AGROCAMPUS OUEST

☐ **CFR Angers**

☑ **CFR Rennes**

Année universitaire : 2016 - 2017

Spécialité :

Ingénieur Agronome

Spécialisation / option :

Sciences et Productions Végétales / Ingénierie des Agrosystèmes

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)

Evaluation des performances de trois systèmes de culture innovants conduits en Bretagne entre 2012 et 2016

Par : Floriane BOUARD

Soutenu à RENNES ***le 12/09/2017***

Devant le jury composé de :

Président : Christine BISSUEL

Maître de stage : Jean-Luc GITEAU

Enseignant référent : Olivier GODINOT

Autres membres du jury (Nom, Qualité)

Julie AUBERGER (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

Remerciements

Je remercie ceux qui m'ont accompagnée tout au long de ce stage et plus particulièrement Jean-Luc Giteau (maître de stage, Chambre d'agriculture Bretagne CRAB), Aurélien Dupont (co-encadrant, CRAB) et Patrice Cotinet (CRAB) pour leur accueil, leur encadrement, leur disponibilité et leur aide. Un grand merci également à Marie-Anna Loaec, mon binôme de stage, pour son application au travail, son soutien et sa bonne humeur.

Merci également à David Méallet (CRAB), Annie Charter (CRAB), Didier Debroize (CRAB), Anne Guézengar (CRAB), San Lemarchand (stagiaire CRAB), Violaine Deytieux (INRA), Lionel Quéré (CRAB), David Bouillé (CRAB), Philippe Lannuzel (CRAB), Anne-Laure Bourigault (Assemblée Permanente des Chambres d'Agriculture), Charlotte Quénard (CRAB), Jean-Yves Carré (CRAB), Audrey Trevisiol (ADEME), Marc Jézéquel (Triskalia), Nina Rabourdin (Terres Inovia), Anne Laperche et François Husson (Agrocampus Ouest) pour leur aide ponctuelle mais nécessaire à la réalisation de ce rapport.

Enfin, parce que ce stage n'aurait pas été possible sans une ambiance agréable, je remercie pour leurs sourires et leur gentillesse les permanents de la station de Kerguéhennec, Patrice Cotinet, David Méallet, Yvon Lambert et Caroline Cocoual, tout comme les non-permanents, Jean-Luc Giteau et Aurélien Dupont, sans oublier les stagiaires Marie-Anna Loaec, Morgane Coulombel, Coralline Houise et San Lemarchand, ni les collègues d'Arvalis, Vincent Bouetel, Dominique Millet, Maëlle Le Bras et Christelle Guillet.

Table des matières

Glossaire
Liste des abréviations
Liste des figures et tableaux
Liste des annexes
Introduction……..1

I. Contexte et objectifs……...2
I.1. Contexte breton et enjeux……2
I.2. Concepts mobilisés……2
I.2.1. Système de culture innovant……2
I.2.2. Agricultures raisonnée, intégrée, biologique et agroécologie……3
I.2.3. Démarche générale de conception, d'expérimentation et d'évaluation des SdC innovants……4
I.3. Objectifs du stage……5

II. Matériels et méthodes……6
II.1. Dispositifs expérimentaux et SdC de référence……6
II.1.1. Présentation du SdC de référence Bretagne……6
II.1.2. Présentation du SdC Crécom intégré……6
II.1.3. Présentation du SdC Kerguéhennec intégré……7
II.1.4. Présentation du SdC Bio……7
II.2. Gestion des données……8
II.3. Evaluation des performances des SdC……9
II.3.1. Indicateurs de performance environnementale……9
II.3.2. Indicateurs de performance économique……10
II.3.3. Indicateurs de performance sociale……10
II.4. Bilan pluri-critères : performances globales des SdC……11

III. Résultats……11
III.1. Performance environnementale……11
III.1.1. Recours aux produits phytosanitaires : IFT……11
III.1.2. Qualité de l'eau : QSA et reliquats début drainage……12
III.1.3. Consommation et efficience énergétiques……13
III.2. Performance économique……13
III.2.1. Rendements……13
III.2.2. Rentabilité économique : produits, charges et marges……13
III.2.3. Valorisation économique du travail……14
III.3. Performance sociale……15
III.3.1. Charge de travail : temps de travail, nombre de passages et répartition du temps de travail……15
III.3.2. Risque pour la santé de l'applicateur : toxicité phytosanitaire……16
III.4. Bilan pluri-critères : performances globales des SdC……16

IV. Discussion……17
IV.1. Comparaison des résultats aux objectifs et à la littérature……17
IV.1.1. Performance environnementale : hypothèses 1 et 2……17

IV.1.2. Performance économique : hypothèses 3 et 4……..…...18
IV.1.3. Performance sociale : hypothèse 5……18
IV.1.4. Bilan pluri-critères : performances globales des SdC……19
IV.2. Recommandations d'optimisation des dispositifs……19
IV.2.1. Produits phytosanitaires : IFT, QSA, toxicité phytosanitaire……..19
IV.2.2. Fertilisation……....20
IV.2.3. Marges, temps de travail et consommation énergétique……....20
IV.3. Limites des essais et de l'évaluation et perspectives……..21
IV.3.1. Limites des essais……21
IV.3.2. Choix et élaboration du correctif des conditions pédoclimatiques……...21
IV.3.3. Evaluation pluriannuelle, pluri-critères et choix des Indicateurs……..…21
IV.3.4. Perspectives des essais……..22
Conclusion……..22
Références bibliographiques……23
Annexes……26

Glossaire

*Les termes définis dans le glossaire sont marqués par une étoile * pour le premier terme apparaissant dans le texte.*

A dires d'expert(s) : avis prononcé par une/des personne(s) compétente(s) sur un sujet donné.

Biocontrôle (produits de) : produits utilisant des mécanismes naturels pour lutter contre les bioagresseurs. Ils peuvent être des macroorganismes (insectes, acariens, nématodes) ou des produits phytopharmaceutiques composés de micro-organismes (champignons, bactéries, virus), de médiateurs chimiques (phéromones, kairomones) ou de substances naturelles d'origine végétale, animale ou minérale (MAAF, 2016 (a)).

Cohérence agronomique : capacité des règles de décision à atteindre les objectifs agronomiques fixés (efficacité des interventions) (Reau & Doré, 2008).

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* Milet, 2016).

Espérance d'un caractère (ex : rendement) : correspond à sa vraie moyenne dans la population donnée. Cette moyenne est différente de celle obtenue pour un échantillon de la population (Pagès, 2010).

Faisabilité technique : possibilité de mise en œuvre d'une pratique culturale ou une/des règle(s) de décision dans un contexte donné. La faisabilité s'évalue en considérant l'écart entre les interventions réalisées et prévisionnelles en termes de fréquence de réalisation des pratiques prévisionnelles (Reau & Doré, 2008 ; Havard et al, 2017).

Indicateur : variable quantitative ou qualitative 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). Les indicateurs doivent être pertinents, faciles à obtenir, compréhensibles et non redondants (Reau & Doré, 2008).

Itinéraire technique (ITK) : « combinaison logique et ordonnée de techniques culturales qui permettent de contrôler le milieu et d'en tirer une production donnée » (Sebillotte, 1974, *in* Sebillotte 1992).

Méthode alternative : repose sur la mise en œuvre d'un ensemble de pratiques autres que la lutte chimique agissant à différentes étapes du cycle des bioagresseurs et de la culture dans le but de limiter la contamination de la culture par les bioagresseurs, leur développement et leur incidence. Les méthodes alternatives peuvent être le contrôle cultural, le contrôle génétique, la lutte physique, la lutte biologique (Aubertot et al, 2011).

Normalisé (rendement) : Le rendement normalisé d'une culture correspond à son rendement brut ramené à la norme commerciale d'humidité. Les normes sont les suivantes :

- blé tendre et triticale : 15% d'humidité (Agreste Bretagne, 2017)
- colza : 9% (Agreste Bretagne, 2017)
- maïs grain : 15% d'humidité (Agreste Bretagne, 2017)
- pois et féverole : 14% d'humidité (Chambre d'agriculture Bourgogne, 2016)
- sarrasin : 14% d'humidité (Chambre d'agriculture Bourgogne, 2016)

Potentiel de production (sol) : capacité de production du sol liés à sa fertilité (richesse en éléments), à sa capacité à exporter ces éléments et aux pratiques culturales (Reau & Doré, 2008).

Quantile 90 (cas de la concentration en nitrates dans l'eau) : concentration pour laquelle 90% des mesures sont inférieures (Agreste Bretagne, 2017).

Règle de décision (RdD) : règle du type « si… alors… sinon… » permettant de cadrer les choix techniques utilisés pour répondre aux objectifs et de les adapter aux conditions annuelles et parcellaires (climat, pression biotique, évolution des cultures) (Meynard, 2012).

Stratégie agronomique : ensemble cohérent constitué d'une fonction à remplir et des solutions qui la servent (Havard et al, 2017).

Substance(s) active(s) (d'un produit phytosanitaire) : molécule(s) constituant le(s) principe(s) actif(s) qui agit(ssent) sur la/les cible(s) du produit phytosanitaire (MAAF, 2016 (a)).

Système décisionnel : combinaison théorique des stratégies et règles de décision à appliquer pour répondre aux attentes du SdC (Havard et al, 2017).

Système pratiqué prévisionnel : synthèse des interventions culturales et des rendements, estimés ou modélisés (Havard et al, 2017).

Zone d'Actions Renforcées (ZAR) : définie dans le 5^{e} programme d'actions breton de la Directive Nitrate pour une simplification des zonages, la ZAR regroupe les bassins contentieux eau brute (BVC), les bassins versants algues vertes (BVAV), les anciennes zones d'actions complémentaires (ZAC) et zones d'excédents structurels (ZES). Les exploitations agricoles en ZAR ont des obligations supplémentaires en termes de fertilisation (balance globale azotée limitée à 50 kg N/ha SAU/an en plus de la quantité d'azote organique épandue limitée à 170 kg N/ha SAU/an) (DREAL Bretagne, 2014).

Liste des abréviations

Analyse en Composantes Principales : ACP
Agriculture biologique : AB
Assemblée Permanente des Chambres d'Agriculture : APCA
Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne : CRAB
Charges de mécanisation : CM
Charges opérationnelles : CO
Culture Intermédiaire Piège à Nitrates : CIPAN
Démontrer, Expérimenter, Produire des références sur les systèmes économes en PHYtosanitaires : DEPHY
Equivalent litre de fuel : EQF
Indice de Fréquence de Traitement : IFT
Itinéraire technique : ITK
Kerguéhennec : Kerg.
Marge semi-nette : MSN
Marge brute : MB
Organisation Internationale de Lutte Biologique : OILB
Outil d'aide à la décision : OAD
Pour L'ANalyse énergETique des Exploitations agricoles : PLANETE
Produit grains + paille : produit G+P
Quantité de Substances Actives : QSA
Règle de décision : RdD
Réseau Mixte Technologique « Systèmes de culture innovants » : RMT SdCi
Reliquat début drainage : RDD (attention : à ne pas confondre avec RdD)
Système de culture : SdC
Unité de travail humain : UTH

Seront abrégées comme suit les cultures suivantes :

- Blé tendre d'hiver : blé
- Colza d'hiver : colza
- Féverole de printemps : féverole (exception : dans « blé-féverole », la féverole est une féverole d'hiver)
- Maïs grain : maïs
- Pois d'hiver : pois
- Triticale d'hiver : triticale

Liste des figures et tableaux

Figure 1 : Evolution des concentrations en nitrates (Q90 moyen, en mg/L) dans les cours d'eau bretons……..2

Figure 2 : Qualité des cours d'eau bretons vis-à-vis des pesticides en 2014-2015……3

Figure 3 : Les six étapes de la démarche appliquée à l'expérimentation système…….4

Figure 4 : Evaluations possibles en expérimentation système……..4

Figure 5 : Vue aérienne des SdC innovants des stations de Crécom (Saint-Nicolas-du-Pélem) et de Kerguéhennec (Bignan)……6

Figure 6 : Formule de l'écart-type……..10

Figure 7 : IFT moyens par poste des trois SdC innovants et de la référence Bretagne 2008 pour les années de récolte 2013 à 2016……11

Figure 8 : IFT moyens par culture et par poste des deux SdC intégrés étudiés et de la référence Bretagne 2008 pour les années de récolte 2013 à 2016……11

Figure 9 : IFT annuels par poste des SdC intégré pour les années de récolte 2013 à 2016……11

Figure 10 : Effet de l'allongement et de la diversification de la succession sur les IFT des deux SdC intégrés pour les années de récolte 2013 à 2016……...12

Figure 11 : QSA moyennes par poste des deux SdC intégrés étudiés et du SdC de référence Bretagne pour les années de récolte 2013 à 2016……..……12

Figure 12 : Evolution de la QSA (kg/ha/an) par poste du SdC Kerguéhennec intégré pour les années de récolte 2013 à 2016……12

Figure 13 : Reliquats début drainage (RDD) moyens (kg N-NO_3/ha/an) par succession du SdC Crécom intégré pour les années de récolte 2013 à 2016……...12

Figure 14 : RDD moyens (kg N-NO_3/ha/an) par succession du SdC Kerguéhennec intégré pour les années de récolte 2013 à 2016……..……...13

Figure 15 : RDD moyens (kg N-NO_3/ha/an) par succession du SdC Bio pour les années de récolte 2013 à 2016……...…13

Figure 16 : Consommations énergétiques (MJ/ha/an) par poste des trois SdC innovants et de la référence Bretagne pour les années de récolte 2013 à 2016……13

Figure 17 : Consommations de carburant moyennes (L/ha/an) (tracteurs, moteurs) par poste des trois SdC innovants et de la référence Bretagne pour les années de récolte 2013 à 2016……..13

Figure 18 : Atteintes moyennes des objectifs de rendement fixés (%/an) des trois SdC innovants pour les années de récolte 2013 à 2016……...14

Figure 19 : Quelques indicateurs de performances économiques (€/ha/an) des trois SdC innovants et du SdC de référence Bretagne pour les années de récolte 2013 à 2016……...14

Figure 20 : Charges opérationnelles moyennes (€/ha/an) par poste des trois SdC innovants et du SdC de référence Bretagne pour les années de récolte 2013 à 2016……...14

Figure 21 : Charges de mécanisation moyennes (€/ha/an) par poste des trois SdC innovants et du SdC de référence Bretagne pour les années de récolte 2013 à 2016……...15

Figure 22 : Effet de l'allongement et de la diversification de la succession sur les MSN des trois SdC innovants pour les années de récolte 2013 à 2016……...……15

Figure 23 : Valorisations économiques moyennes du travail (€/h/an) des trois SdC innovants et du SdC de référence Bretagne pour les années de récolte 2013 à 2016……...15

Figure 24 : Temps de travail moyens (h/ha/an) des trois SdC innovants et du SdC de référence Bretagne pour les années de récolte 2013 à 2016……..16

Figure 25 : Nombres de passages moyens (outils mécaniques) par poste des trois SdC innovants et du SdC de référence Bretagne pour les années de récolte 2013 à 2016……...16

Figure 26 : Répartition moyenne du temps de travail (h/décade/an) du SdC de référence Bretagne pour les années de récolte 2013 à 2016 pour une exploitation de 60 ha…….16

Figure 27 : Répartition moyenne du temps de travail (h/décade/an) du SdC Crécom intégré pour les années de récolte 2013 à 2016 pour une exploitation de 60 ha……..17

Figure 28 : Répartition moyenne du temps de travail (h/décade/an) du SdC Kerguéhennec intégré pour les années de récolte 2013 à 2016 pour une exploitation de 60 ha……..17

Figure 29 : Répartition moyenne du temps de travail (h/décade/an) du SdC Bio pour les années de récolte 2013 à 2016 pour une exploitation de 60 ha……..17

Figure 30 : Nombre annuel d'applications de produits phytosanitaires dangereux (pour une culture) par SdC et pour les années de récolte 2013 à 2016……..18

Figure 31 : Indicateurs de performances environnementales, économiques et sociales des SdC innovants ramenées en base 100 de la référence Bretagne pour les années de récolte 2013 à 2016…….....18

Figure 32 : Graphes des variables de l'ACP pour les dimensions 1 et 2……...18

Tableau 1 : Indicateurs pour l'évaluation environnementale, économique ou sociale de SdC (déterminés par an à la parcelle) (liste non exhaustive)…….5

Tableau 2 : ITK du SdC de référence Bretagne pour les années de récolte 2013 à 2016……6

Tableau 3 : Résumé descriptif des trois SdC innovants et de la référence bretonne……7

Tableau 4 : Indicateurs retenus pour l'évaluation des performances environnementales, économiques et sociales des SdC innovants…….9

Tableau 5 : IFT 2011 Bretagne par culture et par rotation et IFT 2013-2016 des SdC intégrés étudiés……19

Tableau 6 : IFT moyens par poste du réseau DEPHY pour les SdC grandes cultures……...19

Tableau 7 : Quelques indicateurs économiques et sociaux recalculés pour le SdC Crécom intégré à l'échelle de la rotation et en moyenne pour les années de récolte 2013 à 2016 pour une fertilisation organique (lisier de porc) sur céréales 2 ans/4 (au lieu de 4 ans/4) et deux années à fertilisation 100% minérale……..20

Liste des annexes

Annexe I : Principales caractéristiques pédoclimatiques de la Bretagne et des SdC innovants étudiés……26

Annexe II : Qualité des cours d'eau vis-à-vis des nitrates en 2015 en Bretagne……27

Annexe III : Méthodes d'évaluation de performances en productions végétales de grandes cultures, de la parcelle au SdC (liste non exhaustive)……..28

Annexe IV : Méthode du bilan azoté (GREN) pour céréales……29

Annexe V : Schémas décisionnels* du SdC Crécom intégré……...30

Annexe VI : ITK synthétisé du SdC Crécom intégré pour les années de récolte 2013 à 2016……...31

Annexe VII : Schémas décisionnels du SdC Kerguéhennec intégré……..32

Annexe VIII : ITK synthétisé du SdC Kerguéhennec intégré pour les années de récolte 2013 à 2016……..33

Annexe IX : Schémas décisionnels du SdC Bio……..34

Annexe X : ITK synthétisé du SdC Bio pour les années de récolte 2013 à 2016……35

Annexe XI : Test non-paramétrique d'égalité des moyennes de Kruskal-Wallis……..36

Annexe XII : PLANETE……...37

Annexe XIII : Script pour l'obtention des graphiques de la répartition du temps de travail à l'échelle du SdC (sur le logiciel Anaconda)……..38

Annexe XIV : Résultats des tests de normalité et de conformité de la variable IFT du SdC Kerguéhennec intégré pour les années de récolte 2013 à 2016……39

Annexe XV : Résultats des tests de normalité et du test non-paramétrique d'égalité des moyennes de Kruskal-Wallis pour l'indicateur nombre de passages……40

Annexe XVI : Quelques résultats de l'ACP pour les dimensions 1 à 5……..41

Annexe XVII : Graphes des variables et des individus de l'ACP pour les dimensions 2 et 3……..42

Les figures, tableaux et annexes sans source citée sont issus de mon travail personnel.

Introduction

Durant la deuxième moitié du XXe siècle, la France s'engage dans une logique de croissance de la productivité agricole pour faire face à la pénurie alimentaire, qui subsiste à la suite de la Seconde Guerre Mondiale, et à la croissance de la population (Flamant, 2010). Cette intensification de l'agriculture, qui s'appuie notamment sur la mécanisation des exploitations et une forte utilisation d'intrants de synthèse (produits phytosanitaires, engrais), est portée par la Politique Agricole Commune de 1962 en vue de l'autosuffisance alimentaire (Requillart, 2014). Mais cette agriculture, qui a fait ses preuves, se trouve de nos jours confrontée à ses limites : pollution environnementale (nitrate, phosphore, produits phytosanitaires et gaz à effet de serre notamment), dégradation de la biodiversité, résistance de bio-agresseurs aux pesticides, santé humaine (Reau & Doré, 2008 ; Aubertot et al, 2011). La « Directive Nitrates » de 1991 contre la pollution des eaux par les nitrates, qui s'applique en Bretagne, Zone Vulnérable depuis 1994 (DREAL Bretagne, 2014) et le « Plan Ecophyto 2018 » de 2008 (lancé par le Grenelle de l'environnement de 2007 et reconduit en 2015) pour la réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires d'au moins 50% en 10 ans (Aubertot et al, 2011) ont pour but de minimiser ces pollutions d'origine agricole. L'agriculture de demain a dorénavant pour défi d'être performante tout en répondant aux objectifs du développement durable, défini dans le rapport Brundtland comme l'ensemble des moyens permettant « de répondre aux besoins du présent sans compromettre la possibilité pour les générations à venir de satisfaire les leurs » (Commission mondiale sur l'environnement et le développement, 1987). Ce développement repose sur trois piliers : économique, social et environnemental, identifiés lors du Sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992 (UNCED, 1992 ; Reau & Doré, 2008). Dans ce contexte de réglementations et d'enjeux locaux et nationaux, la Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne (CRAB) a mis en place trois systèmes de culture (SdC) innovants, qui s'inscrivent dans le cadre du programme d'action national « DEPHY EXPE Ecophyto 2012 » intitulé « Expérimenter et évaluer des Systèmes Grandes Cultures économes en intrants *(de l'intégré au biologique)* en Bretagne » : deux systèmes en production intégrée, l'un basé à la station expérimentale de Crécom (Saint-Nicolas du Pélem, 22) et l'autre à la station de Kerguéhennec (Bignan, 56), et un système en agriculture biologique (AB) en place à la station de Kerguéhennec. Leurs objectifs sont la réduction du recours aux produits phytosanitaires (d'au moins 50% par rapport à la référence bretonne de 2008), l'amélioration de la qualité de l'eau (azote notamment), tout en conservant ou en améliorant la rentabilité des SdC et les conditions de travail de l'exploitant comparativement aux performances-objectifs établies à partir d'un système témoin maïs-blé en conduite raisonnée.

Le rapport traite de la problématique suivante : **Les trois SdC innovants étudiés dans le contexte breton répondent-ils aux objectifs de réduction du recours aux produits phytosanitaires et d'amélioration de la qualité de l'eau, sans pénaliser la rentabilité des exploitations agricoles et les conditions de travail de l'exploitant ?**

Une analyse pluri-sites, pluri-critères et pluriannuelle des SdC est réalisée sur les années de récolte 2013 à 2016 afin d'évaluer leurs performances économiques, sociales et environnementales (les trois piliers de la durabilité, d'après UNCED, 1992 et Reau & Doré, 2008) par rapport à un SdC de référence régional, décrit à dires d'experts*. Elle est complétée par une analyse de la robustesse de ces systèmes face aux contextes climatiques et économiques, effectuée par M.-A. Loaec (2017).

La première partie du rapport est consacrée à un état des lieux du contexte breton, des concepts mobilisés, de la démarche de conception et d'évaluation de SdC, et des objectifs du stage. Sont décrits dans une deuxième partie les essais étudiés et la méthodologie employée pour l'évaluation des pluri-performances de ces SdC. Les principaux résultats obtenus sont présentés dans une troisième partie, avant d'être analysés dans une quatrième et dernière partie, dans un objectif de discussion des limites et des voies d'optimisation de chaque système étudié.

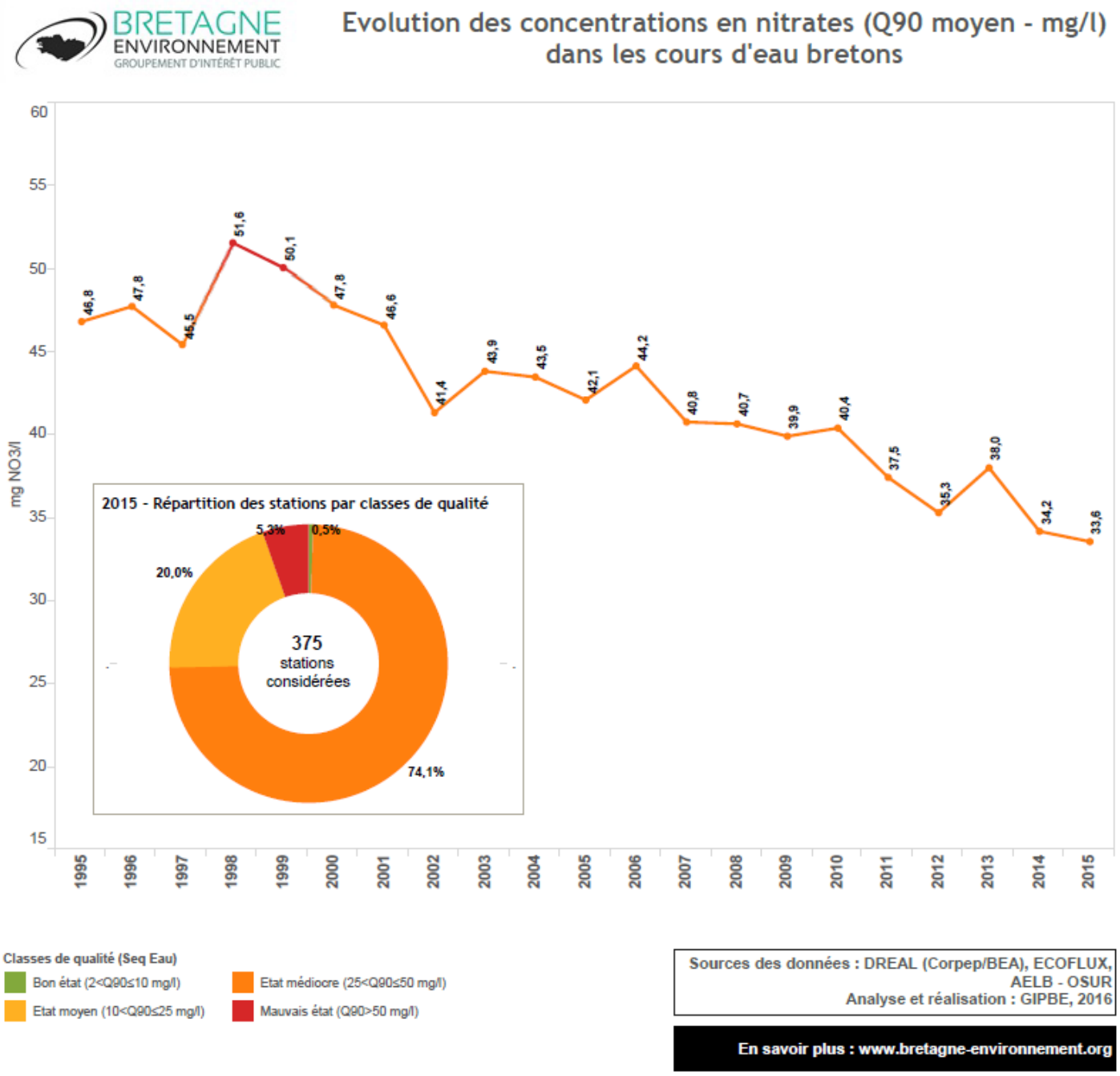


Figure 1 : Evolution des concentrations en nitrates (Q90 moyen, en mg/L) dans les cours d'eau bretons (GIPBE, 2016)

I. Contexte et objectifs

I.1. Contexte breton et enjeux

La Bretagne est une **région agricole** d'importance en termes de surface agricole et de production (Agreste Bretagne, 2017). 60% du territoire breton est consacré à l'agriculture, contre 52% en moyenne en France (Agreste Bretagne, 2017). La Bretagne est avant tout une région d'élevage (sept exploitations sur dix ont une activité d'élevage), à orientations dominantes bovins laits (30% des exploitations régionales), puis porcs et volailles (10% chacun) (CRAB, 2016 ; Agreste Bretagne, 2017). Une exploitation bretonne de taille moyenne dispose de 60 ha en 2013, contre 82 ha à l'échelon national : cette différence s'explique par l'élevage hors-sol et l'intensivité des systèmes de productions bretons (CRAB, 2015 et 2016 ; Agreste Bretagne, 2017). En 2015, 38% de la SAU bretonne (dont 2,2% en AB) et 20% des exploitations sont orientés en **grandes cultures** ; les cultures dominantes sont le blé tendre (48% de la SAU en grandes cultures), le maïs (21%), l'orge (15%) et le colza (6%) (CRAB, 2013 et 2016 ; Agreste Bretagne, 2017).
Le **climat** breton est océanique tempéré (Belleguic et al, 2012) (précisions en II.1.1). Les **sols** sont divers mais en moyenne plutôt limoneux, acides, riches en matière organique et en phosphore (lié à la fertilisation) et profonds (Le Goff & Savelli, 2015) (Annexe I).

La Bretagne est classée Zone Vulnérable depuis 1994, selon la Directive Nitrates de 1991, en termes de **qualité de l'eau vis-à-vis des nitrates** (DREAL Bretagne, 2014). Cette qualité s'est améliorée du fait de l'évolution des pratiques agricoles (réduction de la concentration en nitrates (quantile 90*) de 28% entre 1995 et 2015 et de 5% entre 2012 et 2015, Figure 1) mais reste un enjeu local car quelques stations de suivi de la qualité de l'eau dépassent encore les 50 mg nitrates/L réglementaires (DREAL Bretagne, 2014 ; Agreste Bretagne, 2017) (Annexe II). En 2015, 65% des 360 stations de mesures de la **qualité de l'eau vis-à-vis du phosphore** sont au moins en bon état (concentration en phosphore total ≤ 0,2 mg/L) et cette concentration est passée de 0,24 mg/L en 2011 à 0,2 mg/L en 2015 (Bardon et al, 2017). Les **produits phytosanitaires** représentent également un enjeu pour la qualité de l'eau en Bretagne (Agreste Bretagne, 2017). En effet, la concentration maximale de 0,1 µg/L pour une substance et de 0,5 µg/L pour toutes les substances quantifiées simultanément (règlementation eau potable) est dépassée pour 82% des 182 stations de mesures bretonnes en 2015 (Bardon et al, 2016) (Figure 2). 61% des pesticides détectés sont des herbicides, 22% des fongicides et 14% des insecticides (Bardon et al, 2016).

La Bretagne doit donc faire face à de nombreux enjeux environnementaux locaux (azote, phosphore, produits phytosanitaires), globaux (réchauffement climatique et gaz à effet de serre) et réglementaires (Directives Nitrates, Plan Ecophyto). Des systèmes de productions agricoles permettant de répondre à ces enjeux, tout en restant économiquement viables et socialement acceptables, doivent être élaborés. Répondre aux enjeux en amont et non en aval est essentiel et repose sur la re-conception des systèmes de culture (Aubertot et al, 2011). C'est dans ce cadre que la CRAB teste au champ des SdC innovants, intégrés et biologique.

I.2. Concepts mobilisés

I.2.1. Système de culture innovant

Un SdC est défini par Sebillotte (1990) (*in* Sebillotte, 1992) comme « l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique. Chaque système de culture se définit par : la nature des cultures et leur ordre de succession dans le temps (…) ; les itinéraires techniques* (ITK) appliqués à ces différentes cultures, y compris le choix des variétés ». Le SdC est donc constitué de l'ensemble des interactions entre agroécosystème, pratiques agricoles et choix de l'agriculteur (Havard et al, 2017).

Un SdC innovant est un SdC devant répondre à de nouveaux enjeux, qui prennent la forme de nouveaux objectifs à atteindre, lesquels sont en cohérence avec les priorités des agriculteurs, des filières et de la société (Meynard, 2012). L'innovation, qui repose sur ce renouvellement d'enjeux et d'objectifs, doit permettre d'élaborer de nouvelles combinaisons avec les techniques et les cultures déjà existantes et d'utiliser de nouvelles technologies ou

Figure 2 : Qualité des cours d'eau bretons vis-à-vis des pesticides en 2014-2015 (GIPBE, 2017)

cultures (Meynard, 2012). Un SdC est innovant dans un contexte donné (acteur, milieu, économie), il ne s'agit donc pas de vouloir diffuser des SdC idéaux applicables dans plusieurs contextes mais de donner des pistes de réflexion aux agriculteurs (Meynard, 2012), en vue de l'amélioration de leurs SdC vis-à-vis des nouveaux enjeux émergents (pollution environnementale, santé humaine par exemple).

Le réseau d'expérimentation en parcelles d'essais « système de culture » du RMT SdCi facilite le partage de connaissances à l'échelle de la France (Deytieux et al, 2012 (a)).

I.2.2. Agricultures raisonnée, intégrée, biologique et agroécologie

Les SdC étudiés sont en production raisonnée (référence bretonne), intégrée (Kerguéhennec, Crécom) et biologique (Kerguéhennec). Ces trois modes de production tendent vers une réduction du recours aux produits phytosanitaires, à différents niveaux de rupture. Nous nous concentrerons sur les définitions appliquées aux productions végétales.

L'**agriculture raisonnée** vise à réduire les pertes économiques par la réduction des pertes de récolte et repose sur une optimisation de l'usage des produits phytosanitaires et des engrais : observations, respect de seuils d'intervention et outils d'aide à la décision (OAD) permettent aux agriculteurs d'apporter ces intrants de manière adaptée (dates et conditions, doses, matériel). L'échelle d'action est la parcelle, et la saison ou l'année (Aubertot et al, 2011).

La **production intégrée** est définie par l'OILB en 2004 comme un système agricole produisant des aliments de haute qualité et d'autres produits *via* des ressources et mécanismes de régulation naturels, afin de remplacer les intrants polluants et d'assurer une agriculture durable. La rentabilité de l'exploitation, le respect de la santé de l'agriculteur, la gestion des cycles de nutriments (limitation des pertes), et le maintien et l'amélioration de la fertilité des sols et de la diversité biologique des agroécosystèmes sont pris en compte. L'accent est mis sur une gestion pluriannuelle à l'échelle de l'exploitation (Boller et al, 2004).

L'**AB** est le mode de production le plus contraignant vis-à-vis de l'usage des produits chimiques de synthèse. L'exclusion du recours à tout produit chimique de synthèse (sauf exceptions) induit la mise en œuvre de pratiques alternatives : rotations longues, cultures diversifiées et résistantes, apport de matières organiques et luttes biologique et mécanique (Règlement (CEE) n°2092/91, 1991).

L'agriculture durable s'appuie sur la définition du développement durable (cf Introduction) et repose de fait sur les aspects de respect de l'environnement, de viabilité économique et d'acceptabilité sociale, à une échelle systémique et sur le long terme (UNCED, 1992 ; Reau & Doré, 2008). A ce titre, les agricultures raisonnée, intégrée et biologique sont des formes d'agriculture durable, à différents niveaux d'intensité.

L'agroécologie est un ensemble de concepts, pratiques reposant sur l'utilisation maximale des services écosystémiques de l'agroécosystème comme facteurs de production, tout en limitant les impacts négatifs de l'agriculture sur l'environnement. Elle s'intéresse également à la valorisation de la biodiversité et aux dimensions économiques et sociales du système (Wezel et al, 2009). L'agroécologie diffère de l'AB notamment par une plus grande prise en compte de l'écologie (aménagement de l'espace pour les auxiliaires par exemple). Par rapport à la production intégrée, l'agroécologie n'emploie la chimie (produits phytosanitaires, engrais) qu'en dernier recours, alors qu'elle constitue un levier permettant de sécuriser la protection et la production en conduite intégrée.
Le « Projet agro-écologique pour la France » lancé en 2012 a pour objectif la transition des systèmes de production actuels vers des systèmes performants sur les plans économiques, sociaux et environnementaux, en mettant l'accent sur la préservation des ressources, l'utilisation des fonctions et interactions naturelles et la compétitivité des exploitations (MAAF, 2016 (b)). Le Plan Ecophyto et les essais SdC innovants de la CRAB s'intègrent de fait dans ce projet.

