de N2O	<i>moyenne a</i>	
Maitrise des emissions de pesticides Air	<i>tres eleve</i>	<i>moyenne a</i>
<b>Preservation de la qualite du sol</b>	<i>tres faibl</i>	<i>faible a m</i>
Maitrise de l accumulation d elements toxiques	<i>faible a m</i>	
Maitrise du statut organique	<i>faible a m</i>	<i>moyenne a</i>
<b>Maitrise de l erosion</b>	<i>faible a m</i>	<i>moyenne a</i>
<b>Pression sur les ressources abiotiques</b>	<i>tres faibl</i>	
<b>Pression Eau</b>	<i>tres faibl</i>	
Conso. en eau d irrigation en periode critique	<i>faible</i>	
<b>Dependance vis a vis de la ressource en eau</b>	<i>faible</i>	
<b>Pression Energie</b>	<i>tres faibl</i>	
Consommation en energie	<i>faible</i>	
Efficience energetique	<i>eleve</i>	
Pression Phosphore	<i>tres faibl</i>	
<b>Conservation de la biodiversite</b>	<i>moyenne a</i>	
<b>Conservation de la macrofaune</b>	<i>moyenne a</i>	<i>faible a m</i>
<b>Conservation des insectes volants</b>	<i>tres eleve</i>	<i>moyenne a</i>
<b>Conservation de la macrofaune du sol</b>	<i>faible a m</i>	
<b>Conservation de la flore</b>	<i>moyenne a</i>	
<b>Abondance floristique</b>	<i>faible a m</i>	
<b>Diversite floristique</b>	<i>moyenne a</i>	<i>tres eleve</i>
<b>Conservation des micro-organismes du sol</b>	<i>moyenne a</i>	

