



CARACTÉRISATION DE SYSTÈMES DE CULTURE INNOVANTS ALTERNATIFS A LA MONOCULTURE DE MAÏS POUR LA MODÉLISATION TERRITORIALE

Perlette Totoson, Julie Wohlfahrt

► To cite this version:

Perlette Totoson, Julie Wohlfahrt. CARACTÉRISATION DE SYSTÈMES DE CULTURE INNOVANTS ALTERNATIFS A LA MONOCULTURE DE MAÏS POUR LA MODÉLISATION TERRITORIALE. Sciences de l'environnement. 2019. hal-02911770

HAL Id: hal-02911770

<https://hal.inrae.fr/hal-02911770v1>

Submitted on 4 Aug 2020

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

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

Projet BESTS : BioEconomy Systems for Territorial Sustainability

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

En vue de l'obtention du grade Master 2 en Sciences et Technologies de l'Agriculture, de
l'Alimentation et de l'Environnement

Parcours Sciences Agronomiques et Environnementales

CARACTÉRISATION DE SYSTÈMES DE CULTURE INNOVANTS ALTERNATIFS A LA MONOCULTURE DE MAÏS POUR LA MODÉLISATION TERRITORIALE



Présenté par Perlette TOTOSON

Enseignant référent : Mélanie GELLON

Supervision du stage : Julie WOHLFAHRT

Année Académique : 2018-2019

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

En vue de l'obtention du grade Master 2 en Sciences et Technologies de l'Agriculture, de
l'Alimentation et de l'Environnement
Parcours Sciences Agronomiques et Environnementales

CARACTÉRISATION DE SYSTÈMES DE CULTURE INNOVANTS ALTERNATIFS A LA MONOCULTURE DE MAÏS POUR LA MODÉLISATION TERRITORIALE

PRÉSENTÉ PAR PERLETTE TOTOSON

SOUTENU LE : 17 Septembre 2019

Devant le jury :

Mélanie GELLON

Romain PIERRON

Enseignant référent : Mélanie GELLON, Enseignant Chercheur à la faculté de Marketing et d'Agrosciences de Colmar, Université de Haute Alsace (UHA).

Organisme d'accueil : INRA (Institut National de la Recherche Agronomique), unité 0055 SAD-ASTER, accueille au sein de l'équipe AGISEM de l'UMR Agroécologie au LAE «Laboratoire Agronomie et Environnement» INRA-Université de Lorraine Nancy-Colmar.

Supervision du stage : Julie WOHLFAHRT, Chargé de recherche à l'unité INRA SAD-ASTER.

REMERCIEMENTS

Je suis reconnaissante envers toutes les personnes qui m'ont appuyé et soutenu durant l'accomplissement de ce stage de fin d'études en master. Je remercie l'Université de Haute Alsace et tous les Enseignants du pôle Agrosociétés de la Faculté de Marketing et d'Agrosociétés, d'avoir bien voulu me donner des connaissances et outils permettant d'accéder à la situation actuelle. Je remercie également mon organisme d'accueil pour m'avoir accepté et accompagné durant ces 26 semaines de stage.

J'adresse également mes vifs remerciements à l'endroit des personnes ci-après :

- Mélanie GELLON, mon enseignant référent, pour son appui durant tout le stage.
- Olivier THEROND, Ingénieur de Recherche, Directeur Adjoint de l'UMR LAE « Laboratoire Agronomie et Environnement » et Animateur de l'équipe AGISEM, pour ses conseils et orientations.
- Julie WOHLFAHRT, Chargé de Recherche à l'INRA, mon tuteur de stage, pour tout son soutien et ses encouragements. L'actuel écrit n'a pu être élaboré que grâce à sa patience à toute épreuve, ses critiques très constructives et à son guide inoubliable.
- Aimé BLATZ (Assistant Ingénieur à l'INRA) et Anne SHAUB (Docteur Ingénieur en Agronomie à la Chambre d'Agriculture d'Alsace, Spécialiste des systèmes de culture durables), d'avoir ménagé peine et temps et accepté avec bienveillance de travailler avec moi sur les systèmes de culture actuels et innovants ainsi que pour la formalisation des règles de décision, malgré leurs lourdes occupations. Ce fut un temps de partage riche et valeureux.
- Renaud MISLIN et Laurène CASAL, qui m'ont fortement accompagné dans l'utilisation de la plateforme de modélisation « MAELIA ».
- Annabelle MOUROZ (projet LIFE ALISTER), pour les orientations sur les pratiques en systèmes de culture répondant au contexte de la disparition du hamster commun d'Alsace.
- L'équipe du LAE Colmar : le personnel et les stagiaires, pour l'accueil chaleureux, l'échange de connaissances et l'ambiance fraternelle partagée.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	i
TABLE DES MATIÈRES	ii
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	iv
GLOSSAIRE.....	v
LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX	vi
INTRODUCTION	1
1 Présentation des enjeux de l'étude	3
1.1 Présentation de l'organisme d'accueil	3
1.2 Système de culture innovant alternatif à la monoculture de maïs défini dans le cadre de notre étude.....	3
1.2.1 Système de culture	3
1.2.2 Diversification culturelle.....	3
1.2.3 Système de culture innovant	4
1.2.4 Système de culture innovant alternatif à la monoculture défini dans le cadre de notre étude.....	4
2 Matériels et méthodes	6
2.1 Présentation du territoire d'étude : le Rhin Vignoble Grand Ballon (RVGB).....	6
2.2 Méthodologie	7
2.2.1 Etude des SdC diversifiés à base de maïs actuellement pratiqués dans le RVGB.....	7
2.2.1.1 Description des systèmes de culture de maïs dans le territoire RVGB	7
2.2.1.2 Identification des SdCi diversifiés à base de maïs actuellement pratiqués dans le territoire	8
2.2.2 Recensement des SdCi issus des expérimentations systèmes.....	9
2.2.2.1 Bibliographie	9
2.2.2.2 Description et classification des SdCi	10
2.2.2.3 Sélection des SdCi à retenir.....	11
2.2.3 Formalisation des règles de décision des SdC actuellement pratiqués dans RVGB et des SdCi choisis	12
2.2.3.1 Description des SdC actuellement pratiqués dans le territoire RVGB.....	12
2.2.3.2 Description des SdCi adaptés au contexte alsacien (territoire RVGB)	13
2.2.3.3 Méthodes de description et d'extraction des règles de décision des SdC actuellement pratiqués et des SdCi adapté au contexte alsacien.....	14
3 Résultats.....	14

3.1	Systèmes de culture diversifiés à base de maïs actuellement pratiqués dans RVGB	14
3.1.1	Description des systèmes de culture à base de maïs dans le territoire RVGB.....	14
3.1.2	Identification des SdCi à base de maïs actuellement pratiqués dans le territoire	15
3.1.2.1	Insertion et évolution de la surface des cultures dérobées.....	15
3.1.2.2	Cultures dérobées et successions culturales avec au moins un maïs	16
3.2	SdCi issus des expérimentations systèmes	18
3.2.1	Classification des SdCi	18
3.2.2	Caractéristiques des SdCi issus de l'expérimentation	19
3.2.2.1	Monoculture de maïs avec culture intermédiaire (mmci).....	19
3.2.2.2	Rotation avec deux cultures (rm2ci).....	19
3.2.2.3	Rotation de 3 ans avec cultures intermédiaire (rm3ci).....	20
3.2.2.4	Monoculture de maïs associée à une couverture végétale (mmcv)	20
3.2.2.5	Association culturale de maïs avec des légumineuses à grains (amlg)	20
3.2.3	Comparaison entre les 5 grands types de SdCi selon les indicateurs fixés.....	21
3.3	Formalisation des règles de décision des systèmes de culture actuellement pratiqués dans RVGB et des systèmes de culture innovants choisis.....	23
3.3.1	Description du format des règles de décision obtenues des SdC.....	23
3.3.2	Valorisation des règles de décisions des SdC	23
4	Discussion et perspectives	24
4.1	Systèmes de culture innovants alternatifs à la monoculture de maïs en Alsace	24
4.1.1	Intérêt pour le maïs	24
4.1.2	Choix des systèmes de culture innovant	24
4.2	Discussion concernant la méthodologie mise en œuvre	24
4.2.1	Méthode d'identification des successions culturales	24
4.2.2	Exploitation des données issus des expérimentations systèmes et comparaison.	25
4.2.3	Saisie des données issus des enquêtes dans la plateforme MAELIA	25
4.3	Perspective	26
4.3.1	Validation des règles de décision par de nouveaux experts.....	26
4.3.2	Poursuite de l'intégration des règles sur MAELIA.....	26
	CONCLUSION.....	27
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	I
	ANNEXES.....	IV

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AGISEM :	AGriculture, bIodiversité, Services écosystémiques, et Evaluation Multicritère
ARAA :	Association pour la Relance Agronomique en Alsace
BESTS :	BioEconomy Systems for Territorial Sustainability
CRAGE :	Chambre Régionale d'Agriculture du Grand Est
EPCI :	Etablissements Publics de Coopération Intercommunale
IGN :	Institut National de l'Information Géographique et Forestière connu anciennement sous le nom (Institut Géographique National)
INRA :	Institut National pour la Recherche Agronomique
ITADA :	Institut Transfrontalier d'Application et de Développement Agronomique
LAE :	Laboratoire Agronomie et Environnement
MAELIA :	Multi-Agents for Environmental norms Impact Assessment
PETR :	Pôle d'Equilibre Territorial et Rural
RPG :	Registre Parcellaire Graphique
RVGB :	Rhin Vignoble Grand Ballon
SAD-ASTER :	Unité AgroSystèmes TErritoires Ressources du Département SAD (Sciences pour l'Action pour le Développement) de l'INRA
SdC:	Systèmes de Culture
SdCi:	Système de Culture innovants alternatifs à la monoculture de maïs
UMR :	Unité Mixte de Recherche

GLOSSAIRE

CIPAN : culture intermédiaire pièges à nitrates. Elle est installée en automne et couvre le sol pendant l'hiver, limitant ainsi le transfert de nitrates dans les eaux de drainage. Le choix des espèces doit être en fonction de l'itinéraire technique envisagé pour l'installation et la destruction du couvert. L'effet CIPAN est déterminé par la qualité de son installation. Celui-ci doit être installé correctement au début de l'automne de manière à limiter significativement le stock d'azote minéral du sol au démarrage de la saison de drainage.

PETR : Un PETR est un outil de coopération entre Etablissements Publics de Coopération Intercommunale (EPCI) sur les territoires situés hors métropoles, ruraux ou non. Les PETR ont été créés par la loi du 27 janvier 2014 de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles. Ils ont pour mission de fédérer les communes et les EPCI membres pour mettre en œuvre un projet de territoire.

SA : surface arable = [surface agricole utilisée – (prairies permanentes + prairies temporaires plus de 5 ans + cultures pérennes)]

Surface Agricole Utilisée (SAU) : une notion normalisée dans la statistique agricole européenne destinée à évaluer la surface foncière déclarée par les exploitants agricoles, utilisée pour leur production. Elle comprend les terres arables (y compris pâturages temporaires, jachères, cultures sous abri, jardins familiaux...), les surfaces toujours en herbe et les cultures permanentes (vignes, vergers...). Elle exclut le bois et la forêt.

Système bioéconomique territorialisé : est défini comme l'ensemble des activités de gestion des biomasses (alimentaires, non-alimentaires, ressources naturelles) dans un territoire, soit la production, la logistique, la transformation, la consommation et le recyclage visant à remplacer les ressources non-renouvelables tout en satisfaisant les besoins alimentaires et non-alimentaire d'une population et en préservant les ressources naturelles.

Telepac : site des téléservices des aides de la PAC

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Répartition de l'assolement des groupes de cultures dominants : Territoire RVGB (RPG 044, 2017)	15
Figure 2: Evolution de la SAU (ha) de 2015 en 2017 : Territoire RVGB (données RPG de 2015 en 2017)	15
Figure 3: Comparaison des SdCi issus des expérimentations systèmes	21

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Type de sol dans RVGB	7
Tableau 2: Différence entre CIPAN, SIE et couverts hivernaux dans la politique de verdissement PAC.....	8
Tableau 3: Nombre des individus de chaque groupe SdCi servant au calcul des indicateurs .	12
Tableau 4: Nombre de conduite des SdC actuellement pratiqués dans le territoire	13
Tableau 5: Surface des successions culturales de 2015 en 2017	16
Tableau 6: Successions culturales de 3*maïs	16

INTRODUCTION

En France, la filière maïs est une source importante d'excédent commercial. Le maïs constitue la deuxième céréale produite (14,5 million de tonnes) après le blé. Elle occupe 1,4 millions d'ha et possède un rendement moyen de 101 q/ha en maïs grain. Elle sert principalement pour l'alimentation animale et assure une ressource non négligeable pour la filière d'élevage (Agreste, 2018a). En Alsace, le maïs prédomine les surfaces de grandes cultures : le maïs grain et semence occupe une superficie de 125.700 ha, représentant 69% de la Surface Agricole Utilisée (SAU) totale en céréales. Dans cette région, le maïs grain possède un rendement moyen de 117,4q/ha, ce qui est supérieur à la moyenne nationale (Agreste, 2018b). Son rendement est sécurisé par l'irrigation, la fertilisation minérale et l'utilisation des variétés capables de résister aux printemps froids et aux chaleurs estivales du climat continental d'Alsace. La disponibilité de l'eau de la nappe phréatique de la région permettant l'irrigation du maïs et la proximité des industries de semouleries et d'amidonneries (ex : Tereos, Costimex, Roquette frères, etc.) offrent de bonnes conditions pour le développement de cette culture. Près de 76% de la production de maïs dans la région sont transformées pour l'alimentation humaine¹. Cette situation se distingue du reste de la France où le maïs est principalement destiné à l'alimentation animale².