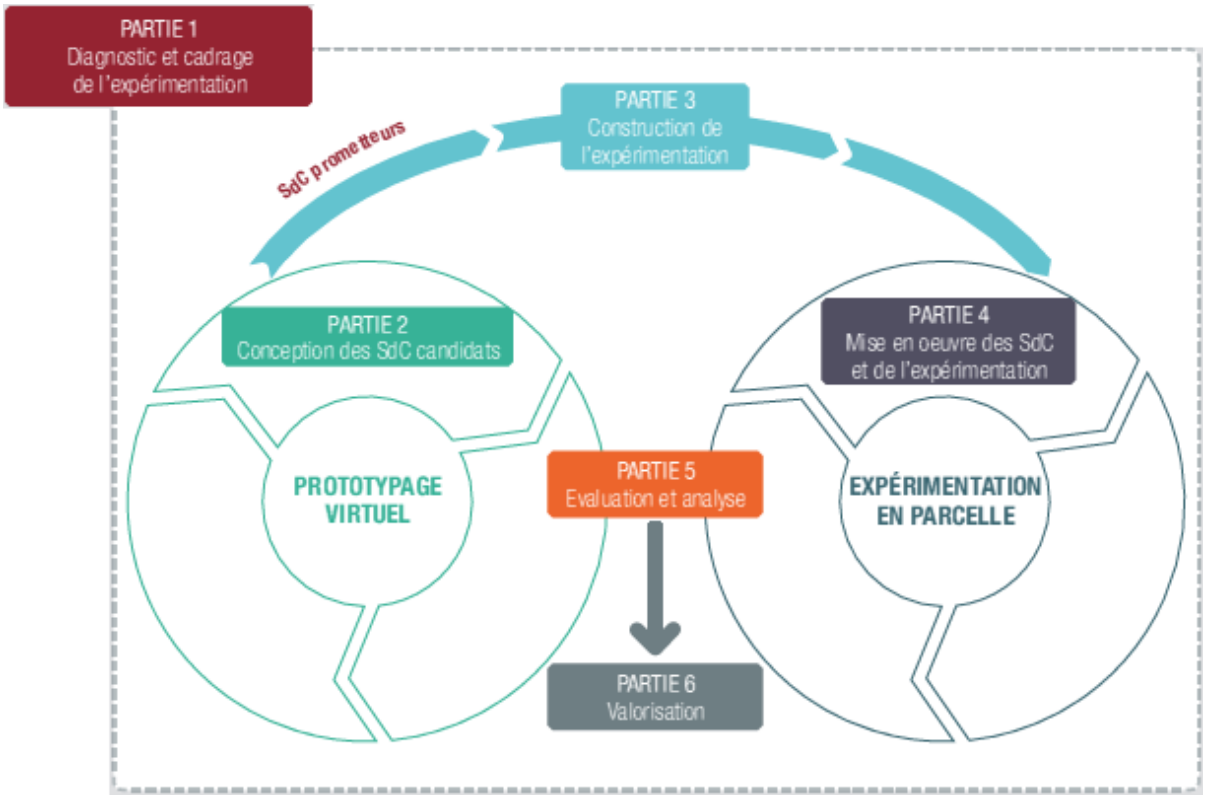


Figure 3 : Les six étapes de la démarche appliquée à l'expérimentation système (Havard et al, 2017)

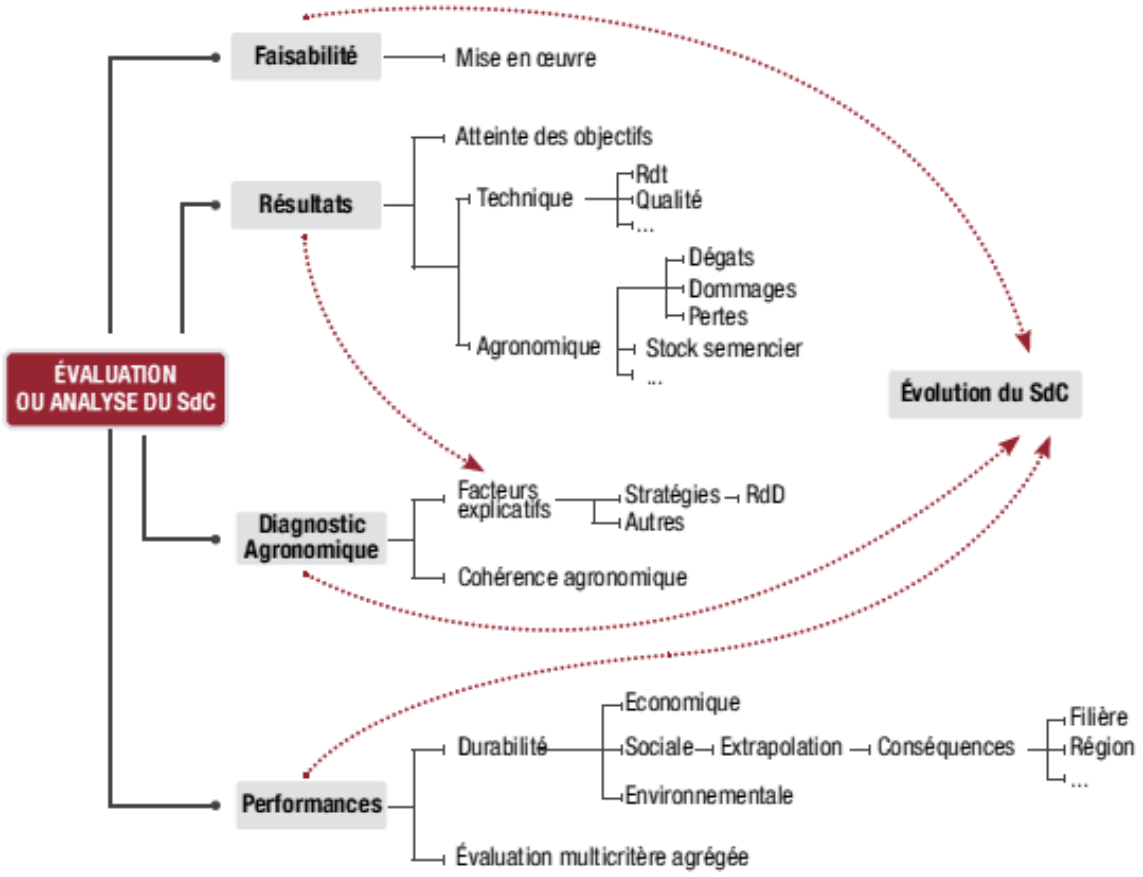


Figure 4 : Evaluations possibles en expérimentation système (Havard et al, 2017)

I.2.3. Démarche générale de conception, d'expérimentation et d'évaluation des SdC innovants

L'expérimentation système consiste en la conception, la mise en œuvre expérimentale au champ, l'évaluation et l'amélioration d'un SdC cohérent (Havard et al, 2017). Cette cohérence repose sur le choix de règles de décision* (RdD) dépendant des objectifs à atteindre. L'expérimentation du système de culture permet de tester sa faisabilité technique* et sa cohérence agronomique*, et d'évaluer ses performances en termes d'atteinte aux objectifs fixés et de contribution au développement durable (performances économiques, sociales et environnementales) (Deytieux et al, 2012(a)). Dans une expérimentation système, la taille importante des unités expérimentales limite le nombre de répétitions, c'est pourquoi le but de ce type d'expérimentation n'est pas de démontrer statistiquement l'effet de facteurs sur un résultat mais d'évaluer à quelles fréquences les objectifs sont atteints (Debaeke et al, 2009). La démarche appliquée à l'expérimentation système se déroule en six étapes (fonctionnant en allers-retours) comprises en deux phases, le prototypage et l'expérimentation au champ (Figure 3) (Debaeke et al, 2009 ; Havard et al, 2017).

a. La conception

Dans le cadre de l'expérimentation système, la méthode de conception de SdC innovants est la conception *de novo*. En rupture avec les systèmes existants, cette conception favorise l'inventivité, permet une plus grande innovation mais présente plus de risque d'application pour l'agriculteur (Reau & Doré, 2008 ; Havard et al, 2017). Elle peut se faire à dires d'experts (conception collective) et/ou utiliser des modèles. Les prototypes de SdC candidats conçus sont ensuite évalués *a priori* à l'aide de la modélisation des systèmes pratiqués prévisionnels* afin de vérifier l'atteinte des résultats attendus et de sélectionner le/les SdC les plus prometteurs au regard des objectifs (Havard et al, 2017).

b. L'évaluation du SdC testé au champ

L'évaluation de la **faisabilité technique** du SdC consiste à évaluer *a posteriori* la possibilité de mise en œuvre d'une pratique culturale ou d'une/des RdD dans un contexte donné : il s'agit de considérer l'écart entre les interventions réalisées et prévisionnelles en termes de fréquence de réalisation des pratiques prévisionnelles (Reau & Doré, 2008 ; Havard et al, 2017) et de donner les raisons d'une éventuelle différence (Figure 4).

L'évaluation des **résultats techniques et agronomiques** permet de vérifier si le SdC a bien atteint ses objectifs en termes d'état des parcelles et des cultures, de rendement et de qualité (Havard et al, 2017). Le diagnostic agronomique consiste en l'explication des résultats techniques et agronomiques à partir d'observations et de mesures de facteurs explicatifs.

Enfin, des **performances** du SdC sont évaluées sur plusieurs années à partir de critères* déclinés en indicateurs*, variables permettant de renseigner (mesure, estimation) ces critères (Havard et al, 2017). Différents outils permettent de réaliser des évaluations qualitatives et/ou quantitatives de diverses performances, à différentes échelles : par exemple, DIA'Terre (analyse énergétique de l'exploitation agricole), INDIGO (diagnostic des performances environnementales), MASC (évaluation multicritère de la durabilité d'un SdC) (Annexe III).

Les principaux critères et indicateurs rencontrés pour l'évaluation des performances économiques, sociales et environnementales de SdC sont résumés Tableau 1. Nous pouvons citer comme exemples les marges brute et semi-nette pour le critère de rentabilité économique, la toxicité phytosanitaire pour le risque pour la santé de l'applicateur, le temps de travail et le nombre de passages en parcelle pour la charge de travail, les pertes en azote et la quantité de substances actives* (QSA) des produits phytosanitaires épandus pour la qualité de l'eau, l'indice de fréquence de traitements phytosanitaires (IFT) pour la pression phytosanitaire sur l'environnement et la consommation énergétique pour la pression sur l'énergie non renouvelable (Reau & Doré, 2008 ; Aubertot et al, 2011 ; Hirschy et al, 2015).

Tableau 1 : Indicateurs pour l'évaluation environnementale, économique ou sociale de SdC (déterminés par an à la parcelle) (liste non exhaustive) (Reau & Doré, 2008 ; Aubertot et al, 2011 ; Hirschy et al, 2015)

Thème	Critère	Indicateur	Méthode
Environnemental	Conservation de la biodiversité	Cohérence des successions culturales (diversité des cultures et temps de retour, pression phytosanitaire, structure du sol, nutrition azotée)	Indigo (I-succession culturale)
		Nombre de vers de terre (/m²)	prélèvements
		Biomasse microbienne (mg/kg sol)	prélèvements
		Diversité de la flore adventice (parcelle, bordures)	comptages
	Fertilité des sols	Statut organique du sol (évolution)	% matière organique, Indigo (I-MO)
		Solde en azote, phosphore, potassium (unités)	bilan = entrées - sorties (méthode CORPEN)
	Qualité de l'eau	Quantité de substances actives (QSA) (kg/ha)	QSA des produits phytosanitaires appliqués : abaques
		Pertes en produits phytosanitaires dans l'eau	Indigo (I-Phy)
		Pertes d'azote par lixiviation (kg NO_3/ha)	Indigo (I-N : I-NO_3), Syst'N
	Qualité de l'air	Pertes d'azote par volatilisation (kg N/ha)	Indigo (I-N : I-N_2O, I-NH_3), Syst'N
		Emission de produits phytosanitaires dans l'air	Indigo (I-Phy)
	Pression phytosanitaire	Indice de Fréquence de Traitement (IFT)	nombre de doses homologuées de produits phytosanitaires épandues par hectare
	Pression sur la ressource en eau	Quantité d'eau d'irrigation utilisée (m3)	enregistrements
		% irrigation en période sèche	enregistrements
	Pression sur l'énergie non renouvelable	Consommation énergétique (MJ/ha)	consommations directe et indirecte en énergie fossile et émission de gaz à effet de serre : Indigo (I-En), Planète, Dia'terre
		Efficience énergétique	production énergétique / consommation énergétique : Planète, Dia'terre
Economique	Rentabilité économique	Produit brut (PB) (€/ha)	rendement x prix (hors aides)
		Charges opérationnelles (CO) (€/ha)	coûts semences, fertilisants, produits phytosanitaires
		Charges de mécanisation (CM) (€/ha)	carburant, entretien, amortissement... (hors main-d'œuvre) : enregistrements, abaques
		Marge brute (MB) (€/ha)	PB - CO
		Marge semi-nette (€/ha)	MB - CM
	Retour sur investissement	Efficience économique	PB / (CO + CM)
Social	Charge de travail	Temps de travail (h/ha)	enregistrements, abaques, à dires d'agriculteurs
		Nombre et nature des passages	enregistrements
		Répartition de la quantité de travail par décade sur l'année	méthode graphique
	Risque pour la santé de l'applicateur	Toxicité phytosanitaire	nombre d'applications de produits dangereux pour la santé humaine

I.3. Objectifs du stage

Les évaluations multicritères *a priori* des systèmes intégrés et biologique ont abouti à leur mise en place au champ en 2009, 2011 et 2012 respectivement. L'évaluation pluriannuelle de 2012 à 2016 permet d'analyser les résultats des essais sur quatre années de récolte, à l'échelle de la rotation. Prendre en compte plusieurs années permet d'analyser l'effet cumulatif de la succession culturale et des pratiques et de réduire l'effet d'une année « exceptionnelle » sur le plan climatique, biotique et/ou économique sur l'évaluation (Havard et al, 2017).

Cette évaluation pluriannuelle et pluri-critères des trois SdC innovants est réalisée en vue d'étudier et d'optimiser leurs performances environnementales, économiques et sociales, déterminées à partir de quelques indicateurs, dans l'objectif de réduction de l'utilisation de produits phytosanitaires (d'au moins 50% par rapport à la référence de 2008), de l'amélioration de la qualité de l'eau (critères à enjeux forts en Bretagne) et au moins de la conservation de la rentabilité de l'exploitation agricole et des conditions de travail de l'exploitant. Un SdC de référence régional permet, pour comparaison, d'identifier les points forts et les points faibles de chaque SdC. L'évaluation devrait permettre de mettre en évidence des pratiques plus durables et performantes et de faire évoluer les systèmes de production vers une meilleure prise en compte de l'environnement. Cinq hypothèses sont formulées selon ces objectifs :

1. **Les méthodes alternatives*, l'allongement et la diversification de la rotation permettent de réduire le recours aux produits phytosanitaires d'au moins 50% par rapport à la référence bretonne de 2008 (objectif du Plan Ecophyto 2018).**

L'hypothèse est validée si l'IFT de chaque SdC innovant, calculé en moyenne pour les années de récolte 2013 à 2016, est inférieur ou égal à 50% de l'IFT de référence régionale de 2008 pour un système maïs-blé et si l'IFT moyen maïs-blé d'un SdC intégré est supérieur à l'IFT des autres cultures de sa rotation.

2. **Les méthodes alternatives réduisent la consommation d'énergie fossile par rapport à la référence bretonne et améliorent la qualité de l'eau.**

L'hypothèse est validée si la consommation énergétique (méthode basée sur l'ACV) et la QSA d'un SdC innovant sont strictement inférieures à 95% (tolérance de -5%) des valeurs de la référence bretonne et si le reliquat début drainage moyen à la rotation est inférieur ou égal à 50 kg N-NO_3/ha/an (à dires d'experts).

3. **Les économies de charges en productions intégrée et biologique, auxquelles s'ajoutent les prix de vente supérieurs en AB, couvrent les pertes de rendement et permettent de maintenir voire d'améliorer la rentabilité du SdC par rapport à la référence.**

Si la moyenne des rendements en maïs-blé de chaque SdC innovant est strictement inférieure à 95% de la moyenne de la référence bretonne, nous considèrerons qu'il y a eu pertes de rendement (ce qui n'est pas un objectif des SdC innovants). Si l'atteinte aux objectifs de rendement (rendement normalisé moyen sur objectif de rendement moyen) est supérieure ou égale à 95%, l'objectif de rendement est atteint. Les charges totales liées à la fonction de production (charges opérationnelles et de mécanisation) et le produit (rendements x prix de vente) d'un SdC innovant sont comparés à ceux de la référence sur la même période. L'hypothèse est validée si la MSN (produit – charges) de chaque SdC innovant est supérieure ou égale à 95% de la marge de la référence bretonne.

4. **L'allongement et la diversification de la rotation permettent de maintenir voire d'améliorer la marge moyenne à l'échelle de la rotation.**

L'hypothèse est validée si la MSN moyenne du maïs-blé d'un SdC innovant est inférieure à celle des autres cultures de la rotation, pour les années de récolte 2013 à 2016. Le triticale du SdC Bio est considéré comme le blé de ce système.

5. **Les méthodes alternatives ne génèrent pas plus de travail et présentent moins de risque pour la santé de l'applicateur.**

L'hypothèse est validée si le temps de travail et le nombre de passages au champ de chaque SdC innovant sont inférieurs ou égaux à 105% (tolérance de +5%) des valeurs de la référence

Tableau 2 : ITK du SdC de référence Bretagne pour les années de récolte 2013 à 2016

	Maïs grain	Blé tendre d'hiver
Interculture	Semis combiné (avec herse rotative) : Moutarde blanche (7 kg/ha) ; 4 ans/4 (fin août/début sept.)	
Préparation du sol et semis	Déchaumage (canadien) ; 4 ans/4 (1-2 j. post-ferti.)	
	Labour à 20 cm : 3 ans/4 (avril)	Labour à 20 cm : 3 ans/4 (début/mi-nov.)
	Préparation du sol (canadien) : 1 an/4 (avril)	Préparation du sol (canadien) : 1 an/4 (début/mi-nov.)
	Préparation du sol (herse rotative) : 4 ans/4 (1-2 j. post labour ou vibroculteur)	
	Semoir monograine 4 rgs 75cm : variété Millesim (100000 gr/ha) ; 4 ans/4 (qqs jours post herse rotative)	Semis combiné (avec herse rotative) : variété Cellule (250 gr/m²) ; 4 ans/4 (même jour que labour ou canadien)
Fertilisation	1 apport Lisier de porc (3,5 uN/m3) : 33,75 m3/ha ; 4 ans/4 (avril)	3 apports Ammonitrate (33,5% N) : 50 uN, 74,5 uN, 40 uN ; 4 ans/4 (début mars, fin mars, mi-avril)
Traitements phytosanitaires : adventices	Camix 2,1 L/ha + Milagro 0,4 L/ha + Peak 6 g/ha : 4 ans/4 (mai)	Biscoto 1 L/ha + Heliosol (adjuvant) 0,4 L/ha : 4 ans/4 (février-mars)
	Auxo 0,4 L/ha + Milagro 0,4 L/ha : 4 ans/4 (juin)	Celio 0,3 L/ha : 2 ans/4 (mars-avril)
Traitements phytosanitaires : maladies		Cherokee 1,9 L/ha : 4 ans/4 (avril-mai)
		Adexar 1,9 L/ha : 4 ans/4 (mai)
Traitements phytosanitaires : régulateurs		C5 2 L/ha : 4 ans/4 (début avril)
Récolte	Moissonneuse : 83,88 q/ha (normalisé) ; 4 ans/4 (oct.-nov.)	Moissonneuse + round baller : 74,13 q/ha/an grains (normalisé) + 4,43 T/ha/an paille (exportée) ; 4 ans/4 (fin juillet-début août)

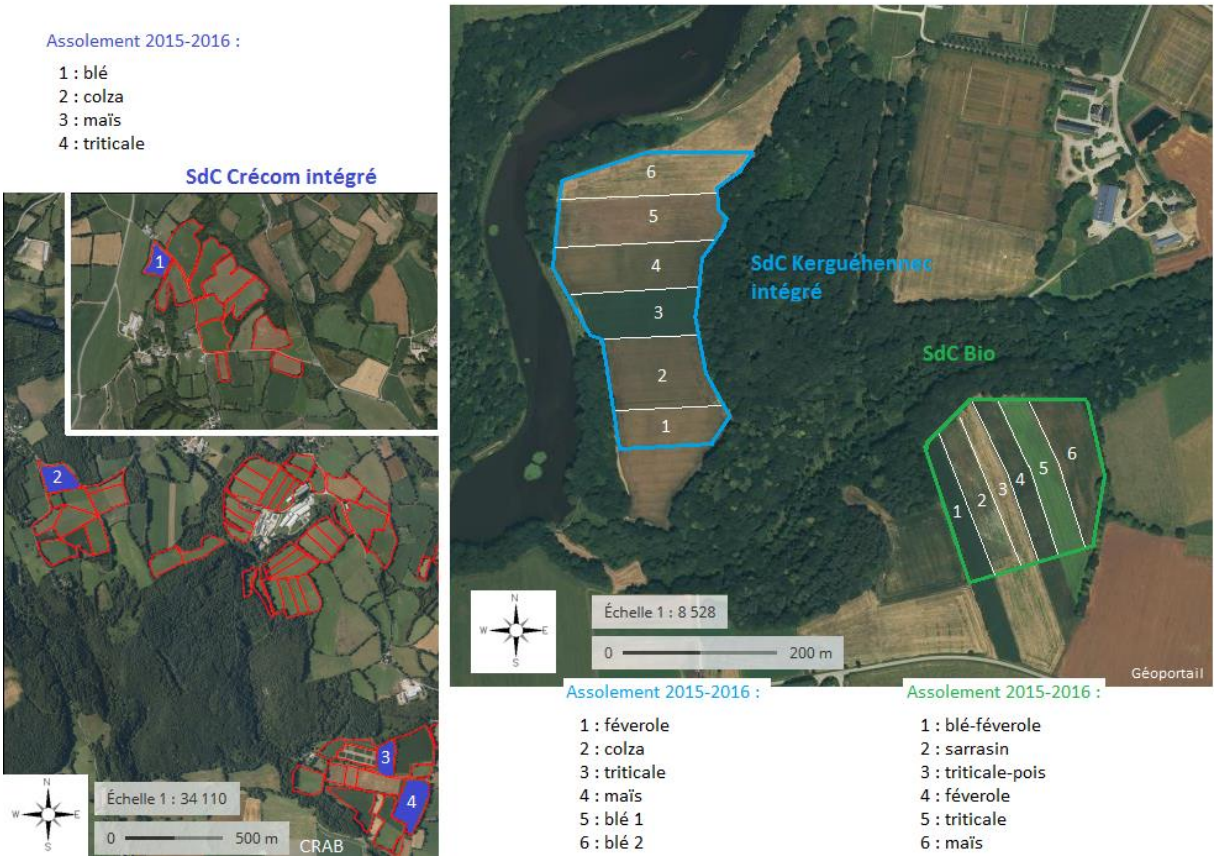


Figure 5 : Vue aérienne des SdC innovants des stations de Crécom (Saint-Nicolas-du-Pélem) et de Kerguéhennec (Bignan) (CRAB, transmission interne ; Géoportail, n.d.)

et si la toxicité phytosanitaire associée à la protection chimique des cultures de chaque SdC innovant est strictement inférieure à 95% de la valeur de la référence.

II. Matériels et méthodes

II.1. Dispositifs expérimentaux et SdC de référence

Les SdC innovants étudiés ne comprennent pas de prairie dans la rotation afin d'être représentatifs d'exploitations agricoles spécialisées en production porcine, en volailles ou en grandes cultures. Il s'agit de trouver des SdC performants (combinaisons de pratiques) en rupture avec le système maïs-blé très pratiqué en Bretagne (Giteau et al, 2017).

Pour chaque SdC innovant, il n'y a pas de répétition spatiale des cultures et toutes les cultures de la succession sont présentes chaque année sur l'essai, ce qui permet de prendre en compte la variabilité climatique et biotique dans les résultats pluriannuels (Havard et al, 2017). Les cultures ont pour débouché l'alimentation animale principalement. Les outils employés sont utilisables par des agriculteurs, il ne s'agit pas de prototypes.

II.1.1. Présentation du SdC de référence Bretagne

Le SdC de référence « maïs grain - blé tendre d'hiver (CIPAN) », raisonné, est élaboré à dires d'experts, à partir de références portant sur les pratiques bretonnes dominantes (travail du sol, fertilisation, protection des cultures, rendement) (Tableau 2). Il se veut représentatif des pratiques des agriculteurs bretons.

Les **rendements** annuels en grains du maïs et du blé des années de récolte 2013 à 2016 correspondent aux rendements annuels bretons issus des enquêtes Agreste (Agreste Bretagne, 2016 et 2017). Les rendements en paille du blé sont obtenus à partir du ratio « rendement paille / rendement grains » mesuré pour les SdC intégrés. La paille est exportée. Une **culture intermédiaire piège à nitrates** (CIPAN) est semée fin août entre la récolte du blé et le semis du maïs afin de respecter les obligations de la Directive Nitrates (Préfet de la région Bretagne, 2014). Le blé étant semé en combiné (avec un outil de travail du sol) dans 80% des cas en France (Mercier-Poirier, 2014), le **semis** de la référence est réalisé avec le couple « herse rotative + semoir ». Seules 20% des surfaces en maïs grain étant semées en combiné (Mercier-Poirier, 2014), un semis en solo avec semoir monograine est choisi. Le **labour** est pratiqué trois années sur quatre pour le blé et le maïs (Heddadj et al, 2014 ; à dires d'experts). La **fertilisation** est minérale sur blé et fractionnée en trois apports (Mercier-Poirier, 2014) et organique (lisier de porc) sur maïs (à dires d'experts). Les apports sont calculés à partir de la méthode du bilan et des reliquats azotés de sortie d'hiver d'un réseau de parcelles suivies chaque année par la CRAB (Giteau, Annexe IV). Le **désherbage** mécanique se faisant sur moins de 10% des surfaces en maïs grain en Bretagne (Mercier-Poirier, 2014), la référence ne comprend pas d'intervention désherbage mécanique. Les stratégies de lutte chimique s'inspirent des préconisations de la CRAB (CRAB Conseil cultures, 2013-2016), en cohérence avec les IFT régionaux de 2008. L'IFT de référence global de 3,03 correspond à la valeur IFT bretonne de 2008 pour un SdC maïs-blé sans prairie (Agreste, 2009 ; Bourigault et al, 2014).

De 2012 à 2016, période de l'étude, la température moyenne annuelle en Bretagne est de 12°C et la pluviométrie de 956 mm/an (Agreste Bretagne, 2015, 2016 et 2017) (Annexe I). Le rayonnement moyen reçu en Bretagne est de 1168 kWh/m²/an (Belleguic et al, 2012).

II.1.2. Présentation du SdC Crécom intégré

Le SdC Crécom intégré (première récolte en 2010) se situe à la station de Crécom (22). D'après les données climatiques moyennes enregistrées à la station entre 2012 et 2016, la température annuelle est de 11°C, la pluviométrie de 1016 mm/an et le rayonnement reçu de 1175 kWh/m²/an. Les quatre parcelles (Figure 5), d'en moyenne 1,9 ha, sont sur sols limono-sableux avec 10% de cailloux et 5,3% de matière organique (horizon 0-30 cm), d'une profondeur moyenne de 68 cm, de pH moyen 6,4 (horizon 0-30 cm) (analyses de sol point 0 de 2009 et 2010) et de potentiels de production* moyens de 75 q/ha en maïs et de 72,5 q/ha en blé (Fisson, 2009) (Annexe I). Le SdC se caractérise par une rotation de 4 ans « maïs grain – blé tendre d'hiver – colza d'hiver – (sol nu ou CIPAN) triticale d'hiver (CIPAN) » (Annexes V

Tableau 3 : Résumé descriptif des trois SdC innovants et de la référence bretonne (adapté de Giteau et al, 2017)

gradient de différenciation au SdC de référence

	SdC référence Bretagne	SdC Crécom intégré	SdC Kerguéhennec intégré	SdC Bio
Conduite	raisonnée	intégrée	intégrée	biologique
Mise en place	-	2009	2011	2012
Rotation	2 ans maïs grain - blé tendre d'hiver (CIPAN)	4 ans maïs grain – blé tendre d'hiver – colza d'hiver – (sol nu ou CIPAN) triticale d'hiver (CIPAN)	6 ans maïs grain – blé tendre d'hiver – (CIPAN) féverole de printemps – (CIPAN) blé tendre d'hiver – colza d'hiver – (sol nu ou CIPAN) triticale d'hiver (CIPAN)	6 ans féverole de printemps – (sol nu ou CIPAN) triticale d'hiver – (CIPAN) maïs grain – blé tendre d'hiver + féverole d'hiver – (CIPAN) sarrasin – triticale d'hiver + pois d'hiver (CIPAN)
Labour	3 ans/4	annuel	1 an/3	annuel
Désherbage mécanique	non	oui (céréales, maïs)	oui (colza, féverole, maïs)	oui (toutes)
Gestion des intercultures courtes	-	Couvert, faux-semis	Couvert (stratégie d'étouffement)	Couvert, faux-semis
Densité et date de semis	classique	densités réduites (céréales, colza), semis précoce (colza)	densités réduites (céréales, colza), semis précoce (colza)	densités augmentées, semis tardif (maïs, sarrasin)
Mélanges	-	variétés (blé, colza)	variétés (céréales, colza)	variétés (triticale), inter-espèces (céréale-protéagineux)
Fertilisation organique	1 an/2 (maïs)	annuelle	2 ans/6 (colza, maïs)	1 an/6 (maïs)
Fertilisation minérale	1 an/2 (blé)	3 ans/4 (céréales, colza)	3 ans/6 (céréales)	-
Gestion de la paille (céréales)	exportation	exportation	exportation	restitution

et VI). Le labour est systématique. La fertilisation organique intervient tous les ans et la fertilisation minérale, trois années sur quatre (céréales, colza selon la biomasse de sortie d'hiver) (Tableau 3). Les traitements phytosanitaires ne sont effectués qu'en cas de franchissement des seuils de nuisibilité (RdD). La paille est exportée.

II.1.3. Présentation du SdC Kerguéhennec intégré

Le SdC Kerg. intégré (première récolte en 2012) se situe à la station de Kerguéhennec (56). D'après les données climatiques moyennes enregistrées à la station entre 2012 et 2016, la température moyenne annuelle est de 11,8°C et la pluviométrie de 962 mm. Le rayonnement reçu est de 1207 kWh/m²/an (données de la ville la plus proche (Ploërmel), choisie à dires d'experts). Les six parcelles (Figure 5), d'en moyenne 1 ha, font partie d'un même îlot et sont sur sols limono-sablo-argileux sur micaschiste, avec moins de 5% de cailloux et 4,8% de matière organique (horizon 0-30 cm), d'une profondeur moyenne de 80-90 cm, de pH moyen 6,4 (horizon 0-30 cm) (analyses de sol 2014) et de potentiels de production moyens de 91 q/ha en maïs et de 83 q/ha en blé (Annexe I). La rotation de 6 ans « maïs grain – blé tendre d'hiver – (CIPAN) féverole de printemps – (CIPAN) blé tendre d'hiver – colza d'hiver – (sol nu ou CIPAN) triticale d'hiver (CIPAN) » (Annexes VII et VIII) est une alternance, en début de rotation, de deux cultures de printemps avec deux cultures d'automne permettant de dérégler le cycle des bioagresseurs. Le SdC diffère de celui de Crécom par l'introduction d'une légumineuse et l'absence d'utilisation d'insecticide et de molluscicide. Le labour n'est pratiqué qu'une année sur 3 en moyenne. La fertilisation organique intervient deux années sur six (maïs, colza) et la fertilisation minérale, trois années sur six en moyenne (céréales). Les traitements phytosanitaires ne sont effectués qu'en cas de franchissement des seuils de nuisibilité (RdD). La paille est exportée.

II.1.4. Présentation du SdC Bio

Le SdC Bio (première récolte en 2013) se situe également à la station de Kerguéhennec. Les six parcelles (en AB depuis 1998) (Figure 5), d'en moyenne 0,7 ha, font partie d'un même îlot et sont sur sols limono-sableux filtrants sur micaschiste, d'une profondeur moyenne de 80 cm, avec 5 à 10% de cailloux et 4,5% de matière organique (horizon 0-30 cm), de pH moyen 6,3 (horizon 0-30 cm) (analyses de sol point 0 de 2013) et de potentiel de production proche de la moyenne régionale (Annexe I). La rotation de 6 ans « féverole de printemps – (sol nu ou CIPAN) triticale d'hiver – (CIPAN) maïs grain – blé tendre d'hiver + féverole d'hiver – (CIPAN) sarrasin – triticale d'hiver + pois d'hiver (CIPAN) » (Annexes IX et X) est une alternance de trois cultures de printemps avec trois cultures d'automne permettant de dérégler le cycle des bioagresseurs. Ce SdC diffère des SdC intégrés par l'absence d'utilisation de produits phytosanitaires de synthèse, la place plus importante dédiée aux légumineuses, l'introduction de mélanges inter-espèces, la pratique du faux-semis pour la gestion des adventices, et l'adaptation des densités et périodes de semis. Les densités sont augmentées afin d'étouffer les adventices et de compenser les pertes liées aux ravageurs et aux interventions de désherbage mécanique ; les semis du maïs et du sarrasin sont tardifs afin de réduire au préalable le stock d'adventices via des faux-semis et de favoriser une levée rapide. Le labour est systématique. Du fait de déjections animales biologiques peu disponibles et de l'anticipation d'une éventuelle fin de dérogation d'utilisation de déjections d'élevages conventionnels dans des systèmes en AB, l'une des contraintes de conception du SdC était une faible dépendance aux intrants organiques : la fertilisation organique n'est appliquée qu'une année sur six. Pour ce SdC, la paille est restituée afin d'entretenir la fertilité des sols.

Par rapport au SdC de référence, l'innovation des SdC étudiés repose donc sur l'ensemble de pratiques permettant de maîtriser les populations de bioagresseurs et les pertes de nitrates : allongement et diversification des cultures de la rotation, introduction de mélanges variétaux et de variétés peu sensibles aux maladies, désherbages mixte (sauf SdC Bio) et mécanique pour lutter contre les adventices, semis d'un couvert végétal en interculture courte pour capter l'azote du précédent et absence d'utilisation de régulateur (Tableau 3). Pour les SdC intégrés, les densités de semis sont réduites sur céréales et colza afin de limiter le risque de maladies.

Le semis du colza est précoce afin de permettre la meilleure valorisation possible de l'azote en période automnale et la croissance de la plante. Cette croissance favorise l'obtention de plants robustes en automne, moins sensibles à la pression des ravageurs (altises).
Les SdC innovants se différencient entre eux par la durée de la rotation, la nature des cultures, les pratiques de gestion des adventices (travail du sol, interculture, dates de semis) et maladies et les pratiques de fertilisation (Tableau 3).

Afin de pouvoir évaluer les performances des différents SdC, l'acquisition de données est obligatoire.

II.2. Gestion des données

Pour les années 2012 à 2016, l'enregistrement des ITK des cultures de chaque SdC est réalisé dans un fichier Excel. Chaque fichier comprend un onglet ITK réalisé et un onglet ITK synthétisé. L'ITK synthétisé comprend les interventions et résultats moyennés (ou fréquences) sur la même période (Havard et al, 2017). Une année correspond à la période entre la récolte du précédent et celle de la culture en place. Les interventions concernant une CIPAN sont prises en compte dans la culture qui la suit. Aucun coût n'est affecté aux intrants organiques car la Bretagne étant une région d'élevage, les éleveurs valorisent directement les matières organiques de leur exploitation ou indirectement *via* des agriculteurs voisins (prêteurs de terre). Les prix d'achat d'intrants et de vente sont réels, et identiques entre les SdC intégrés et la référence bretonne afin de ne pas induire d'effets conjoncturels ou liés aux stratégies d'approvisionnement et de vente des agriculteurs.

En raison d'un manque de données, la faisabilité technique et l'efficacité des RdD, les résultats techniques et la qualité des récoltes ne sont pas évalués dans ce rapport.