## Annexe XIV : Comparaison des sorties DEXi des prototypes AB (sans arbres satellites)

### Comparison of options

Attribute	SdC AB P1 Ajusté	SdC AB P2 Ajusté
<b>Contribution au developpement durable</b>	moyenne	<i>elevee</i>
<b>Dimension economique</b>	<i>elevee</i>	<i>tres eleve</i>
<b>Resultats economiques</b>	<i>moyenne a</i>	<i>tres eleve</i>
Rentabilite	<i>moyenne a</i>	
<b>Autonomie economique</b>	<i>tres eleve</i>	
Independance economique	<i>tres eleve</i>	
Efficiency economique	<i>tres eleve</i>	
Surcout en materiel	<i>eleve</i>	moyen
<b>Capacite productive a long terme</b>	<i>tres eleve</i>	
<b>Maitrise de la fertilité physico-chimique</b>	<i>moyenne a</i>	<i>tres eleve</i>
<b>Maitrise du statut acido-basique du sol</b>	<i>moyenne a</i>	
<b>Maitrise de l'état structural du sol</b>	<i>moyenne a</i>	<i>tres eleve</i>
<b>Maitrise de la fertilité phosphopotassique</b>	<i>moyenne a</i>	
<b>Maitrise des bioagresseurs</b>	<i>tres eleve</i>	
<b>Maitrise des maladies et ravageurs</b>	<i>tres eleve</i>	
<b>Maitrise des adventices</b>	<i>moyenne a</i>	
<b>Contribution au developpement economique</b>	<i>tres eleve</i>	
<b>Qualite des produits</b>	<i>moyenne a</i>	<i>tres eleve</i>
Qualite sanitaire	moyenne	<i>elevee</i>
Qualite technologique et esthetique des produits	<i>elevee</i>	
Contribution a l'emergence de filieres	<i>tres eleve</i>	
Dimension sociale	moyenne	
<b>Satisfaction des attentes de la societe</b>	<i>tres faibl</i>	<i>faible a m</i>
Contribution a l'emploi	<i>faible a m</i>	<i>moyenne a</i>
Fourniture de matieres premieres	<i>tres faibl</i>	
<b>Satisfaction des attentes de l'agriculteur</b>	<i>moyenne a</i>	
<b>Facilite de mise en oeuvre</b>	<i>faible a m</i>	
Complexite des itineraires techniques	<i>moyenne a</i>	
Temps de veille technico-economique	moyen	
<b>Qualite des conditions de travail</b>	<i>tres eleve</i>	
Surcharge de travail	moyenne	
Risque pour la sante de l'applicateur	<i>faible</i>	
Difficulte physique	<i>faible</i>	
Dimension environnementale	moyenne	<i>elevee</i>
<b>Contribution a la qualite du milieu</b>	<i>faible a m</i>	<i>moyenne a</i>
<b>Contribution a la qualite de l'eau</b>	<i>moyenne a</i>	
<b>Maitrise des pertes de pesticides Eaux</b>	<i>tres eleve</i>	
Maitrise pertes dans les eaux profondes	<i>tres eleve</i>	
Maitrise pertes dans les eaux superficielles	<i>tres eleve</i>	
Maitrise des pertes de NO3	<i>moyenne a</i>	
<b>Maitrise des pertes de P</b>	<i>faible a m</i>	
<b>Contribution a la qualite air</b>	<i>tres eleve</i>	
Maitrise des emissions de NH3	<i>tres eleve</i>	
Maitrise des emissions de N2O	<i>moyenne a</i>	
Maitrise des emissions de pesticides Air	<i>tres eleve</i>	
<b>Preservation de la qualite du sol</b>	<i>tres faibl</i>	<i>faible a m</i>
Maitrise de l'accumulation d'elements toxiques	<i>moyenne a</i>	
Maitrise du statut organique	<i>faible a m</i>	
<b>Maitrise de l'erosion</b>	<i>tres faibl</i>	<i>faible a m</i>
<b>Pression sur les ressources abiotiques</b>	<i>tres faibl</i>	
<b>Pression Eau</b>	<i>tres faibl</i>	
Conso. en eau d'irrigation en periode critique	<i>faible</i>	
<b>Dependance vis a vis de la ressource en eau</b>	<i>faible</i>	
<b>Pression Energie</b>	<i>tres faibl</i>	
Consommation en energie	<i>faible</i>	
Efficiency energetique	<i>eleve</i>	
Pression Phosphore	<i>tres faibl</i>	
<b>Conservation de la biodiversite</b>	<i>moyenne a</i>	
<b>Conservation de la macrofaune</b>	<i>moyenne a</i>	
<b>Conservation des insectes volants</b>	<i>tres eleve</i>	
<b>Conservation de la macrofaune du sol</b>	<i>faible a m</i>	
<b>Conservation de la flore</b>	<i>moyenne a</i>	
<b>Abondance floristique</b>	<i>faible a m</i>	
<b>Diversite floristique</b>	<i>tres eleve</i>	<i>moyenne a</i>
<b>Conservation des micro-organismes du sol</b>	<i>moyenne a</i>	