Le développement important de la culture de maïs en Alsace entraîne des problèmes pour l'environnement. Dans la région, le maïs est souvent cultivé dans un Système de Culture (SdC) simplifié avec un enchaînement maïs/maïs sur 3 ans (Agreste Alsace, 2013), voir 4 ans dans certaines localités, comme sur le territoire du pays Rhin Vignoble Grand Ballon (RVGB) (Flisiak, 2018), ce que l'on peut considérer comme une monoculture. Cette monoculture de maïs est le plus souvent associée à la pratique du labour annuel et systématique (80% de la surface des cultures annuelles sont systématiquement labourés en alsace dont 98% en hiver) et rarement à la mise en place d'une couverture du sol durant la période d'interculture (Flisiak, 2018). Ce système de culture simplifié favorise le ruissellement et l'érosion (Rapport final projet GERICHO, 2012). Ce SdC de maïs relativement simplifié conduit à un risque élevé de pertes de nitrates par lessivage et de transfert des molécules actives (par exemple le nicosulfuron et le S-métolachlore : herbicides couramment utilisés sur la culture du maïs) vers les eaux de surface et les eaux souterraines (ERMES, 2016). Par ailleurs, la culture d'une seule espèce sur plusieurs années successives,

¹ <http://www.cac68.fr/fr/secteur-cereales-en-alsace>, consulté 24/04/2019.

² <https://www.passioncereales.fr/dossier-thematique/le-ma%C3%AFs> consulté le 14/07/2019.

sur une même parcelle favorise le développement des ennemis cultureux (maladies, ravageurs, adventices, etc.), pouvant mettre ainsi en péril la durabilité de la production de la culture (Adeux et al., 2017) et induire une faible résilience du système de culture (Schaller, 2012). En Alsace, la monoculture de maïs subit une forte pression d’adventices (Communication personnelle, Aimé BLATZ, 2019) et a été touchée par le problème de la chrysomèle en 2003 et en 2010³. Enfin, la monoculture de maïs est accusée d’être partiellement responsable de pertes de biodiversité, à l’exemple du grand hamster d’Alsace (Virion, 2018). Bien que le maïs constitue une alimentation pour le grand Hamster, il ne lui offre aucune couverture végétale au printemps au moment de la sortie d’hibernation et une faible couverture végétale en été, pour le cacher de ses prédateurs (Bonnafox et al., 2013). Face à ces problématiques, notre étude a pour objectif d’identifier et de contribuer à l’évaluation de Systèmes de Culture innovants alternatifs à la monoculture de maïs (SdCi), en contexte alsacien. Cette étude s’inscrit dans le cadre du projet de recherche BESTS (Bioeconomy for sustainable territories, ADEME Graine, coordonnée par l’INRA – voir Annexe 2) et concerne le terrain d’étude du pays Rhin Vignoble Grand Ballon (68). Il s’agira de répondre aux questions suivantes : **quelles diversifications sont possibles pour les systèmes de culture à base de maïs dans la plaine d’Alsace et quelles sont les conditions permettant leur dissémination dans le territoire ?**

Pour ce faire, j’ai mené une analyse visant à identifier les SdC alternatifs à la monoculture de maïs, soient actuellement pratiqués dans la zone d’étude soient issus d’essais expérimentaux. Ensuite, à partir d’entretiens, nous avons formalisé les règles de décision de SdC actuellement pratiqués et de SdCi potentiellement implantables sur notre terrain d’étude en vue de les implémenter dans une plateforme de modélisation territoriale spatialement explicite (MAELIA). Ces règles serviront de base à la simulation et à l’évaluation, par la plateforme MAELIA, de scénarios de changement de pratiques agricoles possibles dans le territoire et, *in fine*, à l’identification des leviers et les verrous de la diversification culturelle dans la plaine d’Alsace. Pour mieux cerner le sujet d’étude, la première partie de ce rapport sera réservée à la présentation des enjeux de l’étude. La deuxième partie concerne les matériels et méthodes. La troisième partie va traiter les résultats obtenus et les discussions suivant les trois grandes parties de la démarche citée auparavant, avant de terminer par une perspective et la conclusion.

³ https://www.agro.basf.fr/fr/cultures/maïs/basf_agro_et_la_filiere_maïs/ consulté le 14/07/2019.

1 Présentation des enjeux de l'étude

1.1 Présentation de l'organisme d'accueil

J'ai effectué mon stage au sein de l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique), au niveau de l'unité 0055 SAD-ASTER qui est accueilli au sein de l'équipe AGISEM de l'UMR Agroécologie au LAE «Laboratoire Agronomie et Environnement» INRA-Université de Lorraine Nancy-Colmar. L'unité centre ses projets sur les relations entre agricultures et territoires. Elle a comme objectif d'accompagner les transformations des systèmes sociotechniques agricoles vers une meilleure durabilité environnementale. Ainsi, elle collabore avec plusieurs réseaux interdisciplinaires de recherche et maintient des partenariats avec les organismes de développement agricoles et de gestion des ressources naturelles.

1.2 Système de culture innovant alternatif à la monoculture de maïs défini dans le cadre de notre étude

Ce paragraphe vise à définir trois termes centraux pour ce travail : système de culture, système de culture innovant et, diversification culturelle.

1.2.1 Système de culture

Un système de culture est défini comme « l'ensemble des **modalités techniques** mises en œuvre sur des **parcelles traitées de manière identique**. Chaque système de culture se définit par (i) la **nature des cultures et leur ordre de succession**, (ii) les **itinéraires techniques** appliqués à ces différentes cultures, incluant le choix des variétés pour les cultures retenues » (Sebillotte, 1990). Ces modalités techniques sont notamment organisées dans le temps et dans l'espace selon les objectifs de l'agriculteur (diminution de pertes de rendement, augmentation de la marge nette de l'exploitation, diminution du temps de travail, etc.) et des contraintes (biophysique, climatique, économique, réglementaire) de son exploitation.

1.2.2 Diversification culturelle

La diversification culturelle se définit par l'intégration de plusieurs espèces cultivées, sur une même parcelle, année après année⁴. Ceci peut se décliner en plusieurs formes, soit, la mise en place :

- d'une année à une autre de : différentes espèces/familles cultivées, uniquement des espèces annuelles ou une alternance avec des cultures pérennes ; déclinés en système de culture en « **rotation culturelle** » ;

⁴ <https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/infrastructure-agroecologique-2/> consulté le 15/05/2019.

- au cours d’une année de : plusieurs espèces cultivées, en succession avec des cultures intermédiaires (cultures pièges à nitrates (CIPAN), cultures à valorisation énergétique (CIVE), cultures dérobées (CD) ou engrais vert) ; déclinés en « **systèmes de culture avec cultures intermédiaires** » ou en mélanges (plusieurs espèces semées en même temps sur une même bande, deux lignes intercalées, deux bandes intercalées, ou en deux dates décalées) ; déclinés en système de culture en « **association culturale, avec couvert végétal permanent ou temporaire, en sous-semis ou en culture relais, voire même de l’agroforesterie** » ;
 - la combinaison entre ces deux formes constitue également une diversification culturelle.
- Ces formes de diversification culturelle peuvent s’organiser sur la base de l’assolement et de la rotation culturale et donc s’envisager à, au moins, deux échelles spatiales (Fuseau et al., 2012) :
- à l’échelle d’une exploitation qui se traduit par la diversification des assolements (échelle spatiale) ;
 - à l’échelle parcellaire qui se traduit par une rotation diversifiée ou les autres formes de diversification citées auparavant (échelle temporelle).

1.2.3 Système de culture innovant

Dans le domaine agricole, une innovation peut se passer de la technologie. « *Le processus d’innovation consiste autant à construire des **nouvelles combinaisons avec les techniques et les cultures existantes** qu’à introduire **de nouvelles technologies** (machines, techniques de semis, variétés, etc.) ou de **nouvelles cultures** (espèces culturales, variétés cultivées, etc.)* » (Meynard, 2012). « *Un système de culture innovant est un système de culture conçu en vue d’atteindre des objectifs renouvelés, orientés vers **des enjeux émergents et évalués sur les priorités des agriculteurs, des filières et de la société.*** » (J. M. Meynard, 2012). Par conséquent, en se basant sur cette définition, le caractère innovant d’un système de culture est relatif **aux enjeux considérés** (social, économique, environnemental) et **dépend des acteurs concernés** (agriculteur, éleveurs, les décideurs étatiques, etc.). Il se base sur la réussite du système à répondre aux différents enjeux prédéfinis par les acteurs et à la possibilité d’adoption par les agriculteurs.

1.2.4 Système de culture innovant alternatif à la monoculture défini dans le cadre de notre étude

Dans le cadre de cette étude, nous pouvons donc définir qu’un système de culture innovant alternatif à la monoculture de maïs est un système de culture qui :

- est à base de maïs : car c’est une des cultures bien adaptée au contexte alsacien, avec un bon rendement (voir introduction). De plus, la présence active d’acteurs dans la filière (Chambre d’Agriculture, agriculteurs, coopératives, entreprises agro-alimentaires de transformation, etc.) permet un fort ancrage de la filière par rapport aux autres cultures céréalières de la région. Enfin, c’est une culture rémunératrice pour les agriculteurs en Alsace.
- répond aux enjeux environnementaux liés à la monoculture de maïs déjà soulevés en introduction. Nous faisons l’hypothèse qu’augmenter la diversification culturale des SdC à base de maïs en alsace améliore la résilience des exploitations face à la prolifération des ennemis de culture, aux aléas climatiques et à la variabilité des prix. Par ailleurs, une diversité des couverts à différent moment de l’année, entre la sortie d’hibernation et l’entrée d’hibernation de l’hamster, induit par une diversification des cultures au sein d’une parcelle notamment l’introduction d’intercultures ou de couverts permanents, permet d’assurer à la fois un refuge et une source alimentaire à ce mammifère en voie de disparition. L’installation des couverts végétaux en hiver permet également de limiter la lixiviation de l’azote et atténuerait le problème de transfert des molécules d’herbicides vers la nappe phréatique. Aussi, la mise en place de ces couverts combinée à la réduction du labour limite le problème de ruissellement et d’érosion.
- permet de répondre aux besoins alimentaires et non alimentaires de la population. A travers, la diversification culturale, différentes cultures à différentes destination peuvent être implantées. Ceci, pourrait contribuer à la diversité de production et de biomasse alimentaire ou non alimentaire.

En résumé, un système de culture innovant alternatif à la monoculture de maïs (SdCi) est, dans cette étude, un SdC diversifié à base de maïs qui répond potentiellement aux enjeux environnementaux, sociétaux et économiques des agriculteurs et de la société.

Afin d’identifier des systèmes de culture innovants, nous avons adopté deux démarches parallèles, d’un côté une traque aux innovations (Salembier et Meynard, 2013) via l’analyse de base de données, de l’autre une analyse de la littérature experte sur les systèmes innovants à base de maïs. La combinaison de ces deux méthodes nous permet d’avoir un aperçu large et réaliste des innovations potentiellement implantables dans notre zone d’étude.

2 Matériels et méthodes

Cette partie présente le territoire d'étude « le pays Rhin Vignoble Grand Ballon » et détaille la méthodologie adoptée dans le cadre de cette étude : soient l'analyse des SdC diversifiés actuellement pratiqués dans le territoire, le recensement de SdCi issus d'expérimentations systèmes et la formalisation des règles de décision des systèmes de cultures.

2.1 Présentation du territoire d'étude : le Rhin Vignoble Grand Ballon (RVGB)

Le pays Rhin Vignoble Grand Ballon constitue un PETR (Pôle d'Equilibre Territorial et Rural). Ce territoire s'étend sur une superficie de 771km²,⁵. Il est composé de 4 communautés de Commune (la Région Gebwiller, le Pays de Rouffach Vignobles et Châteaux, le Centre Haut-Rhin et le Pays Rhin Brisach) et de 68 Communes dont 85% ont moins de 2000 habitants. (Fiche signalétique banatic PETR RVGB, 2019). Le PETR du RVGB s'engage dans des actions renforcées et innovantes notamment en matière de développement économique et de développement durable.