Afin de pouvoir comparer les performances des SdC innovants aux objectifs définis et quantifiés à partir de la référence Bretagne, et d'éviter d'introduire un biais lié à des conditions pédoclimatiques différentes entre les SdC, le choix a été fait, pour chaque SdC innovant, d'appliquer un coefficient correcteur aux rendements normalisés* et objectifs. Le correctif est calculé de manière à obtenir, en conduite raisonnée et sur une période donnée, des rendements normalisés moyens pour les parcelles des SdC innovants équivalents aux rendements normalisés moyens de la référence Bretagne. Chaque correctif associé à un SdC est appliqué à toutes ses cultures. Les pratiques de fertilisation ont été recalculées en fonction des rendements objectifs corrigés *via* un bilan azoté (Giteau, Annexe IV). La stratégie de protection bas intrant est *a priori* équivalente quel que soit le contexte pédoclimatique (à dires d'experts). Pour le maïs et le blé, seules cultures communes aux SdC de référence et intégrés, les correctifs (c) sont calculés comme suit :

- SdC Kerg. intégré : un SdC en conduite raisonnée maïs-blé est situé de chaque côté du dispositif SdC intégré. D'où : $c_{\text{Kerg.int.}} = \frac{\text{correctif blé + correctif maïs}}{2} = 0{,}9$
  avec $c_{\text{culture i}} = \frac{\text{moyenne des rendements normalisés culture i Bretagne (récoltes 2013-2016)}}{\text{moyenne des rendements normalisés culture i du SdC raisonné (récoltes 2013-2016)}}$
- SdC Crécom intégré : le correctif est calculé à partir de données historiques de rendements (les cinq années de récolte précédant la mise en place de l'essai) en conduite raisonnée (Fisson, 2009). D'où : $c_{\text{Crécom int.}} = \frac{\text{correctif blé + correctif maïs}}{2} = 1{,}1$ avec $c_{\text{culture i}} = \frac{\text{moyenne des rendements normalisés culture i Bretagne (récoltes 2004-2008)}}{\text{moyenne des objectifs de rendements 2009 issus de conduites raisonnées}}$

Pour le SdC Bio, le maïs est la seule culture commune avec les autres SdC. Afin de garder la même logique de calcul du correctif (maïs et céréale), les correctifs du maïs et du triticale ont été calculés. Les rendements de la référence choisie en numérateur sont les rendements moyens obtenus par des agriculteurs bretons en AB (CER FRANCE Bretagne, 2015). En raison d'un manque de données, seules les années de récolte 2013 et 2014 sont disponibles.
D'où : $c_{\text{Bio}} = \frac{\text{correctif triticale + correctif maïs}}{2} = 1{,}0$
avec $c_{\text{culture i}} = \frac{\text{moyenne des rendements normalisés en AB culture i Bretagne (récoltes 2013 et 2014)}}{\text{moyenne des rendements normalisés culture i du SdC Bio (récoltes 2013 et 2014)}}$

Tableau 4 : Indicateurs retenus pour l'évaluation des performances environnementales, économiques et sociales des SdC innovants

Indicateur	Définition	Calcul (en moyenne pour les années de récolte 2013 à 2016), méthode	Objectif (cf hypothèses)
Indice de Fréquence de Traitement (IFT)	Nombre de doses homologuées de produits phytosanitaires appliquées à l'hectare	IFT moyen (échelle : culture) = $\sum_i \left(\frac{\text{dose appliquée moyenne de produit i (kg ou L/ha/an)}}{\text{dose homologuée moyenne de produit i (kg ou L/ha/an)}}\right)$	≤ 50% de l'IFT de référence Bretagne maïs-blé 2008
Quantité de Substances Actives (QSA) (g/ha)	Quantité de substances actives par produit phytosanitaire appliqué	QSA moyen (g/ha/an) (échelle : culture) = $\sum_i$[QSA moyen du produit i (g/ L ou kg /an) x dose appliquée moyenne produit i (L ou kg /ha/an)]	< 95% (tolérance de -5%) du QSA moyen du SdC de référence Bretagne
Reliquat début drainage (RDD) (kg N-NO3/ha/an)	Quantité d'azote dans le sol en période de début drainage : risque de lixiviation de l'azote en période hivernale	Analyses de sol fin novembre	< 50 kg N-NO3/ha/an (dires d'experts)
Consommation énergétique (MJ/ha puis équivalent litre fuel/ha (EQF/ha))	Ensemble des consommations moyennes directes (machinisme, irrigation, séchage des grains) et indirectes (production de produits phytosanitaires et de fertilisants) d'énergie fossile de la culture ou du SdC	Consommation énergétique moyenne (MJ/ha/an) = $E_{mach} + E_{ferti} + E_{phyto}$ avec E_{mach} : consommation totale en énergie fossile des outils utilisés (MJ/ha/an) (avec 1 litre de carburant équivaut à 35,5 MJ selon le référentiel Dia'terre) à l'échelle considérée (culture ou SdC) E_{ferti} : consommation totale en énergie fossile liée à la production d'engrais azoté (ammonitrate 33,5%) (MJ/ha/an) à l'échelle considérée (culture ou SdC) (dose d'engrais apportée en moyenne x 15,9 MJ/kg d'après Bouchard et al, 2008 et le référentiel Dia'terre) E_{phyto} : consommation totale en énergie fossile liée à la production des produits phytosanitaires (MJ/ha/an) Utilisation de la méthode de l'analyse énergétique PLANETE (Pour L'ANalyse énergETique des Exploitations agricoles, mise au point par Solagro et partenaires), basée sur l'ACV	< 95% de la consommation énergétique moyenne du SdC de référence Bretagne
Efficience énergétique		Efficience énergétique moyenne = production énergétique moyenne (MJ/ha/an) / consommation énergétique moyenne (MJ/ha/an) Utilisation de PLANETE	
Produit grains + paille (€/ha)	Gain lié au fonctionnement du SdC, hors charges	Produit G+P moyen (€/ha/an) (échelle : SdC) = $\frac{\sum_i (\text{produit G+P moyen culture i})}{\text{nb de cultures principales}}$ avec produit G + P moyen culture i = rendement normalisé moyen en grains (T/ha/an) x prix de vente moyen du grain (€/T/an) + rendement en paille moyen (T/ha/an) x prix de vente moyen de la paille (€/T/an)	≥ 95% du produit moyen du SdC de référence Bretagne
Charges opérationnelles (€/ha) (hors coût carburant)	Charges liées à la consommation d'intrants : semences, produits phytosanitaires, fertilisants, main-d'œuvre occasionnelle, irrigation	Charges opérationnelles moyennes (€/ha/an) (échelle : SdC) = charges semences + produits phytosanitaires + fertilisants	< 95% des charges totales moyennes du SdC de référence Bretagne
Charges de mécanisation(€/ha) (hors coût de main-d'œuvre)	Charges liées au parc matériel de l'exploitation : charges fixes du matériel (amortissement, intérêt du capital engagé, assurance et remisage), charges de fonctionnement (carburant, entretien, réparation)	Charges de mécanisation moyennes (€/ha/an) (échelle : SdC) = $\frac{1}{\text{nb de cultures principales}} \sum_i$ fréquence d'intervention moyenne (source ITK synthétisé) pour la culture i × (coût horaire d'utilisation outil+tracteur (€/h, source APCA) x débit de chantier de l'outil (h/ha, source APCA) + consommation de carburant par intervention (L/ha, source APCA) x prix moyen du carburant (€/L, source APCA))]	
Marge brute (€/ha) (hors aides)	Gain moyen du SdC après retrait des charges liées à la consommation d'intrants	Marge brute moyenne (€/ha/an) = produit grains+paille moyen (€/ha/an) - charges opérationnelles moyennes (€/ha/an)	≥ 95% de la marge moyenne du SdC de référence Bretagne
Marge semi-nette (€/ha) (hors rémunération de l'agriculteur et aides)	Rentabilité économique annuelle moyenne de la culture ou du SdC, à l'hectare, sans prendre en compte les charges sociales, MSA, fermage, etc…	Marge semi-nette moyenne (€/ha/an) = Marge brute moyenne (€/ha/an) - charges de mécanisation moyennes (€/ha/an)	
Valorisation économique du travail (€/h)	Valorisation économique de l'heure de travail, utilisable pour la comparaison des valeurs de SdC différents (car comparaison en euros et non en quintaux) sur une même période, afin d'éviter le biais lié à la variation de prix entre années	Le temps de travail dépendant des outils employés lors des interventions au champ, le numérateur doit prendre en compte le parc matériel (marge semi-nette et non marge brute) : Valorisation moyenne du travail (€/ha/an) = $\frac{\text{marge semi-nette moyenne (€/ha/an)}}{\text{temps de travail moyen (€/ha/an)}}$ *(cf performance sociale)*	≥ 95% de la valorisation du travail moyenne du SdC de référence Bretagne
Temps de travail (h/ha)	Dépend du matériel utilisé, de la nature et du nombre d'interventions	Données de guides APCA (abaques) en fonction du matériel utilisé	≤ 105% (tolérance de +5%) du temps de travail moyen du SdC de référence Bretagne
Nombre de passages effectués	Fréquences des interventions nécessitant un outil mécanique	Fréquences des interventions avec un outil mécanique par nature de l'intervention	≤ 105% du nombre moyen de passages du SdC de référence Bretagne
Répartition du travail (h/décade)	Répartition moyenne de la quantité de travail par décade sur l'année : mise en évidence des périodes de pic de travail	A partir des données de temps de travail par intervention et par culture	réduction des pics de travail
Toxicité phytosanitaire	Nombre de produits phytosanitaires dangereux pour la santé humaine (risques toxicologiques Xn (nocif), T (toxique) ou T+ (très toxique))	Toxicité phytosanitaire moyenne (échelle : SdC) = $\frac{1}{\text{nb de cultures principales}} \sum_i$[(nombre d'applications de produits Xn + nombre d'applications de produits T + nombre d'applications de produits T+) culture i]	< 95% du risque toxicologique moyen associé au SdC de référence Bretagne

II.3. Evaluation des performances des SdC

Les SdC intégrés et biologique étudiés ont pour enjeux directs la réduction du recours aux produits phytosanitaires (d'au moins 50% par rapport à la référence bretonne de 2008), tout en préservant ou en améliorant, par rapport à la référence régionale, la rentabilité de l'exploitation agricole et les conditions de travail de l'exploitant. Les SdC doivent également répondre aux enjeux locaux et globaux afin d'éviter que des pratiques mises en oeuvre ne les détériorent (Bockstaller et al, 2013). C'est pourquoi sont étudiés la qualité de l'eau, enjeu local, *via* des indicateurs azote et produits phytosanitaires, et la consommation énergétique, enjeu global lié au changement climatique (Bockstaller et al, 2013).

Le choix a été fait de n'évaluer que douze indicateurs quantitatifs (cinq pour le pilier environnemental, trois pour l'économique et quatre pour le social) pour les années de récolte 2013 à 2016 (calculs à partir de l'ITK synthétisé), à l'échelle de chaque SdC et éventuellement de chaque culture selon l'indicateur (effet de la contribution de chaque culture) (Tableau 4). La finalité du projet étant le transfert de connaissances aux agriculteurs et aux conseillers, les outils d'évaluation de la durabilité tels que MASC et DEXi ne sont pas utilisés car leurs résultats, qualitatifs, sont difficiles à valoriser auprès d'agriculteurs non avertis. Une unité surfacique et annuelle (/ha/an) est choisie pour exprimer les indicateurs. Afin d'en déterminer la variabilité interannuelle, les écarts-types, indicateurs de dispersion utilisés de manière standard (Pagès, 2010), sont déterminés (Figure 6).

Pour chacun des SdC, chaque indicateur est comparé à son objectif (Tableau 4), défini comme étant la valeur moyenne du SdC de référence régionale $\pm$ 5% de tolérance, selon l'indicateur. Ce seuil de 5% traduit la notion « d'environ égal à » et trouve son origine dans le niveau de signification α de valeur standard 5% associé au test de comparaison de moyennes (probabilité de rejeter à tort l'hypothèse nulle d'égalité des espérances*) (Pagès, 2010). Sur les graphiques, la notion « d'environ égal à » est représentée par deux lignes pointillées ou une ligne pointillée et une ligne continue (ligne objectif). Seule la moyenne du SdC est représentée par une ligne points-tirets bleue.

Un test de conformité de la moyenne (t.test) est effectué afin de vérifier si la moyenne μ des valeurs d'un indicateur d'un SdC innovant concorde avec la moyenne μ_0 de la référence : H_0 $\mu = \mu_0$ et H_1 $\mu \neq \mu_0$. Le test de Shapiro-Wilk est réalisé au préalable pour vérifier la normalité sur les individus (valeurs d'un indicateur) de chaque SdC : si la probabilité critique associée au test est supérieure à 5%, on accepte l'hypothèse de normalité de la variable (indicateur) du SdC (H_0) et on peut réaliser le test de conformité (Pagès, 2010). Sinon, le test non-paramétrique de Kruskal-Wallis est utilisé (H_0 : égalité des moyennes entre SdC) (Pagès, 2010) (Annexe XI) : si la p-value est inférieure à 5%, H_0 est rejetée et il y a un effet SdC sur nos données. Afin de savoir quel(s) SdC est (sont) concerné(s), le pourcentage de différence est calculé entre deux SdC.

Nous considérerons un système comme performant s'il atteint ses objectifs. En cas d'objectif non atteint, la raison en sera recherchée puis des améliorations proposées.

II.3.1. Indicateurs de performance environnementale

L'**IFT** correspond au nombre de doses homologuées de produits phytosanitaires appliquées à l'hectare (Reau & Doré, 2008 ; Brunet et al, 2009) et est calculé par type de produit (herbicide, fongicide, insecticide, régulateur, biocontrôle*). Le traitement de semences et les adjuvants ne sont pas pris en compte dans le calcul de l'IFT (MAAF, 2016 (a)). Pour l'évaluation, la dose homologuée correspond à la dose définie à la cible, et en cas de cible non informée, à la plus petite dose homologuée définie à la culture (MAAF, 2016 (a)).

La **Quantité de Substances Actives (QSA)** (kg/ha), calculée par type de produit, permet de comparer les produits phytosanitaires employés en termes de toxicité pour l'environnement, les substances actives des produits étant responsables de cette toxicité (Brunet et al, 2009).

La **consommation énergétique** (MJ/ha) correspond à l'ensemble des consommations directes (machinisme, irrigation, séchage des grains) et indirectes (production de produits phytosanitaires et de fertilisants) d'énergie fossile de la culture ou du SdC (Reau & Doré, 2008;

$\sigma = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^{4}(x_i-\bar{x})^2}{\text{nb d'années de récolte}}\right]}$, avec x_i valeur de l'indicateur pour l'année i (ITK réalisé : valeur par culture ou moyenne des cultures selon l'échelle considérée) et $\bar{x}$ sa valeur moyenne sur les quatre années de récolte considérées (ITK synthétisé) (Pagès, 2010)

Figure 6 : Formule de l'écart-type (σ)

Pour tous les graphiques, les écarts-types sont calculés à partir des valeurs totales des indicateurs (pas par poste).

Hirschy et al, 2015). Les consommations liées au transport des intrants et post-récolte (stockage et transport de la récolte, hors séchage des grains) ne sont pas prises en compte dans le calcul car considérées comme indépendantes des pratiques des SdC.

La consommation est calculée à l'échelle de la rotation en utilisant la méthode de l'analyse énergétique PLANETE, basée sur l'analyse de cycle de vie (ACV) (Annexe XII). L'humidité du maïs à la récolte est considérée à 32% en moyenne en Bretagne (Agreste Bretagne, 2015). Un zoom sera fait sur la consommation directe de carburant par SdC (hors ACV).

La consommation énergétique est complétée par l'indicateur **efficience énergétique**, qui correspond au ratio de la production énergétique sur la consommation énergétique (Aubertot et al, 2011). Il est calculé par PLANETE.

La qualité de l'eau, enjeu local, est évaluée, en plus de la QSA précédemment définie, par le **reliquat début drainage de l'azote (RDD)** (kg $N\text{-}NO_3$/ha/an), représentant le risque de lixiviation de l'azote fin automne/début hiver, à un instant t (Reau & Doré, 2008). Il est calculé en moyenne à l'échelle d'une succession entre deux cultures pour les SdC innovants.

II.3.2. Indicateurs de performance économique

La **marge brute moyenne** (MB) (€/ha/an) (hors aides) donne le gain moyen du SdC après retrait des charges liées à la consommation d'intrants (Reau & Doré 2008 ; Brunet et al, 2009).

Calculs des composantes de la marge brute

Le *produit grains + paille (produit G+P) moyen* (€/ha/an) correspond au produit entre les rendements en grains (normalisés) et en paille et les prix de vente associés (avec coûts de séchage) (Reau & Doré, 2008). Les *charges opérationnelles (CO) moyennes* (€/ha/an) (hors coût carburant) sont les charges liées à la consommation d'intrants (Reau & Doré 2008).

La **marge semi-nette moyenne** (MSN) (€/ha/an) (hors rémunération de l'agriculteur et aides) correspond à la rentabilité économique annuelle moyenne de la culture ou du SdC, à l'hectare, après retrait des charges de mécanisation (CM) et sans prendre en compte les charges sociales, MSA et fermage (Reau & Doré 2008 ; Brunet et al, 2009).

Calculs des composantes de la MSN

Les *CM moyennes* (€/ha/an) (hors coût de main-d'œuvre) concernent les charges liées au parc matériel de l'exploitation (Reau & Doré, 2008). Les données sont issues des abaques APCA annuels (APCA - Chambres d'agriculture France, 2013 à 2016), mis en relation avec le matériel utilisé pour la mise en œuvre des ITK de chaque SdC.

Enfin, la **valorisation économique moyenne du travail** (€/h/an), correspondant à la valorisation économique de l'heure de travail (Penot, 2009), est calculée.

II.3.3. Indicateurs de performance sociale

Le **temps moyen de travail** (h/ha/an) dépend du matériel utilisé, de la nature et du nombre d'interventions (Reau & Doré, 2008). Les données sont issues des guides APCA annuels en lien avec le matériel utilisé. Seules les durées des interventions au champ sont prises en compte car les temps de trajets et d'observation ne sont pas liés aux performances des SdC.

Le **nombre moyen de passages effectués** renseigne sur les fréquences des interventions nécessitant un outil (Reau & Doré, 2008 ; Brunet et al, 2009). C'est un indicateur complémentaire au temps de travail car une faible valeur de celui-ci n'implique pas nécessairement un faible nombre d'interventions au champ : on s'intéresse indirectement à l'aspect pénibilité du travail pour l'agriculteur (nombre de préparations du matériel).

La **répartition moyenne du travail** renseigne sur la répartition de la quantité de travail par décade sur l'année à l'échelle d'une exploitation bretonne de taille moyenne (60 ha en 2013 (Agreste Bretagne, 2017)) et met en évidence les périodes de pic de travail (Reau & Doré, 2008). L'indicateur permet de mettre en évidence les points forts et les points faibles de chaque SdC en termes de périodes d'activités. Les graphes sont obtenus *via* Anaconda (logiciel en langage Python ; Annexe XIII) à partir des données de temps de travail.

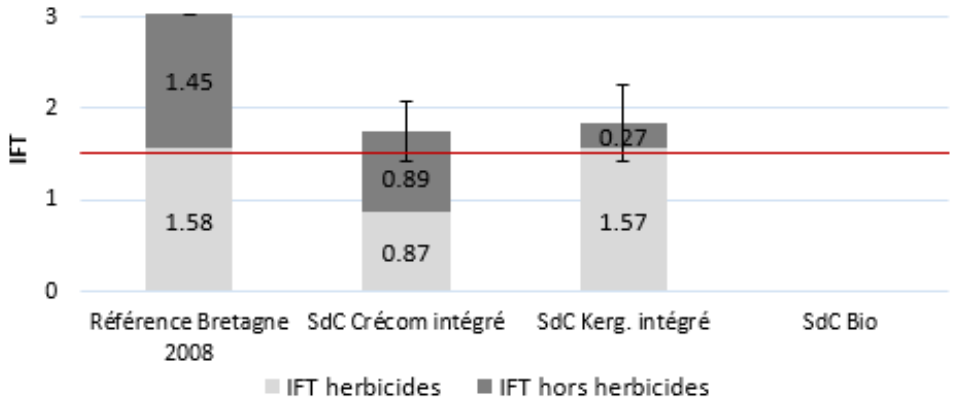


Figure 7 : IFT moyens par poste des trois SdC innovants et de la référence Bretagne 2008 pour les années de récolte 2013 à 2016

La ligne rouge correspond à l'objectif de réduction de 50% de l'IFT de la référence Bretagne 2008.

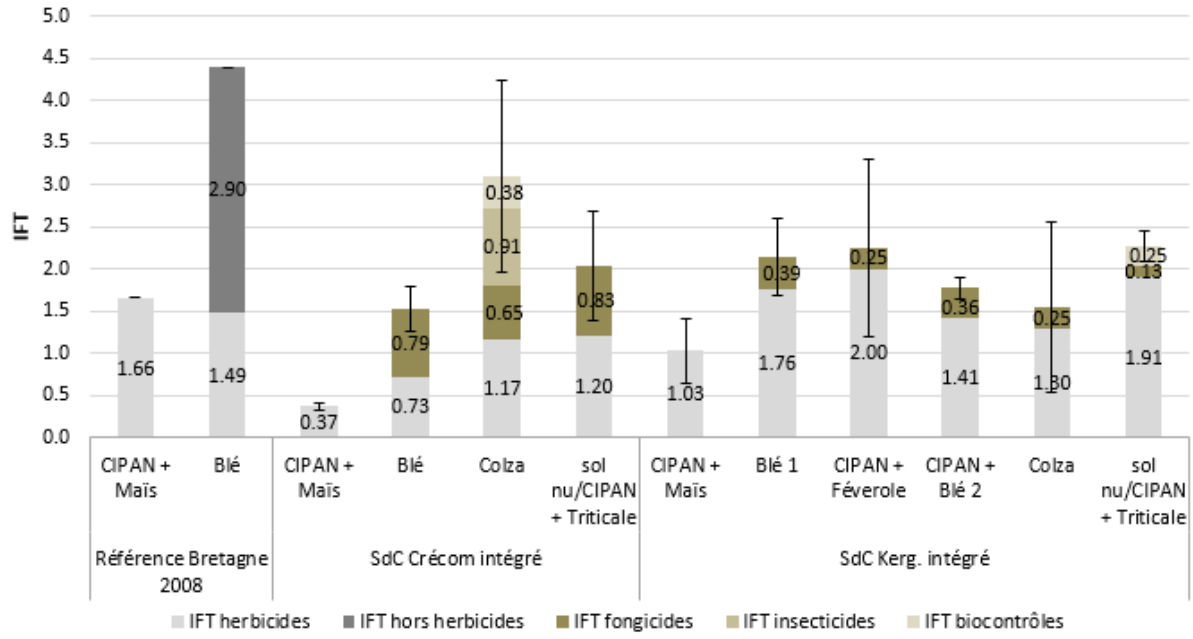


Figure 8 : IFT moyens par culture et par poste des deux SdC intégrés étudiés et de la référence Bretagne 2008 pour les années de récolte 2013 à 2016

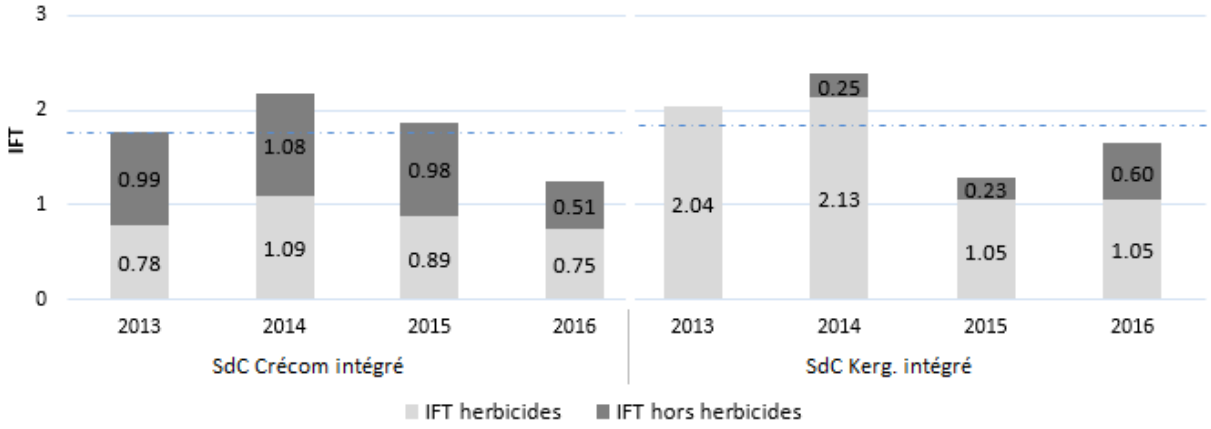


Figure 9 : IFT annuels par poste des SdC intégré pour les années de récolte 2013 à 2016

Les lignes bleues correspondent aux moyennes IFT 2013-2016 de chaque SdC.

La **toxicité phytosanitaire** permet d'évaluer le risque pour la santé de l'applicateur et correspond au nombre d'applications de produits phytosanitaires classés en risques toxicologiques Xn (nocif), T (toxique) ou T+ (très toxique) (indiqués sur le site ephy.gouv), considérés comme dangereux pour la santé humaine (Hirschy et al, 2015).

II.4. Bilan pluri-critères : performances globales des SdC

Un radar résumant les performances des SdC étudiés par indicateur en base 100 de la référence est réalisé afin de résumer les points forts et les points faibles de chaque SdC. De plus, afin de mettre en évidence des ressemblances entre cultures des différents SdC du point de vue de l'ensemble des indicateurs et d'éventuels liens entre ces derniers (Pagès, 2010), une Analyse en Composantes Principales (ACP) est réalisée à partir des données annuelles des indicateurs par culture pour les quatre SdC. Les variables produit G + P, CO et CM, IFT herbicides et hors herbicides, et nombre de cultures différentes dans la rotation (appelé « diversification ») sont illustratives. La consommation et l'efficience énergétique ne sont pas prises en compte dans l'ACP en raison de valeurs indisponibles par culture par année.

Les principaux résultats sont présentés dans la partie suivante.

III. Résultats

III.1. Performance environnementale

III.1.1. Recours aux produits phytosanitaires : IFT

Pour les SdC intégrés, l'IFT suit une loi normale ($p\text{-value}_{\text{Shapiro-Wilk}} > 0,05$) et est significativement différente de la référence Bretagne 2008 ($p\text{-value}_{\text{test de conformité}} < 0,05$) (Annexe XIV). L'IFT total du **SdC Crécom intégré** (1,76) affiche une réduction moyenne de 42% par rapport à la référence bretonne de 2008 (3,03), les herbicides étant réduits de 45% et les produits hors herbicides de 39% (Figure 7). La réduction des doses appliquées pour les herbicides sur maïs et pour les fongicides sur blé améliorent les IFT de ces cultures (Figure 8). En 2014 et 2015, une pression en véroniques sur triticale augmente le recours aux herbicides et, en 2014, la rouille jaune sur blé, celui de fongicides (Figure 9). L'objectif de réduction de 50% par rapport à la référence a été atteint en 2016 du fait de l'absence d'insecticides sur colza (pas de pression altises) et de la réduction d'herbicides sur triticale (moins de pression véroniques).

Pour le **SdC Kerg. intégré**, la réduction de l'IFT total (1,84) par rapport à la référence s'élève à 39%, avec une réduction moyenne de 0,5% pour les herbicides et de 81% pour les produits hors herbicides (Figure 7). L'IFT herbicides du blé 1 du SdC innovant est supérieur à celui de la référence (Figure 8) en raison d'un nombre d'herbicides appliqués plus important (adventices difficiles à gérer : gaillet, chardon, rumex, liseron, véronique). Toutefois le recours aux herbicides est réduit en 2015 et 2016 sur blé 1 (moins de passages contre folles avoines et liserons), colza (un labour et un passage au semis au lieu des trois passages de 2014 contre les graminées), maïs et féverole (arrêt du traitement herbicides contre les vivaces avant semis, remplacé par du labour, et désherbage chimique sur le rang au semis de la féverole) (Figure 9). L'objectif de réduction de 50% par rapport à la référence a été atteint en 2015.

Enfin, pour le **SdC Bio**, la réduction par rapport à la référence est de 100%.

Les cultures liées à l'**allongement et la diversification de la rotation** ont un IFT moyen supérieur à celui des maïs-blé de ces mêmes SdC (Figure 10). Pour le SdC Crécom intégré, le colza et le triticale contribuent à 44% et 29% respectivement de l'IFT moyen total du SdC (contre 22% pour le blé et 5% pour le maïs). Pour le SdC Kerg. intégré, le colza (10% de l'IFT moyen total) est la culture qui contribue le moins à l'IFT total après le maïs (7%). Le triticale et la féverole (23% chacun) sont responsables de presque la moitié de l'IFT. Notons que les IFT moyens maïs-blé des SdC intégrés sont inférieurs de plus de 50% à celui de la référence Bretagne : il peut s'agir d'un effet lié à l'allongement et la diversification de la rotation.

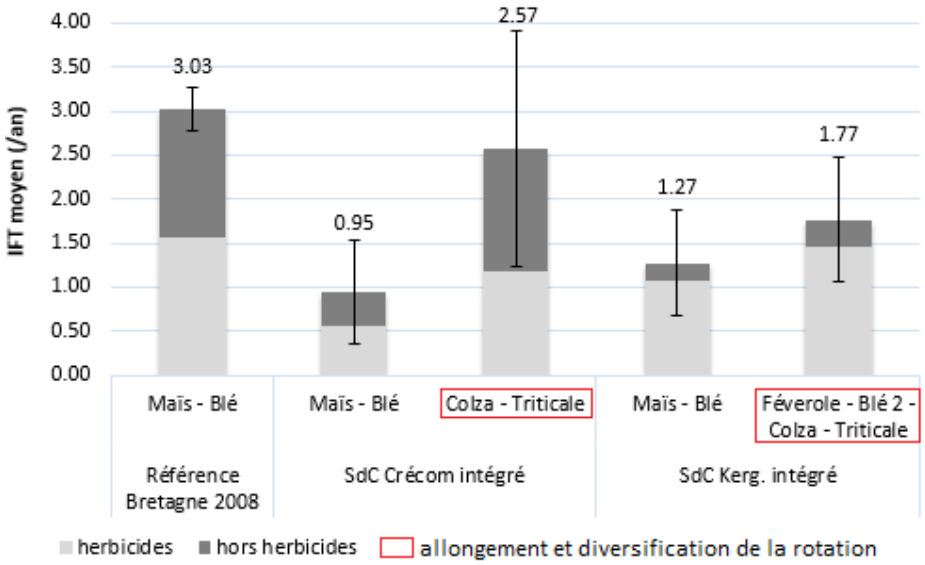


Figure 10 : Effet de l'allongement et de la diversification de la rotation sur les IFT des deux SdC intégrés pour les années de récolte 2013 à 2016

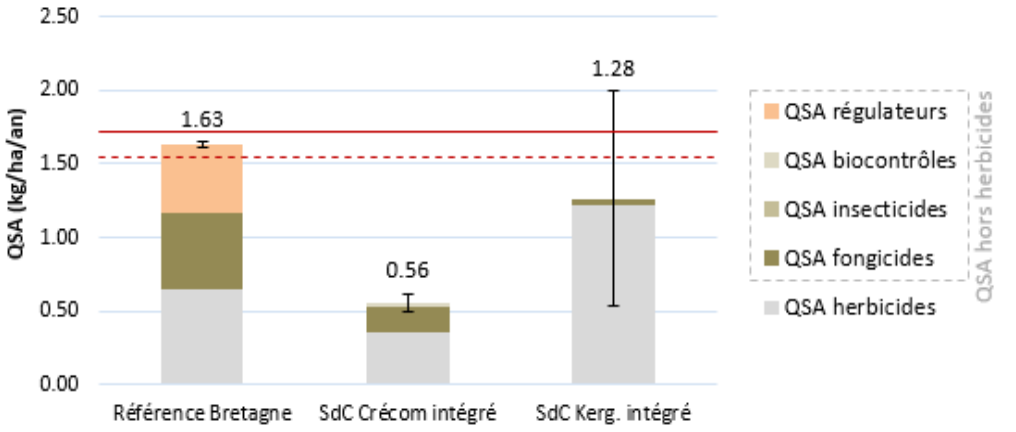


Figure 11 : QSA moyennes par poste des deux SdC intégrés étudiés et du SdC de référence Bretagne pour les années de récolte 2013 à 2016

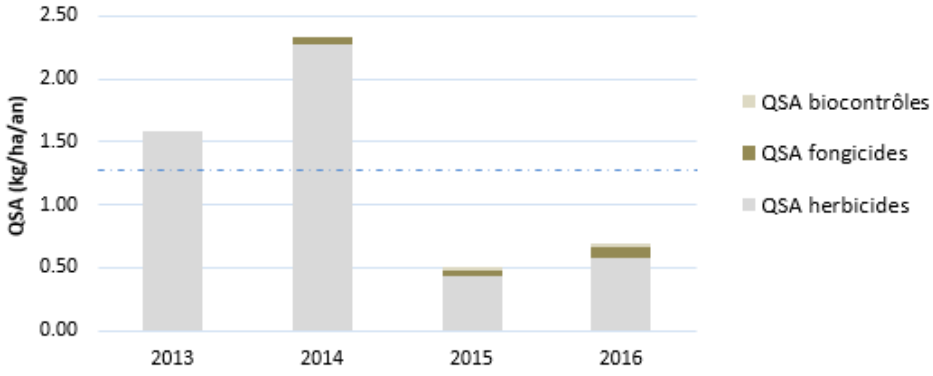


Figure 12 : Evolution de la QSA (kg/ha/an) par poste du SdC Kerguéhennec intégré pour les années de récolte 2013 à 2016

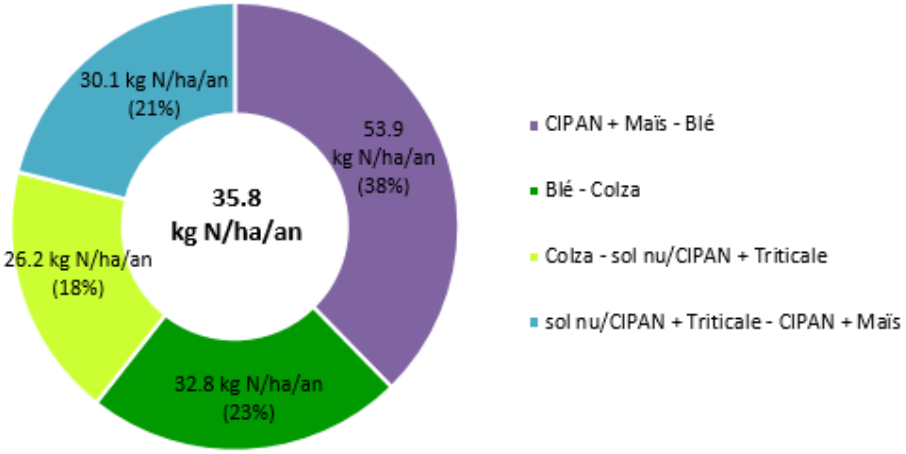


Figure 13 : Reliquats début drainage (RDD) moyens (kg $N\text{-}NO_3$/ha/an) par succession du SdC Crécom intégré pour les années de récolte 2013 à 2016

III.1.2. Qualité de l'eau : QSA et reliquats début drainage

a. QSA

La QSA du **SdC Crécom intégré** suit une loi normale (p-value $_{\text{Shapiro-Wilk}}$ > 0,05) et est significativement différente de la QSA de la référence (p-value $_{\text{test de conformité}}$ < 0,05). La QSA totale (0,56 kg/ha/an) affiche une réduction moyenne de 66% par rapport au SdC de référence (Figure 11). La réduction de la QSA herbicides par rapport au SdC de référence s'explique par la non-utilisation de l'herbicide de pré-levée Camix sur maïs, à fort grammage de matières actives, et par la pratique du désherbinage. La différence avec le SdC Kerg. intégré est liée à la réduction du nombre d'herbicides utilisés : pas de désherbage chimique (glyphosate) avant le semis du maïs et du triticale, pas d'utilisation de Charade, herbicide à fort grammage de matières actives (contre la véronique), sur blé (remplacé par Allié Express 30 g/ha ou Biscoto 0,7 L/ha début avril). 63% de la QSA totale du SdC Crécom intégré provient des herbicides. La culture la plus consommatrice de QSA herbicides est le colza (0,98 kg/ha/an contre 0,07 kg/ha/an pour le blé et le maïs) en raison du recours à des herbicides de pré-levée, à action racinaire (0,5 kg/L de substances actives contre 0,2 kg/L pour les herbicides de post-levée utilisés en rattrapage, à action foliaire) contre graminées et dicotylédones (véronique, laiteron). Le deuxième poste à fort QSA correspond aux fongicides, essentiellement sur céréales et notamment Cherokee (2015 et 2016) contre la septoriose et la rouille jaune.

La QSA totale du **SdC Kerg. intégré** (1,28 kg/ha/an) affiche une réduction moyenne de 21% par rapport au SdC de référence (Figure 11). 95% de sa QSA provient des herbicides. Le faible recours aux produits hors herbicides explique la réduction de la QSA totale. La féverole et le triticale sont les cultures qui utilisent en moyenne le plus de matières actives herbicides (2,22 et 1,80 kg/ha/an resp.). 85% de la QSA herbicides de 2013 à 2016 provient des herbicides de pré-levée Challenge et Nirvana (contre graminées et dicotylédones) et 50% de la QSA herbicides du triticale, du Freeway (glyphosate). La QSA du SdC a une grande variabilité interannuelle (Figure 12). Le fort QSA herbicides de 2014 est lié à l'utilisation de Freeway à 6 L/ha (QSA de 0,49 kg/L) sur blé 1 (liseron) et à l'application de six herbicides en mélanges (deux les autres années) avant et sur colza, dont du Freeway, pour lutter contre les vivaces (faible efficacité du binage, tardif et conditions humides). La forte réduction de la QSA herbicides entre 2013-2014 et 2015-2016 (Figure 12) s'explique principalement par le remplacement du Charade (utilisé contre la véronique essentiellement) sur blé 1, la réduction de la dose d'application du Freeway sur triticale, et par les mêmes raisons que celles données en III.1.1 pour la réduction de l'IFT herbicides du maïs et de la féverole.

La QSA du **SdC Bio** est nulle en raison de l'absence d'utilisation de produits phytosanitaires.

b. Reliquats début drainage

Les RDD à l'échelle de la rotation des SdC innovants sont inférieurs ou égaux à 50 kg N-NO_3/ha/an. Les RDD du **SdC Crécom intégré** sont en moyenne de 35,8 kg N-NO_3/ha/an à l'échelle du SdC, la succession y contribuant le plus étant le maïs-blé (38%) (Figure 13). Entre colza et triticale, le RDD moyen sur la période 2012-2013 est de 64,8 kg N-NO_3/ha/an, contre 26,7 kg N-NO_3/ha/an avec l'ajout d'un couvert court après colza (2014-2016).

Les RDD du **SdC Kerg. intégré** sont en moyenne de 42,7 kg N-NO_3/ha/an à l'échelle du SdC, les successions y contribuant le plus étant le maïs-blé 1 (26%), le blé 2-colza (25%) et la féverole-blé 2 (22%) (Figure 14). Le fort RDD de la succession blé 2-colza s'explique par la fertilisation organique du colza (début septembre) avec du compost (arrière effet azote important). Entre colza et triticale, le RDD moyen est passé de 53,0 kg N-NO_3/ha/an (2012-2014) à 31,5 kg N-NO_3/ha/an (2015-2016) avec couvert court. Les RDD après blé 1 et après triticale sont les plus bas car réalisés dans la CIPAN de la culture suivante, absorbant l'azote.

Les RDD du **SdC Bio** sont en moyenne de 50,6 kg N-NO_3/ha/an à l'échelle du SdC, les successions culture de printemps-culture d'automne contribuant le plus à cette valeur : féverole-triticale (34%), maïs-blé+féverole (29%), et sarrasin-triticale+pois (18%) (Figure 15). Les RDD après cultures d'automne (triticale et mélanges) sont les plus bas car réalisés dans la CIPAN de la culture suivante. Le RDD moyen de 102 kg N/ha/an après féverole est lié au relargage d'azote par cette légumineuse (en lien avec le rendement et la biomasse racinaire).