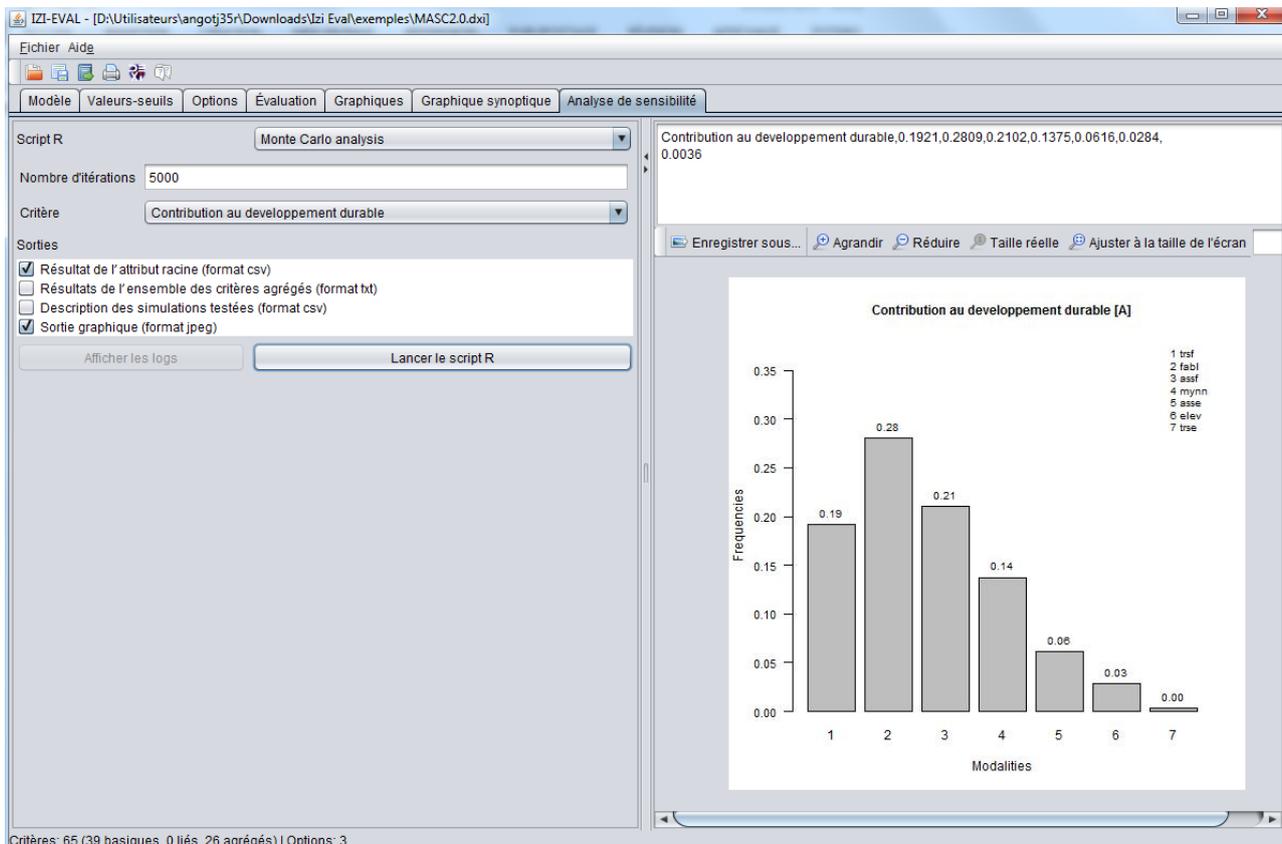
## Annexe XV : L'interface Izi-Eval, un complément aux fonctionnalités de DEXi (Craheix 2012)

L'interface IZI-EVAL est une interface d'évaluation multicritère de la durabilité des systèmes de production innovants, créée pour compléter les fonctionnalités présentes dans DEXi. Cette interface a été initiée en 2011 par l'INRA (Craheix 2012).

L'interface IZI-EVAL permet à partir de modèles développés sur DEXi (Craheix 2012) :

- d'intégrer l'étape de discrétisation des indicateurs en classes qualitatives
- de compléter la gamme de sorties graphiques proposées dans DEXi
- de réaliser des analyses de sensibilité sur les arbres de décision importés
- de faciliter la restitution d'un projet d'évaluation en formalisant de manière automatique la plupart des éléments relatifs au paramétrage.
- de revenir sur le logiciel DEXi pour modifier le paramétrage du modèle

Dans cette étude, l'utilisation d'IZI-EVAL se justifie pour son onglet «Analyse de sensibilité», qui permet d'établir un lien avec le logiciel de statistiques R. Les scripts de l'analyse Monte Carlo et de l'indice de sensibilité sont implémentés dans l'interface IZI-EVAL, ce qui permet de réaliser ces deux analyses à partir de n'importe quel modèle développé sous DEXi.



### Exemple d'analyse Monte Carlo exécutée sur le modèle MASC 2.0

## Annexe XVI : Perspectives pour une gestion différenciée des bords de champ

La notion de “bords de champs” caractérise une bande de quelques mètres située dans la bordure intérieure de la parcelle cultivée. Dans cette zone, la flore est très différente de celle développée au centre de la parcelle. Cette diversité floristique favorise la présence d’auxiliaires\* des cultures mais également améliore les continuités écologiques paysagères (Craheix et al. 2011b). Dans le cadre du projet SYNO’PHYT, plusieurs effets sont attendus d’une gestion différenciée des bords de champ : limiter la propagation d’adventices depuis le talus, réduire l’inoculum dans la parcelle, offrir des abris et ressources alimentaires de qualité aux auxiliaires afin de créer des réservoirs d’auxiliaires (Giteau 2017).