En Alsace, le climat est de type semi-continental ou continental modéré avec une température moyenne de 10°C en plaine (7°C en altitude) et une amplitude thermique moyenne d'environ 20°C (près de 0°C en Janvier et de 20°C en Juillet en moyenne. Les précipitations moyennes annuelles sont d'un peu plus de 500mm sur la plaine de Colmar à Rouffach et entre 600-700mm sur le reste de la laine d'Alsace (Muller, 2012). Le territoire RVGB est composé de 4 entités morphologiques qui déterminent différentes occupations du sol. D'Ouest en Est, il est constitué par : la montagne vosgienne située à l'ouest, le Piémont constitué de collines sous-vosgiennes, la Plaine de l'Ill et la Plaine du Rhin située le plus à l'est. La montagne vosgienne est dominée par la forêt et des milieux semi-naturels. Les collines sous-vosgiennes sont constituées majoritairement de la viticulture, des cultures céréalières et quelques activités d'élevage. Les plaines de l'Ill et du Rhin, par contre, sont dominées par les grandes cultures essentiellement des céréales. Elles sont plus à proximité de la nappe phréatique. Le territoire RVGB présente ainsi plusieurs types de sols (Muller, 2012). En s'appuyant sur le Guide des sols d'Alsace (Party JP, 2003), nous avons catégorisé les différents types de sol rencontrés dans la zone céréalière du pays Rhin-Vignoble- grand Ballon en 5 grands types de sol (voir tableau 1), que nous allons utiliser dans le cadre de cette étude.

⁵ <https://www.rhin-vignoble-grandballon.fr> consulté le 19/06/2019

Tableau 1: Type de sol dans RVGB

Relief	Types de sol	5 grands types de sol constitués avec leur caractéristique (A : Argile, L : Limon, S : Sable)	Pourcentage dans RVGB	Analyse de terre de surface			Hy	Profondeur cm	Cailloux %
				Argile %	CaCO ₃ tot %	CEC meq/100g			
La plaine alluviale du Rhin et de l'Il	Hardt superficiel (31%)	Hardt superficiel (issus des alluvions Rhénanes types anciennes : terrasses Ried bruns)	58%	14 à 24	0 à 5	8 à 18	0	<30	30
	Basse plaine Rhénane superficiel (16%)								
	Basse plaine de l'Il superficiel (11%)								
	Basse plaine de l'Il profond (10%)	Hardt profonde (Ried brun, profond sain) (issus des alluvions Rhénanes types anciennes : terrasses Ried bruns)	26%	18 à 34	2 à 30	8 à 18	0	>120	0
	Hardt profond (16%)								
Les rivières vosgiennes	Piémont irrigué (6%)	Piémont irrigué (issus des alluvions des rivières vosgiennes centrales: Giessen Fecht, Bruche Andlau) Sol LAS à SA lessivé sur glaciaires d'épandage	6%	15 à 25	0 à 2	6 à 10	1 à 3	>120	0
	Piémont non irrigué (6%)	Piémont Non irrigué (issus des alluvions des rivières vosgiennes centrales: Giessen Fecht, Bruche Andlau) Sol LAS à SA lessivé sur glaciaires d'épandage	6%	15 à 25	0 à 2	6 à 10	1 à 3	>120	0
Les dépôts éoliens de limons	Limons issus des loess (4%)	Limons Loess colluvionnés (issus de loess et leh-loess)	4%	15 à 35	5 à 20	6 à 15	0 à 3	>120	0

Source : Party JP, 2003. Guide des sols d'Alsace.

2.2 Méthodologie

2.2.1 Etude des SdC diversifiés à base de maïs actuellement pratiqués dans le RVGB

2.2.1.1 Description des systèmes de culture de maïs dans le territoire RVGB

Une première étape de ce travail a été de décrire les SdC à base maïs existants dans la zone d'étude. Pour cela nous avons utilisé les données du RPG (Registre Parcellaire Graphique) afin d'identifier les assolements et les successions de culture du territoire, au grain de la parcelle agricole, notamment grâce au logiciel QGIS (QGIS 3.4) et à des traitements de données sur Excel. Le RPG est un système d'information géographique permettant l'identification des parcelles agricoles, géré par l'ASP (Agence de Service de Paiement) et mis à disposition par l'IGN. Ces données sont accessibles par département et par région, de 2007 à 2017. Nous avons utilisé le RPG de la région Grand Est pour les années 2015 à 2017. Avant 2015, les données RPG sont structurées par îlot⁶ qui peut contenir une ou plusieurs parcelles agricoles. Elles renseignent sur la localisation des îlots, l'occupation du sol (en groupe de cultures), la superficie des groupes de culture, les structures foncières etc.) et l'appartenance de l'îlot à une exploitation agricole. En 2015, une nouvelle version du RPG (RPG 2.0) a vu le jour. Les informations sont aujourd'hui renseignées au grain de la parcelle agricole, non plus des îlots. La résolution est devenue plus fine et une reclassification des

⁶ Un îlot de culture correspond à un groupe de parcelles contiguës, cultivées par le même agriculteur.

groupes de culture a été effectuée (voir Annexe 4). De plus, les données RPG à l'échelle de la parcelle sont maintenant anonymisées. Afin de pouvoir analyser de manière cohérente les occupations de sol de notre territoire, nous avons donc analysé les données de cette nouvelle version du RPG 2.0.

2.2.1.2 Identification des SdCi diversifiés à base de maïs actuellement pratiqués dans le territoire

L'identification des SdCi à base de maïs actuellement pratiqués dans notre territoire s'est fait à partir de l'étude de l'insertion des cultures intermédiaires dans les successions culturales présentant au moins un maïs. Cette insertion des cultures intermédiaires est spécialement visible dans les données du RPG à partir de 2015. En effet, une évolution des règles de conditionnalités pour l'octroi des aides PAC (Politique Agricole Commune) a vu le jour en 2015. Elle est issue de la politique de verdissement qui incite au maintien des prairies permanentes, à la diversification de l'assolement et à la mise en place des SIE (Surface d'Intérêts Ecologique). Pour obtenir des aides liées à la diversification des assolements, les agriculteurs doivent cultiver différentes cultures en fonction de leur surface arable (SA). Cette diversification oblige l'insertion d'une ou plusieurs cultures, différentes de la culture principales, soit à travers la mise en place des SIE ou de la CIPAN (voir Annexe 5). En Alsace, une dérogation concernant la monoculture de maïs existe. La monoculture de maïs est acceptée à condition de mettre en place des couverts hivernaux sur 100% de la SAU totale. Ainsi, la diversification des assolements passe notamment par l'insertion des cultures intermédiaires, notamment des CIPAN, des SIE et des couverts hivernaux qui peuvent tous être valorisés en cultures dérobées. Le tableau 2 donne les détails de leur caractérisation.

Tableau 2: Différence entre CIPAN, SIE et couverts hivernaux dans la politique de verdissement PAC

CIPAN	SIE	Couverts hivernaux
<ul style="list-style-type: none"> Inscrite dans les directives nitrates Pouvant être des légumineuses pures sauf dans le cadre de l'agriculture biologique Pas de date de semis obligée mais doivent être maintenue au moins 2 mois et détruites au plus tôt le 15 octobre en zone vulnérable et le 1^{er} novembre en zone renforcée Malgré une présence suffisante de SIE, la CIPAN est toujours obligatoire en zone vulnérable et renforcée 	<ul style="list-style-type: none"> Inscrite dans la politique de verdissement de la PAC Pouvant concerner plusieurs surfaces : jachère, jachère mellifère, culture dérobée en sous-semis d'herbe ou de légumineuse, couvert hivernal, plantes fixant de l'azote (pouvant être un mélange, mais légumineuses prépondérantes), des bandes tampons, des bandes enherbées, etc., mais soumises à certaines conditions d'éligibilité (voir Annexe 5). 	<ul style="list-style-type: none"> Inscrits dans la politique de verdissement de la PAC pour la certification en monoculture de maïs <ul style="list-style-type: none"> Pouvant être en mélange ou pur avec une obligation de résultat : le couvert doit lever Implantés au plus tard 15 jours après la récolte de la dernière parcelle de maïs Destruction, pas avant le 1er février de l'année suivante

Source : Deffinis et al., 2019 (Réunion PAC 2019)

Dans le RPG, depuis 2015, les cultures dérochées sont renseignées en plus des cultures principales quand il s'agit de couverts hivernaux, récoltables, constitués d'un mélange d'au moins de 2 espèces donc éligibles en tant que SIE (Voir Annexe 5) et pouvant se présenter comme une CIPAN si installées au plus tard le 18 août et détruites selon les conditions des CIPAN décrites dans le tableau ci-dessus.

Après l'identification de la localisation et de la couverture des cultures intermédiaires (notamment des cultures dérochées) au niveau des groupes de culture dans le territoire, nous avons étudié leur insertion dans les successions culturales présentant au moins un maïs, sur la période 2015-2017, à partir d'une analyse du RPG. L'étude combinée avec les données des années antérieures à 2015 n'a pas été possible due au changement de version du RPG à partir de 2015. Le grain utilisé est la parcelle, non plus l'îlot, donc on ne peut pas assembler des données issues de deux grains différents. Pour avoir les successions culturales, nous avons extrait la base de données du territoire avec QGIS et dans Excel, nous avons établi les successions culturales à partir de leur identifiant unique. La base de données est constituée de 12.402 identifiants, avec les libellées de groupes de culture, leur superficie respective, et les cultures dérochées associées) et ce sur 3 ans, de 2015 en 2017. Avec cette méthode, nous obtenons des successions culturales pour plus 70% des parcelles renseignés, représentant 57% de la SAU totale déclarée soit **20423,79 ha** (voir Annexe 6). Nous, avons ensuite catégorisé les successions culturales selon le nombre de maïs dans la succession : avec 3*maïs, 2*maïs, 1*maïs, 0*maïs. Ensuite, nous avons classé les différentes cultures composant la succession selon leur groupe de famille (voir Annexe 7), pour avoir une analyse fine de leur diversité.

2.2.2 Recensement des SdCi issus des expérimentations systèmes

2.2.2.1 Bibliographie

Le recensement des systèmes de culture alternatifs expérimentaux (SdCi) s'est fait à partir de données bibliographiques techniques. Les références consultées nous ont été proposées par une experte de la CRAGE et nous avons effectué des recherches complémentaires à partir des références mentionnées dans ces documents techniques et sur internet en utilisant les mots clés « système de culture innovant à base de maïs » + « maïs innovant » ou « innovative maize-based cropping systems ».

7 sources bibliographiques ont été finalement consultées. Il s'agit d'articles et/ou rapports produits par des instituts techniques (ITADA, Greenotec, Arvalis, ARAA, la Chambre d'Agriculture de l'Ain) sur les grandes cultures et d'une coopérative (Maïsadour). Ce corpus

bibliographique a été complété grâce à une interview faite auprès d'une conseillère à la Chambre d'Agriculture d'Alsace (Spécialisée sur le programme LIFE Alister).

2.2.2.2 Description et classification des SdCi

Au total, 65 SdCi ont été identifiés dans la littérature et à partir d'entretiens avec des experts. Ils ont été décrits en fonction de 7 grandes questions, pour lesquelles un ensemble de paramètres ont été renseignés :

- **Quel est le système de culture expérimenté ?** : ceci revient à recueillir les informations sur la description du système de culture testé (le type de système⁷, les différentes cultures et variétés qui le composent, les types de produits exportés, les caractéristiques particulières du système testé et ses conditions clés.
- **Pourquoi avoir testé ce système de culture ?** : cette question nous mène à décrire les objectifs de l'essai expérimental, l'auteur et les systèmes de culture de référence choisis.
- **Dans quelles conditions a été effectué l'essai système ?** : ceci nous mène à identifier la localisation de l'essai, le type de sol et le climat où l'expérience a été faite, l'existence de l'irrigation ou non.

Ces trois premiers points regroupent 19 champs de notre base de description.

- **Quelle est la conduite du système de culture** : cette question concerne les successions d'opérations culturales entreprises dans le cadre du système (semis, travail du sol, reprise, fertilisation minérale et organique, désherbage, irrigation, traitement de culture, récolte et autres travaux mécaniques pratiqués) et les stratégies de conduite de culture (type de désherbage, type de régulation des couverts, travail du sol en fonction des conditions de récolte, etc.). Ces informations sont récoltées pour la culture principale et les couverts secondaires. Elles regroupent 64 champs.
- **Est-ce que le système est réussi ?** : cette question concerne les résultats obtenus (sur 50 champs) du système testé selon l'objectif prédéfini, les différentes contraintes analysées, les remarques des auteurs (sur 6 champs). Les résultats peuvent être déclinés en résultats agronomiques (rendement des cultures principales et des couverts, quantité d'azote stockée dans le sol et les couverts et régulation des adventices), économiques (marge semi-nette, surplus de bénéfice €/ha, surplus de d'investissement €/ha, etc.) ou sur le domaine social (temps libre dégagé). Les contraintes d'adoption et remarques peuvent

⁷ S'agit-il d'une rotation culturale, de combien d'année ? ou d'un SdC avec culture intermédiaire ? ou avec des couvertures végétales, temporaire ou permanente ? ou etc.

concerner la mécanisation, le choix des techniques adoptées, les conditions climatiques, etc.

- **Est-ce que le système sera réussi à long terme ?** : que l'on va traiter en regardant les matériels utilisés et les recommandations pouvant être sur le plan technique, de conduite de culture, etc. (sur 5 champs).

Les informations décrivant ces SdCi sont hétérogènes et parcellaires, en fonction du niveau d'information disponible.