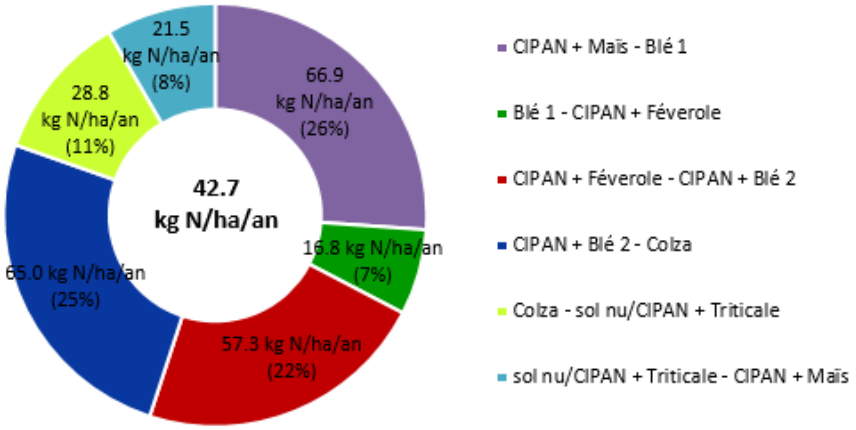


Figure 14 : RDD moyens (kg N-NO_3/ha/an) par succession du SdC Kerguéhennec intégré pour les années de récolte 2013 à 2016

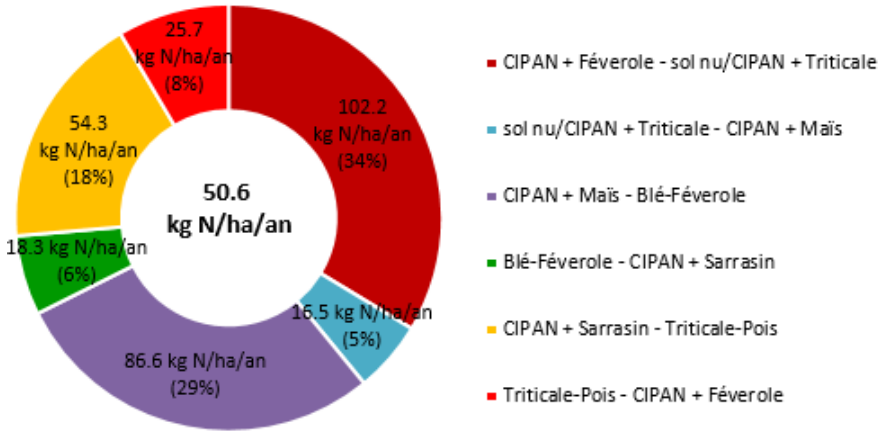


Figure 15 : RDD moyens (kg N-NO_3/ha/an) par succession du SdC Bio pour les années de récolte 2013 à 2016

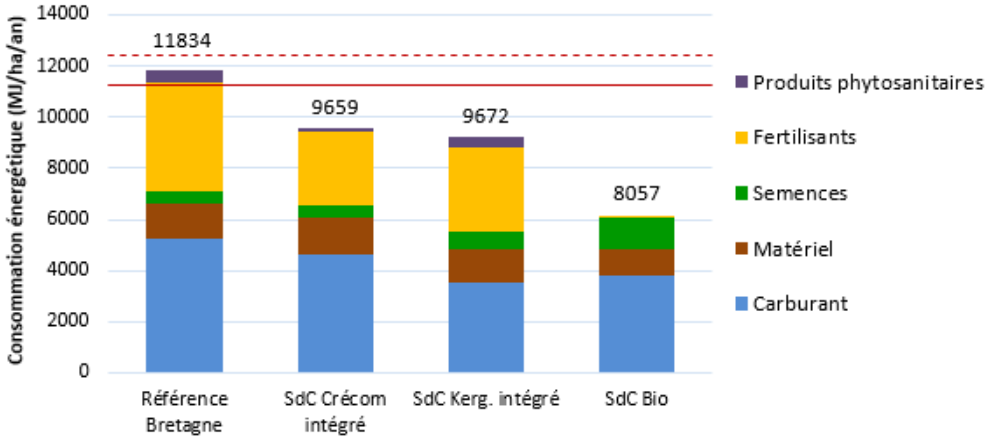


Figure 16 : Consommations énergétiques (MJ/ha/an) par poste des trois SdC innovants et de la référence Bretagne pour les années de récolte 2013 à 2016

Rq : 1 MJ ⇔ 0,028 EQF

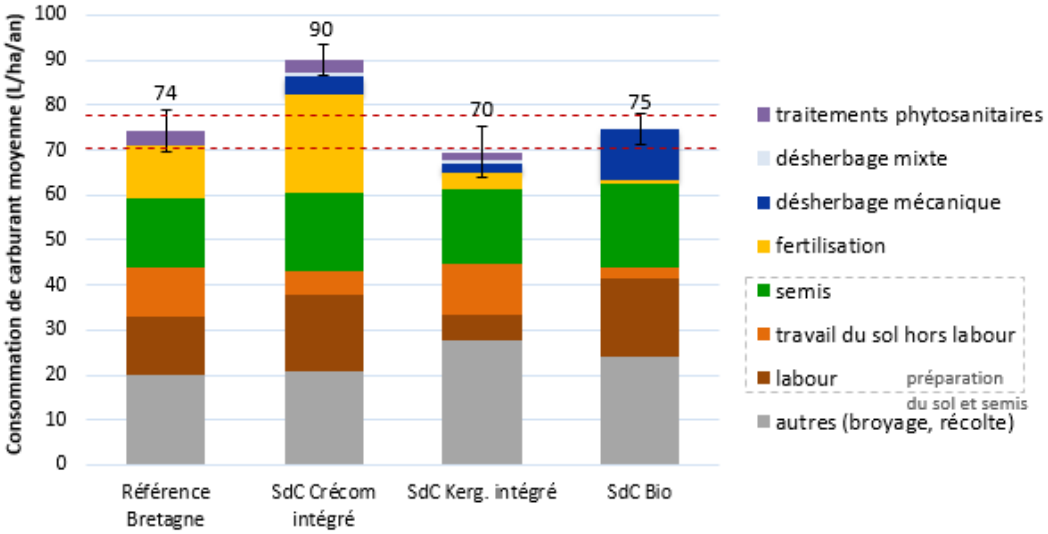


Figure 17 : Consommations de carburant moyennes (L/ha/an) (tracteurs, hors séchage) par poste des trois SdC innovants et de la référence Bretagne pour les années de récolte 2013 à 2016

Entre féverole et triticale, le RDD moyen en 2014 (pas de données 2013) est de 144 kg N-NO_3/ha/an, contre 81 kg N-NO_3/ha/an avec couvert court après féverole (2015-2016). Les couverts courts pourraient donc avoir contribué à la réduction des RDD des SdC étudiés.

III.1.3. Consommation et efficience énergétiques

Les SdC de référence, Crécom et Kerg. intégrés et le SdC Bio consomment respectivement 331, 268, 259 et 171 équivalents litres fuel (EQF)/ha/an. Les principales différences entre les SdC innovants et la référence se trouvent au niveau des postes « carburant » (consommations directes du matériel et séchage des grains), « semences » et « fertilisants » (Figure 16). Concernant le **poste « carburant »**, l'allongement de la rotation permet de réduire en moyenne annuelle la consommation nécessaire au séchage des grains *via* une réduction de la fréquence de retour du maïs, récolté en novembre entre 32% et 38% d'humidité. Le SdC Crécom intégré affiche cependant une consommation énergétique en carburant supérieure aux deux autres SdC innovants, en raison d'une consommation de carburant directe (tracteurs) de 90 L fuel/ha/an (73 L/ha/an en moyenne pour les autres SdC) (Figure 17). Cette consommation supérieure provient essentiellement de la fertilisation organique au lisier de porc sur céréales (20 L/intervention/ha pour du lisier contre 8 L pour du fumier ou de la fertilisation minérale). Notons que le SdC Bio n'est pas synonyme d'augmentation de la consommation de carburant (Figure 17), malgré des interventions de désherbage mécanique plus fréquentes. Pour le **poste « semences »** de la consommation énergétique (Figure 16), les différences s'expliquent par l'implantation de CIPAN (67% des cultures sont précédées par un couvert pour les SdC Kerg. intégré et Bio, 50% pour les SdC de référence et Crécom intégré) et par la densité de semis (augmentée pour le SdC Bio). Le **poste « fertilisants »** du SdC Bio est très réduit du fait de la fréquence de fertilisation (1 an/6) ; pour les autres SdC, l'utilisation d'engrais de synthèse multiplie la consommation énergétique par au moins 90 (en fonction du SdC, la référence consommant plus d'ammonitrate, suivie des SdC Kerg. puis Crécom intégrés).

Les trois SdC innovants sont plus **efficients** que la référence bretonne (15,77 MJ/ha/an produits pour 1 MJ consommé pour le SdC Crécom intégré, 15,52 pour le SdC Kerg. intégré et 16,96 pour le SdC Bio, contre 13,68 pour le SdC de référence) car bien qu'ils produisent moins d'énergie (7% en moins pour le SdC Crécom, 12% en moins pour le SdC Kerg. intégré et 36% en moins pour le SdC Bio), ils en consomment également moins (18% en moins pour les SdC intégrés et 49% pour le SdC Bio). Malgré l'absence de récolte des pailles (moindre production énergétique), le SdC Bio reste le plus efficient, notamment grâce à l'économie du poste « fertilisants ».

III.2. Performance économique

III.2.1. Rendements

Les SdC Crécom et Kerg. intégrés réalisent des rendements maïs-blé équivalents à la référence bretonne (75, 79 et 79 q/ha/an resp.) sur la période étudiée. Les rendements maïs-triticale du SdC Bio étant de 49,67 q/ha/an, il y a pertes de rendements pour ce SdC. En moyenne, les trois SdC innovants atteignent leurs objectifs de rendement (Figure 18). Le SdC Bio affiche une plus grande variabilité interannuelle du fait de sa récente mise en place et de la plus forte variabilité entre cultures. Les cultures d'automne (mélanges notamment) sont plus régulières entre années en termes d'atteinte de rendements que les cultures de printemps.

III.2.2. Rentabilité économique : produits, charges et marges

Les MB et MSN des SdC innovants suivent une loi normale (p-value $_{\text{Shapiro-Wilk}} > 0,05$) et sont significativement différentes des marges de la référence pour le SdC Bio (p-value $_{\text{test de conformité}} < 0,05$), ce qui n'est pas le cas des marges des SdC intégrés (p-value $_{\text{test de conformité}} > 0,05$). Les marges des SdC innovants sont en moyenne supérieures à celles de la référence, notamment pour le SdC Bio (225 €/ha/an de MB et MSN en plus par rapport à la référence) (Figure 19). Ces différences s'expliquent par des CO inférieures pour les SdC innovants par rapport au SdC de référence, auxquelles s'ajoute un produit G + P du SdC Bio supérieur à la référence

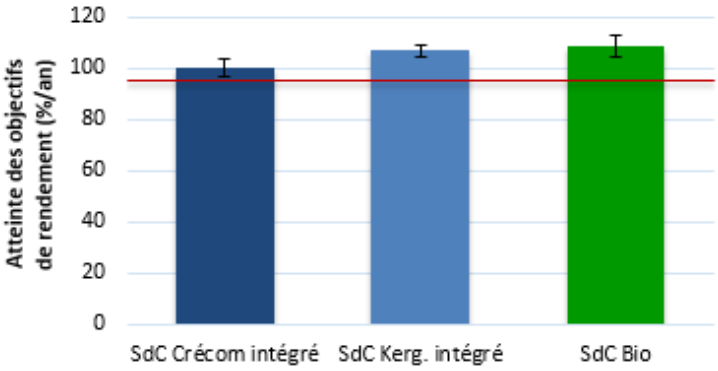


Figure 18 : Atteintes moyennes des objectifs de rendement fixés (%/an) des trois SdC innovants pour les années de récolte 2013 à 2016

La ligne rouge correspond à 95% de l'atteinte de l'objectif de rendement.

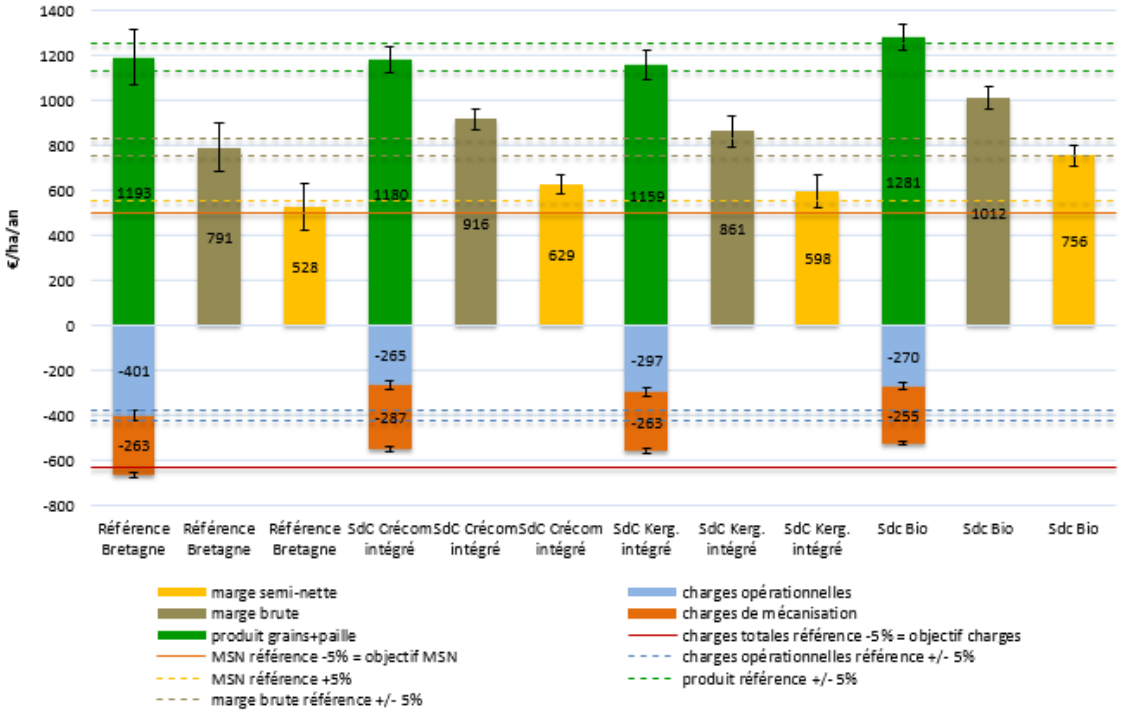


Figure 19 : Quelques indicateurs de performances économiques (€/ha/an) des trois SdC innovants et du SdC de référence Bretagne calculés pour les années de récolte 2013 à 2016

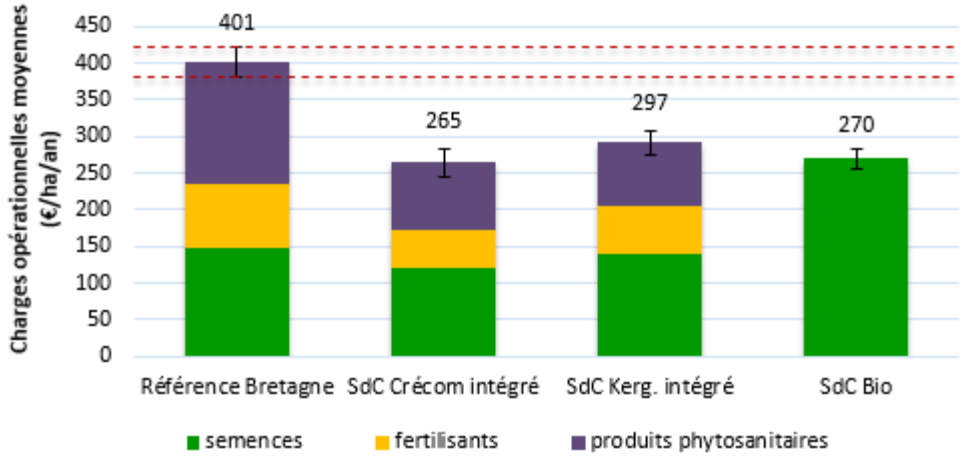


Figure 20 : Charges opérationnelles moyennes (€/ha/an) par poste des trois SdC innovants et du SdC de référence Bretagne pour les années de récolte 2013 à 2016

(prix de vente supérieurs). Les CO des SdC innovants sont réduites d'environ 31% par rapport à la référence, en raison essentiellement de la réduction du poste alloué aux produits phytosanitaires (Figure 20). Pour Crécom, ce sont les fongicides sur céréales (50€/ha/an) et les herbicides sur colza (90€/ha/an) qui entrainent le plus de dépenses ; pour le SdC Kerg. intégré, ce sont les dépenses d'herbicides sur féverole (120€/ha/an) et céréales (75€/ha/an). Les dépenses du SdC Bio sont liées à des semences chères (féverole, maïs) ainsi qu'aux densités de semis augmentées. Les semences de maïs coûtent cher mais la culture rapporte 480€/ha/an de plus en produit que la moyenne du SdC ; la féverole a également un coût de semences élevé mais rapporte 100€/ha/an de moins. Les mélanges céréale-protéagineux ont un coût de semences inférieur à la moyenne du SdC Bio (220€/ha/an et 270€/ha/an respectivement) et génèrent 110 €/ha/an de produit en plus (effet rendement et prix de vente).

Les SdC innovants présentent des marges plus stables pour les années de récolte étudiées du fait de la compensation entre cultures chaque année. Pour les deux SdC intégrés, le maïs présente des marges inférieures aux autres cultures (effet prix de vente) et les céréales, des marges supérieures (effet prix et rendements). La féverole et le colza du SdC Kerg. intégré présentent une forte variabilité de marges en raison de rendements variables. Le colza de ce SdC rapporte 250 €/ha/an en moins que celui de Crécom. Pour le SdC Bio, la féverole, le triticale et le sarrasin présentent des marges inférieures à la moyenne (effet rendements) et le maïs ainsi que le blé-féverole des marges supérieures (effets rendements et prix). Les mélanges céréales-protéagineux semblent rapporter un plus par rapport à une culture pure en termes de produit (au moins 300 €/ha/an de plus en moyenne lié à un effet rendement pour le blé-féverole et un effet prix de vente pour le triticale-pois). Le triticale et le sarrasin ne présente pas d'avantage en termes de produit par rapport à la référence en raison de rendements variables et peu élevés, malgré un prix de vente fort pour le sarrasin (838 €/T/an). Les MSN de la féverole pure et du sarrasin, sans prise en compte des CIPAN, seraient réduites de 155 €/ha/an, les maintenant toujours en-dessous du maïs et du blé-féverole.

Notons que les CM du SdC Crécom intégré sont supérieures de 24 €/ha/an à la référence (Figure 21), en raison du désherbage mécanique (14 €/ha/an supplémentaires : faux-semis sur triticale) et de la fertilisation organique (8 €/ha/an supplémentaires : lisier de porc notamment). Les charges de désherbage mécanique élevées du SdC Bio (40 €/ha/an) s'expliquent essentiellement par les faux-semis, hersages et binages sur maïs.

Pour le SdC Crécom intégré, les **cultures de diversification** (colza et triticale) génèrent une MSN supérieure, en moyenne, à celle de son maïs-blé, et contribuent pour 27% chacune à la MSN moyenne totale du SdC (contre 18% pour le maïs) (Figure 22). La MSN des cultures de diversification du SdC Kerg. intégré est équivalente à celle de son maïs-blé. Le blé 2, le triticale et le colza contribuent pour 22%, 19% et 15% respectivement à la MSN totale du SdC (contre 12% pour le maïs). Pour le SdC Bio, les cultures de diversification ont une MSN moyenne inférieure (de 11%) à celle du maïs-triticale mais plus stable sur la période considérée. Le maïs du SdC Bio contribue pour 23% à la MSN totale du SdC et les mélanges céréale-protéagineux pour 21% chacun (contre 13% pour le triticale). Les MSN maïs-blé des SdC intégrés sont supérieures en moyenne à celle de la référence bretonne (effet réduction des CO sur blé).

III.2.3. Valorisation économique du travail

La variable valorisation du travail des SdC innovants suit une loi normale (p-value $_{\text{Shapiro-Wilk}}$ > 0,05) et est significativement différente de la valeur de la référence pour le SdC Bio (p-value $_{\text{test de conformité}}$ < 0,05), ce qui n'est pas le cas des SdC intégrés (p-value $_{\text{test de conformité}}$ > 0,05). Les SdC innovants ont une valorisation économique du travail moyenne supérieure au SdC de référence (Figure 23), ce qui s'explique par une MSN supérieure à la référence. Le temps de travail (cf III.3.1.a) du SdC Crécom intégré, supérieur à ceux des autres SdC, explique la différence entre les SdC intégrés (réduction de Crécom). Les mélanges céréale-protéagineux du SdC Bio et les céréales du SdC Kerg. intégré (240 et 160 €/h/an en moyenne resp.) sont les cultures qui valorisent le mieux le temps de travail (forte MSN, faible temps de travail). Sans prendre en compte le temps de travail alloué aux CIPAN, le sarrasin resterait la culture la moins valorisante du SdC Bio (108 €/h/an sans CIPAN, 83 €/h/an avec).

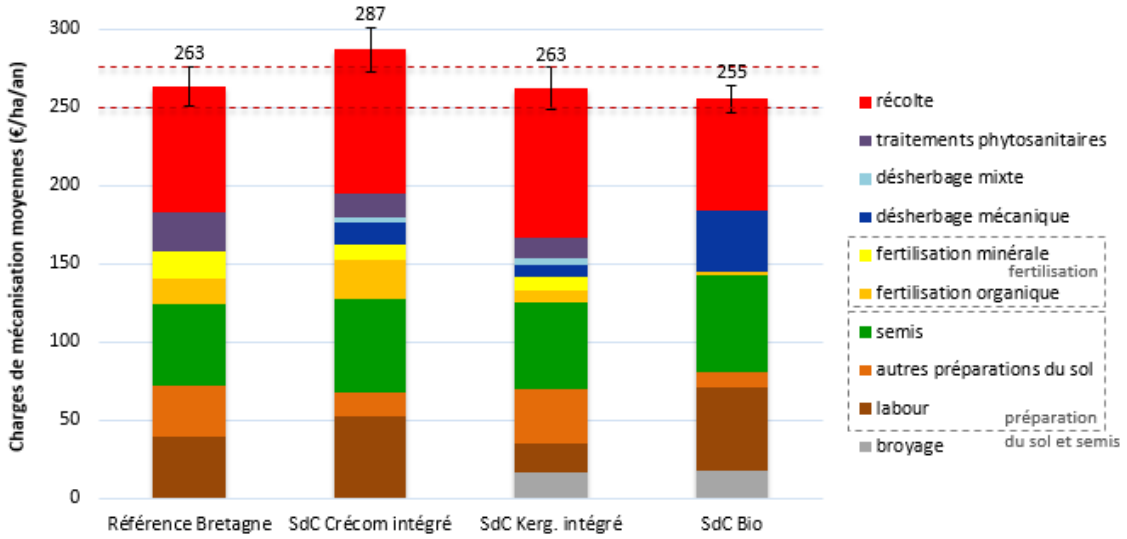


Figure 21 : Charges de mécanisation moyennes (€/ha/an) par poste des trois SdC innovants et du SdC de référence Bretagne pour les années de récolte 2013 à 2016

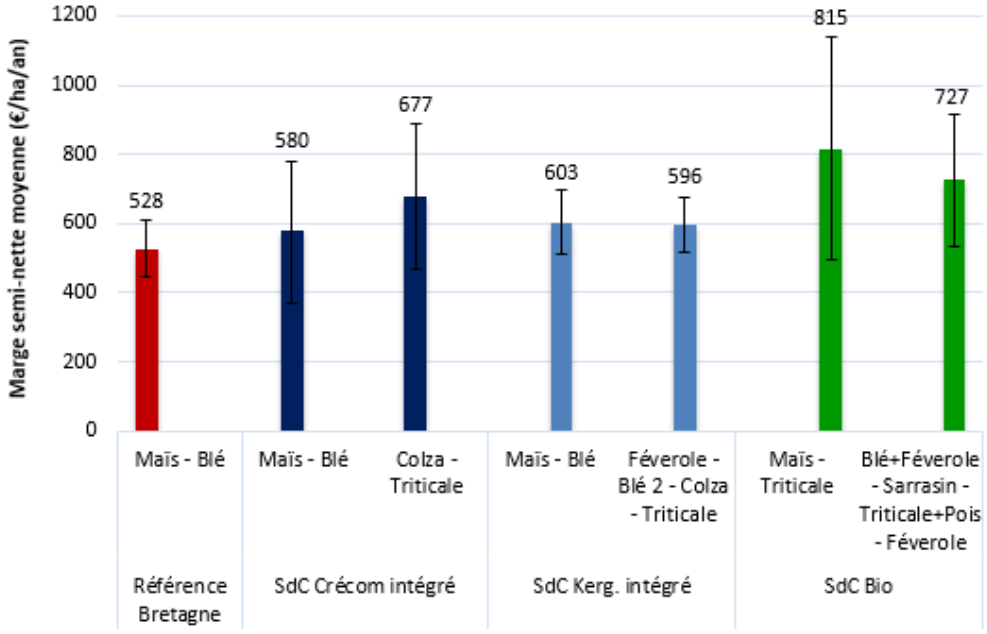


Figure 22 : Effet de l'allongement et de la diversification de la rotation sur les MSN des trois SdC innovants pour les années de récolte 2013 à 2016

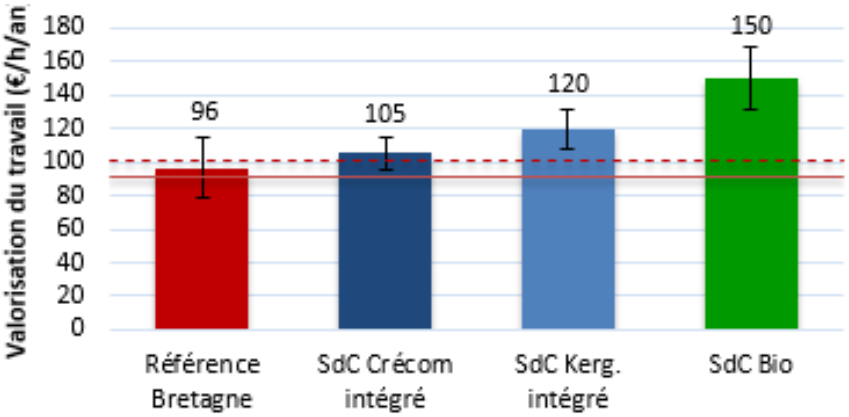


Figure 23 : Valorisations économiques moyennes du travail (€/h/an) des trois SdC innovants et du SdC de référence Bretagne pour les années de récolte 2013 à 2016

III.3. Performance sociale

III.3.1. Charge de travail : temps de travail, nombre de passages et répartition du temps de travail

a. Temps de travail

Les temps de travail des SdC innovants suivent une loi normale (p-value $_{\text{Shapiro-Wilk}}$ > 0,05) et ne sont pas significativement différents de la valeur de la référence (p-value $_{\text{test de conformité}}$ < 0,05). Le SdC Crécom intégré présente un temps de travail (environ 6 h/ha/an) supérieur à la référence (5,6 h/ha/an) et aux deux autres SdC innovants (5,4 h/ha/an en moyenne) (Figure 24). La préparation du sol et le semis occupe 52% du temps de travail des SdC innovants (58% pour la référence). Le désherbage mécanique s'ajoute pour les SdC innovants et occupe presque 25% du temps pour le SdC Bio (hersages du maïs et du triticale, binage du maïs). La fréquence de fertilisation organique inférieure pour le SdC Kerg. intégré réduit le temps de travail alloué à la fertilisation par rapport à la référence et à Crécom. L'utilisation de la tonne à lisier à Crécom consomme plus de temps qu'un épandeur à fumier (2 voyages/h contre 3 resp.). Le désherbage manuel (vivaces) du SdC Bio représente 5 min/ha/an pour une culture.

b. Nombre de passages

Le nombre de passages des SdC innovants ne suit pas une loi normale (p-value $_{\text{Shapiro-Wilk}}$ < 0,05). D'après le test de Kruskal-Wallis, il ne semble pas y avoir d'effet SdC sur cet indicateur pour la période considérée (p-value $_{\text{Kruskal-Wallis}}$ > 0,05) (Annexe XV). Les SdC de référence et Crécom intégré présentent des nombres de passages équivalents (environ 10 passages/an) sur la période étudiée, tandis que les SdC Kerg. intégré et SdC Bio ont environ un passage en moins (Figure 25). Le nombre de passages du SdC Bio est plus hétérogène entre cultures que pour les autres SdC : entre 5 et 16 passages/culture/an (triticale-pois et CIPAN+maïs resp.) sont enregistrés, contre 8 et 12 passages/an pour les autres SdC. Le labour systématique des SdC Crécom intégré et Bio, la fréquence de fertilisation des cultures et le fractionnement des apports d'ammonitrate, le désherbage mécanique du maïs du SdC Bio (8 interventions/an) et la réduction de l'usage de fongicides au SdC Kerg. intégré expliquent les différences.

c. Répartition du temps de travail

Pour le **SdC de référence**, deux grands pics de travail apparaissent : une pointe de travail à 9 h/j fin avril (préparation du sol et semis du maïs) et une autre à 7 h/j début novembre (préparation du sol et semis du blé surtout) (Figure 26). Les deux autres pics, moins élevés (6 h/j fin mars et 4,5 h/j mi-août), correspondent à la destruction de la CIPAN avant maïs suivie d'une fertilisation organique pour le premier pic, et à la récolte du blé (grains et paille) pour le second. Trois périodes de travail sont mises en avant : de mars à juin, d'août à septembre et de novembre à décembre.

Pour le **SdC Crécom intégré**, une pointe de travail à 5,5 h/j en août apparaît (récolte des céréales ; fertilisation, préparation du sol et semis du colza) (Figure 27). Deux paires de pics, moins élevés (4 h/j), se trouvent en mars-avril (destruction de la CIPAN avant maïs, fertilisations du maïs et des céréales, préparation du sol et semis du maïs) et en novembre-décembre (préparation du sol et semis des céréales surtout). Deux grandes périodes de travail sont mises en avant : de mars à juin et d'août à décembre.

Pour le **SdC Kerg. intégré**, une pointe de travail à 6 h/j début août (récolte des céréales) apparaît (Figure 28). Les quatre autres pics, moins élevés (4,5 h/j en novembre-décembre, 4 h/j fin août-début septembre et 2h/j en mars et mai), correspondent surtout à la préparation du sol et semis des céréales pour le pic de 4,5 h/j ; à la préparation du sol et semis du colza et des CIPAN, ainsi qu'à la récolte de la féverole pour le pic de 4 h/j ; au broyage de la CIPAN avant féverole et à la préparation du sol et semis de celle-ci en mars ; enfin, à la préparation du sol et semis du maïs en mai. Trois périodes de travail très rapprochées sont mises en avant : une longue période de mars à juillet et deux plus petites d'août à septembre et d'octobre à décembre.

Pour le **SdC Bio**, deux pointes de travail à environ 5 h/j en août (récolte du triticale, de la féverole et des mélanges et semis des CIPAN) et en novembre-décembre (préparation du sol

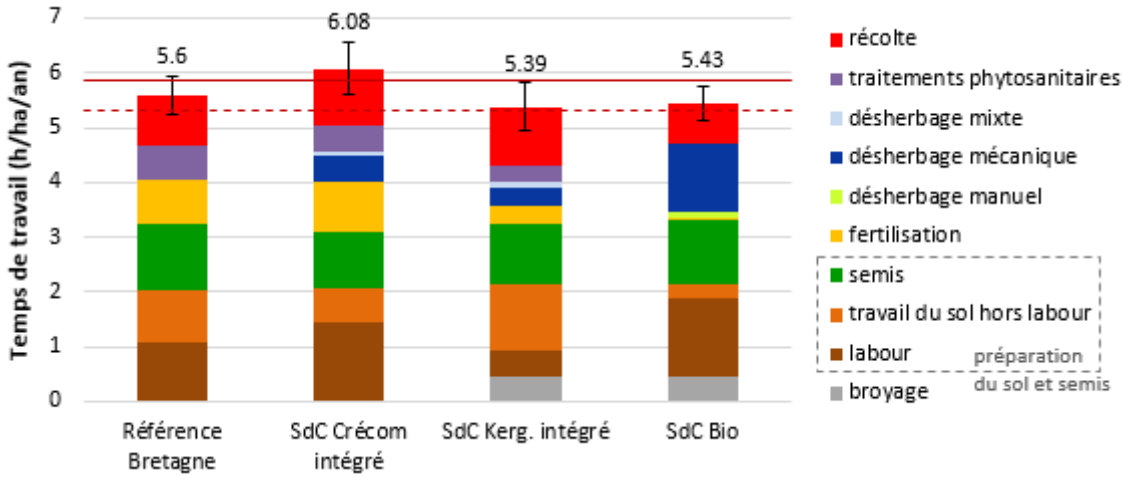


Figure 24 : Temps de travail moyens (h/ha/an) des trois SdC innovants et du SdC de référence Bretagne pour les années de récolte 2013 à 2016

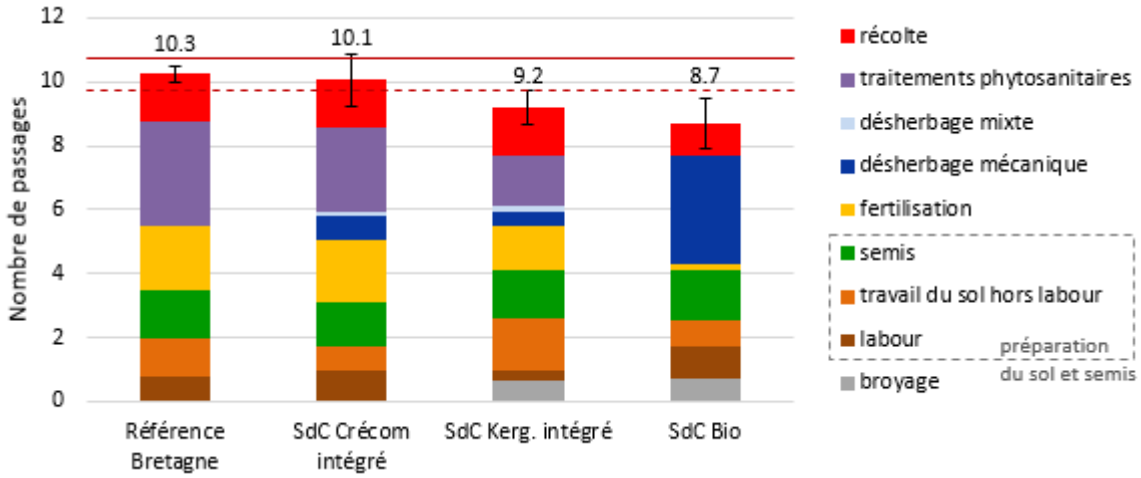
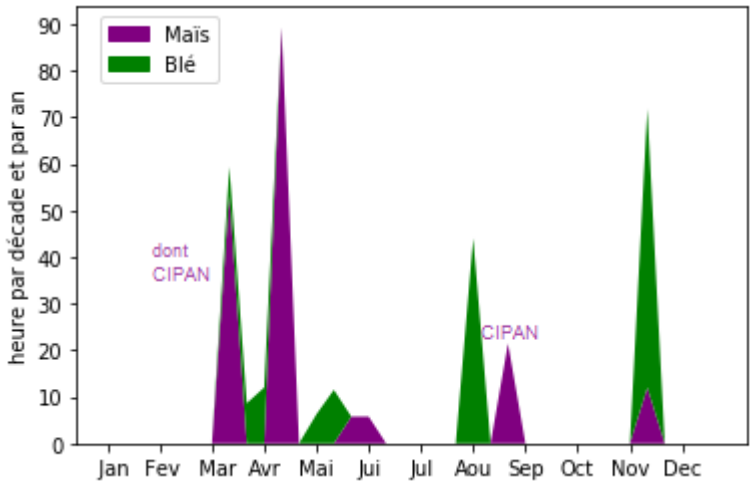


Figure 25 : Nombres de passages moyens (outils mécaniques) par poste des trois SdC innovants et du SdC de référence Bretagne pour les années de récolte 2013 à 2016



Mars-juin : destruction de la CIPAN, fertilisations, préparation du sol et semis du maïs, traitements phytosanitaires

Août-septembre : récolte du blé et semis de la CIPAN

Novembre-décembre : récolte du maïs, préparation du sol et semis du blé

Figure 26 : Répartition moyenne du temps de travail (h/décade/an) du SdC de référence Bretagne pour les années de récolte 2013 à 2016 pour une exploitation de 60 ha (graphique de type cumulé)

et semis du triticale et des mélanges surtout) apparaissent (Figure 29). Un autre pic, moins élevé (3 h/j en mars-avril), correspond aux préparations du sol et semis du sarrasin, maïs et féverole, ainsi qu'aux hersages du triticale, féverole et mélanges. Trois périodes de travail très rapprochées sont mises en avant : une longue période de février à juillet et deux plus petites d'août à octobre et en novembre-décembre.

III.3.2. Risque pour la santé de l'applicateur : toxicité phytosanitaire

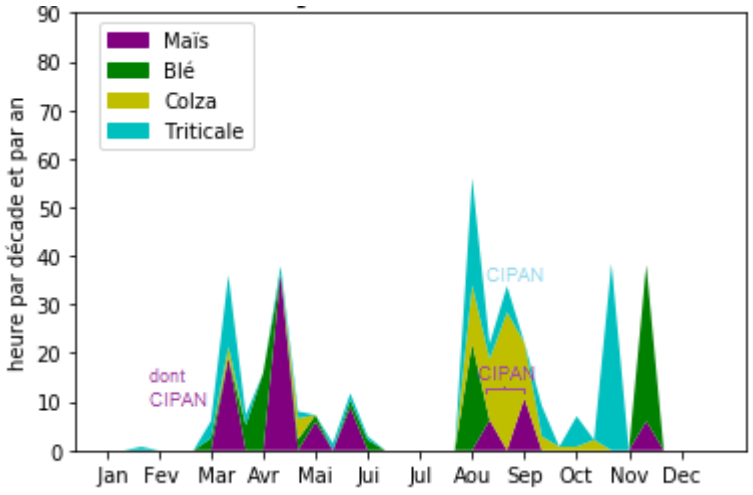
Le nombre d'applications dangereuses des SdC innovants ne suit pas une loi normale (p-value $_{Shapiro\text{-}Wilk}$ < 0,05). D'après le test de Kruskal-Wallis, il semble y avoir un effet SdC sur cet indicateur pour la période considérée (p-value $_{Kruskal\text{-}Wallis}$ < 0,05), au moins lié au SdC Bio (100% de différence avec les autres SdC). Aucun produit phytosanitaire classé T ou T+ n'a été utilisé pour tous les SdC. Le nombre d'applications moyen par culture avec produits dangereux est réduit de 100% pour le SdC Bio, 40% pour le SdC Kerg. intégré et 20% pour le SdC Crécom intégré par rapport au SdC de référence (Figure 30). Pour le SdC Crécom intégré, les fongicides sont les produits les plus souvent toxiques (47%) (fongicides sur céréales contre septoriose, rouille, oïdium) ; pour le SdC Kerg. intégré, ce sont les herbicides (39%) (herbicides sur maïs, féverole et triticale contre dicotylédones vivaces (rumex, chardon, liseron) et annuelles (véronique) et contre graminées (folle avoine)).

III.4. Bilan pluri-critères : performances globales des SdC

Les trois SdC innovants étudiés et surtout le SdC Bio sont plus performants que le SdC de référence sur les **plans environnemental et économique** en termes d'IFT, de QSA, de pression sur l'énergie non renouvelable, de rentabilité et de valorisation économique du travail (Figure 31). Le SdC Crécom intégré libère moins de substances actives dans l'environnement que le SdC Kerg. intégré mais est moins rentable à l'heure travaillée. Les SdC Bio et Kerg. intégré sont plus performants sur le **plan social** en termes de conditions de travail et de risque santé pour l'applicateur que le SdC de référence. Le SdC Crécom intégré est équivalent à la référence en ce qui concerne le nombre de passages mais dégrade le temps de travail.