Pour évaluer l’impact du SdC sur la biodiversité, il est souhaitable de réaliser un diagnostic de biodiversité en amont et en aval des essais. Plusieurs méthodes permettent de réaliser ce diagnostic :

- **Méthode IBEA** (Indicateurs de Biodiversité des Exploitations Agricoles) : Logiciel d’évaluation de l’impact des pratiques agricoles sur la biodiversité, à l’échelle de l’exploitation (à vocation surtout pédagogique) (Ministère de l’Agriculture et de l’Alimentation 2014).
- **ECOBORDURE** : Indicateur d’évaluation de l’état écologique des bords de champs à partir de la flore, en lien avec les pratiques de gestion (Lanoë et al. 2015).
- **Protocoles du MNHN** (Observatoire national de la biodiversité sur les espaces agricoles) : Jeu de protocoles pouvant être réalisés en autonomie pour mesurer l’évolution de la biodiversité en lien avec les pratiques.
- **Boîte à outils du projet IBIS** : Démarche de diagnostic conseil à l’échelle de l’exploitation agricole et reliée à des enjeux de territoire. Une boîte à outils est mise à disposition (<https://goo.gl/o5mKCN>), comprenant un guide introductif sur les enjeux, un guide méthodologique à destination du conseiller, un référentiel de pratiques et d’aménagements (12 fiches sur les pratiques agricoles en lien avec la biodiversité, 12 fiches sur les aménagements, des fiches sur l’intérêt écologique de «Milieux» et d’«Espèces»), des exemples de diagnostics réalisés (Cervek 2012).

A la base de ces différentes méthodes, on retrouve des protocoles de relevés floristiques (biodiversité sauvage ou cultivée) et de relevés faunistiques (carabes, vers de terre, etc.)

## Annexe XVII : Ex ante assessment results for the 50% CS

	SdC 50% P1	SdC 50% P2
<b>Contribution to sustainable development</b>		
<i>...Economic dimension</i>		
<b>..Economic results</b>		
<i>...Profitability</i>		
<i>...Economic autonomy</i>		
<i>...Subsidies independence</i>		
<i>...Economic efficiency</i>		
<i>...Specific equipments needs</i>		
<b>..Long term productive capacity</b>		
<i>...Physical and Chemical fertility</i>		
<i>...Soil structure</i>		
<i>...Soil acid-base status</i>		
<i>...P-K fertility</i>		
<i>...Pests and weeds control</i>		
<i>...Weeds control</i>		
<i>...Pests control</i>		
<b>..Contribution to economic development</b>		
<i>...Products quality</i>		
<i>...Technological quality</i>		
<i>...Sanitary quality</i>		
<i>...New supply chain emergence</i>		
<i>...Social dimension</i>		
<b>..Farmer's satisfaction</b>		
<i>...Quality of working conditions</i>		
<i>...Workload distribution</i>		
<i>...Physical difficulty</i>		
<i>...Pesticides use risk</i>		
<i>...Ease of implementation</i>		
<i>...System complexity</i>		
<i>...Technical monitoring</i>		
<b>..Society's satisfaction</b>		
<i>...Employment contribution</i>		
<i>...Supply of raw materials</i>		
<i>...Environmental dimension</i>		
<b>..Contribution to environment quality</b>		
<i>...Water quality</i>		
<i>...Pesticides losses in water</i>		
<i>...Groundwater</i>		
<i>...Surface water</i>		
<i>...NO3 losses</i>		
<i>...Phosphorus losses</i>		
<i>...Air quality</i>		
<i>...NH3 volatilisation</i>		
<i>...N2O emissions</i>		
<i>...Pesticides emissions in air</i>		
<i>...Soil quality</i>		
<i>...Soil erosion contrôle</i>		
<i>...Organic matter status</i>		
<i>...Accumulation of toxic elements</i>		
<b>..Pressure on resources</b>		
<i>...Pressure on water resource</i>		
<i>...Pressure on energy resource</i>		
<i>...Energy consumption</i>		
<i>...Energetic efficiency</i>		
<i>...Pressure on phosphorus resource</i>		
<b>..Biodiversity conservation</b>		
<i>...Macrofauna conservation</i>		
<i>...Soil macrofauna</i>		
<i>...Flying insects</i>		
<i>...Flora conservation</i>		
<i>...Flora abundance</i>		
<i>...Flora diversity</i>		
<i>...Microorganisms conservation</i>		