2.2.2.3 Sélection des SdCi à retenir

L'objectif de la description des SdCi est d'identifier des systèmes alternatifs à la monoculture de maïs capables de diversifier les cultures et les produits, de limiter l'impact environnemental de l'agriculture et de maintenir des caractéristiques acceptables par les agriculteurs (voir partie 1.2.4). Vue la grande variabilité des données et le caractère incomplets des SdCi, un ensemble d'indicateurs synthétiques a été calculé afin d'être en mesure de les comparer (voir Annexe 8). Ils portent sur la diversification culturelle, l'utilisation des ressources non renouvelables et l'impact des SdCi sur la vie des agriculteurs. Pour la diversification culturelle, nous proposons de calculer les indicateurs suivants: la diversité des cultures, des espèces et leurs familles, la diversité des destinations des produits issus de ces SdCi qui peuvent être soit pour l'alimentation animale, alimentation humaine ou la production de biomasse énergétique. Les indicateurs relatifs aux destinations des produits, ne restent pas limités aux objectifs du SdCi, mais calculés en considérant la capacité de chaque espèce à répondre à différentes destinations. Ensuite, pour l'impact sur la vie des agriculteurs, il s'agit de caractériser la facilité de gestion des SdCi, à travers les indicateurs suivants : le nombre de passage de machines et le nombre d'outil utilisé. Par ailleurs, l'identification du rendement des cultures principales et des couverts associés, ainsi que le calcul du ratio du rendement en maïs du SdCi par rapport à celui de son SdC de référence, indiquent un niveau de performance du système à produire de la biomasse et de variation de revenu des agriculteurs. Sur le plan environnemental, le calcul des indicateurs concernant l'utilisation des engrais de synthèse (engrais minéraux, herbicides, fongicides, insecticides) et le nombre de passage total (fertilisation minérale, organique, irrigation, travaux mécaniques) nous informent sur la consommation en énergie fossile notamment en ressources non renouvelables de ces SdCi.

Le niveau d'information issu de la consultation des documents étant variable en fonction du niveau de détail présenté dans les documents consultés. Nous n'avons donc pas

pu calculer tous les indicateurs pour tous les systèmes faute de données sur les paramètres à calculer. Ainsi, nous avons choisi de montrer seulement les résultats sur les 4 indicateurs que nous trouvons les plus pertinents à analyser et par lesquels nous avons eu assez de données pour le calcul. Ils portent sur le rendement du maïs, la diversité familles des espèces composant le SdCi, l'utilisation alimentaire de ces espèces et le nombre de passage des machines durant toute la mise en place du SdCi. Le tableau 9 nous montre le nombre de SdC de chaque grand type SdCi (voir partie 3.2.1) concernés par le calcul de ces 4 indicateurs.

Tableau 3: Nombre des individus de chaque groupe SdCi servant au calcul des indicateurs

Grands types de SdCi	Nb tot	Nb cal_rdt	Nb cal_fam	Nb cal_alim_hum	Nb cal_alim_anim	Nb cal_mach
Rotation de 2 ans + CI	4	4	4	4	4	4
rotation de 3 ans + CI	3	3	3	3	3	3
Monoculture de maïs avec couverture végétale	26	23	26	26	26	4
Monoculture de maïs avec culture intermédiaire	26	1	26	26	26	0
Association de maïs grain avec des légumineuses à grains	6	5	6	6	6	0

Nb tot : Nombre total de SdCi ; *Nb cal_rdt* : Nombre total de SdCi ayant servi au calcul du ratio de rendement en maïs ; *Nb cal_fam* : Nombre de SdCi ayant servi au calcul de la moyenne de la diversité des familles culturales ; *Nb cal_alim_hum* : Nombre de SdCi ayant servi au calcul de la moyenne du nombre d'espèces à destination alimentation humaine ; *Nb cal_alim_anim* : Nombre de SdCi ayant servi au calcul de la moyenne du nombre d'espèces à destination alimentation animale ; *Nb cal_mach* : Nombre de SdCi ayant servi au calcul de la moyenne du nombre de passage de machines.

2.2.3 Formalisation des règles de décision des SdC actuellement pratiqués dans RVGB et des SdCi choisis

Afin de simuler les scénarios de changements de pratiques agricoles possibles dans le territoire avec la plateforme MAELIA (voir annexe 9), nous avons besoin de formaliser les règles de décision qui déterminent la localisation et le fonctionnement des SdC actuellement pratiqués dans RVGB et des SdCi potentiellement implantables dans le territoire. Ceci, va servir à l'identification des leviers et les verrous de la diversification culturale dans la plaine d'Alsace.

2.2.3.1 Description des SdC actuellement pratiqués dans le territoire RVGB

Par expertise nous avons identifié les principaux SDC actuellement pratiqués dans le territoire. Partant de la liste de toutes les cultures pratiquées dans la zone, nous avons identifié celles qui composent les rotations dominantes (rotation dont la surface est supérieure à 1% de la SAU totale du territoire), à savoir : le maïs grain, le blé d'hiver, le soja, la betterave, l'orge d'hiver, le tournesol semences, les autres céréales (seigle et l'épeautre). Les prairies sont exclues. Ensuite, nous avons déterminé les facteurs qui font varier la conduite de ces cultures dominantes. Ces facteurs sont : le précédent cultural, le type de sol et la présence d'irrigation. Pour le type de sol, nous nous basons sur les 5 classifications décrites dans la partie 2.1.2. Ainsi, nous avons pu décrire 31 conduites sur la base du maïs, du blé d'hiver, du

soja, de l'orge d'hiver et de la betterave. Le tableau 4, nous montre plus de détails sur ces descriptions.

Tableau 4: Nombre de conduite des SdC actuellement pratiqués dans le territoire

Culture principale	Maïs	Blé d'hiver	Soja	Orge d'hiver	Betterave
Précédent cultural faisant varier la conduite	Maïs Blé+CIPAN Soja	Maïs Soja	-	-	-
Type de sol/irrigation (faisant varier la conduite)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hardt superficiel/irrigué ▪ Hardt profond/irrigué ▪ Piémont/irrigué ▪ Piémont/non irrigué ▪ Limon/irrigué 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hardt superficiel/irrigué ▪ Hardt profond/irrigué ▪ Piémont/irrigué ▪ Piémont/non irrigué ▪ Limon/irrigué 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hardt superficiel/irrigué ▪ Hardt profond/irrigué ▪ Piémont/irrigué ▪ Piémont/non irrigué ▪ Limon/irrigué 	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hardt superficiel/irrigué ▪ Hardt profond/irrigué
Nombre total de conduites (combinaison entre les 3 facteurs ci-hauts)	15 conduites	8 conduites (car conduite en Hardt superficiel irrigué = conduite en Hardt profond irrigué)	5 conduites	1 conduite	2 conduites

La conduite du maïs change suivant que nous avons du maïs, du soja ou du blé en précédent cultural. Celle du blé, change suivant que nous avons du maïs ou du soja en précédent cultural. Certaines conduites, à l'exemple de celles du soja, de l'orge d'hiver et la betterave ne changent pas selon de leur précédent cultural. La conduite de l'orge d'hiver ne change pas en fonction non plus du type de sol. Pour la betterave, sa culture ne s'observe que sur les sols de type Hardt (superficiel et profond) irrigué.

2.2.3.2 Description des SdCi adaptés au contexte alsacien (territoire RVGB)

Pour la caractérisation les règles de conduite des SdCi adaptés au contexte de la plaine d'Alsace, nous nous sommes basés sur les SdCi expérimentés dans le cadre du réseau PI⁸, menés par la CRAGE et INRA sur le territoire du Haut-Rhin. Ce choix a été fait en raison des connaissances fines nécessaires à ce travail. Ainsi les SDCi caractérisés à partir de la bibliographie ne présentent pas un niveau suffisant de détails pour identifier les règles de conduite. Les SdCi choisis et menés dans le cadre du réseau d'expérimentation PI sont bien documentés et la personne en charge de ces essais nous a consacré du temps pour les décrire. Les SdCi sont : une rotation de 3 ans composée de maïs suivi d'un soja suivi d'un blé suivi d'une culture intermédiaire (CIAN) expérimentée à Rouffach, et une rotation de 2 ans composée de maïs suivi d'orge d'hiver suivi de soja en dérobée et d'une culture intermédiaire

⁸ Réseau de test de systèmes de culture économes en phytosanitaires « production intégrée en grandes cultures » et d'évaluation de leurs performances du RMT Systèmes de culture innovants.

(CIPAN) expérimentée à Muntzenheim. Pour ces 2 SdCi, nous avons caractérisé 5 conduites de culture : 3 conduites pour la rotation de 3 ans et 2 conduites pour la rotation de 2 ans.

Ces deux systèmes sont parmi les SdCi recensés plus haut et décrits dans la partie 3.2.3. Ils ont été choisis car ils ont été testés pour répondre aux problématiques de la monoculture de maïs en Alsace. Ils ont été expérimentés en Alsace. Les règles de décision concernent les critères de localisation et les règles de conduites de culture.

2.2.3.3 Méthodes de description et d'extraction des règles de décision des SdC actuellement pratiqués et des SdCi adapté au contexte alsacien

L'extraction des règles de décision a été obtenue à travers des entretiens semi-directifs auprès d'un expert agronome travaillant dans le cadre des expérimentations systèmes en Alsace. L'entretien s'est effectué parfois en groupe parfois individuellement. Durant l'entretien, nous lui avons fait exprimer les règles de décision des conduites de culture en saisissant directement les informations sur Excel et l'écran est partagé pour faciliter la compréhension et le contrôle de l'exactitude des informations écrites. L'entretien a duré au total 53h 30, pour la caractérisation des 31 conduites de SdC actuels et les 5 conduites de SdCi choisis. Après extraction, les règles de décision ont été retravaillées et homogénéisées pour obtenir une cohérence dans les informations et vérifier leur exactitude. Les entretiens sont enregistrés pour avoir une sauvegarde d'informations.

3 Résultats

3.1 Systèmes de culture diversifiés à base de maïs actuellement pratiqués dans RVGB

3.1.1 Description des systèmes de culture à base de maïs dans le territoire RVGB

Les surfaces agricoles du territoire Rhin Vignoble Grand Ballon sont dominées par des grandes cultures essentiellement des céréales (72,4%). La figure 1 montre plus de détails sur la répartition des assolements des groupes de cultures dominants dans le territoire.

Le maïs occupe la plus grande partie de l'assolement avec une superficie représentant 62,5% de la SAU totale de la zone, soit une superficie de 22308,28 ha/ 35676,08 ha en 2017. Après le maïs, suivent respectivement, le blé tendre, les autres oléagineux (essentiellement du soja), et les vignes, une des cultures populaires d'Alsace.

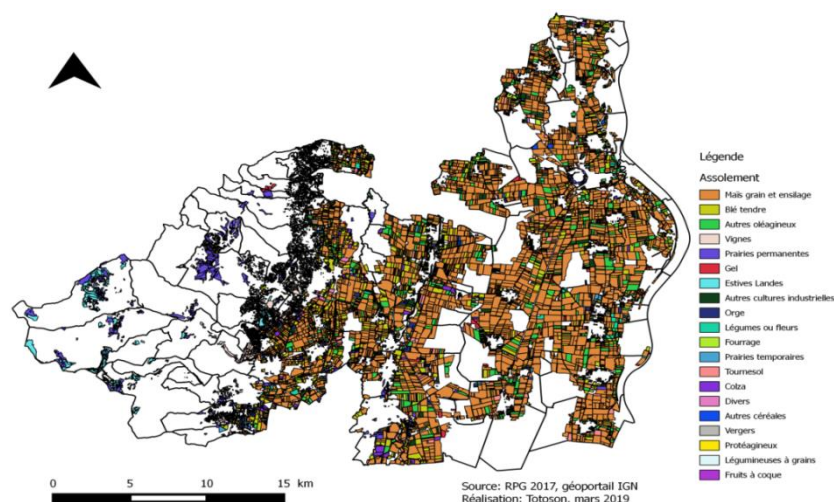


Figure 1: Répartition de l'assolement des groupes de cultures dominants : Territoire RVGB (RPG 044, 2017)

3.1.2 Identification des SdCi à base de maïs actuellement pratiqués dans le territoire

3.1.2.1 Insertion et évolution de la surface des cultures dérobées

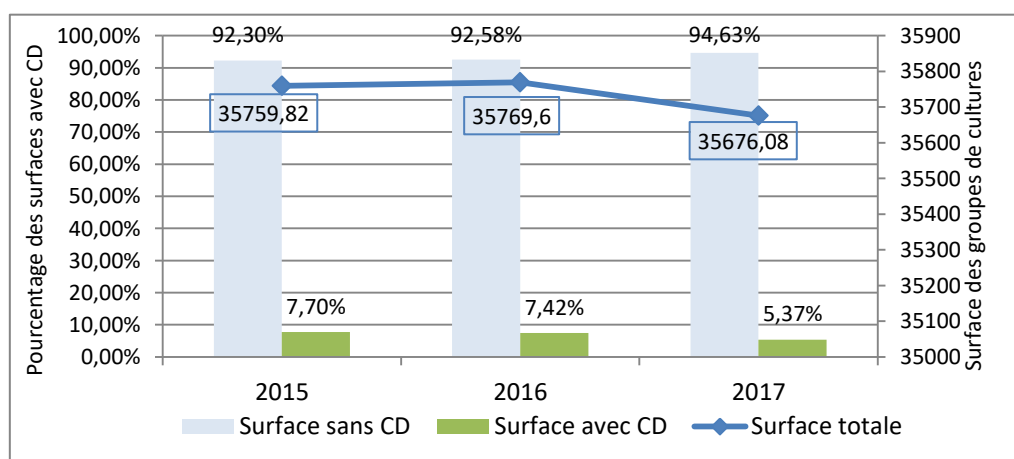


Figure 2: Evolution de la SAU (ha) de 2015 en 2017 : Territoire RVGB (données RPG de 2015 en 2017)