Les trois premiers axes de l'**ACP** expliquent 89% de l'inertie totale (89% de l'information contenue dans les données est contenue dans ces dimensions). Les variables IFT total, QSA totale, valorisation économique du travail et MSN sont bien représentées (cos^2>0,7) pour les dimensions 1 et 2 du graphe des variables ; le nombre de passages total et le temps de travail total le sont sur les dimensions 2 et 3 (Figure 32 et Annexe XVI). L'IFT et la QSA sont corrélées positivement (cosinus de l'angle entre les deux variables proche de 1), de même que la MSN et la valorisation économique du travail. L'IFT et la QSA ne semblent pas corrélés à la MSN et à la valorisation du travail (cosinus de l'angle proche de 0). Le colza et le blé semblent être des cultures à fort IFT et QSA pour les SdC et la période étudiés. Le blé du SdC Crécom intégré est moins consommateur de produits phytosanitaires et substances actives que celui de la référence. La féverole et le maïs semblent être des cultures présentant moins d'intérêt sur le plan économique que les mélanges céréale-protéagineux et sont de plus très variables entre années. Le maïs est une culture consommatrice en temps (désherbage mécanique, fertilisation organique), notamment en AB (plus de désherbage mécanique) (Annexe XVII), tandis que la féverole (en AB surtout) et les mélanges céréale-protéagineux le sont moins.

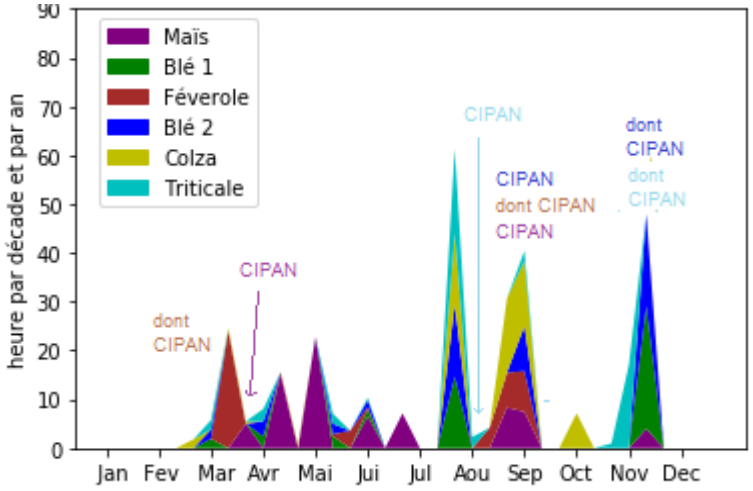
Les résultats sont discutés dans la partie suivante, des améliorations proposées (sachant que les rotations ne sont pas modifiables) et les limites et perspectives des essais et de la méthodologie employée mises en évidence.



Mars-juin : destruction de la CIPAN, fertilisations, préparation du sol et semis du maïs, traitements phytosanitaires, désherbages mécaniques

Août-décembre : faux-semis ou semis de la CIPAN avant triticale, semis de la CIPAN avant maïs, préparation du sol, semis (sauf maïs) et récoltes des cultures

Figure 27 : Répartition moyenne du temps de travail (h/décade/an) du SdC Crécom intégré pour les années de récolte 2013 à 2016 pour une exploitation de 60 ha (graphique de type cumulé)

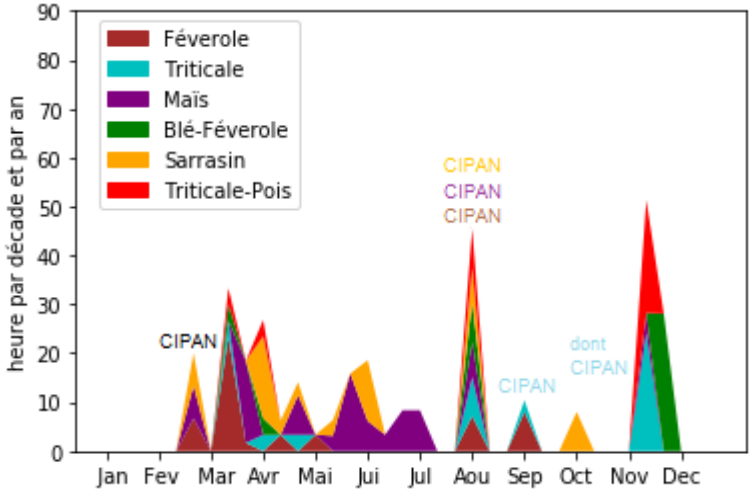


Mars-juillet : destruction des CIPAN avant féverole et maïs, préparation du sol et semis de ces derniers, fertilisations des céréales et du maïs, traitements phytosanitaires, désherbages mécaniques

Août-septembre : récolte des céréales, du colza et de la féverole, préparation du sol et semis du colza et des CIPAN

Octobre-décembre : binage du colza, récolte du maïs, broyage des CIPAN avant triticale et blé 2, préparation du sol et semis des céréales

Figure 28 : Répartition moyenne du temps de travail (h/décade/an) du SdC Kerguéhennec intégré pour les années de récolte 2013 à 2016 pour une exploitation de 60 ha (graphique de type cumulé)



Février-juillet : broyages des CIPAN, préparations du sol et semis du sarrasin, maïs et féverole, désherbages mécaniques, fertilisation du maïs

Août-octobre : semis des CIPAN et récolte du triticale, de la féverole, des mélanges et du sarrasin

Novembre-décembre : récolte du maïs, préparation du sol et semis du triticale et des mélanges

Figure 29 : Répartition moyenne du temps de travail h/décade/an) du SdC Bio pour les années de récolte 2013 à 2016 pour une exploitation de 60 ha (graphique de type cumulé)

II. Discussion

IV.1. Comparaison des résultats aux objectifs et à la littérature

IV.1.1. Performance environnementale : hypothèses 1 et 2

a. Recours aux produits phytosanitaires

Sur la période 2012 à 2016, seul le SdC Bio répond à l'objectif de réduction du recours aux produits phytosanitaires d'au moins 50% par rapport à la référence bretonne de 2008. Les cultures de diversification des SdC intégrés ne présentent pas d'avantage en termes de réduction de l'IFT par rapport à une rotation maïs-blé. Les combinaisons de leviers ne suffisent pas à réduire suffisamment les usages de produits phytosanitaires pour les SdC intégrés. L'hypothèse 1 n'est pas validée pour ces SdC. Le colza, la féverole et le triticale sont les cultures les plus consommatrices en produits phytosanitaires (insecticides pour colza, herbicides sinon). Les rotations simplifiées avec colza et céréales (67 et 75% des cultures de la rotation des SdC intégrés) sont plutôt associées à un IFT élevé (Pillet, 2014).

Par rapport à l'IFT de référence Bretagne 2011 pour une même rotation (pas de référence colza 2008 pour la région, valeur système intégré en France en 2000 pour la féverole), les SdC intégrés ont réduit leur IFT de 46% (Tableau 5).
Pour les SdC du réseau DEPHY, 65 % réduisent leur IFT d'au moins 50 % de l'IFT de référence à même rotation et en moyenne l'IFT herbicides représente 50% de l'IFT total (Tableau 6) (Emonet et al, 2016), ce qui est également le cas du SdC Crécom. Parmi les leviers les plus utilisés pour la gestion des adventices, le labour, le faux-semis, l'alternance culture de printemps-culture d'automne, le décalage de la date de semis et le désherbage mécanique sont en tête (Emonet et al, 2016). Pour la gestion des maladies et des ravageurs, le choix de variétés tolérantes ou résistantes et le décalage de la date de semis (respectivement) sont les leviers les plus utilisés ; le traitement localisé et les OAD, évalués comme très faisables et efficaces (Emonet et al, 2016), mériteraient d'être mis en œuvre plus souvent.

b. Qualité de l'eau et consommation énergétique

QSA : Sur la période 2012 à 2016, les SdC innovants améliorent la qualité de l'eau en termes de QSA par rapport à la référence. Les herbicides de pré-levée (colza, féverole) contribuent le plus à la QSA. La réduction de l'usage de glyphosate pour le SdC Kerg. intégré permettrait de réduire la QSA herbicides du triticale. La QSA reste réduite pour les SdC innovants et la tendance à la baisse pour le SdC Kerg. intégré mérite d'être conservée.

Reliquats début drainage : Pour les années de récolte 2013 à 2016, les SdC innovants ont un RDD moyen inférieur ou égal à 50 kg N-NO_3/ha. Le SdC Bio a le plus fort RDD moyen ; la part des légumineuses et de cultures de printemps dans la rotation contribue à ce RDD. Les successions culture de printemps-culture d'automne semblent générer les RDD les plus élevés (RDD plus élevés après maïs qu'après céréales (Préfet de la région Bretagne, 2013) et interculture à problème après protéagineux (Duthoit & Charron, 2017)), mais dans le cas d'une rotation de cultures d'automne, l'intérêt de rompre le cycle des bioagresseurs serait perdu. Enfin, les couverts courts sembleraient avoir contribué à la réduction des RDD des SdC.

Consommation et efficience énergétiques : Sur la période 2012 à 2016, les SdC innovants sont plus efficients sur le plan énergétique et répondent bien à l'objectif de réduction de la consommation d'énergie fossile par rapport à la référence bretonne grâce à l'allongement de la rotation qui réduit la fréquence de séchage du maïs et à l'absence de fertilisation minérale pour le SdC Bio. En effet, l'utilisation d'engrais azotés induit une forte consommation d'énergie fossile (production des engrais minéraux), suivie par la mécanisation (consommation de fuel), dans une moindre mesure (Metayer et al, 2010). Les exploitations consommant le plus d'intrants sont souvent celles avec la rotation la moins diversifiée (Metayer et al, 2010). Toutefois, un SdC en AB ne consomme pas toujours moins de carburant qu'un SdC conventionnel : un SdC en AB étudié par Agrobio Poitou-Charentes (2016) consomme 17 L fuel/ha supplémentaires (désherbage mécanique) que le SdC conventionnel.

L'hypothèse 2 est validée pour les SdC et la période étudiés.

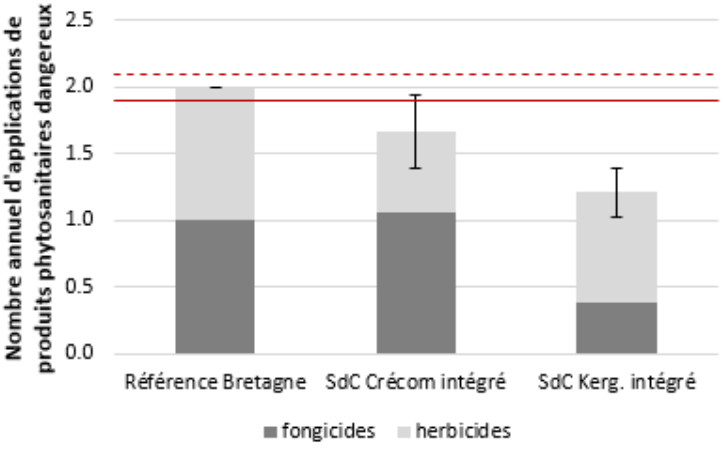


Figure 30 : Nombre annuel d'applications de produits phytosanitaires dangereux (pour une culture) par SdC et pour les années de récolte 2013 à 2016

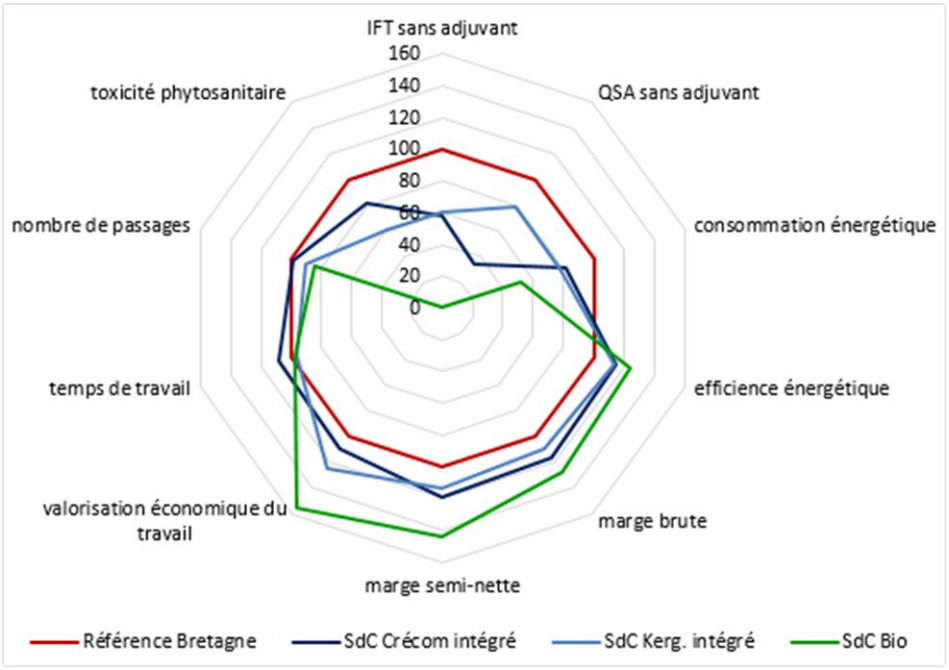


Figure 31 : Indicateurs de performances environnementales, économiques et sociales des SdC innovants ramenées en base 100 de la référence Bretagne pour les années de récolte 2013 à 2016

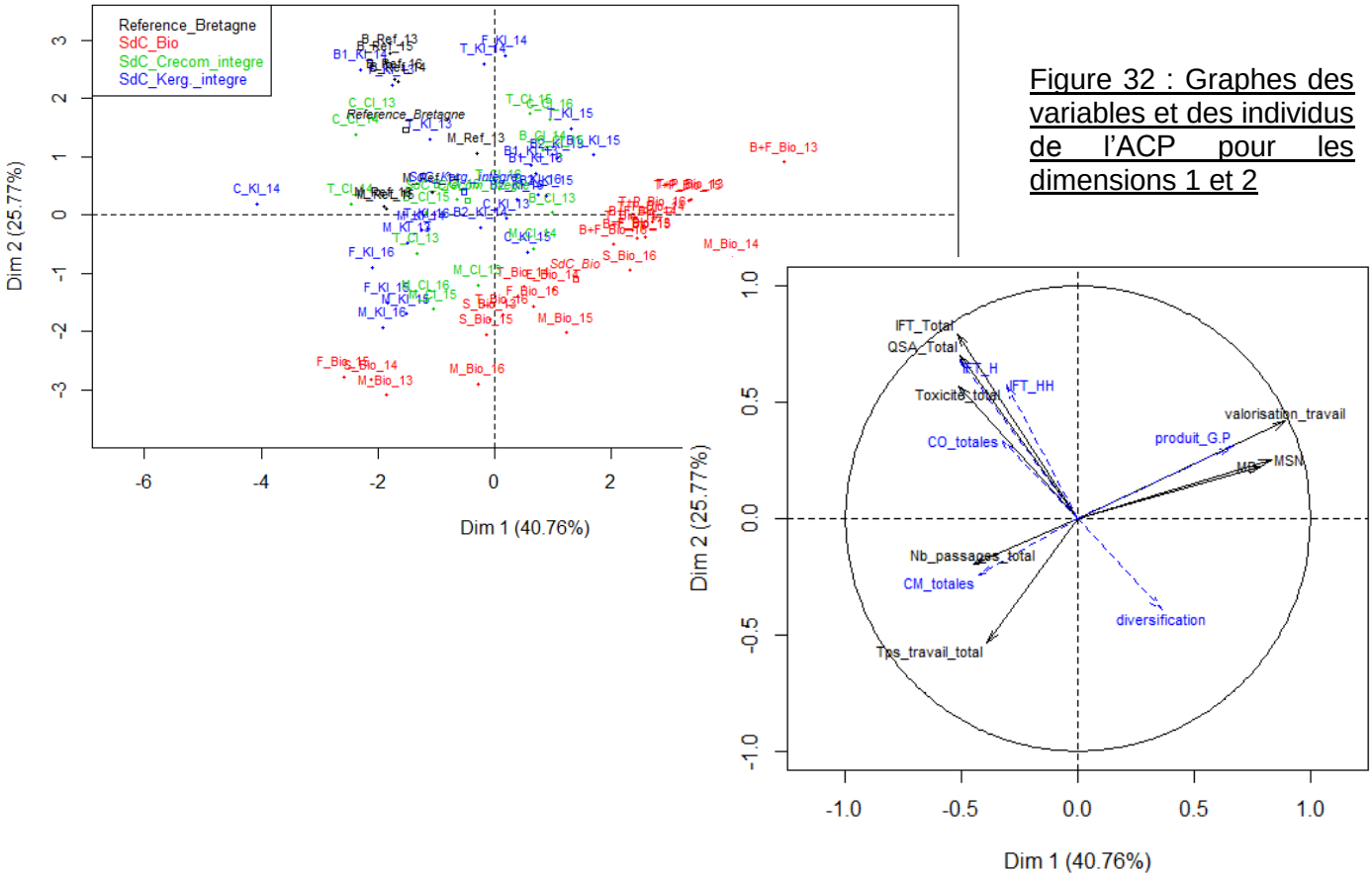


Figure 32 : Graphes des variables et des individus de l'ACP pour les dimensions 1 et 2

IV.1.2. Performance économique : hypothèses 3 et 4

a. Rentabilité économique : produits, charges et marges

Sur la période 2012 à 2016, les SdC innovants répondent bien à l'objectif de maintien ou d'amélioration de leur rentabilité par rapport à la référence, et ce grâce à une économie des CO (produits phytosanitaires essentiellement), à laquelle s'ajoutent des prix de vente supérieurs en AB, couvrant les pertes de rendement. L'hypothèse 3 est validée.

Pour les SdC et la période étudiés, l'allongement et la diversification de la rotation permettent de stabiliser le produit G + P. La féverole (confirmé par Mollier, 2012) et le colza du SdC Kerg. intégré, le sarrasin et le triticale du SdC Bio ne présentent pas d'avantage en termes de produit par rapport à un maïs-blé conventionnel. En AB, les mélanges céréale-protéagineux semblent apporter un plus par rapport à une culture pure (effets rendement et prix) - ce que confirme Biarnès et al, 2011 - et à un maïs-blé. Le maïs AB présente un produit avantageux mais variable (effets prix de vente élevés et rendements variables). Le maïs AB et la féverole présentent des CO élevées (semences respectivement à 305 €/ha ; 240 €/ha en intégré et 330 €/ha en AB) ; les mélanges céréale-protéagineux ont l'avantage de présenter des CO moyennes (semences : 220 €/ha). Le colza (pas de récolte paille, moins de travail du sol), la féverole (pas de fertilisation) et les mélanges céréale-protéagineux (peu de désherbage mécanique car couvrants, pas de fertilisation, moins de travail du sol (ce que confirme Biarnès et al, 2011)) permettent de réduire les CM moyennes des SdC. Pour les céréales, la récolte de la paille augmente les CM de 50€/ha mais apporte un produit supplémentaire de 240 €/ha en moyenne. Le maïs AB (malgré sa variabilité), les céréales et les mélanges céréale-protéagineux AB sont les cultures les plus intéressantes sur le plan des marges, en moyenne.

Sur la période 2012 à 2016, les SdC innovants valorisent mieux l'heure de travail que la référence bretonne. Les mélanges céréale-protéagineux en AB et les céréales en conduite intégrée semblent très bien valoriser le temps de travail.

b. Diversification de la rotation et marge

Les cultures de diversification des SdC intégrés améliorent ou maintiennent la MSN moyenne à l'échelle de la rotation (hypothèse 4 validée pour ces SdC). Pour le SdC Bio, elles permettent de la stabiliser entre années. D'après Meynard (2014), la diversification de la rotation améliore ou maintient les marges sur plusieurs années.

IV.1.3. Performance sociale : hypothèse 5

a. Charge de travail : temps de travail, nombre de passages et répartition du temps de travail

Temps de travail et nombre de passages : Les SdC Kerg. intégré et Bio maintiennent le temps de travail et réduisent le nombre de passages au champ par rapport à la référence tandis que le SdC Crécom dégrade légèrement le premier et maintient le second (faux-semis sur triticale). L'essai La Cage de l'INRA (1998-2008) a montré, pour le blé, une réduction du temps de travail de la conduite raisonnée (7,6 h/ha) à l'intégrée (6,2 h/ha) (Mollier, 2012), tendance que l'on retrouve pour le SdC Kerg. intégré. Les mélanges céréale-protéagineux (pas de travail du sol hors labour) et la féverole (pas de fertilisation) permettent de réduire le temps de travail et le nombre de passages. La fertilisation minérale réduit le temps de travail sur céréales (0,4 h pour 2 apports d'ammonitrate contre 1 h pour 2 apports de lisier) mais pas le nombre de passages. Le maïs est une culture très consommatrice en temps et nombre de passages, notamment en AB (désherbage mécanique), ce que confirme l'étude de Brunet et al (2009). Les faux-semis (trois interventions) rajoutent 0,8 h/ha par culture de printemps.

Répartition du temps de travail : Une rotation **maïs-blé** présente l'avantage de dégager du temps libre en juillet, octobre et en janvier-février, et l'inconvénient de comporter des périodes de travail très chargées (6 à 9 h/j). 1 UTH peut gérer cette quantité de travail mais pour fin avril (préparation du sol et semis du maïs) et fin novembre (préparation du sol et semis du blé), dans le cas d'une autre activité à mener en parallèle des cultures (élevage par exemple), la délégation ou l'embauche d'un salarié est à envisager. Une rotation **maïs-blé-colza-triticale** présente l'avantage de dégager du temps libre en fin juin-début juillet et de limiter la présence

Tableau 5 : IFT 2011 Bretagne par culture et par rotation (Brunet et al, 2009 ; Agreste, 2015) et IFT 2013-2016 des SdC intégrés étudiés

Culture ou rotation	IFT herbicides 2011	IFT hors herbicides 2011	IFT total 2011	IFT SdC Crécom intégré 2013-2016	IFT SdC Kerg. intégré 2013-2016
Blé	1,42	2,83	4,25		
Colza	1,13	2,34	3,46		
Féverole			3,10		
Maïs	1,47	0	1,47		
Triticale	1,60	2,25	3,85		
Maïs-Blé-Colza-Triticale			3,26	1,76	
Maïs-Blé-Féverole-Blé-Colza-Triticale			3,40		1,84

Tableau 6 : IFT moyens par poste du réseau DEPHY pour les SdC grandes cultures (Emonet et al, 2016)

IFT herbicides	IFT fongicides	IFT insecticides
1,08	0,63	0,56

de périodes de pointe nécessitant une organisation ponctuelle différente, et l'inconvénient de comporter des périodes de travail étalées (entre 4 et 5,5 h/j). 1 UTH peut gérer cette quantité de travail mais dans le cas d'une autre activité à mener, le ryhtme de travail peut être assez soutenu. Les **rotations sur 6 ans** des SdC Kerg. intégré et Bio présentent l'avantage de dégager du temps libre en janvier-février et de limiter la présence de périodes de pointe nécessitant une organisation ponctuelle différente, et l'inconvénient de présenter une période de travail en juillet-août. 1 UTH peut gérer cette quantité de travail mais pour des vacances en été, la délégation ou l'embauche d'un salarié est à envisager.

b. Risque pour la santé de l'applicateur : toxicité phytosanitaire

Les SdC innovants réduisent le risque pour la santé de l'applicateur par rapport à la référence. La toxicité provient essentiellement des fongicides appliqués sur céréales (contre septoriose, rouille, oïdium) pour le SdC Crécom intégré et des herbicides appliqués sur maïs, féverole et triticale (contre rumex, chardon, liseron, véronique) pour le SdC Kerg. intégré.

L'hypothèse 5 est partiellement validée (dégradation du temps de travail pour Crécom).

IV.1.4. Bilan pluri-critères : performances globales des SdC

Pour les critères et la période étudiés, le SdC Bio apparaît comme le plus performant sur les plans environnemental, économique et social et le SdC de référence, le moins performant. Le SdC Crécom est moins performant que les deux autres SdC innovants sur le plan social.

Comme montré sur l'ACP, l'IFT et la MB ne semblent pas corrélés pour le réseau DEPHY (Emonet et al, 2016). D'après Pillet (2014) et Emonet et al (2016), il n'y a pas de corrélation entre réduction d'IFT et MB, atteinte des objectifs de rendement, augmentation de la consommation de carburant ou du temps de travail. Ainsi, un SdC peut réduire son IFT sans dégrader ces aspects de performances environnementales, économiques et sociales.

IV.2. Recommandations d'optimisation des dispositifs

IV.2.1. Produits phytosanitaires : IFT, QSA, toxicité phytosanitaire

a. Labour, désherbages mécanique et manuel

Les produits hors herbicides sont les plus réduits pour le SdC Kerg. intégré, or ce sont les herbicides que l'on retrouve le plus dans l'eau (Deytieux et al, 2012 (b)). La gestion des adventices sans herbicides est complexe sans travail du sol (Emonet et al, 2016). Pour le SdC Kerg. intégré, le remplacement de traitement chimique des vivaces avant semis de la culture (glyphosate) par du **labour** (féverole, maïs) est un bon moyen de réduire l'IFT et la QSA herbicides par un travail du sol épuisant le stock d'adventices. Toutefois, pour un passage, le labour demande 1,43 h/ha (0,17 h/ha pour un passage de pulvérisateur), 54 €/ha de CM (contre 8 €/ha) et 17 L fuel/ha (contre 1 L/ha). Un déchaumage (canadien) pourrait être réalisé avant semis de la CIPAN afin de ralentir le développement des vivaces, si besoin (+0,8 h/ha, +20 €/ha de CM, +6,7 L fuel/ha).

Pour le SdC Kerg. intégré, avancer la destruction de la CIPAN précédant le maïs à fin février (mars actuellement) pour réaliser des **faux-semis** après labour (fin mars, fin avril, mai), permettrait d'épuiser le stock superficiel d'adventices annuelles et donc de réduire l'IFT et la QSA herbicides. Cependant, cela nécessite, pour trois passages (rouleau, vibroculteur, herse étrille), 0,8 h de travail/ha, 32 €/ha de CM et 8 L fuel/ha. Les interventions chimiques contre les vivaces peuvent être complétées par un **désherbage manuel** début juin (0,3 h/ha), ciblant les rumex. Pour la féverole du SdC Kerg. intégré, l'utilisation d'herbicides de pré-levée, pulvérisés en même temps que le semis et sur le rang, permet de réduire les CM, le nombre de passages, le temps de travail et l'IFT. Toutefois, remplacer le désherbage chimique par deux passages de **herse étrille** mi-avril et début mai (stades foliaires) permettrait de réduire l'IFT de 0,77, la QSA de 0,89 et la toxicité phytosanitaire d'une application pour cette culture. Pour les céréales des SdC intégrés, trois **hersages** aux stades tallage, épi 1 cm et 1 noeud des cultures (mars, début avril, fin avril) pourraient remplacer les herbicides (utiliser une houe rotative en cas de résidus) (comme pour le SdC Bio). Afin de pallier les pertes liées au désherbage mécanique, les densités de semis doivent être augmentées de 10-15% (Sicard et

Tableau 7 : Quelques indicateurs économiques et sociaux recalculés pour le SdC Crécom intégré à l'échelle de la rotation et en moyenne pour les années de récolte 2013 à 2016 pour une fertilisation organique (lisier de porc) sur céréales 2 ans/4 (au lieu de 4 ans/4) et deux années à fertilisation 100% minérale (en rose : dégradation par rapport au cas actuel, en vert : amélioration)

	Cas fertilisation organique (FO) sur céréales 2 ans/4 (Crécom)	**Cas actuel de FO sur céréales 4 ans/4 (Crécom)**	**SdC de référence Bretagne**
CO	279 €/ha/an dont 68 €/ha/an de fertilisation minérale (FM)	265 €/ha/an dont 54 €/ha/an de FM	401 €/ha/an dont 87 €/ha/an de FM
CM	282 €/ha/an dont 13 €/ha/an de FM et 18 €/ha/an de FO	287 €/ha/an dont 10 €/ha/an de FM et 25 €/ha/an de FO	263 €/ha/an dont 17 €/ha/an par FM et FO
MB	901 €/ha/an	916 €/ha/an	791 €/ha/an
MSN	619 €/ha/an	629 €/ha/an	528 €/ha/an
Valorisation du travail	109 €/h/an	105 €/h/an	94 €/h/an
Temps de travail	5,87 h/ha/an dont 0,71 h/ha/an pour la fertilisation	6,08 h/ha/an dont 0,91 h/ha/an pour la fertilisation	5,60 h/ha/an dont 0,78 h/ha/an pour la fertilisation
Nombre de passages	10,06		10,25
Consommation de carburant	87 L/ha/an dont 19 L/ha/an pour la fertilisation	90 L/ha/an dont 22 L/ha/an pour la fertilisation	74 L/ha/an dont 12 L/ha/an pour la fertilisation
Consommation énergétique	10044 MJ/ha/an	9598 MJ/ha/an	11834 MJ/ha/an
Efficience énergétique	15,07	15,77	13,68

al, 2012). Un semis à la mi-novembre au lieu du début du mois permet de limiter le salissement de la culture (Sicard et al, 2012). Au stade 2 nœuds - épiaison, la herse étrille relevée à hauteur de végétation permet d'arracher très efficacement les gaillets (Sicard et al, 2012) (gaillets développés et attention aux épis). Pour le colza du SdC Kerg. intégré, le passage de la bineuse début octobre ne satisfait pas complètement le pilote de l'essai. Des **doigts de caoutchouc** travaillant sur le rang apporteraient un gain d'efficacité. Le **désherbinage** pourrait également remplacer le désherbage localisé au semis ou au moins les désherbages chimiques en plein.

b. Date de semis

Pour le SdC Kerg. intégré**,** semer le **colza** autour du 20-25/08 au lieu de début septembre permettrait d'avoir un colza plus avancé en automne, ayant absorbé plus d'azote, pouvant étouffer les adventices, résister aux attaques d'altises (Terres Inovia, 2017) et dans lequel le passage de la bineuse en conditions sèches est possible (avant octobre). Le principe est le même pour les **CIPAN** (précédant féverole et maïs), à semer plus tôt, mi-août.

c. Insecticide et fongicide sur colza

Pour le SdC Crécom intégré, les seuils d'intervention contre **altises** pourraient être revus en fonction des stades de développement du colza afin de réduire les interventions insecticides.
Pour le SdC Kerg. intégré, pour une meilleure efficacité du fongicide contre le **sclérotinia**, le traitement doit être réalisé plus tôt, au stade G1 (Terres Inovia, 2017).

IV.2.2. Fertilisation

Semer le colza et les CIPAN mi-août au lieu de début septembre permettrait d'absorber plus d'azote avant l'automne et donc de réduire le RDD. Pour la récolte 2017 à la station de Kerg., le **triticale** conduit en AB et ayant reçu une fertilisation de 60 kg N efficace/ha au lisier de porc fin avril (un peu avant stade 1 nœud) (objectif de rendement : 53 q/ha) a réalisé 15 q/ha de plus que le même triticale sans fertilisation. Une voie d'optimisation des rendements du triticale pour le SdC Bio serait donc la fertilisation organique.

Des **OAD** (drones, capteurs embarqués) peuvent être utilisés pour le pilotage de la fertilisation et la gestion des maladies.

IV.2.3. Marges, temps de travail et consommation énergétique

Un levier d'amélioration des CM, du temps de travail et de la consommation de carburant du SdC Crécom intégré serait de réduire la **fréquence de la fertilisation organique** avec lisier de porc sur céréales. Pour une fréquence de 2 ans/4 d'apport de lisier sur céréales et une fertilisation 100% minérale pour 2015 et 2016, le temps de travail aurait été allégé de 0,21 h/ha/an (Tableau 7), permettant au SdC Crécom de répondre à l'objectif de maintien du temps de travail par rapport au SdC de référence. Cependant, la MSN auraient été dégradée de 10 €/ha/an et la consommation énergétique de 446 MJ/ha/an, sans pour autant entamer l'atteinte aux objectifs par rapport à la référence. La présence de céréales dans la rotation implique un fractionnement des apports d'azote minéral à l'origine de CM, temps de travail, nombre de passages et consommation de carburant supplémentaires.

Par passage, le labour demande 1,43 h/ha, 54 €/ha de CM et 17 L fuel/ha. L'amélioration des CM et du temps de travail pour le SdC Crécom intégré pourrait passer par la réduction de la **fréquence du labour**, actuellement systématique. Le colza semble être la culture la moins sensible au non-labour en termes de rendement par rapport au blé et au maïs (Heddadj et al, 2010). Un déchaumage avec un outil à disques ou à dents à 10-15 cm de profondeur (moins de 10 cm si sol non compacté) avant colza ne dégrade pas le rendement par rapport au labour. En cas de présence de vivaces à rhizomes (rumex, chardon, liseron), un outil à dents sera préféré à un outil à disques afin d'éviter leur fractionnement (Terres Inovia, 2017). Le passage d'un canadien permettrait ainsi d'économiser 0,6 h/intervention/ha, 33 €/ha de CM et 10 L fuel/ha par rapport à un labour. Les **faux-semis** avant triticale ont été arrêtés après la récolte 2014 et remplacés par un couvert, ce qui permet d'économiser 0,6 h/ha/an et 0,75 passage/an à l'échelle d'une rotation en croisière.

Ainsi, en réduisant les fréquences de fertilisation organique et de labour, et en ayant remplacé les faux-semis par un couvert, 0,96 h/ha/an, 9 €/ha/an et 9,5 L fuel/ha/an sont économisés à l'échelle de la rotation, améliorant notamment le temps de travail par rapport à la référence.

Pour le SdC Kerg. intégré (pas pour le SdC Bio car faux-semis donc pas de travail du sol en profondeur avant semis), un **semis combiné** semoir maïs pneumatique + rotalabour permet de gagner un passage de préparation du sol avant semis mais nécessite un tracteur de 135 CV. Le pulvérisateur peut être combiné au semoir pour un désherbage chimique de pré-levée.

Pour le SdC Bio, un **essai analytique** faisant varier densités et dates de semis du sarrasin permettrait d'identifier les facteurs influençant la variabilité des rendements (impact sur les marges).

IV.3. Limites des essais et de l'évaluation et perspectives

IV.3.1. Limites des essais

Les SdC innovants ne présentent pas de **répétitions spatiales** des cultures (ce qui permet d'avoir des parcelles de taille correcte), limitant l'analyse statistique des résultats (exemple : rendement) pour l'évaluation des effets parcelle et année. La présence d'une **référence** sur le dispositif permettrait de comparer les performances du SdC testé dans un contexte pédoclimatique et de pression de bioagresseurs donné (Havard et al, 2017). Toutefois, cette référence ne serait pas nécessairement représentative des pratiques locales, reste soumise aux aléas locaux et implique un compromis de surface avec le SdC testé (Havard et al, 2017).

Les SdC testés au champ étant gérés par des chefs de projet différents, les **protocoles** de recueil de données (adventices, ravageurs, composantes de rendement) sont différents, rendant l'analyse des résultats techniques et les comparaisons entre SdC difficiles. Des informations régulières sur les conditions et réussites des interventions permettraient d'évaluer la faisabilité technique et l'efficacité des **RdD**. Les RdD de l'un des SdC évoluent en continue (exemple : fréquence de labour), ce qui permet de tester différentes techniques mais complexifie leur évaluation.

IV.3.2. Choix et élaboration du correctif des conditions pédoclimatiques

Une référence locale permettrait d'évaluer directement les performances du SdC testé. Dans notre cas, les trois SdC se trouvent dans des conditions pédoclimatiques différentes (mais qui restent proches) et le SdC de référence est breton (et non local), c'est pourquoi, afin d'éviter d'introduire un biais lié aux conditions pédoclimatiques différentes, un correctif a été appliqué sur les rendements (objectifs et normalisés).

Le correctif est issu d'une moyenne des cultures maïs et blé car seules cultures présentent dans le SdC de référence. Ce correctif est appliqué aux autres cultures. Un moyen plus rigoureux d'élaboration du correctif aurait été d'appliquer un correctif par culture. Pour cela il aurait fallu avoir des rendements historiques par culture en conduite raisonnée sur les parcelles des SdC intégrés (données partiellement disponibles pour Crécom). Pour le SdC Bio, le correctif est calculé à partir d'un petit nombre d'agriculteurs (15 pour le triticale, 31 pour le maïs) en AB et pour deux années uniquement (manque de données).

IV.3.3. Evaluation pluriannuelle, pluri-critères et choix des indicateurs

Les SdC étudiés n'ont pas été mis en place la même année. Le SdC Crécom intégré est ainsi bien stabilisé (2009-2016), ce qui n'est pas le cas du SdC Bio (2012-2016). Les données 2013 de ce SdC ont été prises en compte afin d'avoir un nombre de données suffisant mais pour les évaluations suivantes, l'année de récolte 2013 devra être considérée comme une année de transition (pas de prise en compte) car les précédents culturaux sont différents de ceux du SdC en croisière. Une durée pertinente pour l'évaluation des SdC est d'au moins une rotation, deux si possible (Havard et al, 2017). C'est pourquoi une évaluation *a posteriori* sera réalisée en 2018 au terme d'une rotation : elle se fera à l'aide du logiciel MASC et permettra de confronter les résultats obtenus pour un SdC à ses objectifs de départ et d'évaluer sa durabilité. Notons que l'évaluation traitée dans le présent rapport est réalisée à partir d'indicateurs à fort enjeu local. Avec d'autres critères, les résultats pourraient être différents.

IV.3.4. Perspectives des essais

Les essais en station expérimentale permettent de tester des systèmes plus en rupture avec les systèmes existants que ceux testés en parcelle d'agriculteurs. Dans le cadre de la poursuite du programme d'action national DEPHY EXPE Ecophyto 2012, un appel à projet DEPHY EXPE Ecophyto 2017, intitulé « Evaluer des SYstèmes de grandes cultures très écoNOmes en produits PHYTosanitaires en région Bretagne (SYNO'PHYT) », a été déposé (début 2019). Les SdC testés à la station expérimentale de Kerguéhennec auront pour but de réduire de 50%, 75% et 100% le recours aux produits phytosanitaires par rapport à la référence régionale en mobilisant différents OAD. Leurs performances agronomiques, environnementales, économiques et sociales seront étudiées et les résultats diffusés aux professionnels agricoles bretons (Giteau, 2017).