## Annexe XVIII : Ex ante assessment results for the 75% CS

	SdC 75% P1	SdC 75% P2
<b>Contribution to sustainable development</b>		
<b>Economic dimension</b>		
<b>..Economic results</b>		
...Profitability		
...Economic autonomy		
...Subsidies independence		
...Economic efficiency		
... Specific equipments needs		
<b>..Long term productive capacity</b>		
...Physical and Chemical fertility		
...Soil structure		
...Soil acid-base status		
...P-K fertility		
...Pests and weeds control		
...Weeds control		
...Pests control		
<b>..Contribution to economic development</b>		
...Products quality		
...Technological quality		
...Sanitary quality		
...New supply chain emergence		
<b>Social dimension</b>		
<b>..Farmer's satisfaction</b>		
...Quality of working conditions		
...Workload distribution		
...Physical difficulty		
...Pesticides use risk		
...Ease of implementation		
...System complexity		
...Technical monitoring		
<b>..Society's satisfaction</b>		
...Employment contribution		
...Supply of raw materials		
<b>Environmental dimension</b>		
<b>..Contribution to environment quality</b>		
...Water quality		
...Pesticides losses in water		
...Groundwater		
...Surface water		
...NO3 losses		
...Phosphorus losses		
...Air quality		
...NH3 volatilisation		
...N2O emissions		
...Pesticides emissions in air		
...Soil quality		
...Soil erosion contrôle		
...Organic matter status		
...Accumulation of toxic elements		
<b>..Pressure on resources</b>		
...Pressure on water resource		
...Pressure on energy resource		
...Energy consumption		
...Energetic efficiency		
...Pressure on phosphorus resource		
<b>..Biodiversity conservation</b>		
...Macrofauna conservation		
...Soil macrofauna		
...Flying insects		
...Flora conservation		
...Flora abundance		
...Flora diversity		
...Microorganisms conservation		



## Annexe XIX : Ex ante assessment results for the Organic CS

	SdC AB P1	SdC AB P2
<b>Contribution to sustainable development</b>		
<b>Economic dimension</b>		
<b>..Economic results</b>		
...Profitability		
...Economic autonomy		
...Subsidies independence		
...Economic efficiency		
...Specific equipments needs		
<b>..Long term productive capacity</b>		
...Physical and Chemical fertility		
...Soil structure		
...Soil acid-base status		
...P-K fertility		
...Pests and weeds control		
...Weeds control		
...Pests control		
<b>..Contribution to economic development</b>		
...Products quality		
...Technological quality		
...Sanitary quality		
...New supply chain emergence		
<b>Social dimension</b>		
<b>..Farmer's satisfaction</b>		
...Quality of working conditions		
...Workload distribution		
...Physical difficulty		
...Pesticides use risk		
...Ease of implementation		
...System complexity		
...Technical monitoring		
<b>..Society's satisfaction</b>		
...Employment contribution		
...Supply of raw materials		
<b>Environmental dimension</b>		
<b>..Contribution to environment quality</b>		
...Water quality		
...Pesticides losses in water		
...Groundwater		
...Surface water		
...NO3 losses		
...Phosphorus losses		
...Air quality		
...NH3 volatilisation		
...N2O emissions		
...Pesticides emissions in air		
...Soil quality		
...Soil erosion contrôle		
...Organic matter status		
...Accumulation of toxic elements		
<b>..Pressure on resources</b>		
...Pressure on water resource		
...Pressure on energy resource		
...Energy consumption		
...Energetic efficiency		
...Pressure on phosphorus resource		
<b>..Biodiversity conservation</b>		
...Macrofauna conservation		
...Soil macrofauna		
...Flying insects		
...Flora conservation		
...Flora abundance		
...Flora diversity		
...Microorganisms conservation		