La figure 2 montre le pourcentage d'adoption des cultures dérobées et l'évolution de leur surface depuis de 2015 en 2017. Dans notre territoire et comme le montre ce graphique, les surfaces avec cultures dérobées sont faibles, en moyenne 7% de la SAU totale renseignée. Ce taux semble stable d'année à une autre pour la période étudiée. Elles ont tendance à diminuer en 2017. Cette tendance peut s'expliquer par la diminution de la superficie de blé, le groupe de culture qui présente le plus de cultures dérobées dans le pays RVGB. En effet, les cultures dérobées sont plus adoptées après une culture de blé tendre, principalement du blé tendre d'hiver. Si l'on considère l'ensemble des cultures dérobées du territoire pour l'année 2017, 80% sont associées au blé et moins de 1% au maïs (voir Annexe 10). La surface de maïs associée à une culture dérobée est donc très faible : 19, 11, 14 ha respectivement pour les années 2015, 2016 et 2017. Pour le cas du maïs, les cultures dérobées renseignées dans le RPG de 2015 en 2017 sont un mélange de deux espèces, de différentes familles : crucifères:

radis (fourrager, chinois), graminées fourragères: avoine, seigle, ray-grass, et légumineuses fourragères: féverole, vesce, trèfle) (voir Annexe 10).

3.1.2.2 Cultures dérobées et successions culturales avec au moins un maïs

73% des successions identifiées sur la période 2015-2017 présentent au moins 1 culture de maïs (1*maïs). Les successions sans maïs (27%) ne sont pas considérées dans notre étude. Le tableau 5 détaille sur les surfaces des successions culturales ainsi constituées. Ainsi, sans considérer les successions sans maïs, les successions avec 3 cultures de maïs (3*maïs) sur trois ans dominant soient 41% de toutes les successions observées. Ensuite, viennent successivement les successions avec 2 cultures de maïs (2*maïs) et 1*maïs.

Tableau 5: Surface des successions culturales de 2015 en 2017

	Surface (ha)	Pourcentage des surfaces
Succession avec 3*maïs	8471,67	41%
Succession avec 2*maïs	4317,34	21%
Succession avec 1*maïs	2084,84	10%
Succession avec 0*maïs	5549,94	27%
Somme totale	20423,79	100%

Successions culturales avec 3*maïs

Tableau 6: Successions culturales de 3*maïs

Succession	Pourcentage de surface (par rapport au tot-3*maïs)
Maïs - /Maïs - /Maïs -	99,76%
Maïs ensilage - /Maïs ensilage - /Maïs ensilage -	0,13%
Maïs - /Maïs - /Maïs -Radis (fourrager, chinois) Vesce	0,06%
Maïs -Trèfle Vesce/Maïs - /Maïs -	0,04%
Maïs - /Maïs - /Maïs -Avoine Féverole	0,00%

Les successions culturales 3 *maïs sur trois ans sans cultures dérobées (soit 99,76%) sont dominantes et sont essentiellement constituées de maïs grains. Pour l'ensemble des successions, la présence des CD ne s'observe qu'une année sur 3 et sur une très faible part de ces successions (soit 0,06%). Ces cultures dérobées sont essentiellement des espèces fourragères (Voir tableau 6). Cette prépondérance de 3 maïs successifs sur 3 ans, peut s'expliquer par la rentabilité du maïs grain en Alsace. La faible représentation des cultures dérobées peut s'interpréter comme un manque d'habitude des agriculteurs alsaciens à mettre en place des couverts hivernaux. De plus, son installation demande un investissement financier et technique pour les agriculteurs. On peut faire l'hypothèse que seuls ceux qui souhaitent valoriser ces CD les adoptent. Ceci concernerait ainsi préférentiellement les

éleveurs qui peuvent valoriser directement ces CD en fourrages ou les céréaliers souhaitant améliorer la fertilité de leur sol en enfouissant ces CD pour faire de l'engrais vert.

Concernant notre étude, une monoculture de maïs grain ou ensilage avec insertion systématique de cultures dérobées chaque année, pourrait être intéressante. Ce système permet une diversification culturale tout en maintenant une importance forte du maïs. De plus, d'un point de vue environnemental, elle s'insère dans le cadre de la politique de verdissement de la PAC.

Successions culturales avec 2*maïs

La succession 2*maïs associés à une culture de céréales, essentiellement le blé tendre d'hiver, elle-même associée à une CD, domine sur près de 70% des surfaces des successions avec 2*maïs (voir Annexe 11). La diversification de la succession avec d'autres groupes de cultures tels que : les oléagineux (essentiellement du soja), les cultures industrielles (essentiellement de la betterave non fourragères), le tournesol, les légumes (pommes de terre), le fourrage (autre luzerne) etc. est observée mais reste minime. Ces successions sont intéressantes d'un point de vue de la diversification des SDC à base de maïs.

La succession 2*maïs/soja_CD semble particulièrement intéressante, du point de vue de diversité de familles de cultures (céréales/oléagineux_CD/céréales).

Successions culturales avec 1*maïs

Pour la succession avec 1*maïs, la succession dominante est le : maïs/2*céréales-CD suivie de, maïs/2*oléagineux, maïs/céréales-CD/oléagineux et maïs/2*céréales (respectivement 18,04%, 15,65%, 12,76% et 10,99% de la surface totale des successions avec 1*maïs) dont les céréales sont essentiellement du blé tendre d'hiver et les oléagineux, du soja. Les cultures dérobées sont constituées par des espèces fourragères majoritairement l'association d'avoine-vesce.

En termes de diversité culturale, il est intéressant de retenir la succession avec maïs/blé tendre d'hiver-CD/soja. Elle comporte différentes familles de cultures, alternées d'une année à une autre et avec possibilité de valorisation de l'interculture en CD. Le soja est une légumineuse et permet une restitution d'azote dans le sol. Ceci, permet de réduire l'apport d'azote au sol. Il est essentiel que le soja se mette entre le maïs et le blé (2 céréales) pour éviter la contamination des maladies. Le cycle des adventices et des autres ravageurs seront ainsi perturbés.

De cette première partie des résultats, il ressort que le système de culture avec maïs est loin d'être diversifié dans le pays RVGB. Les cultures dérobées sur maïs ne concernent qu'une infime partie de la SAU (moins de 1%) et si l'on regarde les successions culturales pour la période de 2015-2017, une dominance de 3 cultures de maïs sans CD s'observe. Quelques successions culturales diversifiées sont cependant observées. Elles sont intéressantes en tant que SdCi à adopter dans le cadre de notre étude, notamment les successions 3 fois maïs avec CD systématique sur 3 ans, maïs/soja_CD/maïs et maïs/soja/blé tendre d'hiver_CD.

3.2 SdCi issus des expérimentations systèmes

Nous avons pu recenser 65 SdCi suite à notre analyse bibliographique. Les SdCi identifiés ont été expérimentés dans 16 différentes localités, dans 4 régions (Alsace, Auvergne-Rhône-Alpes, Nouvelle Aquitaine et Région Wallonne de Belgique) (voir Annexe 12). Près de 35% des SdCi décrits viennent d'essais expérimentaux faits en Alsace.

Les SdCi se diffèrent par plusieurs paramètres : le type de SdC testé, les raisons de l'essai expérimental, les conditions sur lequel l'expérimentation est menée, la conduite du SdCi, les résultats et les contraintes de mise en œuvre de ces SdCi.

3.2.1 Classification des SdCi

Les différents SdCi recensés suite à notre étude bibliographique se caractérisent par la présence, en plus du maïs, d'une ou plusieurs autres cultures. L'agencement temporel de ces différentes cultures nous amène à distinguer trois grands modes de diversification au sein de ces SdCi : soit, simultanée au maïs (une culture associée, un couvert végétal en sous-semis), soit à la suite d'une culture de maïs la même année (une culture dérobée, une CIPAN ou une CIVE), soit encore au sein d'une rotation culturale de plusieurs années. Ces couverts peuvent être caractérisés par :

- le caractère permanent du Couvert : Permanent (CP), Temporaire (CT),
- le type de culture intermédiaire associé : CIPAN, CIVE, CD
- Le type des familles, variétés et espèces des couverts : pure ou mélangé, même famille ou familles différentes (pour les couverts et les cultures principales)

Ainsi, pour permettre la comparaison des performances de ces systèmes vis-à-vis des enjeux de durabilité étudiés (diversification, impact environnemental et social), nous les avons classés sous 5 grands types de SdCi, faisant sens vis-à-vis de la complexité de leur mise en œuvre et regroupant les SdCi en fonction de leur type de couvert, de l'agencement temporel de la diversification, le nombre de culture de maïs dans la rotation et de la destination du couvert:

- une monoculture de maïs avec culture intermédiaire systématique (mmci)
- une rotation avec deux cultures : maïs et autres cultures (orge d'hiver) suivi par une culture intermédiaire (rm2ci)
- une rotation avec trois cultures : maïs et deux autres cultures (soja et blé d'hiver) suivi par une culture intermédiaire (rm3ci)
- une monoculture de maïs en association avec un couvert végétal : temporaire ou permanent (mmcv)
- une association culturale de maïs en association avec une ou plusieurs légumineuses à grains destinée(s) pour l'alimentation animale (amlg)

3.2.2 Caractéristiques des SdCi issus de l'expérimentation

3.2.2.1 Monoculture de maïs avec culture intermédiaire (mmci)

Ce type de SdCi regroupe les SdC présentant une succession annuelle de maïs et d'interculture, chaque année. Les cultures intermédiaires présentes dans ce groupe peuvent être semées soit après la récolte du maïs (4% des cas) soit en sous-semis dans le maïs (96% des cas). La réussite du sous-semis est fonction de la qualité de son implantation (la période de semis) et du programme de désherbage appliqué durant le cycle du maïs. En effet, le semis des CI se fait lors du binage (stade 6-10 feuilles du maïs). Si le semis est fait plus tôt, il y aurait un risque de concurrence avec le maïs, s'il est fait plus tard, après la récolte du maïs, les CI se développent faiblement. Par ailleurs, les herbicides appliqués sur le maïs peuvent affecter également les cultures intermédiaires en sous-semis et limitent ainsi leur développement.

3.2.2.2 Rotation avec deux cultures (rm2ci)

Il s'agit d'une rotation de 2 ans : maïs suivi de céréales (par exemple : orge d'hiver) suivi par une culture intermédiaire, notamment des légumineuses en dérobées (à l'exemple du soja ou du pois). Ce SdC permet la récolte de 3 cultures sur 2 ans. Les contraintes de ce système sont, notamment la date de récolte de la céréale qui doit être assez précoce pour permettre l'installation et le développement de la CD ; et le choix des CD qui doivent permettre un développement de biomasse assez important dans la période automnale. Une mauvaise structure du sol peut s'observer au moment de la récolte de l'orge en juin si bien que cela nécessite un travail du sol plus conséquent (à savoir : un passage de chisel, semis combiné avec une herse rotative et un roulage) avant le semis du soja. Si les légumineuses en dérobées ne sont pas semées, une installation d'une CIPAN serait nécessaire pour le respect de la directives nitrate.

3.2.2.3 Rotation de 3 ans avec cultures intermédiaire (rm3ci)

Il s'agit d'une rotation de 3 ans : maïs suivi d'une légumineuse (soja), suivi d'une céréale (blé) suivi d'une culture intermédiaire (notamment la CIPAN). Le blé a été placé après le soja pour diminuer le risque de mycotoxine lié au maïs grain et pour éviter la lixiviation des nitrates au printemps suivant. Le soja est choisi car c'est une légumineuse et qu'il présente un prix attractif. Le blé est intégré pour rompre le cycle des adventices de printemps. Il est moins énergivore car il est 2 à 3 fois moins irrigué que le maïs. Ce SdC peut être conduit en non labour et ainsi réduire le temps de travail, restaurer la fertilité biologique du sol et diminuer l'utilisation d'énergie fossile.