Conclusion

Le but de l'étude est de savoir si les trois SdC innovants étudiés dans le contexte breton répondent aux objectifs de réduction du recours aux produits phytosanitaires de -50% par rapport à la référence bretonne maïs-blé et d'amélioration de la qualité de l'eau, sans pénaliser la rentabilité des exploitations agricoles et les conditions de travail de l'exploitant.

Sur la période 2012 à 2016, seul le SdC Bio répond à l'objectif de réduction du recours aux produits phytosanitaires d'au moins 50% par rapport à la référence bretonne de 2008. Les cultures de diversification des SdC intégrés ne présentent pas d'avantage en termes de réduction de l'IFT par rapport à une rotation maïs-blé. L'**hypothèse 1** (les méthodes alternatives, l'allongement et la diversification de la rotation permettent de réduire le recours aux produits phytosanitaires d'au moins 50% par rapport à la référence bretonne de 2008) n'est donc pas validée pour les SdC intégrés. La maîtrise des adventices apparait comme la plus difficile à atteindre. Des améliorations (telles que la fréquence du labour ou le désherbage mécanique inspiré du SdC Bio) ont été proposées pour les SdC intégrés afin de répondre à l'objectif.

Les SdC innovants améliorent la qualité de l'eau en termes de QSA par rapport au SdC de référence et ont bien un RDD moyen inférieur ou égal à 50 kg $N\text{-}NO_3$/ha. De plus, ils répondent à l'objectif de réduction de la consommation énergétique par rapport à la référence. L'**hypothèse 2** (les méthodes alternatives réduisent la consommation d'énergie fossile par rapport à la référence bretonne et améliorent la qualité de l'eau) est validée.

L'objectif de maintien ou d'amélioration de la rentabilité des SdC innovants par rapport à la référence est rempli, grâce à une économie des CO (produits phytosanitaires essentiellement). L'**hypothèse 3** est validée. Les cultures de diversification des SdC intégrés améliorent ou maintiennent la MSN moyenne à l'échelle de la rotation. Pour le SdC Bio, elles la dégradent mais permettent de la stabiliser entre années. L'**hypothèse 4** (l'allongement et la diversification de la rotation permettent de maintenir voire d'améliorer la marge moyenne à l'échelle de la rotation) est validée pour les SdC intégrés.

Les SdC Kerg. intégré et Bio maintiennent la charge de travail par rapport à la référence tandis que le SdC Crécom la dégrade. De plus, les trois SdC répondent à l'objectif de réduction du risque pour la santé de l'applicateur par rapport à la référence. L'**hypothèse 5** est donc partiellement validée (dégradation du temps de travail pour Crécom, en cours de réduction par arrêt des faux-semis après la récolte 2014).

Les SdC Kerg. intégré et Bio feront partie du nouveau projet DEPHY EXPE Ecophyto 2017 qui a pour objectif de tester des SdC innovants à plus forte réduction d'IFT (-75% et -100%) par rapport à la référence régionale. Une référence maïs-blé testée au champ sur le même site (à -50% d'IFT par rapport à la référence régionale) sera mise en place afin de pouvoir évaluer les performances des SdC dans les mêmes conditions pédoclimatiques.

Références bibliographiques

Articles, livres, rapports

Agreste Bretagne. 2015, 2016, 2017. Tableaux de l'agriculture bretonne – Edition 2014, 2015, 2016. DRAAF. pp 38-39 et 51 (2015), pp 33 et 35 (2016), pp 1-70 (2017). ISSN : 1286-658X.

Agrobio Poitou-Charentes. 2016. Conduire une exploitation en grandes cultures Bio – Etude comparative des coûts entre conventionnel et bio. 43 p.

APCA – Chambres d'agriculture France. 2013, 2014, 2015, 2016. Matériels agricoles – Les coûts 2013, 2014, 2015 ou 2016. TRAME. 52, 70, 78, 84 p. (resp.)

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. pp 12-13.

Bardon, E., Novince, E., Gruau, G., Guiho, M., Fernandez, F. 2016. Qualité des cours d'eau vis-à-vis des pesticides : méthode et analyse. GIP Bretagne environnement. Observatoire de l'eau en Bretagne. 10 p.

Bardon, E., Novince, E., Gruau, G., Launay, J., Guiho, M., Ferry, P. 2017. Concentration en matières phosphorées dans les cours d'eau : méthode et analyse. GIP Bretagne environnement. Observatoire de l'eau en Bretagne. 5 p.

Belleguic, K., Conseil, C., Eveno, T., Lorge, S., Baraer, F. 2012. Le changement climatique en Bretagne. Partie I : Le climat actuel. Météo France. pp. 1-16.

Biarnès, V., Carrouée, B., Bouttet, D., Chaillet, I., Hellou, G., Fontaine, L. 2011. La culture des associations céréales/protéagineux en AB. Fiche technique. ITAB, UNIP, Arvalis. 8 p.

Bochu, J.-L. 2002. PLANETE : méthode pour l'analyse énergétique de l'exploitation agricole et l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre. Colloque SOLAGRO. 10 p.

Bockstaller, C., Cariolle, M., Galan, M-B., Guichard, L., Leclercq, C., Morin, A., Surleau-Chambenoit, C. 2013. Evaluation agri-environnementale et choix des indicateurs : acquis, enjeux et pistes. Innovations agronomiques (31). pp 1-14.

Boller, E.F., Avilla, J., Joerg, E., Malavolta, C., Wijnands, F.G., Esbjerg, P. 2004. Integrated Production: Principles and Technical Guidelines (3rd edition). IOBC wprs Bulletin (Bulletin OILB srop en français). Vol. 27 (2). pp. 1-12. ISBN : 92-9067-163-5.

Bourigault, A.-L., Giteau, J.-L., Charter, A., Guézengar, A., Mahé, P., Arzul, J.-P. 2014. Evaluation des performances de 3 systèmes de culture économes en intrants en production porcine (Crécom, 22). Rapport d'étape 2014. Chambres d'agriculture de Bretagne – Pôle Agronomie PV. 8 p.

Brunet, N., Debaeke, P., Delos, M., Guérin, O., Guichard, L., Guindé, L., Mischler, P., Munier-Jolain, N., Omon, B., Rolland, B., Viaux, P., Villard, A. 2009. Ecophyto R&D vers des systèmes de culture économes en produits phytosanitaires. Volet 1. Tome II : Analyse comparative de différents systèmes en grandes cultures. Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie. INRA. 218 p.

CER FRANCE Bretagne. 2015. Orge, Blé tendre, Avoine, Triticale, Maïs grain, Féverole, Mélange en agrobiologie. Etudes et Références. 26 p.

Chambre d'agriculture de Bourgogne. 2016. Guide Grandes cultures biologique en Bourgogne (2e édition). Chambres d'agriculture Bourgogne, BIO Bourgogne.

Chambre Régionale d'agriculture de Bretagne (CRAB). 2013, 2015, 2016. ABC – Les chiffres (éditions 2013, 2015, 2016). ABC. 52 p.

Commission mondiale sur l'environnement et le développement. 1987. Rapport Brundtland – Notre avenir à tous. pp 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. Agronomy for Sustainable Development 29(1). pp 73-86. DOI: 10.1051/agro:2008050.

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 (a). Expérimentation de systèmes de culture innovants : avancées méthodologiques et mise en réseau opérationnelle. Innovations Agronomiques (20). pp 49-78.

Deytieux, V., Nemecek, T., Freiermuth Knuchel, R., Gaillard, G., Munier-Jolain, N. 2012 (b). Is Integrated Weed Management efficient for reducing environmental impacts of cropping systems? A case study based on life cycle assessment. European Journal of agronomy (36). pp. 55-65.

DREAL Bretagne. 2014. Directive nitrates : 5e programme d'actions en Bretagne. 16 p.

Duthoit, S., Charron, M. 2017. Bilan de la campagne de reliquats azotes 2016-2017 dans les aires d'alimentation de captage et résultats observés sur différents modes de gestion de l'interculture. Chambre d'agriculture Marne. 11 p.

Emonet, E., Rougier, M., Pillet, E. 2016. Réseau DEPHY EXPE : Synthèse des résultats à mi-parcours à l'échelle nationale - filière Grandes Cultures – Polyculture Elevage. Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto. 92p.

Fisson, C. 2009. Evaluation a priori de systèmes de culture à bas niveau d'intrants en système spécialisé porcs-cultures à l'aide de l'outil MASC. Mémoire de fin d'études, Agrocampus Ouest Rennes. 43 p.

Flamant, J.-P. 2010. Une brève histoire des transformations de l'agriculture au 20e siècle. Mission Agrobiosciences. pp 11-13.

Giteau, J.-L. 2017. Lettre d'intention pour l'appel à projet DEPHY EXPE 2017. DEPHY EXPE Ecophyto. 10 p.

Giteau, J.-L., Cotinet, P., Dupont, A. 2017. Trois systèmes polycultures permettant de réduire le recours aux produits phytosanitaires. Tech PORC. Janvier-février 2017. n°33. pp 24-26.

Havard, M., Alaphilippe, A., Deytieux, V., Estorgues, V., Labeyrie, B., Lafond, D., Meynard, J.-M., Petit M.S., Plénet, 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 PIClég, GIS Fruits, Réseau ECOVITI, RMT Systèmes de culture innovants, GIS Relance Agronomique. 119 p.

Heddadj, D., Bouvier, D., Cotinet, P., Guil, J., Lebossé, D., Le Roux, L., Turlin, J.P., Pérès, G., Corson, M., Hallaire, V., Ménasseri, S., Hoeffner, K., Pulleman, M., Faber, J. 2014. Techniques Culturales Sans Labour. Guide pratique Agricultures & Territoires Chambres d'Agriculture Bretagne. 44 p.

Hirschy, M., Ravier, C., Lorin, M. 2015. CRITER 5.2 – Un outil de caractérisation des performances de systèmes de culture : Manuel d'utilisateur. Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, INRA, RMT SdCI. 134 p.

Le Goff, M., Savelli, E. 2015. Les sols en Bretagne. Dossier n°9. GIP Bretagne environnement. pp. 1-7 et 20-21.

Loaec, M.-A. 2017. Evaluation de la robustesse des performances de trois systèmes de culture innovants en Bretagne. Mémoire de fin d'études, Université de Rennes 1 - Agrocampus Ouest.

Mercier-Poirier, S. 2014. Enquête Pratiques culturales 2011 – principaux résultats. Agreste LES DOSSIERS (21). 70 p. ISSN : 1760-8341.

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 ». Innovations Agronomiques (20). pp. 143-153.

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. 56 p.

MAAF. 2016 (a). Guide méthodologique : Indicateur de fréquence de traitements phytopharmaceutiques (IFT) - version 2. 74 p.

Meynard, J.-M. 2014. Actes de colloque « De nouvelles filières pour de nouvelles rotations ». ECOPHYTO, MAAF, Chambre d'agriculture Auvergne. pp. 10.

Metayer, N., Bochu, J-L., Bordet, A-C., Trevisiol, A. 2010. Références PLANETE 2010. Fiche 3-Production « Grandes cultures strict ». SOLAGRO. 33 p.

Pagès, J. 2010. Statistique générale pour Utilisateurs : 1-Méthodologie (2e édition augmentée). Pratique de la statistique. Presses Universitaires de Rennes. pp 14 et 40-45. ISBN : 978-2-7535-1215-3.

Penot, C.2009.Calculs économiques avec le logiciel Olympe dans le cadre des réseaux de fermes de références et définitions pour le projet PAMPA. Document de travail n°3 RIME-PAMPA. 30p.

Pillet, E. 2014. Réseau DEPHY FERME : Synthèse des premiers résultats à l'échelle nationale. Filière Grandes Cultures – Polyculture Elevage. Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto. pp. 1-28.

Préfet de la région Bretagne. 2013. Bilan des campagnes d'analyses de reliquats d'azote 2010-2012. Plan gouvernemental de lutte contre les algues vertes. pp. 10.

Préfet de la région Bretagne. 2014. Arrêté établissant le programme d'actions régional en vue de la protection des eaux contre la pollution par les nitrates d'origine agricole. pp 4-5.

Reau, R., Doré, T. 2008. Systèmes de culture innovants et durables – Quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?. Transversales. Educagri. 175 p. ISBN : 978-2-84444-685-5.

Règlement (CEE) n°2092/91. 1991. Règlement (CEE) n°2092/91 du conseil du 24 juin 1991 concernant le mode de production biologique de produits agricoles et sa présentation sur les produits agricoles et les denrées alimentaires. Conseil des Communautés Européennes. 107 p.

Requillart, V. 2014. La PAC et les enjeux de l'agriculture. Parcours 2013-2014. pp 57-66.

Sebillotte, M.1992.Pratiques agricoles et fertilité du milieu. Economie rurale (208-209).pp117-124.

Sicard, H., Fontaine, L., Arino, J., Aubert, C., Bonin, L., Gall, J., Glachant, C., Johan, G., Leclech, N., Le Moine, R., Lieven, J., Ménétrier, P., Pottier, M., Rolland, C., Zaganiacz, V. 2012. Désherber mécaniquement les grandes cultures. Projet « Optimiser et promouvoir le désherbage mécanique ». CASDAR 2009/2011. pp. 1-37.

Terres Inovia. 2017. Guide de culture Colza 2017. 48 p.

The United Nations Conference on Environment and Development (UNCED). 1992. The Rio declaration on environment and development. 19 p.

Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D., David, C. 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. Agronomy for Sustainable Development (29). pp. 503-515. DOI: 10.1051/agro/2009004.

Sites internet et autres

Agreste. 2009. IFT de référence par culture et par région – valeurs 2008. [Valeurs_IFT2008_diffusées_correction.xls]. [téléchargeable sur http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Oos3zMdRuL8J:agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/documents/xls/Valeurs_IFT2008_diffus%25C3%25A9es_correction.xls+&cd=1&hl=fr&ct=clnk&gl=fr&client=firefox-b-ab].

Agreste. 2015. IFT grandes cultures en 2011 par région et par culture, méthodologie 2015 [format Excel]. Enquête pratiques culturales sur les grandes culture et prairies. [téléchargeable sur http://agreste.agriculture.gouv.fr/enquetes/pratiques-culturales/grandes-cultures-prairies/].

CRAB Conseil cultures. 2013 à 2016. Conseil cultures Hebdomadaire de Bretagne. [sur http://www.agriculteurs56.com/synagri/conseil-cultures-bretagne]. (consulté le 20/04/2017).

Géoportail. n.d. https://www.geoportail.gouv.fr (consulté le 27/06/2017).

GIP Bretagne environnement (GIPBE). 2016. Evolution des concentrations en nitrates des cours d'eau bretons. Observatoire de l'eau en Bretagne. [sur http://www.observatoire-eau-bretagne.fr/Media/Donnees/Donnees/Evolution-des-concentrations-en-nitrates-dans-les-cours-d-eau-bretons]. (mis à jour le 06/12/2016, consulté le 27/06/2017).

GIPBE. 2017. Qualité des cours d'eau bretons vis-à-vis des pesticides – dépassement des seuils fixés pour l'alimentation en eau potable. Observatoire de l'eau en Bretagne. [sur http://www.observatoire-eau-bretagne.fr/Media/Atlas/Cartes/Qualite-des-cours-d-eau-bretons-vis-a-vis-des-pesticides-Depassement-des-seuils-fixes-pour-l-alimentation-en-eau-potable]. (mis à jour le 15/05/2017, consulté le 13/07/2017).

MAAF. 2016 (b). Le projet agro-écologique en 12 clés. [sur http://agriculture.gouv.fr/le-projet-agro-ecologique-en-12-cles]. (mis à jour le 12/04/2016, consulté le 27/06/2017).

Mollier, P. 2012. Systèmes agricoles innovants : l'expérimentation système. [sur http://www.inra.fr/Chercheurs-etudiants/Systemes-agricoles/Tous-les-dossiers/experimentation-systeme/Dijon-lutte-contre-les-adventices/(key)/1]. (mis à jour le 20/06/2017, consulté le 14/08/2017).

RMT ERYTAGE. n.d. Aide aux choix d'un outil ou d'une méthode. PLAGE. [sur http://www.plage-evaluation.fr/webplage/index.php?option=com_flexicontent&view=item&_cid=80&id=131&Itemid=57]. (consulté le 03/07/2017).

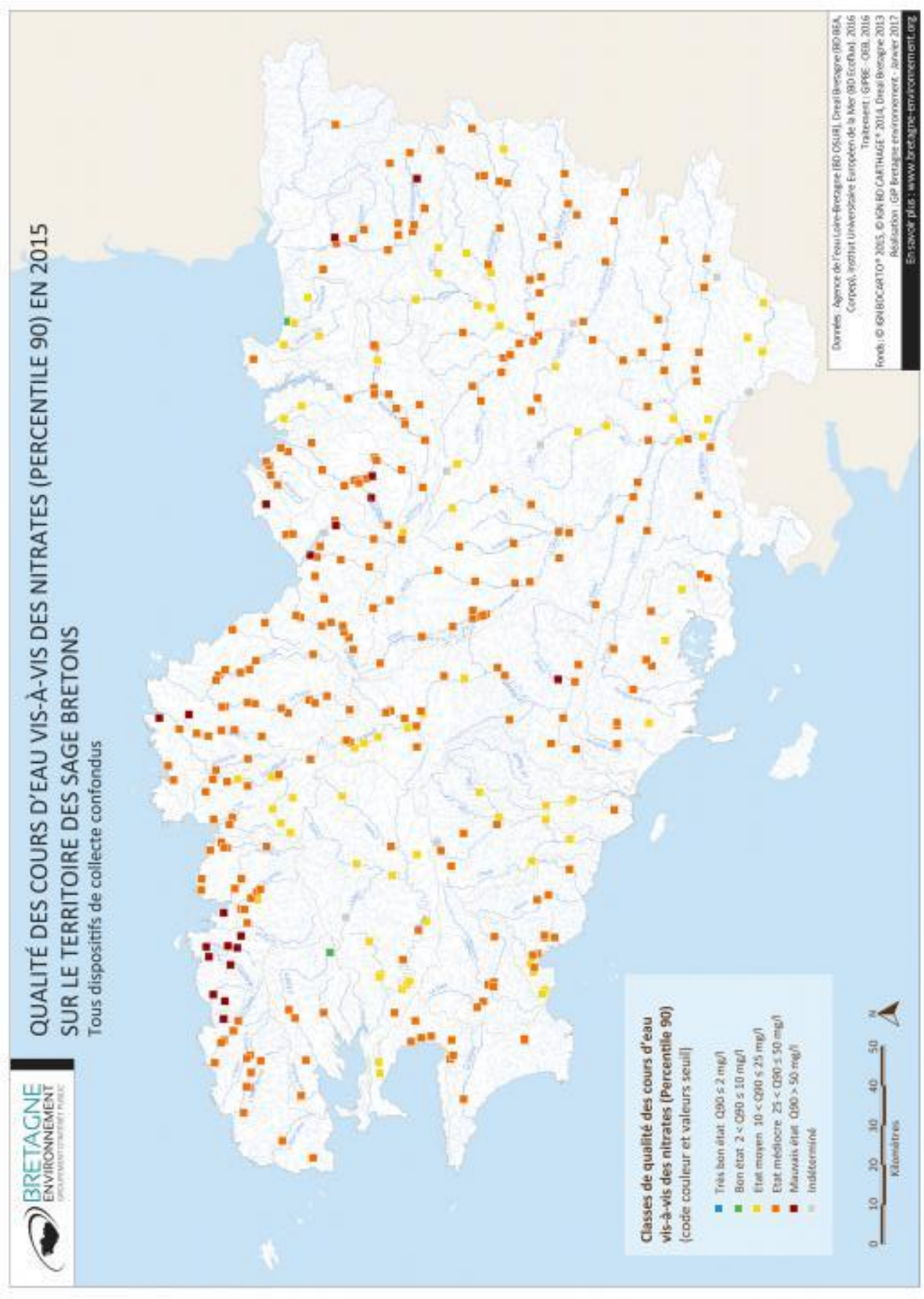
Wikilean. n.d. Test de Kruskal et Wallis. [sur http://www.wikilean.com/Articles/Analyse/5-Les-tests-d-hypotheses-25-articles/Test-de-Kruskal-et-Wallis]. (consulté le 07/08/2017).

Annexes

Annexe I : Principales caractéristiques pédoclimatiques de la Bretagne et des SdC innovants étudiés

		Bretagne		SdC Crécom intégré		SdC Kerg. intégré		SdC Bio	
Climat	Température journalière moyenne (2012-2016)	12,0°C (de 5,9°C en février à 18,0°C en juillet)	*Agreste Bretagne, 2015, 2016 et 2017*	11,0°C (de 5,0°C en février à 17,2°C en juillet)	*Enregistrements à la station*	11,8°C (de 5,7°C en février à 18,2°C en juillet)	*Enregistrements à la station*	cf SdC Kerg. intégré	
	Pluviométrie annuelle moyenne (2012-2016)	956 mm (de 46 mm en septembre à 132 mm en janvier)		1016 mm (de 29 mm en septembre à 149 mm en janvier), 145 jours de pluie*		962 mm (de 44 mm en juillet à 133 mm en janvier), 155 jours de pluie			
	Rayonnement annuel moyen (2012-2016 sauf Bretagne)	1168 kWh/m²	*Belleguic et al, 2012*	1175 kWh/m² (de 26 kWh/m² en décembre à 172 kWh/m² en juillet)		1207 kWh/m² (de 27 kWh/m² en décembre à 177 kWh/m² en juillet)	*Données de Ploërmel, ville la plus proche choisie à dires d'experts*		
Sol	Texture dominante	limoneuse	*Le Goff & Savelli, 2015*	limono-sableux	*Analyses de sol point 0 de 2009 et 2010*	limono-sablo-argileux	*Analyses de sol 2014*	limono-sableux	*Analyses de sol point 0 de 2013*
	Sous-sol			schiste ou granite		micaschiste		micaschiste	
	pH moyen	6,3	*Le Goff & Savelli, 2015*	6,4 (horizon 0-30 cm)		6,4 (horizon 0-30 cm)		6,3 (horizon 0-30 cm)	
	Matière organique (MO)	teneur en MO variable : de 2,5 à 10%, soit 80 à 350 T de carbone/ha		5,3% (horizon 0-30 cm), méthode utilisée par le laboratoire : teneur en MO (g/kg) = teneur en carbone organique (g/kg) x 1,73		4,8% (horizon 0-30 cm), méthode utilisée par le laboratoire : cf SdC Crécom		4,5% (horizon 0-30 cm), méthode utilisée par le laboratoire : cf SdC Crécom	
	Pierrosité			10%		< 5%		5-10%	
	Profondeur	50-100 cm (considérés comme profonds)	*Le Goff & Savelli, 2015*	68 cm		85 cm		80 cm	
	Potentiel de production en conduite raisonnée			75 q/ha en maïs, 72,5 q/ha en blé	*Fisson, 2009 (données station)*	91 q/ha en maïs, 83 q/ha en blé	*Données station*	proche de la moyenne régionale	

Annexe II : Qualité des cours d'eau vis-à-vis des nitrates en 2015 en Bretagne (GIPBE, 2016)



Annexe III : Méthodes d'évaluation de performances en productions végétales de grandes cultures, de la parcelle au SdC (liste non exhaustive) (Reau & Doré, 2008 ; RMT ERYTAGE, n.d.)

Méthode d'évaluation	Type d'évaluation	Objectif de l'évaluation	Type de variables prises en compte	Echelle spatiale	Nombre d'indicateurs	Type de sortie	Pertinence scientifique *(remarque)*	Facilité d'utilisation *(remarque)*
ARBRE	Durabilité : environnemental, économique, social	Diagnostic de la durabilité de l'exploitation	Pratiques agricoles, implications et activités socio-professionnelles	Exploitation	adapté en fonction des besoins	Qualitative	+ *(pas d'analyse détaillée des pratiques agricoles)*	+++
DAESE	Durabilité : environnemental, économique, social	Diagnostic de la durabilité de l'exploitation	Sol, climat, pratiques agricoles, implications et activités socio-professionnelles	Exploitation	128 (éco. : 27, env. : 79, social : 22)	Quantitative et qualitative	++ *(reparamétrage pour la Bretagne nécessaire)*	+ *(licence et formation payantes)*
IDEA	Durabilité : environnemental, économique, social	Evaluation de la durabilité de l'exploitation	Pratiques agricoles, données économiques, facture énergétique	Exploitation	42	Quantitative	+ *(agrégation par somme de scores, évaluation des systèmes spécialisés peu discriminante)*	+++
MASC (DEXi)	Durabilité : environnemental, économique, social	Evaluation de la durabilité du SdC	Sol, climat, pratiques agricoles, données économiques, performances productives	Succession de cultures	53 (niveau 1), 31 (niv. 2), 22 (niv. 3)	Qualitative	+++ *(pondérations délicates à attribuer)*	++
RAD	Durabilité : environnemental, économique, social	Evaluation de la durabilité de l'exploitation	Pratiques agricoles, données économiques, facture énergétique	Exploitation	18 (éco. : 7, env. : 6, social : 5)	Quantitative	++	+++
SYSTERRE	Durabilité : environnemental, économique, social	Evaluation de la durabilité du SdC	Sol, climat, pratiques agricoles, données économiques, performances productives	Succession de cultures	20	Quantitative	+++	++ *(formation payante nécessaire)*
PERSYST	Environnemental et économique	Evaluation des conséquences environnementales et économiques des modifications des SdC annuels et des pratiques	ITK, sol, climat	SdC	15	Quantitative et qualitative selon indicateur	++ *(non paramétré pour la Bretagne)*	++
AQUALEA	Environnementale (nitrates)	Diagnostic des risques de lixiviation des nitrates	Sol, climat, pratiques de fertilisation et de gestion de l'interculture	Parcelle, exploitation	?	Quantitative	++	+
AQUAPLAINE	Environnementale (pesticides)	Diagnostic des risques de transferts de produits phytosanitaires vers le milieu	Sol, climat, voies de transfert, pratiques agricoles	Parcelle	-	Quantitative et qualitative	++ *(bonne approche des mécanismes de transfert)*	+ *(collecte de données terrain et expertise de terrain nécessaires)*
ARTHUR	Environnementale (pesticides)	Evaluation des risques de transferts de produits phytosanitaires vers le milieu	Milieu, pratiques culturales	Parcelle, exploitation	4	Qualitative	+	++ *(reparamétrage nécessaire pour la Bretagne, formation et licence payantes)*
DAE-G	Environnementale	Diagnostic agri-environnemental géographique pour visualiser les risques d'impacts environnementaux	Contexte géographique, sol, climat, pratiques agricoles, facture énergétique	Parcelle et exploitation	27 finaux	Quantitative (indicateurs intermédiaires) et qualitative (sorties finales)	++	++ *(reparamétrage nécessaire pour la Bretagne, licence et formations payantes)*
Dialecte	Environnementale	Evaluation de l'impact environnemental de l'exploitation	Contexte géographique, pratiques agricoles moyennes	Exploitation	43	Quantitative et qualitative	++	+++
Diaphyt	Environnementale (pesticides)	Evaluation de l'impact des pratiques phytosanitaires sur l'environnemental	Pratiques agricoles	Parcelle et exploitation	10	Qualitative	++	+ *(formation payante)*
DIA'Terre	Environnementale (énergie)	Analyse énergétique basée sur l'analyse de cycle de vie (ACV)	Pratiques agricoles, données économiques, facture énergétique	Exploitation	4	Quantitative	+++ *(suite de PLANETE)*	++ *(formation nécessaire)*
EGES	Environnementale (énergie)	Analyse énergétique basée sur l'analyse de cycle de vie (ACV)	Pratiques agricoles, données économiques, facture énergétique	SdC	2	Quantitative	+ *(pas d'analyse détaillée des pratiques agricoles)*	+++
INDIGO	Environnementale	Diagnostic agri-environnemental	Sol, climat, pratiques agricoles	Exploitation, SdC	8	Quantitative ou qualitative transformée en	+++ *(analyse détaillée des pratiques, note)*	++ *(données sols nécessaires)*
MERLIN	Environnementale (nitrates)	Evaluation des risques de lixiviation des nitrates	Milieu, pratiques culturales	Parcelle et exploitation	4	Qualitative	+	++ *(reparamétrage nécessaire pour la Bretagne, formation payante)*
PLANETE	Environnementale (énergie)	Analyse énergétique basée sur l'ACV	Pratiques agricoles, données économiques, facture énergétique	Exploitation	3	Quantitative	++ *(mise à jour des bases de données des coefficients énergétiques nécessaire)*	++
SALCA	Environnementale	Diagnostic agri-environnemental par ACV	Sol, climat, pratiques agricoles	De la parcelle à la filière de production	4 à 15	Quantitative	+++	++ *(données sols nécessaires, logiciel payant)*
Syst'N	Environnementale (azote)	Quantification et diagnostic des pertes d'azote	Sol, climat, pratiques agricoles	Parcelle	3	Quantitative	+++ *(toutes les cultures ne sont pas paramétrées)*	++

+ : faible, ++ : moyenne, +++ : élevée

Annexe IV : Méthode du bilan azoté (GREN) pour céréales

Grille de calcul de la dose d'azote prévisionnelle pour les **céréales** en Bretagne

Document validé par le GREN de Bretagne - juillet 2012

A. Besoins du peuplement végétal

* Choix de l'objectif de rendement

Cf. chapitre III de la note méthodologique

Rendement objectif : ____ q /ha

x

* Azote absorbé par unité de production

Blé tendre	3 kg N/q (*)
Orge (hiv)	2,4 kg N/q
Triticale	2,6 kg N/q
Seigle	2,3 kg N/q
Avoine	2,2 kg N/q
Meteil	2,5 kg/q

(*) : Plus suivant besoin variétal selon donné ARVALIS : référence sur SYNAGRI

Si légumineuse > 30% : apport 0 azote

Coef. : ____ kg N/q

-

* Azote déjà prélevé(*) par la culture

(*) Ce poste est à prendre en compte uniquement si la date de calcul de la dose, de la mesure ou de l'estimation du reliquat d'azote sortie hiver (RSH) est postérieure à la seconde décade de février (20/02).

Nabs. : (0 *) kg N /ha

1 - Besoins de la culture = Rdt obj. x Coef. - Nabs. :

(1) ____

+

2 - Azote non valorisable

Quel que soit le type de sol, ne retenir que 30 kg N/ha

(2) 30 kg N/ha

=

Pour la parcelle analysée

Total des besoins des cultures (1) + (2) = (A) ____ kg N /ha

B. Estimation des fournitures d'azote par le sol

Contribution de la minéralisation d'automne et de début d'hiver

3. Reliquat sortie hiver (RSH) (Ouverture du bilan)

3 Selon que vous disposez :

si le PPF est réalisé avant le RSH prendre
d'une mesure de reliquat pour votre parcelle
de la valeur proposée par le réseau de suivi départemental

50	
	kg N /ha
	kg N /ha

Ce niveau de RSH sera obligatoirement à corriger après publication des RSH de l'année

+

Contribution de la minéralisation de fin d'hiver et de printemps

4. Contribution des retournements de prairies

Les associations ray-grass - trèfle blanc ne sont pas concernées par cet effet fauche

Rang de la culture post destruction	Type d'exploitation de la prairie	Age de la prairie				
		6-18 mois	2-3 ans	4-5 ans	6-10 ans	> 10 ans
1	100% pâture	10	30	50		
	1 fauche + P	5	25	40		
	2 fauches + P	0	20	30		
	100% fauche	0	10	20	20	20
2	Tout type d'exploitation	0	0	0	0	0

Aucun apport d'azote n'est autorisé sur la culture

Dans ce tableau, il n'est donné que l'effet **direct** du retournement de prairie en tenant compte de son mode d'exploitation selon les références établies par l'INRA, ARVALIS et les Chambres d'Agriculture de Bretagne. Les arrières effets sont dans le tableau 7.

4

+

5. Contribution des apports organiques des années précédant le semis

5

Fréquence des apports organiques	Nature des apports : en cas d'apports multiples, effectuer la somme des apports individuels									
	Fumier bov.	Lisier bov.	Fumier vol.	Lisier vol.	Lisier porc	Fumier porc	porc	bovin	fumier	mûr de
	à 5,5 kg Nt	à 3 kg N/m3	à 25 kg Nt	à 7 kg N/m3	à 3,5 kg N/m^3	à 4 kg Nt	à 6 kg Nt	à 6,5 kg Nt	à 20 kg Nt	à 8 kg Nt
	30 t	40m3	10 t	15 m3	40 m3	30 t	30 t	15 t	8 t	30t
tous les ans	50	25	60	15	20	25	60	35	70	60
2 années sur 3	35	15	25	10	15	20	40	25	45	60
tous les 2 ans	25	10	20	5	10	15	30	20	35	45
tous les 3 ans et +	15	5	10	0	5	10	20	10	25	30

Ces valeurs ne sont valables que si les apports sont réguliers depuis au moins 20 ans sinon calcul au prorata des années avec cette pratique. Il faut prendre en compte toutes les déjections apportées ex: rotation maïs avec fumier bovin et blé avec lisier de porc, cela correspond à du fumier bovin tous les 2 ans et le lisier porc de même; les arrières effets sont de 25 + 10 = 35 kg d'azote.