	Diplôme : Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage Spécialité : Ingénieur Agronome Spécialisation / option : Agroecology Enseignant référent : Guénola Pérès
Auteur(s) : Jeanne ANGOT Date de naissance : 03/12/1994	Organisme d'accueil : Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne
Nb pages : 26      Annexe(s) : 19	Adresse : Rue Maurice Le Lannou, CS n°74223, 35042 RENNES CEDEX
Année de soutenance : 2018	Maître de stage : Aurélien DUPONT
Titre français : <b>Co-conception et évaluation <i>ex ante</i> de trois systèmes de culture agroécologiques permettant une réduction forte de l'usage des produits phytosanitaires en Bretagne</b>	
Titre anglais : <b>Co-design and ex ante assessment of three agroecological cropping systems that aim at a substantial reduction of pesticides in Brittany.</b>	
<p><b>Résumé :</b> Pour réduire l'usage des produits phytosanitaires, le plan Ecophyto 2 appelle à une mutation profonde des systèmes de culture. Trois essais présentant un gradient de réduction de l'usage de ces produits (-50%, -75% et -100% par rapport à un système de référence breton) sont mis en place à Kerguéhennec (56) afin de produire des références sur de tels systèmes et favoriser leur adoption par les agriculteurs. Cette étude vise à concevoir les rotations et itinéraires techniques de ces trois essais, en mobilisant des leviers agroécologiques. Une approche systémique et participative est privilégiée. La co-conception en ateliers permet d'obtenir six prototypes candidats, deux pour chaque essai. Une évaluation multicritère est réalisée avec le modèle MASC pour évaluer la durabilité (économique, sociale et environnementale) de ces prototypes. Tous répondent à la réduction d'usage des produits phytosanitaires sans dégrader la contribution au développement durable par rapport à un système de référence. L'évaluation est discriminante entre les prototypes de chaque essai sur la note globale de contribution au développement durable, ce qui permet, en la complétant par une analyse détaillée des critères d'évaluation, de choisir trois prototypes prometteurs à expérimenter au champ. Le modèle MASC est discriminant et adaptable au contexte, mais le paramétrage des pondérations et valeurs seuils limite l'extrapolation des résultats. Ces essais permettront d'étudier les conséquences des réductions de produits phytosanitaires et d'accompagner la transition vers des systèmes agroécologiques.</p>	
<p><b>Abstract:</b> To reduce the use of phytosanitary products, the 2<sup>nd</sup> Ecophyto plan requires deep changes in the cropping systems. Three trials presenting a decreasing gradient of use of this products (-50%, -75% and -100% compared to a regional reference) are implemented in Kerguéhennec (56) to produce references on such cropping systems and promote their adoption by farmers. This study aims to design the rotations and cropping management practices of this trials, using agroecological levers. A systemic and participative approach is used. Co-design workshops allow to obtain six candidates prototypes, two for each trial. A multicriteria assessment is performed with the MASC model to assess the sustainability (economic, social and environmental) of this prototypes. All achieve the reduction of phytosanitary products use without degrading the overall sustainability compared to a regional reference. The assessment is discriminatory between the prototypes of each trial for the overall contribution to sustainable development, which allows, added to a detailed analysis of assessment criteria, to choose three promising prototypes to experiment on field. The MASC model is discriminatory and esay to adapt to the context, but the choices in weights and threshold values limit the extrapolation of the results. This trials will allow to study the consequences of phytosanitary products reduction and to accompany the transition towards agroecological cropping systems.</p>	
Mots-clés : MASC, Ecophyto, durabilité, co-conception, évaluation <i>ex ante</i> , système de culture Key Words: MASC, Ecophyto, sustainability, co-design, <i>ex ante</i> assessment, cropping system	