3.2.2.4 Monoculture de maïs associée à une couverture végétale (mmcv)

Il s'agit d'une monoculture de maïs associée à une couverture végétale permanente ou temporaire. Les essais testés se différencient par le type de couvert végétal, date de semis du couvert et la méthode de régulation du couvert. Les couverts permanents sont régulés de manière temporaire par des herbicides ou par du roulage. Les couverts temporaires sont installés au moment du désherbinage ou du binage (entre les stades 3-8 feuilles du maïs). Sur les 26 SdCi appartenant à cette classe, les couverts testés sont majoritairement des légumineuses pures (50% pour les couverts permanents et 85% pour ceux temporaires) et seulement quelques mélanges de légumineuses et graminées (50% pour les couverts permanents et 15% pour les couverts temporaires). Les légumineuses testées sont les trèfles, le lotier, la luzerne, le pois, la féverole, la vesce et les graminées sont plutôt du ray-grass, de l'avoine et de l'orge. Ces couverts sont des espèces à forte production de biomasse permettent ainsi une restitution de la matière organique et de l'azote au sol, de couvrir le sol durant le cycle du maïs et ainsi de limiter la prolifération des adventices et la perte de l'azote par lixiviation. Ces systèmes présentent de difficultés de mise œuvre, notamment la gestion des couverts qu'il faut à la fois maintenir assez important pour limiter la prolifération d'adventice et maîtriser pour limiter la compétition avec le maïs. En effet, le maïs est une plante qui ne supporte aucune concurrence, ni en lumière ni en éléments minéraux. Ce problème s'avère particulièrement important lorsque des graminées sont présentes dans le mélange ou que les espèces choisies sont plus hautes que le maïs au cours du cycle. Le programme de désherbage est donc une technique clé pour réussir ces associations.

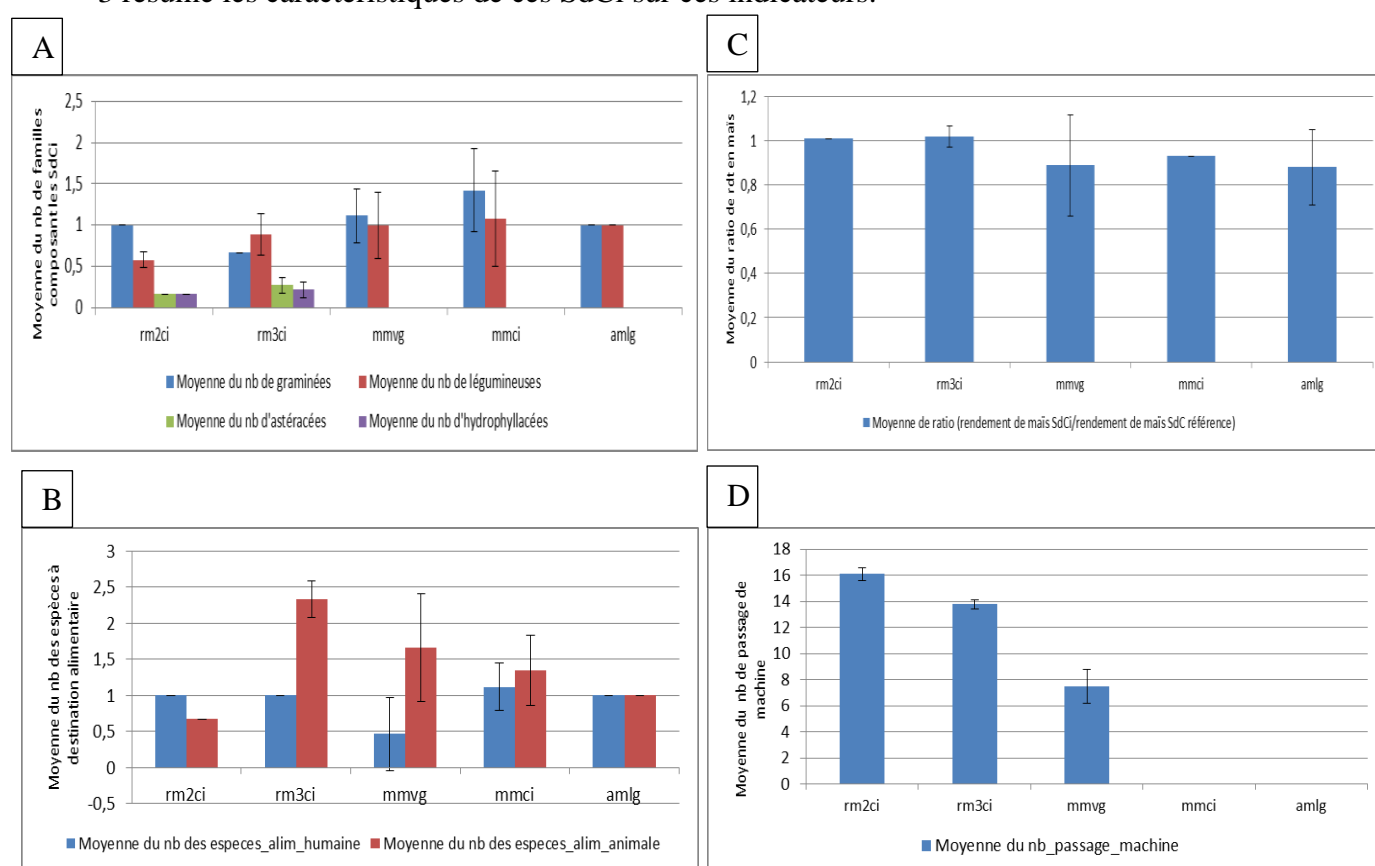
3.2.2.5 Association culturale de maïs avec des légumineuses à grains (amlg)

Il s'agit d'un système où la culture de maïs est associée à une légumineuse à grain. Le semis de la légumineuse (vesce, féverole) se fait en même temps que le semis du maïs soit dans le

même rang que le maïs, soit 1 rang sur 2 ou 2 rangs sur 4. L'objectif est de pouvoir récolter une autre culture en même temps que le maïs. Cette association de culture permet la production de protéines et est donc intéressant pour l'ensilage. Une des contraintes sur l'adoption de ce SdCi est la nécessité d'avoir un matériel de semis en conduite assisté (ex : semoir pneumatique équipé d'un RTK). Il permet un premier passage pour le semis de la légumineuse à grain et un deuxième passage successif pour le semis du maïs, sur le même rang.

3.2.3 Comparaison entre les 5 grands types de SdCi selon les indicateurs fixés

Les 5 grands types de SdCi ont été comparés selon 4 indicateurs (cf 2.2.2.3). La figure 3 résume les caractéristiques de ces SdCi sur ces indicateurs.



A : Indicateur de diversité culturelle (nombre de familles des espèces composant les SdCi).

B : Indicateur de diversité sur la destination des espèces/cultures composant ces SdCi.

C : Indicateur de réussite du système (ratio de rendement moyen en maïs du SdCi/celui de son SdC de référence).

D : Indicateur de contrainte sur la mise en œuvre du SdCi (nombre de passages de machine).

Figure 3: Comparaison des SdCi issus des expérimentations systèmes

Les SdCi « rm2ci et rm3ci » présentent une plus grande diversité en termes de familles d'espèces. Ceci s'explique par le fait que leur interculture est constituée par un mélange de différentes familles d'espèces avec des légumineuses, des hydrophyllacées (phacélie), des astéracées (tournesol) et des graminées. Aussi, combiné aux familles des cultures « graminée

(blé d'hiver, maïs, orge d'hiver) et légumineuse (soja) », composant ces rotations, le nombre de diversité de famille de culture augmente. Les 3 autres SdCi sont constitués par des légumineuses (les cultures associées, les couverts et leur composition et les cultures intermédiaires) et des graminées (les graminées composant les cultures intermédiaires et les couverts). Concernant, la destination des cultures composant les SdC, le SdCi « rm3ci » présente le plus grand nombre moyen des espèces à destination alimentation animale. Ceci est expliqué par le mélange de plusieurs espèces fourragères dans la CIPAN. Pour la destination alimentation humaine, le nombre moyen d'espèce est quasiment égal pour tous les SdCi car chaque année, nous avons la présence de d'une espèce destinée alimentation humaine (maïs, blé, orge d'hiver, soja), sauf le cas du SdCi « mmvg ». Ce dernier pourrait s'expliquer par le fait que 53% des SdCi recensés dans le groupe « mmvg » sont à base de maïs ensilage qui est destiné à l'alimentation animale. En plus, les espèces composant les couverts sont des espèces fourragères pouvant être valorisées pour l'alimentation animale. Par rapport au ratio de rendement, il varie en fonction du type de SdCi, de la conduite de culture mais également du contexte pédo-climatique de la région où s'est effectué l'essai. Les SdCi « rm2ci et rm3ci » présentent un ratio de rendement en maïs supérieur ou égale à 1. Pour le SdCi « mmci », il est de 0,9 et pour les 2 autres SdCi « mmvg et amlg », il est de 0,88 et 0,87 respectivement. Ce dernier pourrait s'expliquer par la concurrence existant entre les couverts) et le maïs au cours de leur développement. Contrairement aux trois autres indicateurs, l'indicateur sur le nombre de passage de machine n'a été calculé que sur 3 types de SdCi notamment sur les SdCi « mmvg, rm2ci et rm3ci » dont les données nous ont été accessibles. Le SdCi « rm2ci » présente un nombre moyen de passage de machine le plus élevé. Ceci s'explique par l'existence de plusieurs cultures principales à gérer au cours d'une année que l'on veut valoriser (soit 3 cultures principales sur 2 ans). A ceci s'ajoute, la présence d'une année sur 3 d'une mauvaise structuration du sol laissé par la récolte de l'orge, nécessitant ainsi des travaux supplémentaires. Le SdCi « mmvg » nécessite moins de passage de machine car il existe moins de culture principale à entretenir et la régulation des couverts est souvent combinée au travail du sol ou au désherbage, ce qui limite le nombre de passage d'outil mécanique dans ce SdCi.

De cette partie, il ressort que chaque SdCi expérimenté essaie de répondre à des objectifs prédéfinis par les auteurs et varient selon les localités et plusieurs autres paramètres. Un même mode de diversification culturelle pratiqué dans deux localités différentes présente des résultats différents. Et si l'on regarde par grand type de SdCi, le SdC rm3ci est celui qui

répond présente le bon résultat vis-à-vis de 4 critères. Il ressort que ces résultats viennent d'un nombre total d'individus différent par SdC, nécessitant une homogénéité de nombre de SdCi par grand type pour être plus informatifs et plus parlant.

3.3 Formalisation des règles de décision des systèmes de culture actuellement pratiqués dans RVGB et des systèmes de culture innovants choisis

3.3.1 Description du format des règles de décision obtenues des SdC

Nous avons extrait les règles de décision concernant 36 conduites de cultures issues des SdC actuellement pratiqués et des SdCi (voir partie 2.2.3.3) sous forme de fonction « si..., alors ...sinon,... ». Chaque opération culturale d'une année de conduite d'une culture a été décrite par un ensemble de conditions variant d'une opération à une autre. Les conditions décrites sont : une fenêtre de temps précise pour la pratique de l'opération, soit un intervalle de temps durant lequel l'opération peut être pratiquée, ainsi qu'un ensemble de conditions faisant notamment appel aux, stades phénologiques des plantes, à l'humidité du sol, à la température de l'air et du sol, soit des paramètres pédo-climatiques. Concernant la fenêtre de temps, des sous-périodes associées à des conditions allégées ont été défini pour éviter la non pratique d'une opération si jamais les conditions agissant la mise en place de cette pratique ne sont pas obtenues. Pour chaque opération, des matériels et des intrants adoptés sont également décrits pour évaluer notamment les débits de chantier. Enfin, se trouve la colonne des remarques, où nous mettons les informations utiles pour la mise en œuvre des opérations culturales. Ces dernières peuvent concerner le choix de la densité, le choix de mélange des espèces, le rendement visé, etc. (voir Annexe 13).

3.3.2 Valorisation des règles de décisions des SdC

Sur MAELIA, les données sont intégrées suivant les cases correspondantes à chaque information. Tout d'abord les informations sur les critères de localisation de la conduite de culture à déclarer. Il s'agit de la culture principale, de son précédent cultural, du type de sol et de la présence ou pas d'irrigation. Ensuite, viennent les champs concernant les opérations culturales successives, avec les différents critères conditionnant leur mise en œuvre et le nombre de sous-périodes correspondant. Par ailleurs, une carte mentale (voir Annexe 14) a été effectuée afin de mieux visualiser les facteurs déterminants du changement des décisions adoptées au niveau de la mise en œuvre des SdCi. Ces facteurs peuvent être les conditions pédo-climatiques, les stades phénologiques, les dates de mise en place de l'opération culturale et caractère de l'opération culturale qui précède l'opération culturale à déclencher.

4 Discussion et perspectives

4.1 Systèmes de culture innovants alternatifs à la monoculture de maïs en Alsace

4.1.1 Intérêt pour le maïs

Les systèmes de culture innovants alternatifs à la monoculture de maïs choisis dans le cadre de notre étude sont basés sur le maïs. C'est la culture la plus rentable dans la région. La stabilité et le haut niveau de rendement du maïs en Alsace par rapport au reste de la France sont des facteurs très déterminants de son adoption dans la région. Cependant, une forte baisse du prix du maïs, pourrait cependant renverser cette tendance. Le prix du maïs est instable par rapport aux autres céréales (Agreste, 2017). On peut ainsi envisager l'abandon de cette culture dans la région. Ainsi le choix d'étudier des systèmes à base de maïs pourrait s'avérer non efficace pour prédire le futur du territoire. La caractérisation de SdCi non fondés sur le maïs pourrait permettre de palier à ce problème.