+

6. Contribution des résidus du précédent (*) (pour les prairies, voir 4)

6

Précédent	Conditions de récolte	kg N/ha
Betteraves	feuilles enfouies	20
	feuilles non enfouies	0
Céréales	pailles exportées ou brulées	0
	pailles enfouies	-20
Colza, pomme de terre, haricots, pois		20

(*)Pas d'addition de plusieurs précédents

(Source COMIFER)

Précédent	Conditions de récolte	kg N/ha
Tournesol		0
Légumineuses fourragères (luzerne, trèfle ...)		30
Jachères, cultures intermédiaires avant céréales		20
Maïs	ensilage	0
	grain	-10
Choux fleurs d'hiver		40

+

7. Contribution de l'humus du sol et du système de culture

7

Système de Cultures		kg N/ha
Maïs - Céréales	Cas particulier sans cipan et sans canne de maïs	50
	Rotation maïs ensilage et céréales (cipan)	60
	Rotation maïs grain et céréales (cipan)	65
Prairies pâturées avec 3 pâturages par an	3 années de prairie sur 10	65
	5 années de prairie sur 10	70
	8 années de prairie sur 10	80
Légumes	Endiviers et terre de St Malo	50
	Légumes céréales ou lég. Industries	70
	Légumes frais 100 %	95

=

Pour la parcelle analysée

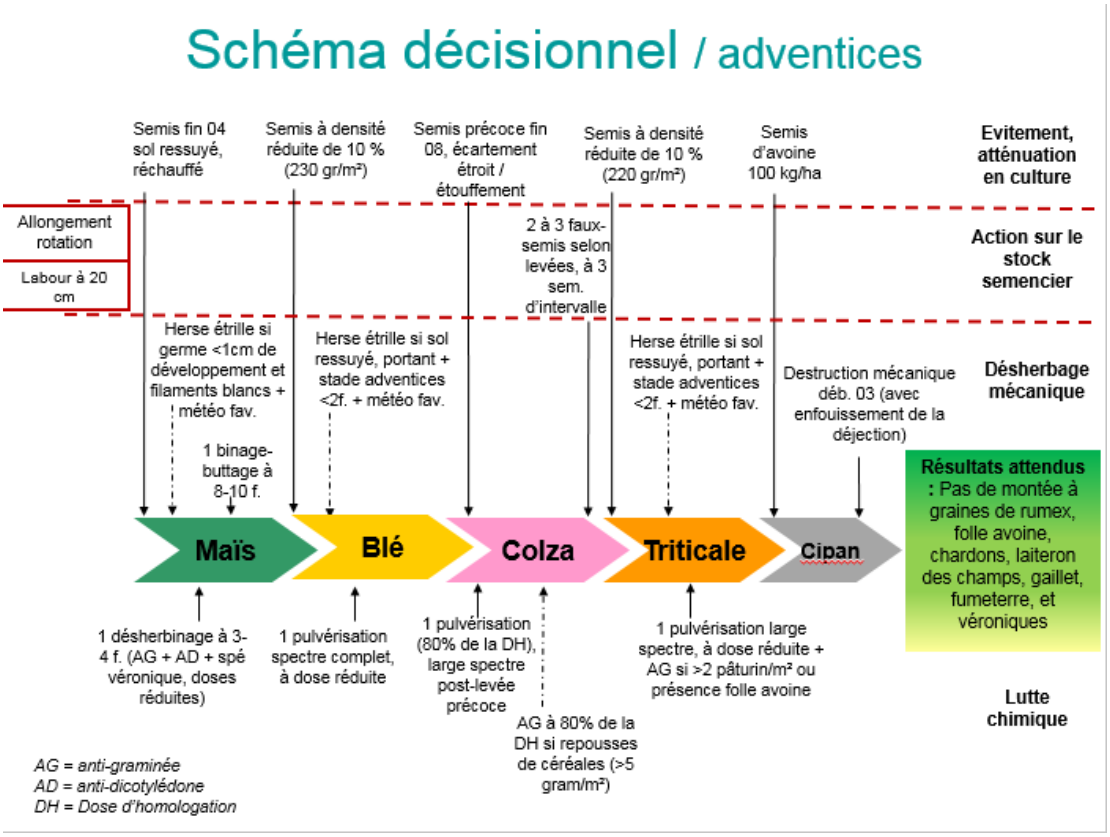
(B) Total des fournitures du sol (3 + 4 + 5 + 6 + 7)

Reprendre la valeur de A (page précédente) puis faire le calcul ci-dessous

Dose à apporter = besoins - fournitures

Dose à apporter = (A) - (B) kg N /ha

Annexe V : Schémas décisionnels* du SdC Crécom intégré



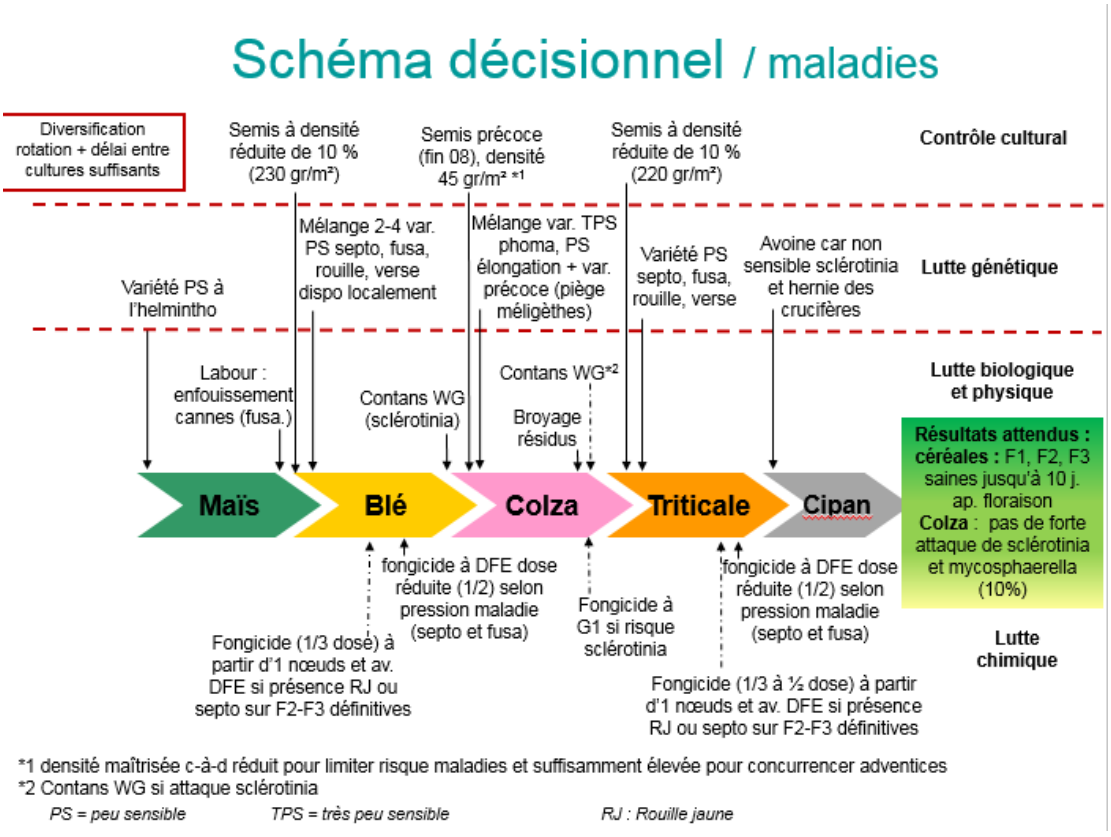
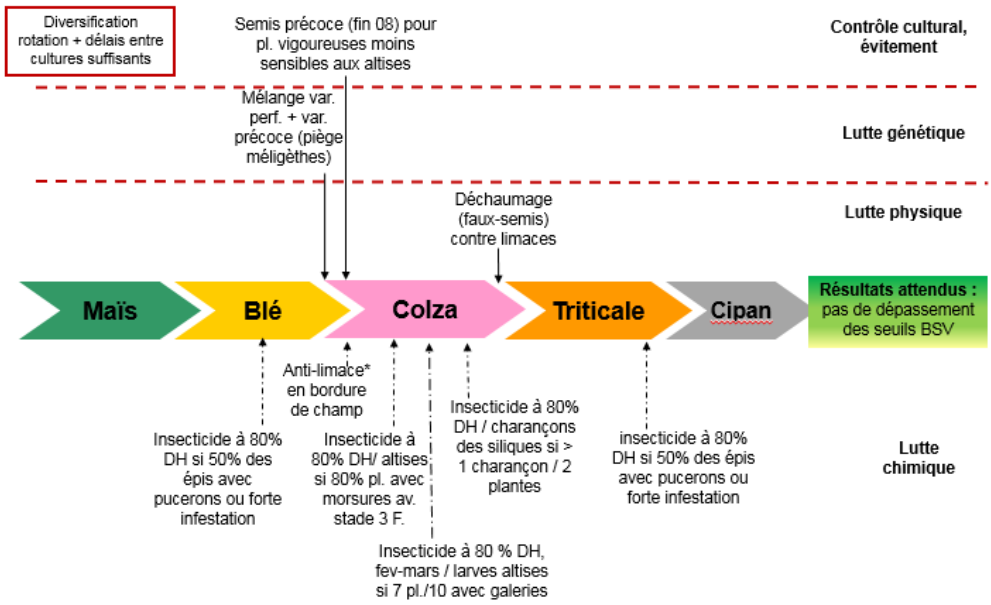
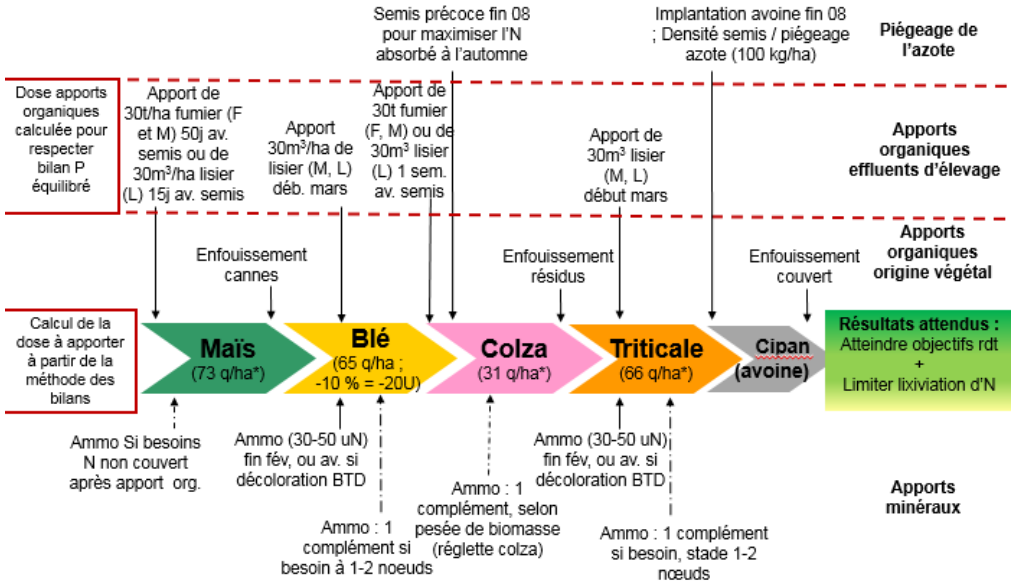


Schéma décisionnel / ravageurs



Anti-limace en pourtour de parcelle si dégâts observés ou 4 limaces/ piège (soit 16 limaces/m²)
DH : dose d'homologation

Schéma décisionnel / fertilisation N et P



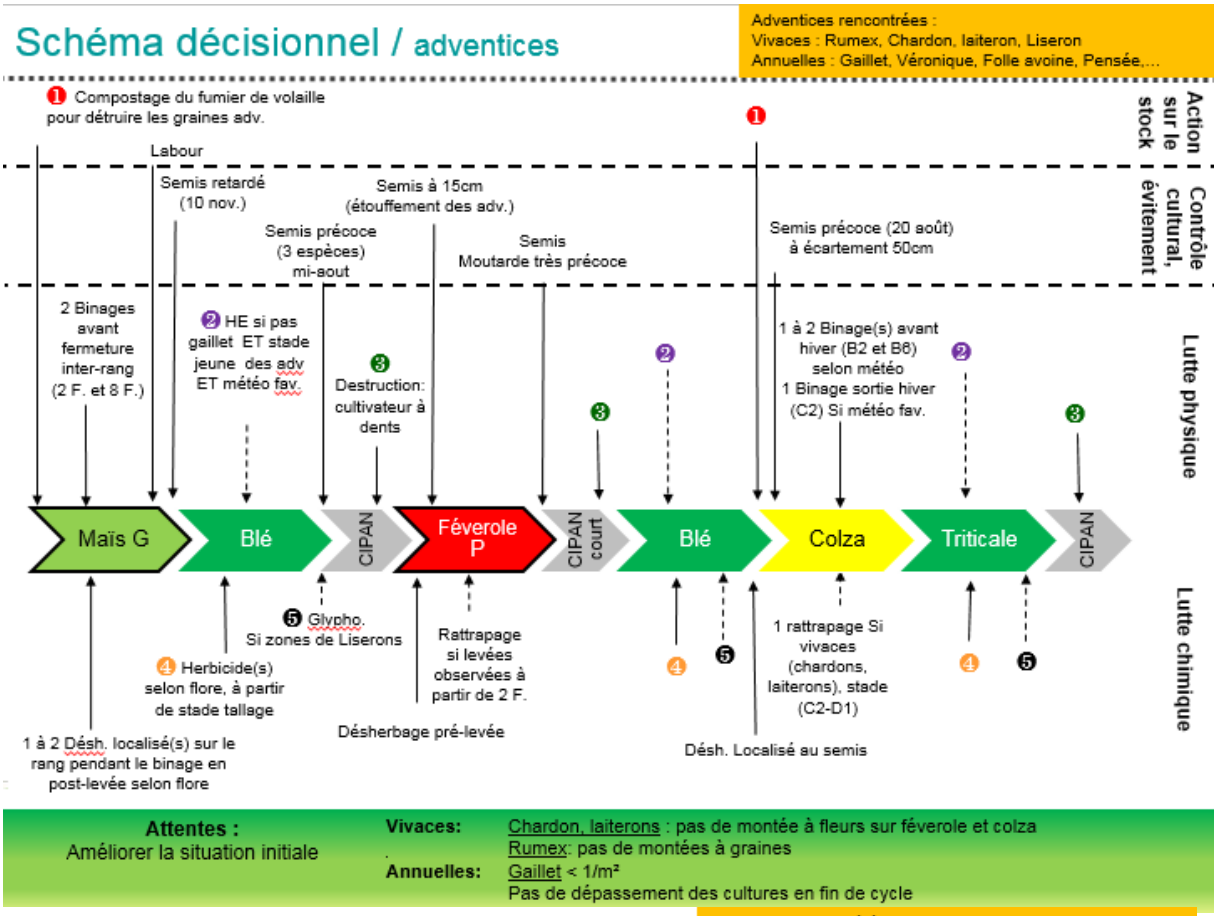
Fumier: *9,7 kg N_{tot} /t ;* *9,66 kg P_{tot} /t*
Lisier (SdC L) : *2,43 kg N_{tot} /m³ ;* *1,37 kg P_{tot}/m³*
Lisier (SdC M) : *2,27 kg N_{tot}/m³ ;* *1,10 kg P_{tot}/m³*

Objectif de rendement = moyenne rdt 5 dernières années en raisonnée – année mini et maxi → moyenne des 3 années médianes

Annexe VI : ITK synthétisé du SdC Crécom intégré pour les années de récolte 2013 à 2016 (avec correctif, cf II.2.)

	Maïs grain (objectif de rendement : 79 q/ha)	**Blé tendre d'hiver** (objectif de rendement : 75 q/ha)	**Colza** (objectif de rendement : 34 q/ha)	**Triticale d'hiver** (objectif de rendement : 74 q/ha)
Interculture	Déchaumage (déchaumeur pattes d'oie) : 2 ans/4 (mi-août)			3 Faux-semis (1 an/4) (mi-août puis pas de temps de 1 mois, 15j), 1 Faux-semis (2 ans/4) (sept.-oct.) (déch. pattes d'oie)
	Semis combiné (avec rotalabour) : Avoine (120 kg/ha, 1 an/4), Phacélie (7 kg/ha, 2 ans/4), Mélange (20 kg/ha, 1 an/4) (fin août/mi-sept.)			Semis combiné (avec rotalabour) : Moutarde blanche (8 kg/ha) ; 2 ans/4 (fin août)
Préparation du sol et semis	Déchaumage (déch. pattes d'oie) : 4 ans/4 (1-2 j. post-ferti.)		Déchaumage (déch. pattes d'oie) : 4 ans/4 (mi-août)	
	Labour à 20 cm : 4 ans/4 (avril)	Labour à 20 cm : 4 ans/4 (début/mi-nov.)	Labour à 20 cm : 4 ans/4 (1 à 3j post-ferti.)	Labour à 20 cm : 4 ans/4 (fin oct./début nov.)
				Prépa. du sol (tiller avant) : 2 ans/4 (jour du
	Semis combiné (semoir maïs pneumatique + rotalabour) : variétés Konsensus (1 an/4), Sphinxx (3 an/4) (100000 gr/ha) (qqs jours post labour)	Semis combiné (avec rotalabour) : variétés Barok + Azzerti (2 ans/4), Fluor + Rubisko + Barok + Malhéo (1 an/4), Fluor + Fructidor + Grapeli (1 an/4) (230 gr/m²) (même jour que labour)	Semis combiné (avec rotalabour) : variétés Hardi (95%) + ES Alicia (5%) (3 ans/4), Hourra (1 an/4) (1,9 kg/ha) (même jour/1j après labour)	Semis combiné (avec rotalabour) : variétés Orval (220 gr/m²) (3 ans/4), Vuka (250 gr/m²) (1 an/4) (même jour que labour)
Fertilisation	1 apport Fumier de porc : 19,72 T/ha ; 4 ans/4 (mars)	1 ou 2 apport(s) Ammonitrate (33,5% N) : 60,5 uN (4 ans/4) (mars-avril), 48 uN (3 ans/4) (20j-1 mois après 2e ferti.)	1 apport Fumier de porc : 20,98 T/ha ; 4 ans/4 (fin août)	1 ou 2 apport(s) Ammonitrate (33,5% N) : 52 uN (3 ans/4) (début mars), 35 uN (2 ans/4) (1 mois après 2e fertilisation)
		1 apport Lisier de porc : 36,5 m3/ha ; 4 ans/4 (20j post-1ere ferti.)	1 apport Ammonitrate (33,5% N) : 44 uN ; 3 ans/4 (mars)	1 apport Lisier de porc : 35,2 m3/ha ; 4 ans/4 (20j post-1ere ferti.)
Désherbage mécanique	Binage : 4 ans/4 (fin juin)	Hersage : 2 ans/4 (début mars)		Hersage : 1 an/4 (début mars)
Désherbage mixte	Callisto 0,16 L/ha + Nisshin Premium 6 OD 0,08 L/ha + Amzer 0,2 L/ha + Cantor (adj.) 0,04 L/ha : 2 ans/4 (fin mai/début juin)			
Traitements phytosanitaires : adventices	Callisto 0,2 L/ha + Nisshin Premium 6 OD 0,1 L/ha + Amzer 0,2 L/ha + Cantor (adj.) 0,1 L/ha : 2 ans/4 (fin mai/début juin)	Allié Express 31 g/ha : 1 an/4 (mars-avril)	Novall 1,9 L/ha : 1 an/4 (sept.)	Biscoto 0,75 L/ha + Cantor (adjuvant) 0,1 L/ha : 1 an/4 (fin janv.)
		Biscoto 0,7 L/ha + Cantor (adj.) 0,1 L/ha : 1 an/4 (mars-avril)	Alabama 1,8 L/ha : 3 ans/4 (sept.)	Kalao D+ 0,9 L/ha + Aligator 15 g/ha : 1 an/4 (fin mars) - *véronique*
		Aligator 15 g/ha + Biscoto 0,35 L/ha + Cantor (adjuvant) 0,1 L/ha : 1 an/4 (mars-avril)	Ogive 0,35 L/ha : 1 an/4 (oct.) - *rattrapage (folle avoine + repousses de blé)*	Kalao D+ 0,9 L/ha + Aligator 20 g/ha + Aloes 60 g/ha : 1 an/4 (fin mars) - *véronique*
		Biscoto 0,75 L/ha : 1 an/4 (mars-avril)	Foly R 0,5 L/ha + Cantor (adjuvant) 0,18 L/ha : 2 ans/4 (oct.) - *rattrapage (folle avoine)*	Aligator 15 g/ha + Biscoto 0,35 L/ha + Cantor (adjuvant) 0,1 L/ha : 1 an/4 (fin mars)
				Starane gold 1 L/ha : 1 an/4 (fin avril) - *rattrapage (gaillet, rumex)*
				Aligator 20 g/ha + Cantor (adjuvant) 0,1 L/ha : 1 an/4 (fin avril)
Traitements phytosanitaires : maladies		Abacus Sp 0,7 L/ha + Sportak Ew 0,4 L/ha : 1 an/4 (début mai) - *rouille jaune*	Contans WG 2 kg/ha (fongicide de biocontrôle) : 1 an/4 (1j post-labour)	Korema 1 L/ha : 1 an/4 (fin avril) - *rouille*
		Cherokee 0,8 L/ha : 1 an/4 (début mai) - *rouille brune*	Prosaro 0,55 L/ha : 1 an/4 (avril-mai) - *alternaria*	Etiage 0,56 L/ha + Cherokee 0,8 L/ha : 1 an/4 (fin avril) - *septoriose*
		Etiage 0,6 L/ha : 1 an/4 (fin mai)	Pictor pro 0,4 L/ha : 1 an/4 (avril-mai)	Etiage 0,56 L/ha : 2 ans/4 (mai) - *rouille brune*
		Abacus Sp 0,6 L/ha : 1 an/4 (fin mai) - *rouille jaune*	Joao 0,44 L/ha : 2 ans/4 (avril-mai)	Aviator Xpro 0,4 L/ha + Cantor (adjuvant) 0,1 L/ha : 1 an/4 (fin mai) - *septoriose*
		Aviator Xpro 0,5 L/ha + Cantor (adjuvant) 0,1 L : 1 an/4 (début juin) - *septoriose*		Kestrel 0,5 L/ha + Cantor (adjuvant) 0,1 L/ha : 1 an/4 (fin mai) - *oïdium*
		Kestrel 0,4 L/ha : 2 ans/4 (début juin) - *septoriose*		Kestrel 0,3 L/ha : 1 an/4 (début juin) - *oïdium, rouille*
Traitements phytosanitaires : ravageurs			Décis Protech 0,3 L/ha : 1 an/4 (fin sept.) - *altises*	
			Sluxx 7 kg/ha (molluscicide de biocontrôle) : 1 an/4 (début oct.)	
			Décis Protech 0,3 L/ha : 3 ans/4 (avril-mai) - *altises*	
Récolte	Moissonneuse : 81,29 q/ha (normalisé) ; 4 ans/4 (nov.)	Moissonneuse + round baller : 69,47 q/ha/an grains (normalisé) + 4,02 T/ha/an paille (exportée) ; 4 ans/4 (début août)	Moissonneuse : 33,97 q/ha (normalisé) ; 4 ans/4 (fin juillet/début août)	Moissonneuse + round baller : 78,49 q/ha/an grains (normalisé) + 5,45 T/ha/an paille (exportée) ; 4 ans/4 (début août)

Annexe VII : Schémas décisionnels du SdC Kerguéhennec intégré



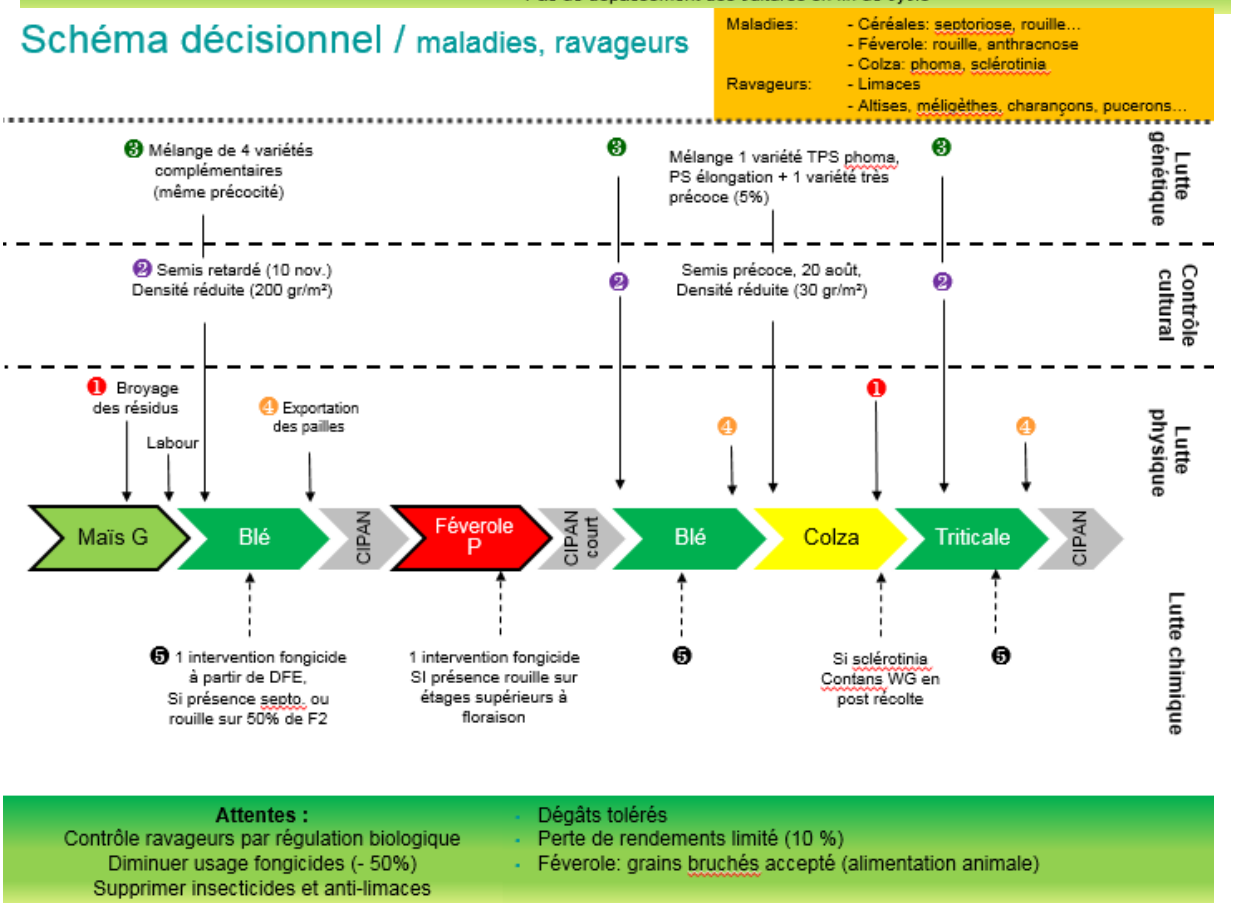
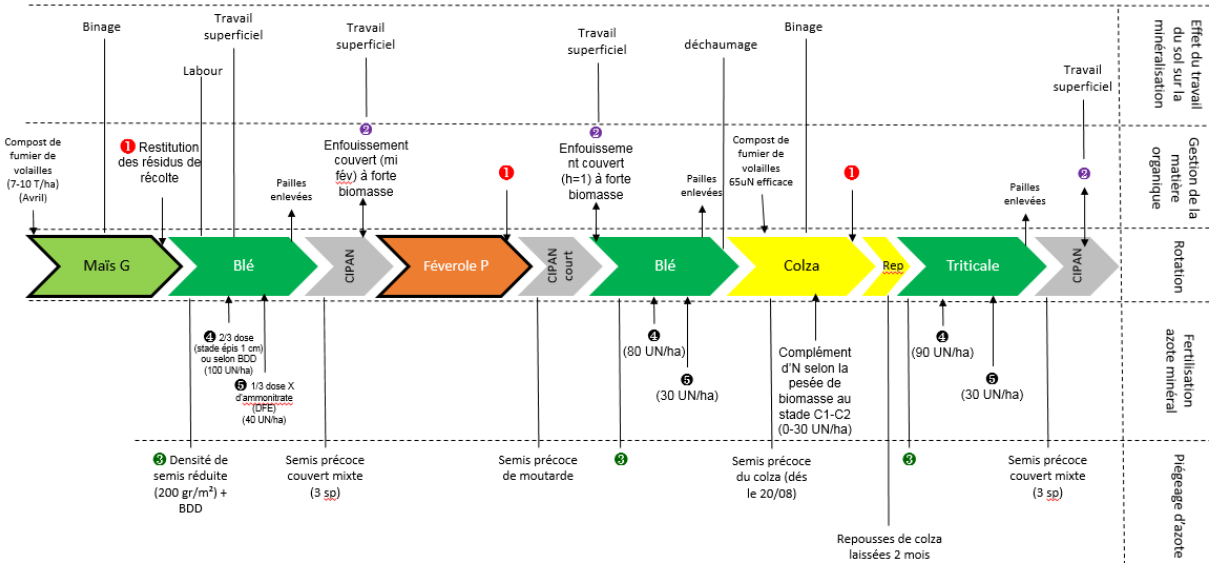


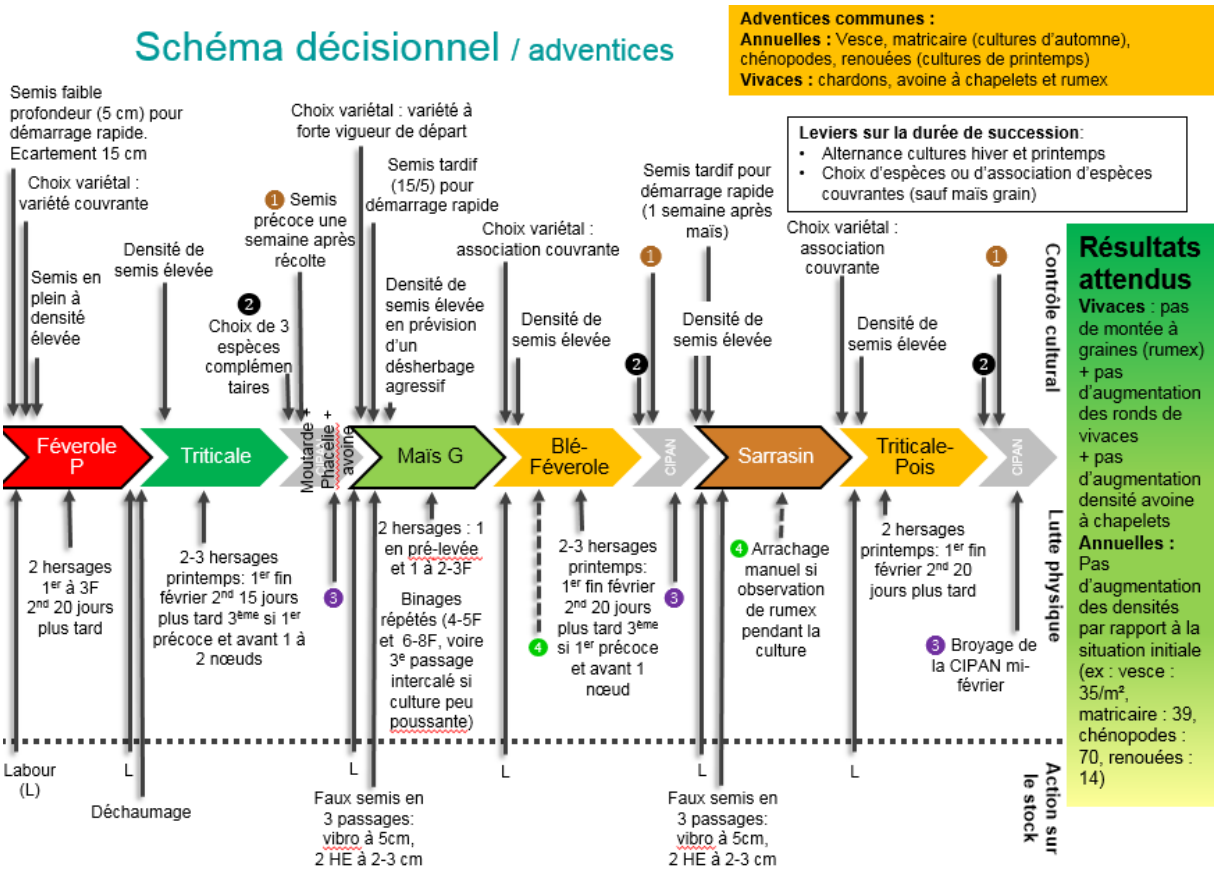
Schéma décisionnel /pertes de nitrates



Annexe VIII : ITK synthétisé du SdC Kerguéhennec intégré pour les années de récolte 2013 à 2016 (avec correctif, cf II.2.)

	Maïs grain (objectif de rendement : 83 q/ha)	**Blé tendre d'hiver 1** (obj. de rdmt : 68 q/ha)	**Féverole de printemps** (obj. de rdmt : 35 q/ha)	**Blé tendre d'hiver 2** (obj. de rdmt : 68 q/ha)	**Colza d'hiver** (obj. de rdmt : 27 q/ha)	**Triticale d'hiver** (obj. de rdmt : 68 q/ha)
Interculture	Déchaumage (canadien) : 4 ans/4 (août)		Déchaumage (canadien) : 2 ans/4 (mi-août)	Déchaumage (canadien) : 1 an/4 (début sept.)		Prépa. du sol (déchaumeur à disques indépendants) : 1 an/4 (2j post-Contans)
	Semis combiné (avec herse rotative HR) : Avoine-Phacélie-Radis ou Niger (60-5-2 kg/ha, 2 ans/4), Moutarde-Phacélie-Radis (5-5-3 kg/ha, 2 ans/4) (mi-août)		Semis combiné (avec HR) : Avoine-Phacélie-Radis ou Niger (60-5-2 kg/ha, 2 ans/4), Moutarde-Phacélie-Radis (5-5-3 kg/ha, 2 ans/4) (mi-août)	Semis combiné (avec HR) : Moutarde (7 kg/ha, 4 ans/4) (début sept.)		Semis combiné (avec HR) : Moutarde (6 kg/ha, 1 an/4) (1 semaine post-prépa.)
	Broyage (2 ans/4) ou Déchaumage (cover-crop, canadien) (2 ans/4) (fin mars)		Broyage (3 ans/4) ou Déchaumage (canadien) (1 an/4) (mi-mars)	Broyage (2 ans/4) ou Déchaumage (canadien) (2 ans/4) (début nov.)		Broyage : 1 an/4 (début nov.)
Préparation du sol et semis	Déchaumage (canadien) : 4 ans/4 (jour de ferti.)				Déchaumage (canadien) : 4 ans/4 (jour de 1ere ferti.)	Déchaumage (canadien) : 1 an/4 (début sept.) + 2 ans/4 (début nov.)
	Labour à 20 cm : 2 ans/4 (début mai)	Prépa. du sol (canadien) ou Labour à 20 cm : 2 ans/4 chacun (mi-nov.)	Labour à 20 cm : 2 ans/4 (mi-mars)	Prépa. du sol (canadien) : 2 ans/4 (début nov.)	Labour à 20 cm : 1 an/4 (fin août)	Labour à 20 cm : 1 an/4 (début nov.)
	Prépa. du sol (vibroculteur ou HR) : 2 ans/4 (0-2j. post-labour)		Prépa. du sol (vibroculteur ou HR) : 2 ans/4 (1j. post-labour)		Prépa. du sol (HR) : 4 ans/4 (début sept.)	
	Semis (semoir monograine) : variété Millesim (4 ans/4) (95000 gr/ha) (jour de prépa. du sol)	Semis combiné (avec HR) : mélange de 4 variétés (4 ans/4) (200 gr/m²) (même jour que prépa. du sol ou labour)	Semis (semoir monogr. ou combiné (avec HR)) (2 ans/4 de chq) : variétés Espresso (1 an/4), Fabelle (3 ans/4) (43 gr/m²) (même jour que prépa. du sol ou labour)	Semis combiné (avec HR) : mélange de 4 variétés (4 ans/4) (200 gr/m²) (même jour que prépa. du sol ou labour)	Semis (semoir monogr.) : variétés Kadore (95%) + ES Alicia (2 ans/4), DK Explicit + ES Alicia (1 an/4), DK Exception (1 an/4) (30 gr/m²) (début sept.)	Semis combiné (avec HR) : mélange de 4 variétés (4 ans/4) (200 gr/m²) (même jour que labour)
Fertilisation	1 apport Compost de fumier de volailles : 13 T/ha ; 4 ans/4 (fin avril)	2 apports Ammonitrate (33,5% N) : 100 uN (début avril) + 50 uN (mi-mai) (4 ans/4)		2 apports Ammonitrate (33,5% N) : 82 uN (début avril) + 43 uN (mi-mai) (4 ans/4)	1 apport Fumier de volailles 4 T/ha, Compost de fumier de volailles 5 T/ha : 2 ans/4 chacun (fin août)	2 apports Ammonitrate (33,5% N) : 77 uN (début avril) + 30 uN (mi-mai) (4 ans/4)
					1 apport Ammonitrate (33,5% N) : 33,5 uN (1 an/4 (mi-mars)	
Désherbage mécanique	Binage : 1 an/4 début juin, 2 ans/4 fin juin		Binage : 2 ans/4 (fin mai)		Binage : 4 ans/4 (début oct.) + 1 an/4 (fin févr.)	
Désherbage mixte	Amzer + Milagro + Callisto 0,1 L/ha de chq (2 ans/4) ; Banvel 4S 0,07 L/ha + Milagro 0,17 L/ha + Callisto 0,1 L/ha (1 an/4) : début juin					
	Amzer 0,17 L/ha + Milagro 0,17 L/ha + Callisto 0,25 L/ha : 1 an/4 (fin juin) - *rattrapage*					
	Banvel 4S 0,07 L/ha + Auxo 0,17 L/ha : 1 an/4 (fin juin)					
Traitements phytosanitaires : adventices	Freeway 3 L/ha + Banvel 4S 0,3 L/ha + Silwett 0,1 L/ha (1 an/6) (début sept.) - *vivaces*	Aligator 20 g/ha + Primus 0,08 L/ha + Charade 1,5 L/ha ; Primus 0,07 L/ha + Charade 1,3 L/ha ; Aligator 15 g/ha + Biscoto 0,8 L/ha ; Primus 0,08 L/ha + Biscoto 0,8 L/ha + Heliosol 0,4 L/ha : 1 an/4 de chq (début mars) - *dicotylédones*	Centium 36S 0,15 L/ha + Challenge 600 2 L/ha + Nirvana 2 L/ha (2 ans/4) (1j post-semis) ; Centium 36S 0,075 L/ha + Challenge 600 1 L/ha + Nirvana 1 L/ha (2 ans/4) (pulvérisateur sur semoir monogr.)	Aligator 20 g/ha + Primus 0,08 L/ha + Charade 1,5 L/ha ; Primus 0,05 L/ha + Biscoto 0,8 L/ha ; Aligator 10 g/ha + Primus 0,07 L/ha ; Primus 0,08 L/ha + Biscoto 0,8 L/ha + Heliosol 0,4 L/ha : 1 an/4 de chq (début mars) - *dicotylédones*	Freeway 3 L/ha + Banvel 4S 0,3 L/ha (1 an/6) (fin août) - *vivaces*	Freeway 2 L/ha + Banvel 4S 0,3 L/ha + Silwett 0,1 L/ha (1 an/4) (fin oct.) - *vivaces*
	Freeway 2 L/ha + Silwett 0,15 L/ha + U46D 1 L/ha (1 an/6) (mi-avril) - *vivaces*	Atlantis 0,15 kg/ha + Actirob B 1 L/ha : 1 an/6 (début avril) - *pâturin, folle avoine FA*	Etamine 2 L/ha + Actirob B 1 L/ha : 1 an/4 (mi-avril) - *repousses avoine CIPAN*	Atlantis 88 g/ha + Actirob B 1 L/ha : 2 ans/4 (début avril) - *pâturin, FA*	Alabama 1 L/ha + Centium 36S 0,075 L/ha : 4 ans/4 (pulvérisateur sur semoir monogr.)	Freeway 3 L/ha + Silwett 0,1 L/ha (1 an/4) (début août) - *rumex*
	Camix 1 L/ha (1 an/4) (pulvérisateur sur semoir)	Celio 0,4 L/ha + Actirob B 1 L/ha : 1 an/6 (mai) - *FA*	Corum 1,25 L/ha + [Stratos Ultra + Dash HC] 1 L/ha : 1 an/4 (mi-avril)		Lontrel 100 + Actorib B 1 L/ha de chq : 1 an/4 (fin mars) - *dicotylédones*	Freeway 3 L/ha + Banvel 4S 0,3 L/ha + Silwett 0,15 L/ha (1 an/4) (fin oct.) - *repousses de colza, vivaces*
						Aligator 20 g/ha + Primus 0,08 L/ha + Charade 1,5 L/ha ; Primus 0,07 L/ha + Charade 1,3 L/ha ; Primus 0,05 L/ha + Biscoto 0,8 L/ha ; Gratil 20 g/ha + Picotop 1,3 L/ha : 1 an/4 de chq (début mars)- *dicotylédones*
						Atlantis 0,15 kg/ha + Actirob B 1 L/ha : 1 an/4 (début avril) - *pâturin, FA*
Traitements phytosanitaires : maladies		Adexar 0,48 L/ha (2 ans/4) ; Prosaro (1 an/4) (début juin) - *septoriose*	Sunorg Pro 0,8 L/ha : 1 an/4 (fin juin) - *rouille brune*	Adexar 0,73 L/ha (3 ans/4) (début juin) - *septoriose*	Pictor Pro 0,25 kg/ha + Caramba star 0,4 L/ha : 1 an/4 (fin avril) - *alternaria*	Contans WG 2 kg/ha (fongicide de biocontrôle) : 1 an/4 (fin juillet) + 1 an/4 (début nov.) - *sclérotinia*
						Prosaro 0,5 L/ha : 1 an/4 (début juin) - *septoriose*
Récolte	Moissonneuse : 83,81 q/ha (normalisé) ; 4 ans/4 (mi-nov.) - broyage des cannes	Moissonneuse + round baller : 72,16 q/ha/an grains (normalisé) + 4,44 T/ha/an paille (exportée) ; 4 ans/4 (début août)	Moissonneuse : 42,86 q/ha (normalisé) ; 4 ans/4 (début sept.)	Moissonneuse + round baller : 75,24 q/ha/an grains (normalisé) + 4,64 T/ha/an paille (exportée) ; 4 ans/4 (début août)	Moissonneuse : 26,12 q/ha (normalisé) ; 4 ans/4 (fin juillet) - broyage des cannes	Moissonneuse + round baller : 71,30 q/ha/an grains (normalisé) + 6,04 T/ha/an paille (exportée) ; 4 ans/4 (début août)

Annexe IX : Schémas décisionnels du SdC Bio



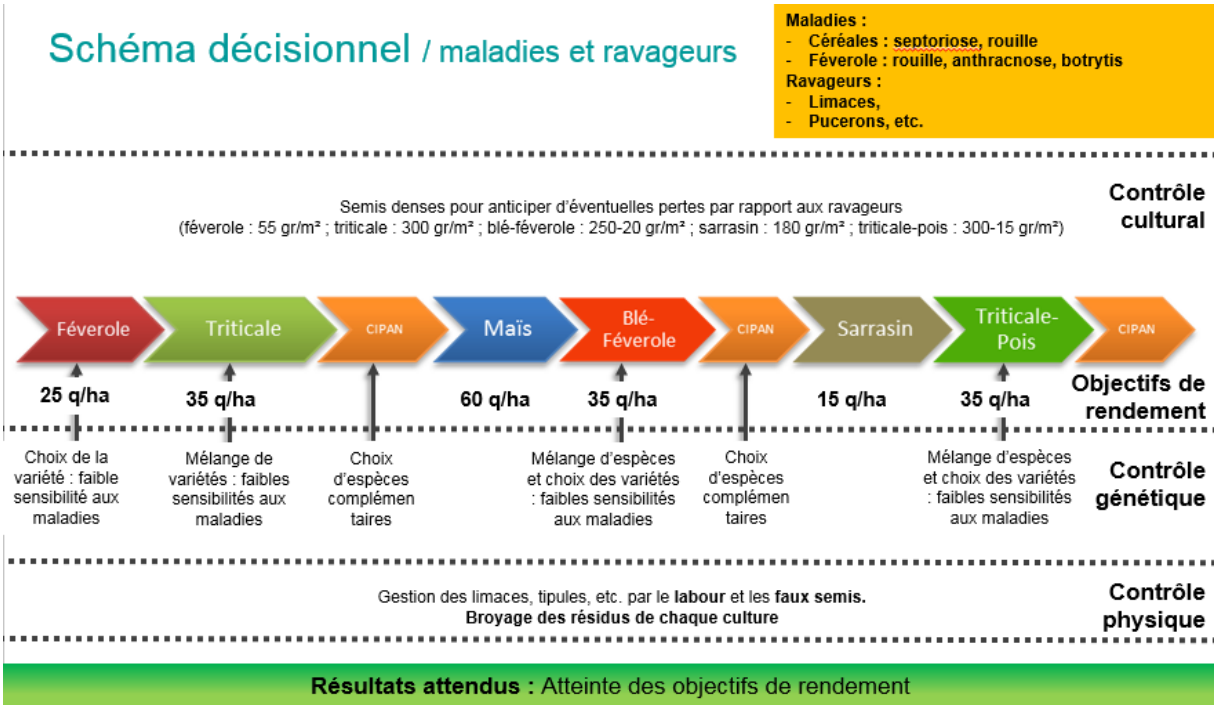
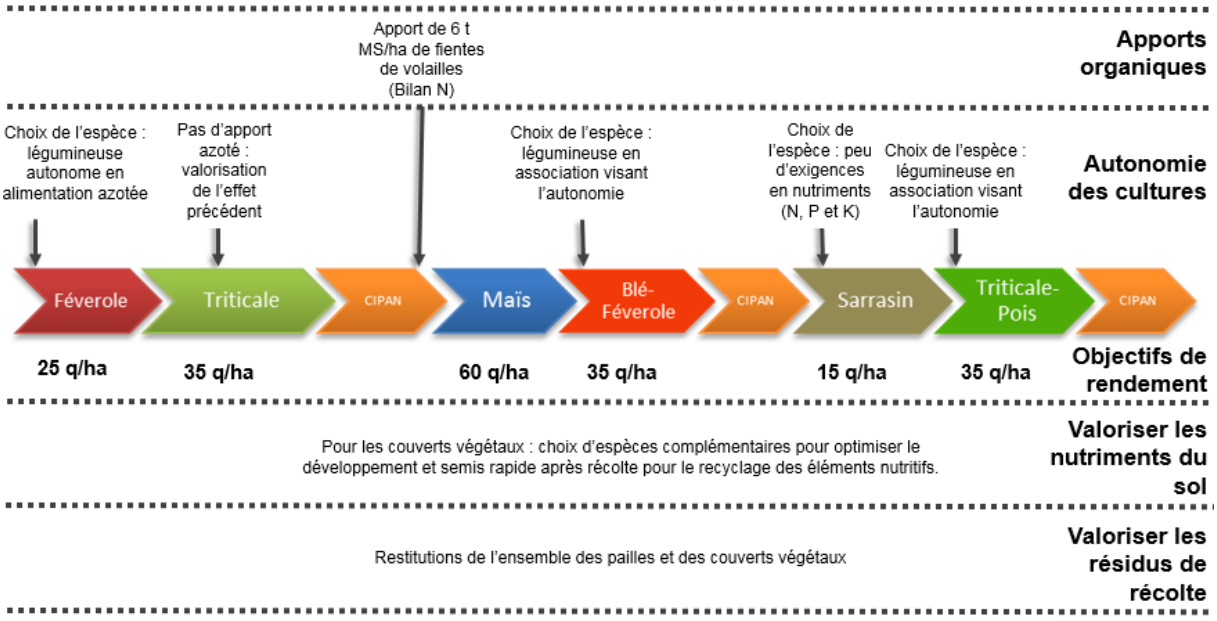


Schéma décisionnel / fertilisation



Résultats attendus : Maintien de la fertilité du sol (indicateur : taux de mo)
Atteinte des objectifs de rendement

Annexe X : ITK synthétisé du SdC Bio pour les années de récolte 2013 à 2016

	Féverole de printemps (objectif de rendement : 25 q/ha)	**Triticale d'hiver** (obj. de rdmt : 35 q/ha)	**Maïs grain** (obj. de rdmt : 62.5 q/ha)	**Blé tendre d'hiver - féverole d'hiver** (obj. de rdmt : 35 q/ha)	**Sarrasin** (obj. de rdmt : 15 q/ha)	**Triticale d'hiver + pois d'hiver** (obj. de rdmt : 35 q/ha)
Interculture	Semis combiné (avec herse rotative HR) : Phacélie- Avoine-Moutarde (4-4-60 kg/ha, 4 ans/4) (début août)	Semis combiné (avec HR) : Moutarde (7 kg/ha, 1 an/3) (mi-sept.)	Semis combiné (avec HR) : Phacélie- Avoine-Moutarde (4-4-60 kg/ha, 4 ans/4) (début août)		Semis combiné (avec HR) : Phacélie- Avoine-Moutarde (4-4-60 kg/ha, 4 ans/4) (début août)	
	Broyage : 4 ans/4 (février-mars)	Déchaumage (canadien) : 1 an/3 (mi-nov.)	Broyage : 4 ans/4 (fin février)		Broyage : 4 ans/4 (fin février)	
Préparation du sol et semis	Labour à 20 cm : 4 ans/4 (mi-mars)	Labour à 20 cm : 3 ans/3 (mi-nov.)	Labour à 20 cm : 4 ans/4 (mi-mars/début avril)	Labour à 20 cm : 4 ans/4 (fin nov.)	Labour à 20 cm : 4 ans/4 (début avril)	Labour à 20 cm : 4 ans/4 (mi-nov.)
			Reprise (vibroculteur) : 4 ans/4 (même jour que la fertilisation)		Reprise (vibroculteur) : 4 ans/4 (mi-avril)	
	Semis combiné (avec HR) : variétés Divine (2 ans/4), Espresso (1 an/4), Fabelle (1 an/4) (55 gr/m²) (mi-mars)	Semis combiné (avec HR) : mélange de 3 variétés (300 gr/m²) (3 ans/3) (même jour que le labour)	Semis (semoir monograine) : variétés Latki (1 an/4), Borelli (2 ans/4), Burli (1 an/4) (110000 gr/ha) (fin mai)	Semis combiné (avec HR) : variétés Attlass (blé) + Irena (féverole) (250 + 19 gr/m²) (4 ans/4) (même jour que le labour)	Semis combiné (avec HR) : variété La Harpe (4 ans/4) (45 kg/ha) (fin mai-début juin)	Semis combiné (avec HR) : mélange de 3 variétés (triticale) + variété Assas (pois) (300 + 15 gr/m²) (4 ans/4) (même jour que le labour)
	Rappuyage (rouleau) : 3 ans/4 (1 semaine post-semis)		Rappuyage (rouleau) : 4 ans/4 (même jour que le semis)		Rappuyage (rouleau) : 4 ans/4 (même jour que le semis)	
Fertilisation			1 apport Fientes humides de poules 8,1 T/ha : 4 ans/4 (fin avril)			
Désherbage manuel			Arrachage rumex : 3 ans/4 (juin)		Arrachage rumex : 3 ans/4 (juin)	
Désherbage mécanique			3 Faux-semis (rouleau pour les 2 premiers, puis herse étrille HE ou vibroculteur 2 ans/4 chacun) : 4 ans/4 (fin mars puis 15j d'écart)		3 Faux-semis (rouleau, rouleau ou vibro. 2 ans/4 chacun, HE 3 ans/4 ou vibro.) : 4 ans/4 (début avril puis 15j d'écart)	
	2 Hersages 4 ans/4 (mi-avril, début mai) + Hersage 2 ans/4 (fin mars)	3 Hersages : 3 ans/3 (mars, début avril, fin avril)	3 Hersages : 4 ans/4 (fin mai puis 15j d'écart)	2 Hersages : 4 ans/4 (mars, début avril)		2 Hersages : 4 ans/4 (mars, début avril)
			2 Binages : 4 ans/4 (fin juin, début juillet)			
Récolte	Moissonneuse : 30,25 q/ha (normalisé) ; 4 ans/4 (début sept.)	Moissonneuse : 38,33 q/ha (normalisé) ; 3 ans/3 (début août)	Moissonneuse : 61 q/ha (normalisé) ; 4 ans/4 (mi-nov.) - broyage des cannes	Moissonneuse : 45,25 q/ha (normalisé) ; 4 ans/4 (début août)	Moissonneuse : 11,9 q/ha (normalisé) ; 4 ans/4 (début oct.) - broyage des chaumes (1 an/4)	Moissonneuse : 40,5 q/ha (normalisé) ; 4 ans/4 (début août)

Annexe XI : Test non-paramétrique d'égalité des moyennes de Kruskal-Wallis (annexe élaborée à partir de Wikilean, n.d.)

Des tests de comparaison de moyennes non-paramétriques peuvent être réalisés dans le cas où la variable X à étudier ne remplit pas la condition de normalité. Si les échantillons étudiés peuvent être considérés comme indépendants, on applique le test de Mann et Whitney pour deux échantillons, le test de Kruskal-Wallis pour un nombre quelconque d'échantillons. Si les échantillons ne sont pas indépendants, on applique le test de Wilcoxon. Ces tests sont non-paramétriques car ne nécessitent pas d'estimation de la moyenne et de la variance.

Dans notre cas, le test de Kruskal-Wallis est utilisé : on teste l'hypothèse nulle H_0 « égalité des moyennes entre SdC », avec H_1 « au moins un SdC a une moyenne différente des autres ».

Les valeurs des quatre SdC sont classées par ordre croissant, puis chaque valeur est associée à son rang dans la liste si elle n'apparaît qu'une fois, la moyenne des rangs de ses apparitions si elle apparaît plusieurs fois. Pour chaque SdC, la somme des rangs de ses valeurs est calculée.

Si la p-value du test est inférieure au niveau de signification α de valeur standard 5%, alors H_0 est rejetée : au moins un SdC a une moyenne différente des autres.

Pour savoir quel SdC diffère des autres, le pourcentage de différence entre chaque combinaison de SdC est calculé (pour un nombre de SdC inférieur à 5) :

$$\%\text{différence} = 100 * (X_{2barre} - X_{1barre}) / X_{1barre}$$

Si le nombre de SdC est plus important, des tests post hoc peuvent être utilisés (test de Tukey pour différencier des groupes statistiques homogènes).

Annexe XII : PLANETE (annexe élaborée à partir de Bochu, 2002)

La méthode de l'analyse énergétique PLANETE (Pour L'ANalyse énergETique des Exploitations agricoles, mise au point par Solagro avec l'ENESAD, le CEIPAL, le CEDAPAS et le CETA de Thiérache et le soutien de l'ADEME à la fin des années 1990) permet de quantitifer la consommation totale d'énergie (MJ/ha SAU et en EQF/ha SAU avec 1 MJ correspond à 0,028 équivalent litre de fuel), la répartition de l'énergie consommée par poste, la production énergétique et l'estimation des émissions de gaz à effet de serre, à l'échelle de l'exploitation agricole. La méthode est basée sur celles des analyses de cycle de vie : prise en compte de tous les intrants d'un produit « du berceau à la tombe » (impacts environnementaux sur l'eau, le sol, l'air, les resources non renouvelables de l'élaboration et usages de ces intrants). L'analyse concerne une année de production et a pour limite l'exploitation agricole (entrées et sorties de l'exploitation). Les productions animales et végétales sont séparées.

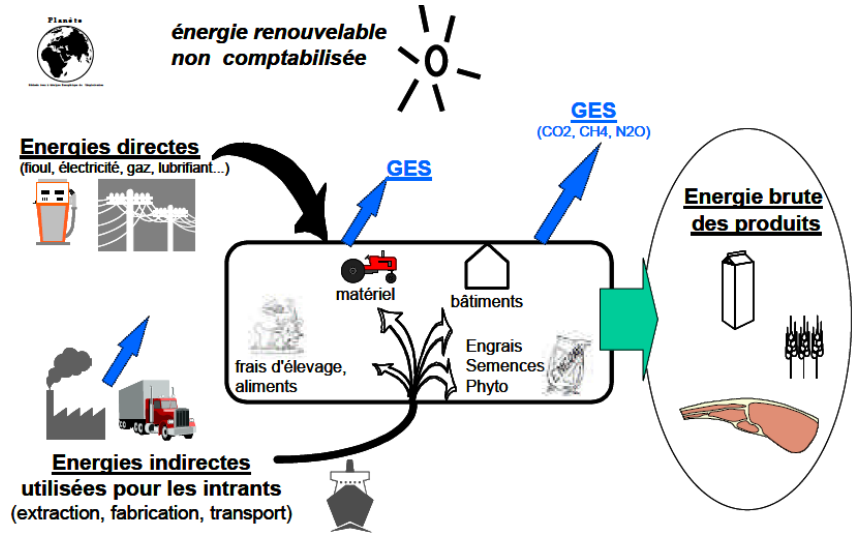


Schéma général de l'analyse PLANETE

La consommation d'énergie non renouvelable comprend :

- la consommation directe : consommation en fuel sur l'exploitation (ou consommation par les tiers intervenant sur l'exploitation), en électricité et en autres produits pétroliers nécessaires au fonctionnement de l'exploitation agricole
- la consommation indirecte : énergies consommées pour la fabrication et le transport des intrants (engrais minéraux et organiques, aliments du bétail, produits phytosanitaires, semences, jeunes animaux, amortissement énergétique du matériel (machines, bâtiments), autres achats).

La production énergétique correspond à l'énergie brute des produits, comparable au pouvoir de combustion inférieur (PCI) des combustibles.

Les principales émissions de gaz à effet de serre proviennent de l'atelier production animale (CH_4, N_2O), des formes d'azote (émissions de N_2O dans le sol ou dans l'air issus de la fertilisation, minéralisation…) et de la consommation énergétique (CO_2 lors des combustions).

Les dernières références de PLANETE, datant de 2010, ont été actualisées manuellement (pour la partie productions végétales) par les références 2016 de Dia'Terre (outil de diagnostic énergie-gaz à effet de serre à l'échelle de l'exploitation agricole, par l'ADEME).

Annexe XIII : Script pour l'obtention des graphiques de la répartition du temps de travail à l'échelle du SdC (sur le logiciel Anaconda)

Anaconda est un logiciel développé par l'entreprise Continuum et fournissant un éditeur de texte, Spyder, permettant de coder en langage Python. Le script a été réalisé par Didier Debroize (CRAB) et adapté à la marge.

```
#Chargement des packages de langage et de graphique
import os
import pandas as pd
import numpy as np
import pylab as plt
import matplotlib.patches as mpatches

#Chargement du jeu de données, choix des couleurs, explicitation des variables
Rep='C:\Users\Floriane\Documents\Agrocampus Ouest\M2'
os.chdir(Rep)
couleurs=[u'g',u'b',u'g',u'y',u'brown',u'purple',u'orange',u'c',u'r']
couleurs=[couleurs[0]]+couleurs
rot=[[u'Blé',u'Maïs'],[u'Féverole',u'Triticale',u'Maïs',u'Blé-Féverole',u'Sarrasin',u'Triticale-
Pois'],[u'Maïs',u'Blé',u'Colza', u'Triticale'],[u'Maïs',u'Blé 1',u'Féverole',u'Blé
2',u'Colza',u'Triticale']]
interv=[u'Préparation du sol et semis', u'Fertilisation',u'D\xe9sherbage manuel',
u'D\xe9sherbage mixte',u'D\xe9sherbage m\xe9canique',u'Traitement phytosanitaire',
u'Récolte',u'Autre']
mois=[u'  Jan',u' Fev',u'  Mar',u'Avr',u'Mai',u'Jui',u'Jul',u'Aou',u'Sep',u'Oct',u'Nov',u'Dec']
df = pd.read_excel('Bouard_donnees.xlsx')
df.describe()
df.columns
np.unique(df[u'Année de récolte']).tolist()
cultures=np.unique(df[u'Culture']).tolist()

#Graphe par SdC :
an=2013-2016
        #Sélection des individus
df1=df.loc[df[u'Année de récolte'] == an]
df1[u'SdC'].unique
sdc=np.unique(df1[u'SdC'])
Y=np.zeros((len(sdc),36))

for n,i in enumerate(sdc):
   df2=df1.loc[df1['SdC']==i]
   clt=rot[n] #np.unique(df2[u'Culture'])
   Y=np.zeros((len(clt),36))
   co=[]
   col=[]
   plt.figure()
   for o,j in enumerate(clt):

      df3=df2.loc[df2[u'Culture']==j]
      co.append(cultures.index(j))
      dec=df3.iloc[:, 10:].as_matrix()
      deca=np.sum(dec,axis=1)

      #Axe des abscisses (décades)
      tps=df3[u'Durée (h/ha)'].as_matrix()
```

```
        dec2=dec*tps[:, None]/deca[:,None]
         np.sum(dec2)
         Y[o,:]=np.sum(dec2,axis=0)
         plt.plot([],[],color=couleurs[cultures.index(j)], label=j, linewidth=5)

    #Mise en forme du graphe et enregistrement
    plt.stackplot(range(36), Y,colors=[couleurs[x] for x in co])
    plt.legend([mpatches.Patch(color=couleurs[x]) for x in co],clt,bbox_to_anchor=(0.02,
1),prop={'size':10},loc='upper left')
    plt.title(u'Répartition moyenne du temps de travail \n '+i+u' - Années de récolte 2013 à
2016')
    plt.axis('tight')
    plt.ylabel(u'h/ha, par décade et par an')
    plt.xticks(range(0,34,3),mois)
    plt.yticks(range(0,7,1))
    plt.show()
    plt.savefig(u'Sdc_'+i+'_'+unicode(an)+u'.png',dpi=150)
```

Annexe XIV : Résultats des tests de normalité et de conformité de la variable IFT du SdC Kerguéhennec intégré pour les années de récolte 2013 à 2016

Test de normalité de Shapiro-Wilk sur l'IFT selon les hypothèses suivantes :

- H_0 : la variable IFT suit une loi normale
- H_1 : la variable IFT ne suit pas une loi normale

```
> with(Dataset, shapiro.test(IFT_Total))

        Shapiro-Wilk normality test

data:  IFT_Total
W = 0.9624, p-value = 0.4883
```

La p-value est supérieure à 0,05. L'hypothèse de normalité de la variable IFT est acceptée : la variable IFT suit une loi normale.

Le test de conformité de la moyenne peut ainsi être effectué selon les hypothèses suivantes :

- H_0 : la moyenne μ des valeurs de l'IFT du SdC Kerg. intégré concorde avec la moyenne μ_0 de la référence $\Leftrightarrow$ $H_0 : \mu = \mu_0$
- H_1 : les deux moyennes sont différentes $\Leftrightarrow$ $H_1 : \mu \neq \mu_0$

```
> with(Dataset, (t.test(IFT_Total, alternative='two.sided', mu=3.03, conf.level=.95)))

        One Sample t-test

data:  IFT_Total
t = -7.2815, df = 23, p-value = 2.073e-07
alternative hypothesis: true mean is not equal to 3.03
95 percent confidence interval:
 1.500318 2.177182
sample estimates:
mean of x
  1.83875
```

La p-value est bien inférieure à 0,05. L'hypothèse H_0 est donc rejetée : la moyenne de l'IFT du SdC Kerg. intégré est significativement différente de celle de la référence Bretagne de 3,03.

Annexe XV : Résultats des tests de normalité et du test non-paramétrique d'égalité des moyennes de Kruskal-Wallis pour l'indicateur nombre de passages

Test de normalité de Shapiro-Wilk sur la variable nombre de passages selon les hypothèses suivantes :

- H_0 : la variable suit une loi normale
- H_1 : la variable ne suit pas une loi normale

```
> with(Dataset, shapiro.test(Nb_passages_total))

        Shapiro-Wilk normality test

data:  Nb_passages_total
W = 0.8627, p-value = 0.004669
```

La p-value est bien inférieure à 0,05. L'hypothèse de normalité de la variable nombre de passages est rejetée : la variable ne suit pas une loi normale.

Le test non-paramétrique de Kruskal-Wallis est utilisé selon les hypothèses suivantes :

- H_0 : égalité des moyennes entre SdC
- H_1 : au moins un SdC a une moyenne différente des autres

```
> kruskal.test(Nb_passages_total ~ SdC, data=Dataset)

        Kruskal-Wallis rank sum test

data:  Nb_passages_total by SdC
Kruskal-Wallis chi-squared = 3.9778, df = 3, p-value = 0.2639
```

La p-value est supérieure à 0,05. L'hypothèse H_0 est acceptée : il n'y a pas d'effet SdC sur la variable nombre de passages sur la période considérée.

Annexe XVI : Quelques résultats de l'ACP pour les dimensions 1 à 5

```
> res$eig
       eigenvalue percentage of variance cumulative percentage of variance
comp 1 3.260710115             40.7588764                            40.75888
comp 2 2.061297452             25.7662182                            66.52509
comp 3 1.836665489             22.9583186                            89.48341
comp 4 0.547559282              6.8444910                            96.32790
comp 5 0.183467999              2.2933500                            98.62125
comp 6 0.069032620              0.8629078                            99.48416
comp 7 0.038867978              0.4858497                            99.97001
comp 8 0.002399064              0.0299883                           100.00000

> res$var
$coord
                          Dim.1      Dim.2      Dim.3        Dim.4        Dim.5
MB                    0.7864899  0.2257792 0.56816993  0.005210299  0.017291216
MSN                   0.8332972  0.2540719 0.48431980  0.012507618  0.034920217
valorisation_travail  0.8932082  0.4170755 0.02766178  0.001812433 -0.002263409
IFT_Total            -0.5183034  0.7936806 0.15032489  0.049396542 -0.239446362
QSA_Total            -0.5083565  0.7019489 0.02597210  0.435096087  0.239512199
Toxicite_total       -0.5147971  0.5685271 0.25533879 -0.574890383  0.110537454
Nb_passages_total    -0.4521420 -0.1973256 0.82399979  0.157760033 -0.170377226
Tps_travail_total    -0.3916955 -0.5357192 0.71489294 -0.015381979  0.161235500

$cor
                          Dim.1      Dim.2      Dim.3        Dim.4        Dim.5
MB                    0.7864899  0.2257792 0.56816993  0.005210299  0.017291216
MSN                   0.8332972  0.2540719 0.48431980  0.012507618  0.034920217
valorisation_travail  0.8932082  0.4170755 0.02766178  0.001812433 -0.002263409
IFT_Total            -0.5183034  0.7936806 0.15032489  0.049396542 -0.239446362
QSA_Total            -0.5083565  0.7019489 0.02597210  0.435096087  0.239512199
Toxicite_total       -0.5147971  0.5685271 0.25533879 -0.574890383  0.110537454
Nb_passages_total    -0.4521420 -0.1973256 0.82399979  0.157760033 -0.170377226
Tps_travail_total    -0.3916955 -0.5357192 0.71489294 -0.015381979  0.161235500

$cos2
                          Dim.1      Dim.2        Dim.3        Dim.4
MB                    0.6185663 0.05097626 0.3228170638 2.714721e-05
MSN                   0.6943842 0.06455255 0.2345656671 1.564405e-04
valorisation_travail  0.7978209 0.17395201 0.0007651741 3.284914e-06
IFT_Total             0.2686385 0.62992894 0.0225975716 2.440018e-03
QSA_Total             0.2584263 0.49273224 0.0006745500 1.893086e-01
Toxicite_total        0.2650161 0.32322303 0.0651978955 3.304990e-01
Nb_passages_total     0.2044324 0.03893741 0.6789756549 2.488823e-02
Tps_travail_total     0.1534254 0.28699501 0.5110719117 2.366053e-04
                          Dim.5
MB                    2.989861e-04
MSN                   1.219422e-03
valorisation_travail  5.123020e-06
IFT_Total             5.733456e-02
QSA_Total             5.736609e-02
Toxicite_total        1.221853e-02
Nb_passages_total     2.902840e-02
Tps_travail_total     2.599689e-02

$contrib
                          Dim.1     Dim.2       Dim.3        Dim.4        Dim.5
MB                    18.970294  2.473018 17.57625794 4.957858e-03  0.162963651
```

```
MSN                  21.295490  3.131646 12.77127863 2.857052e-02  0.664650826
valorisation_travail 24.467705  8.438957  0.04166105 5.999194e-04  0.002792324
IFT_Total             8.238649 30.559827  1.23035859 4.456172e-01 31.250441796
QSA_Total             7.925462 23.903985  0.03672688 3.457317e+01 31.267629100
Toxicite_total        8.127558 15.680562  3.54979695 6.035857e+01  6.659760178
Nb_passages_total     6.269567  1.888976 36.96784521 4.545303e+00 15.822050393
Tps_travail_total     4.705274 13.923028 27.82607475 4.321089e-02 14.169711733
```

```
> res$ind
$coord
                Dim.1       Dim.2         Dim.3        Dim.4       Dim.5
B+F_Bio_13  4.95908227  0.90345597 -0.0085464512  0.092110003  0.19685264
F_Bio_13    2.58937593 -0.38096075 -0.7534870550  0.042919406  0.26689303
M_Bio_13   -1.84398981 -3.08263600  0.6650915882  0.631874587 -0.44280846
S_Bio_13   -0.08414065 -1.78872733 -0.7704363721  0.298685966 -0.26967777
T+P_Bio_13  3.36462650  0.26595614 -1.3712413463 -0.014045898  0.10818608
B+F_Bio_14  2.53833121 -0.19316536 -1.5939871984 -0.030749955  0.14343190
F_Bio_14    1.00841140 -1.27343342 -0.4456196320  0.242629725 -0.06824398
M_Bio_14    4.06943576 -0.74677561  5.3224480218  0.832950696  0.22347122
S_Bio_14   -2.12172511 -2.82239096 -1.4347069506  0.328989972 -0.40489962
```

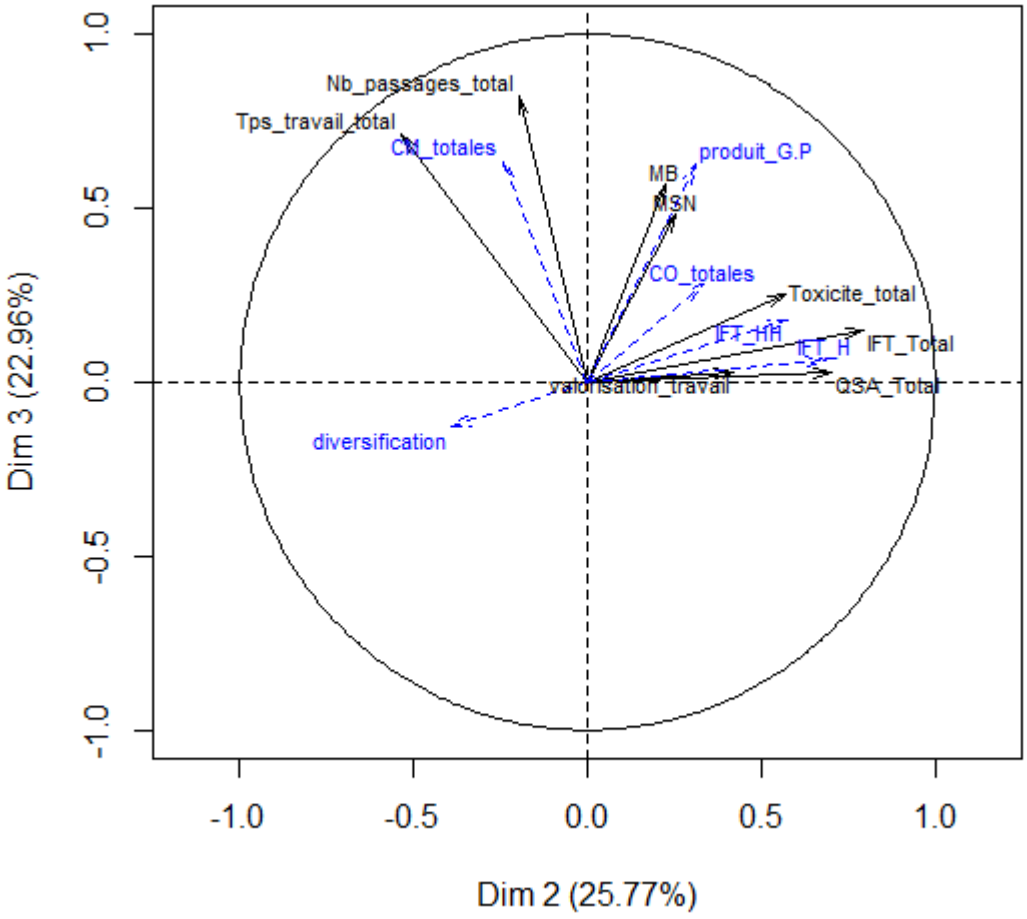
… etc

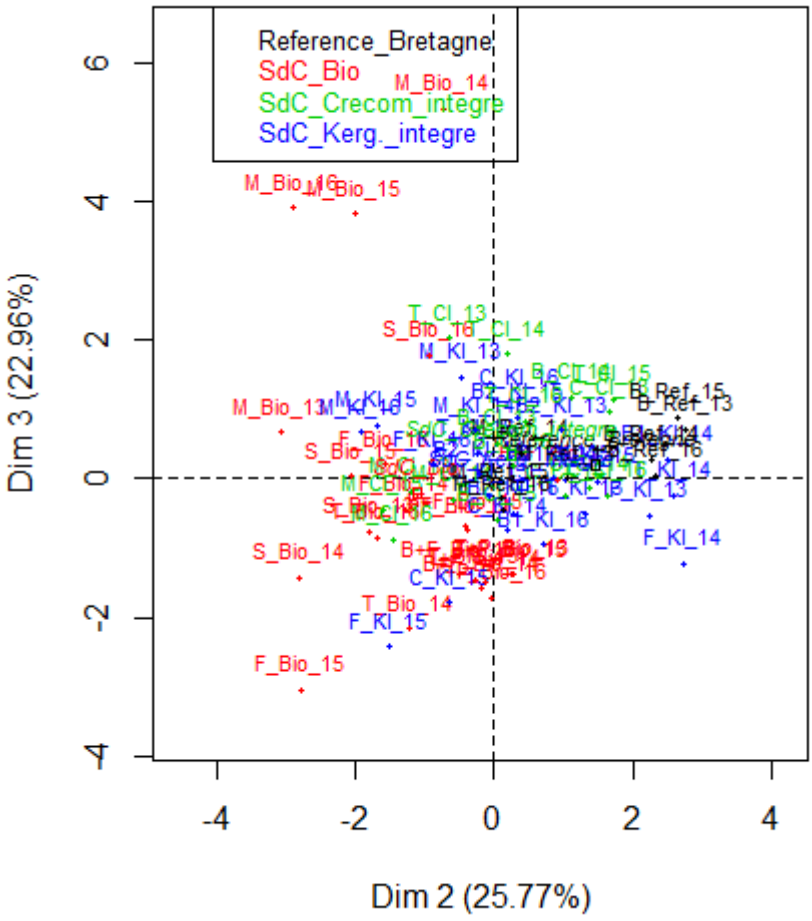
```
> dimdesc(res, axes=1:5)
$Dim.1
$Dim.1$quanti
                     correlation      p.value
valorisation_travail   0.8932082 1.192204e-25
MSN                    0.8332972 1.977215e-19
MB                     0.7864899 4.370294e-16
produit_G.P            0.6645576 2.627929e-10
diversification        0.3586060 2.134396e-03
IFT_HH                -0.3073200 9.134532e-03
CO_totales            -0.3256861 5.578692e-03
Conso_carburant_totale -0.3428446 3.424179e-03
Tps_travail_total     -0.3916955 7.302598e-04
CM_totales            -0.4283781 1.938652e-04
Nb_passages_total     -0.4521420 7.547033e-05
QSA_Total             -0.5083565 6.011769e-06
IFT_H                 -0.5084294 5.990292e-06
Toxicite_total        -0.5147971 4.368128e-06
IFT_Total             -0.5183034 3.660878e-06

$Dim.2
$Dim.2$quanti
                     correlation      p.value
IFT_Total              0.7936806 1.526191e-16
QSA_Total              0.7019489 9.103994e-12
IFT_H                  0.6813951 6.145577e-11
IFT_HH                 0.5735632 1.710581e-07
Toxicite_total         0.5685271 2.315065e-07
valorisation_travail   0.4170755 2.964988e-04
CO_totales             0.3311164 4.794177e-03
produit_G.P            0.3110087 8.292881e-03
MSN                    0.2540719 3.251126e-02
CM_totales            -0.2444005 3.996945e-02
diversification       -0.3910127 7.474581e-04
Conso_carburant_totale -0.4897095 1.462428e-05
Tps_travail_total     -0.5357192 1.477802e-06

$Dim.3
$Dim.3$quanti
                     correlation      p.value
Nb_passages_total      0.8239998 1.090757e-18
Tps_travail_total      0.7148929 2.511776e-12
CM_totales             0.6386320 2.070553e-09
produit_G.P            0.6258842 5.329776e-09
Conso_carburant_totale 0.5840672 8.950484e-08
MB                     0.5681699 2.364831e-07
MSN                    0.4843198 1.872936e-05
CO_totales             0.2790618 1.843785e-02
Toxicite_total         0.2553388 3.162683e-02
```

Annexe XVII : Graphes des variables et des individus de l'ACP pour les dimensions 2 et 3





AGRO CAMPUS OUEST	Diplôme : Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, horticoles et du Paysage Spécialité : Ingénieur Agronome Spécialisation : Sciences et Productions Végétales Option : Ingénierie des Agrosystèmes Responsable d'option : M. CAROF

Auteur(s) : **Floriane BOUARD** Date de naissance : 12/01/1995	Organisme d'accueil : **Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne** Adresse : Rue Maurice Le Lannou, CS n°74223, 35042 RENNES CEDEX Maître de stage : Jean-Luc GITEAU
Nb pages : 25 Annexe(s) : 17	
Année de soutenance : 2017	

Titre français : **Evaluation des performances de trois systèmes de culture innovants conduits en Bretagne entre 2012 et 2016**

Titre anglais : **Evaluation of performances of three innovative cropping systems tested in Brittany between 2012 and 2016**

Résumé : Trois systèmes de culture (SdC) innovants, deux en production intégrée et un en agriculture biologique, sont testés en Bretagne (Crécom (22) et Kerguéhennec (56)). Leurs objectifs sont la réduction du recours aux produits phytosanitaires (d'au moins 50% par rapport à la référence bretonne de 2008), l'amélioration de la qualité de l'eau, et le maintien ou l'amélioration de la rentabilité des SdC et des conditions de travail de l'exploitant, comparativement aux performances-objectifs établies à partir d'un système témoin maïs-blé en conduite raisonnée. Douze indicateurs sont choisis et déterminés pour les années de récolte 2013 à 2016, dont l'IFT, la QSA, le risque de lixiviation d'azote, la consommation énergétique, la marge semi-nette, le temps de travail et la toxicité phytosanitaire. Seul le SdC Bio réduit le recours aux produits phytosanitaires selon l'objectif du plan Ecophyto. Les SdC innovants ont une QSA, une consommation énergétique et une toxicité phytosanitaire inférieures à celles du SdC de référence. Leur reliquat début drainage est inférieur ou égal à 50 kg $N\text{-}NO_3$/ha. Les SdC innovants présentent une marge semi-nette supérieure à la référence. Enfin, le temps de travail est augmenté pour le SdC Crécom intégré. Afin de réduire l'IFT, des améliorations sont proposées telles que l'augmentation de la fréquence de labour au SdC Kerg. intégré ou celle du désherbage mécanique. La réduction des fréquences de fertilisation au lisier de porc sur céréales et de labour permettrait d'améliorer le temps de travail du SdC Crécom intégré.

Abstract: Three innovative cropping systems (CS), two integrated crop production systems and one organic production system, are tested in Brittany (Crécom (22) and Kerguéhennec (56)). Their objectives are to reduce the use of phytosanitary products (in half in comparison with the Brittany reference of 2008), to improve water quality and to maintain or improve the CS's profitability and the working conditions, in comparison with the performances-objectives established from a maize-wheat reference system with rational agriculture practices. Twelve indicators are chosen and calculated for the harvest years from 2013 to 2016, including TFI, quantity of active ingredients (QAI), risk of nitrogen leaching, energy consumption, semi-net margin, working time and pesticide toxicity. Only the organic CS reduces the use of phytosanitary products according to the objective of the Ecophyto plan. The innovative CS have lower QAI, energy consumption and pesticide toxicity than the reference CS. Their soil nitrogen balance before drainage is lower than or equal to 50 kg $N\text{-}NO_3$/ha. The semi-net margins of the innovative CS are higher than the reference. Finally, the working time is extended for the Crécom integrated CS. In order to reduce the TFI, improvements are made such as increasing the ploughing frequency for the Kerg. integrated CS or the mechanical weeding frequency. The reduction of the frequencies of pig manure application (for cereals) and ploughing would allow the Crécom integrated CS to improve its working time.

Mots-clés : système de culture, performance, Ecophyto, production intégrée, agriculture biologique

Key Words: cropping system, performance, Ecophyto, integrated crop production, organic farming