4.1.2 Choix des systèmes de culture innovant

Pour des raisons de disponibilité des données et d'un expert capable de décrire précisément le système, le choix des systèmes de cultures innovants finement caractérisés dans le cadre de cette étude s'est basé sur les deux systèmes expérimentés par la CRAGE et l'INRA. Cependant, nous aurions pu aussi choisir d'autres SdCi plus proches de la tendance des systèmes de culture à base de maïs actuellement adoptés par les agriculteurs autrement dit, un modèle de système avec une monoculture de maïs suivi d'une interculture systématique. A cela, nous pouvons proposer de choisir une interculture valorisable, à l'exemple de la CIVE (ex : maïs_seigle) ou des espèces fourragères (maïs_méteil) pour constituer une nouvelle source de revenu aux céréaliers ou un complément d'intrants pour les éleveurs. L'installation d'une interculture valorisable nécessite cependant un investissement supplémentaire pour les agriculteurs, ce qui pourrait être la contrainte principale de son adoption (Rapport final projet EXPÉCIVE, 2013).

4.2 Discussion concernant la méthodologie mise en œuvre

4.2.1 Méthode d'identification des successions culturelles

L'identification des successions culturelles à base de maïs, pratiquées au niveau du territoire d'étude a été menée avec le logiciel QGis et des traitements sur Excel, à partir des identifiants communs des parcelles, renseignées dans les données RPG pour les 3 années successives 2015, 2016 et 2017. Le résultat obtenu une reconstitution des successions pour 70% des parcelles, ce qui n'est pas négligeable. Cependant, deux autres méthodes existent et auraient pu permettre d'améliorer nos résultats : soit une analyse cartographique sur QGis en faisant

une intersection des couches vectorielles des données RPG du territoire, des 3 années 2015, 2016 et 2017 et d'extraire les attributs de données (Manuel d'utilisation de QGIS)⁹, soit utiliser le logiciel RPG-explorer pouvant constituer les rotations culturales d'un territoire à partir des données RPG.

4.2.2 Exploitation des données issus des expérimentations systèmes et comparaison

Les données sur les SdCi issus des expérimentations systèmes sont très hétérogènes et parcellaires. Elles sont relatives aux objectifs de l'auteur. Ainsi, il a été difficile de les décrire et de les comparer de manière homogène. Nous nous sommes donc basés sur des indicateurs communs, relatifs à nos objectifs d'innovation. Cependant, le calcul de ces indicateurs peut contenir des erreurs et des imprécisions, à l'exemple de l'indicateur sur la destination alimentaire des espèces composant les SdCi ou le nombre de famille. Il a été obtenu aussi sur un nombre d'individus non représentatif (moins de 30) pour permettre une analyse statistique, ce qui constitue une des limites de notre analyse. Par ailleurs, des indicateurs plus économiques, notamment sur les marges (brutes, nettes ou semi-nettes) auraient été intéressantes à montrer pour donner des informations sur ce que le SdCi peut apporter à l'agriculteur en terme de bénéfices, ce qui pourrait être un argument ou une raison importante de son adoption par les agriculteurs. Une solution aurait été de mettre en place des collaborations avec d'autres partenaires pour avoir accès à des bases de données plus détaillées décrivant des SdCi à base de maïs.

4.2.3 Saisie des données issus des enquêtes dans la plateforme MAELIA

Les règles de décision obtenues à partir d'entretiens avec l'expert ont été formulées de manière à être compréhensibles pour faciliter la retranscription des données dans la plateforme de modélisation et de simulation MAELIA. De plus des informations supplémentaires sur les règles de conduites et leurs déterminants ont été récoltées « hors cadre » de la modélisation par prise de notes et enregistrement afin de limiter la déperdition d'information. Cependant, le format des données d'entrées de la plateforme de modélisation ne correspond pas entièrement à celui de la saisie des données et nécessite des conversions et des fixations de certaines valeurs des paramètres. Ceci peut conduire à des erreurs et à une perte d'informations importantes entre les informations sorties par l'expert et la prise de notes et la saisie au niveau de la plateforme. Par exemple, la conversion d'un stade phénologique décrit dans les règles de décision en nombre de feuilles a nécessité l'utilisation d'une échelle végétale pour être converti dans le format admis par la plateforme. Ces problématiques

⁹ <https://docs.qgis.org/3.4/pdf/fr/QGIS-3.4-UserGuide-fr.pdf> consulté le 01/07/2019.

montre la difficulté de la modélisation si l'on veut caractériser à un grain fin l'objet de modélisation.

4.3 Perspective

4.3.1 Validation des règles de décision par de nouveaux experts

Les règles de décision sur les SdC (SdC actuellement pratiqués dans le territoire et les SdCi potentiellement implantables au sein du territoire) ont été obtenues à travers un entretien auprès d'un seul expert. Ainsi, les résultats obtenus sont décrits selon l'expertise d'une seule personne compétente et connaisseur du domaine. A cet effet, une validation auprès de nouveaux experts pourrait être intéressante pour confirmer et enrichir les données que nous avons obtenues. De plus, comparer des données de terrain aux résultats de simulations faites à partir de ces règles pourrait permettre de valider ces règles expertes.

4.3.2 Poursuite de l'intégration des règles sur MAELIA

Dans le cadre de mon travail, je n'ai pas réussi à intégrer toutes les règles de décision des systèmes dans la plateforme MAELIA. La première étape pour poursuivre ce travail serait donc de poursuivre cette intégration. Des allers-retours entre les règles de décision relevées lors des entretiens et le format de saisie des règles de conduites de la plateforme seraient à opérer de manière à enrichir et améliorer les caractéristiques prises en compte dans la plateforme, pour qu'elle puisse être adaptée aux fonctionnements complexes des systèmes socio-écologiques. De plus, une validation des résultats auprès des agriculteurs pourrait permettre une validation du modèle et confirmer l'exactitude des règles de décision obtenues des experts et devrait permettre une analyse sur l'adoption par les agriculteurs de ces systèmes innovants.

CONCLUSION

La recherche de systèmes de culture innovants alternatifs à la monoculture de maïs est importante pour répondre aux problèmes environnementaux liés à ce type de SdC. L'existence du maïs dans les SdCi est effective. Plusieurs types de diversification culturale à base de maïs sont susceptibles d'être implantés en Alsace. Cela est fonction de la réussite du système, des enjeux auxquels il répond et de sa capacité à répondre à nos critères de SdCi. Un des paramètres à ne pas négliger est l'adaptation du SdCi au contexte alsacien. A cet effet, deux types de SdCi ont été retenus : une rotation de 3 ans de maïs suivi de soja suivi de blé et de CIPAN et une rotation de 2 ans de maïs suivi d'orge d'hiver suivi de soja dérobée et de CIPAN. Ces deux systèmes sont issus des expérimentations effectuées en Alsace dans l'objectif de constituer un système de culture alternatif à la monoculture de maïs avec une utilisation moindre de produits phytosanitaires et permettant à la fois une rentabilité aux agriculteurs.

La localisation de ces systèmes de culture est conditionnée par plusieurs paramètres, notamment les caractéristiques du sol (type de sol, humidité du sol, température du sol), du climat (pluviométrie et température de l'air), du précédent cultural et la présence d'irrigation. Par ailleurs, les conduites culturales peuvent être dépendantes entre eux et constituent des facteurs déterminant la décision des agriculteurs à mettre en œuvre certaines opérations culturales en aval. Aussi, le déclenchement d'une opération culturale peut être influencé par les stades phénologiques de la culture.

La simulation à travers une plateforme de modélisation comme MAELIA est importante pour pouvoir représenter les fonctionnements des systèmes socio-économiques et permettre une analyse fine du mode de gestion de ces systèmes ainsi qu'une évaluation en termes de durabilité. Ces questions sont importantes dans le cadre du projet BESTS.

Du point de vue personnel, le stage m'a permis de m'initier et de me familiariser avec le domaine de la modélisation au sein d'un territoire. Il m'a donné l'occasion d'observer les problématiques liées à la représentativité du fonctionnement réel d'un objet à son fonctionnement sur une plateforme de modélisation. Par ce stage, j'ai pu également acquérir de nouvelles connaissances sur le contexte du maïs en alsace, mieux comprendre les problématiques liées à la monoculture de maïs et sa conduite de culture dans un contexte de climat tempéré avec des outils agricoles performants. De plus, j'ai eu l'opportunité de travailler avec plusieurs personnes de différentes compétences, me permettant d'expérimenter et de renforcer le sens du travail en équipe multidisciplinaire. L'utilisation de plusieurs outils

informatiques, tels que le logiciel de bibliographie, l'utilisation des plateformes informatiques et la gestion des mails ont été pour moi un élément de découverte.

Pour l'accomplissement du stage, j'ai dû utiliser plusieurs compétences et en déployer de nouvelles. J'ai notamment exploité les cours sur QGis, les traitements de dossier sur Excel, les systèmes de cultures et analyse multi-critères et sur l'analyse des articles scientifiques. C'était une initiation professionnelle très enrichissante. Ainsi, des notions de bioéconomie, économie circulaire, les services écosystémiques, le logiciel statistique R, l'innovation en système de culture, la gestion des ressources naturelles au niveau du territoire seront selon moi, intéressants à intégrer dans la formation agronomique car ils constituent les enjeux actuels de notre agriculture. A mon avis, de telles connaissances et compétences favoriseraient l'insertion professionnelle des étudiants.

Pour finir, je note que la gestion du temps, d'organisation de travail, la communication avaient par moment rendu difficile ce travail de stage. La maîtrise de ces différents éléments se révèle pour moi, aujourd'hui encore, comme un élément clé d'une réussite de travail.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adeux, G., Giuliano, S., Cordeau, S., Savoie, J-M., Alletto, L., 2017. Low-Input Maize-Based Cropping Systems Implementing IWM Match Conventional Maize Monoculture Productivity and Weed Control. Agriculture. 17p. [doi:10.3390/agriculture7090074](https://doi.org/10.3390/agriculture7090074) sur www.mdpi.com/journal/agriculture.
- Agreste Alsace, 2013. Zoom du mois: travail et protection des sols avant l'hiver. Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt. Service Régional de l'Information Statistique et Économique d'Alsace. Numéro 70 - Novembre 2013. 4p.
- Agreste, 2017. Les chocs de prix des matières premières agricoles : déterminants et anticipations. Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. Centre d'études et de prospective -n° 107 - Novembre 2017. 4p.
- Agreste, 2018. Statistique agricole de la Région Grand EST. Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. 24p.
- Agreste, 2018a. L'essentiel sur le contexte européen. La statistique, l'évaluation et la prospective agricole. Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, (Mémento 2018). 36 p.
- Agreste, 2018b. L'essentiel sur la Région Grand Est. La statistique, l'évaluation et la prospective agricole. Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, (Mémento 2018). 36 p.
- ARAA (Association pour la Relance Agronomique en Alsace), 2017. Expérimentation système de culture de Rouffach 2009-2015. Rapport de synthèse-1. 51 p.
- Bonnafox, F., Bouquier, C., Herbillon, C., Gresse, L., Merkez, E., Marie-Béatrice Devidts, M.-B., Roux, J., Ulrich, B., Barbier, P., Eidenschenck, J., Claerr, E., Tourron, J., Delahaie, Y., 2013. « Le Grand Hamster – un animal pas si commun ». Association Régionale pour l'initiation à l'environnement à l'environnement et à la nature en Alsace (Ariena). 16 p.
- Bousquet, F., et Le Page C., 2004. Multi-agent simulations and ecosystem management: a review. Ecological Modelling 176 (2004) 313–332.
- Deffinis, J., Granveaux, E., Barléon, S., 2019. Réunion PAC 2019. 93 p.

- ERMES (Évolution de la Ressource et Monitoring des Eaux Souterraines), 2016. Etat de la nappe phréatique d'Alsace et des aquifères du Sundgau : Premiers résultats sur les nitrates et les pesticides. APRONA & GRAND EST. 24p.
- Fiche signalétique banatic, PETR du Pays Rhin-Vignoble-Grand Ballon (Siren : 200073963) issue de DGCL, BANATIC / Insee, RP (population totale légale en vigueur en 2019 - millésimée 2016) mise à jour le 01/04/2019. Disponible sur : <https://www.banatic.interieur.gouv.fr/V5/recherche-de-groupements/fiche-raison-sociale-PDF.php?siren=200073963&arch=01/04/2019&dcou=> (consulté le 19/06/2019).
- Flisiak, C., 2018. Diagnostic du rôle des produits résiduels organiques dans le bilan humique d'un territoire-pilote situé dans la Plaine d'Alsace. Mémoire de fin d'études pour l'obtention du titre d'Ingénieur de Bordeaux Sciences Agro. Ecole Nationale Supérieure des Sciences Agronomiques de Bordeaux Aquitaine. 93p.
- Fuzeau, V., Dubois, G., Théron, O., Allaire, G., 2012. Etudes et Documents : diversification des cultures dans l'agriculture française état des lieux et dispositifs d'accompagnement. Commissariat Général au Développement Durable. 52p.
- GraphAgri, 2018. Produits Agroalimentaires : Céréales, protéagineux, oléagineux. Agreste La statistique, l'évaluation et la prospective agricole. Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, p. 124-135.
- 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 : p. 143-153.
- Muller, N., Party, J.-P., Sauter J., 2012. Notice simplifiée du Référentiel Régional Pédologique de la région Alsace, Sol conseil, ARAA [en ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.araa-agronomie.org/download/get/notice_referentiel_regional_pedologique_alsace/85.html, consulté le 11/07/2019.
- Party, J.-P., 2003. Guide des sols d'Alsace, petite région naturelle n°12, Piémont haut-rhinois et Ochsenfeld. 236 p.
- Petit, M.-S., Reau, R., Dumas M., Moraine M., Omon B., Josse S., 2012. Mise au point de systèmes de culture innovants par un réseau d'agriculteurs et production de ressources pour le conseil. Innovations Agronomiques 20 (2012), 79-100.

- Rapport final projet EXPÉCIVE, 2013. Etude au champ des potentiels agronomiques, méthanogènes et environnementaux des cultures intermédiaires à vocation énergétique. Projet ADEME. 64 p.
- Rapport final projet GERICO (GEstion des RIques et Histoire des COulées boueuses), 2012. Approche intégrée des transferts générant des coulées d'eaux boueuses en aval des bassins versants cultivés: ruissellement, érosion, perception et prévention des risques. 96 p.
- Salembier, C., et Meynard, J.-M., 2013. Evaluation de systèmes de culture innovants conçus par des agriculteurs: un exemple dans la Pampa Argentine. *Innovations Agronomiques* 31 (2013), p. 27-44.
- Schaller, N., 2012. La diversification des assolements en France : intérêts, freins et enjeux. Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt Secrétariat Général. Centre d'études et de prospective. n° 51 - Août 2012. 4 p.
- Sebillotte, M., 1990. Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. In : L. Combe et D. Picard coord., *Les systèmes de culture*. Inra, Versailles, p. 165-196.
- Varah, A.; Jones, H.; Smith, J.; Potts, S.G., 2013. Enhanced biodiversity and pollination in UK agroforestry systems. *J. Sci. Food Agric.* 2013, 93, 2073–2075.
- Virion, M-C., 2018. Plan National d'Actions en faveur du Hamster Commun (*Cricetus cricetus*) et de la biodiversité de la plaine 2019-2028. Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Grand Est. 130p.

ANNEXES

ANNEXE 1: Présentation du projet BESTS	V
ANNEXE 2: Localisation du PETR au niveau national avec zoom régional (adapté de data gouv, PETR RVGB)	VI
ANNEXE 3: Différence entre les codes de culture du RPG 2014 et celui à partir de 2015..	VII
ANNEXE 4: Politique de verdissement de la PAC	VIII
ANNEXE 5: Surfaces et identité des parcelles utilisées pour l'identification des successions culturales à base de maïs.....	IX
ANNEXE 6: Famille des groupes de cultures renseignés dans le RPG	X
ANNEXE 7: Critères de comparaison des SdCi et choix des indicateurs	XI
ANNEXE 8: Description de la plateforme MAELIA.....	XII
ANNEXE 9: Surface des groupes de culture avec cultures dérobées.....	XIII
ANNEXE 10: Succession culturale avec 2 cultures de maïs	XIV
ANNEXE 11: Localisation des grands types de SdCi	XVI
ANNEXE 12: Exemple de formalisation des règles de décision des SdC	XVII
ANNEXE 13: Exemple de règles de décision régissant la plantation de l'orge dans le SdCi "rotation de 2ans maïs/orge d'hiver_soja dérobée (+CIPAN).....	XVIII
ANNEXE 14: Implémentation des règles de décision dans MAELIA.....	XIX

ANNEXE 1: Présentation du projet BESTS

Le projet BESTS ou BioEconomy Systems for Territorial Sustainability est un projet financé par l'ADEME qui porte sur la gestion, durable des biomasses à l'échelle territoriale. Il est piloté par l'INRA et associe la Chambre d'Agriculture Grand Est et AgroTransfert Ressources et Territoires. Le projet dure 4 ans (2019-2022) et vise à évaluer et assurer la durabilité des systèmes bioéconomiques et accompagner les acteurs pour le développement d'une bioéconomie territoriale durable.

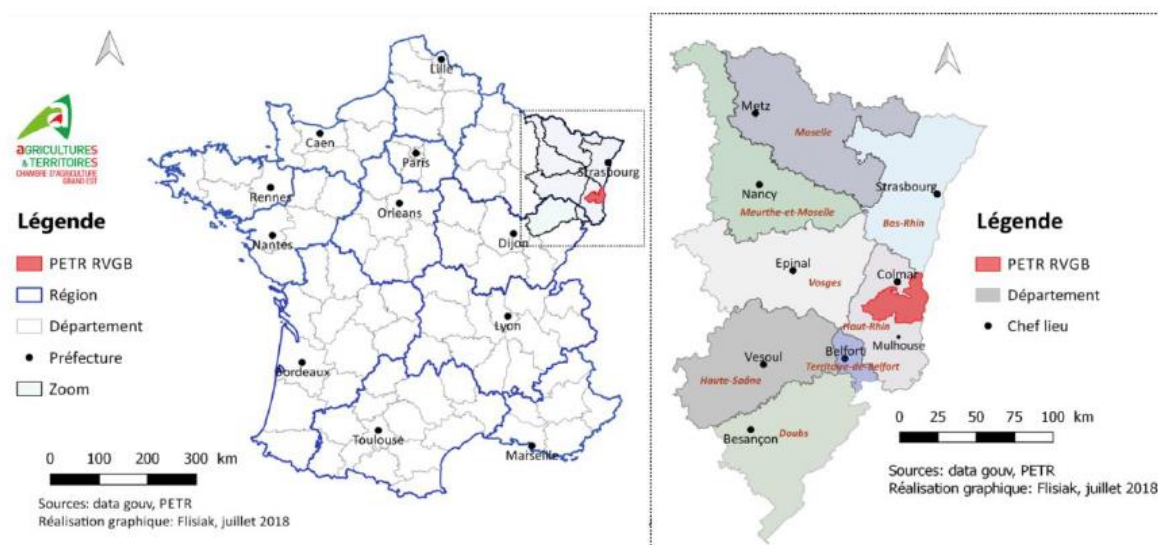
La démarche du projet comprend 5 phases : la caractérisation des systèmes de gestion de biomasses dans le territoire (courants et innovants), la modélisation conceptuelle et informatique de ces systèmes, le développement de méthodes d'évaluation de la durabilité de ces systèmes aux différents niveaux d'organisation, la co-construction des visions du territoire avec les acteurs territoire et la simulation et l'évaluation des organisations alternatives de territoires grâce à la Plateforme MAELIA.

Ainsi, mon sujet de stage contribue à la caractérisation des systèmes bioéconomiques, soit des systèmes de production de biomasse actuels et innovants, à l'échelle parcellaire, dans le territoire principal du projet, le pays Rhin-Vignoble-Grand-Ballon. Ce travail contribuera ainsi à la modélisation des systèmes de gestion des biomasses à l'échelle territoriale et permettra la simulation de scénarios de changement des systèmes (entre les courants et les innovants) avec la plateforme MAELIA.

ANNEXE 2: Localisation du PETR au niveau national avec zoom régional (adapté de data gouv, PETR RVGB)



Source : <https://www.rhin-vignoble-grandballon.fr/> consulté le 14/04/2019



Source : Flisiak, 2018

ANNEXE 3: Différence entre les codes de culture du RPG 2014 et celui à partir de 2015

Code de groupe de culture	Libellé en 2015	Libellé en 2014
1	Blé tendre	Blé tendre
2	Maïs grain et ensilage	Maïs grain et ensilage
3	Orge	Orge
4	Autres céréales	Autres céréales
5	Colza	Colza
6	Tournesol	Tournesol
7	Autres oléagineux	Autres oléagineux
8	Protéagineux	Protéagineux
9	Plantes à fibres	Plantes à fibres
10		Semences
11	Gel (surfaces gelées sans production)	Gel (surfaces gelées sans production)
12		Gel industriels
13		Autres gels
14	Riz	Riz
15	Légumineuses à grains	Légumineuses à grains
16	Fourrage	Fourrage
17	Estives et landes	Estives et landes
18	Prairies permanentes	Prairies permanentes
19	Prairies temporaires	Prairies temporaires
20	Vergers	Vergers
21	Vignes	Vignes
22	Fruits à coque	Fruits à coque
23	Oliviers	Oliviers
24	Autres cultures industrielles	Autres cultures industrielles
25	Légumes ou fleurs	Légumes ou fleurs
26	Canne à sucre	Canne à sucre
27		arboriculture
28	Divers	Divers

Les semences du code 10 de 2014 sont réparties dans les groupes de cultures 1, 2, 3 et 4 en 2015, suivant la culture considérée. Les cultures du code 12 et 13 sont reclassées dans le groupe 11 en 2015. Les cultures du code 27 sont intégrer dans le groupe 20 en 2015.

ANNEXE 4: Politique de verdissement de la PAC

Diversité d'assolement	Maintien des prairies permanentes	Respect des SIE
Si SAU < 10 ha, pas d'obligation	Surfaces déclarées en herbe depuis 5 ans ou moins (PP, PT, jachère hors SIE)	Sur 5% de la SA (SAU-(PP+PT plus 5 ans + cultures pérennes))
Si SAU [10 ; 30ha], il faut 2 cultures sur ton exploitation dont C1 < 75% SAU _{tot} , 25% doit être avec une ou 2 cultures autres (CIPAN, SIE, ...)		Prioriser les CIPAN et jachère Sans utilisation phyto
Si SAU > 30ha, il faut 3 cultures sur ton exploitation dont C1 < 75% SAU _{tot} , C1+C2 < 75%, 5% doit être avec une ou 2 cultures autres (CIPAN, SIE, ...)		Non soumis à cette mesure si : de 15 ha de SA, PT jachères légumineuses > 75% de SA, PT+PP 75% de SAU

Les surfaces d'intérêts écologiques ou SIE concerne 5% de la Surface Arable (SA). Les exploitants ne sont pas soumis à l'obligation de SIE s'ils ont moins de 15 ha de SA, ou leurs prairies temporaires + jachère + légumineuses sont à une superficie supérieure à 75% de leur SA et le reste inférieure à 30ha ou leurs prairies temporaires + prairie temporaire sont à une superficie supérieure à 75% de leur SA. Dans le cadre de la certification maïs, **les cultures dérobées et les cultures végétales (CIPAN) ne peuvent être comptabilisées en SIE**. Il faut utiliser en premier priorité les jachères et les couverts SIE. Les SIE peuvent être des surfaces plantées en taillis en courte rotation, des surfaces portant des plantes fixant de l'azote, des terres jachères en mellifères, des terres en jachère, des surfaces portant des cultures dérobées ou à couverture végétale, tous les deux récoltables, de la surface en *Miscanthus giganteus*, des groupe d'arbres, des bosquets, des mares, des surfaces en agroforesterie, des arbres isolés, des haies ou bandes boisées, des arbres alignés, des fossés, des murs traditionnels en pierre, des bandes tampons et bordures des champs, des landes d'ha admissibles le long des forêts et des surfaces boisées. Les surfaces portant des cultures dérobées en sous-semis d'herbe ou de légumineuse avec ensemencement d'un mélange d'au moins deux espèces dans la liste ci-après, sont éligibles en tant que SIE.

Espèces éligibles en SIE
Boraginacées (Bourrache), Poacées (Avoines, Ray-grass, Seigles, Sorgho fourrager, Brôme, X-Festulolium, Dactyles, Fétuques, Fléoles, Millet jaune, perlé, Mohas, Pâurin commun), Polygonacées (sarrasin), brassicacées (Cameline, Chou fourrager, Colzas, Cresson alénois, Moutardes, Navet, navette, Radis (fourrager, chinois), Roquette), Hydrophyllacées (phacélie), Linacées (lin), Astéracées (Niger, tournesol), fabacées (Féveroles, Fenugrec, Gesses cultivées, Lentilles, Lotier corniculé, Lupins (blanc, bleu, jaune), Luzerne cultivée, Minette, Mélilots, Pois, Pois chiche, Sainfoin, Serradelle, Soja, Trèfles, Vesces)

ANNEXE 5: Surfaces et identité des parcelles utilisées pour l'identification des successions culturelles à base de maïs

	2015	2016	2017
Total surface déclarée (ha)	35759,82	35769,6	35676,08
Total surface déclarée à la fois chaque année (ha)	20423,79	20423,79	20423,79
Pourcentage des surfaces des identités communes	57,11%	57,10%	57,25%

	2015	2016	2017
Nombre d'identités total renseigné par année	17336	17316	17184
Nombre d'identités communes	12402	12402	12402
Pourcentage des nb d'identités communes	71,54%	71,62%	72,17%

ANNEXE 6: Famille des groupes de cultures renseignés dans le RPG

Classes RPG (RPG 28 classes)	Famille de culture
arboriculture	vergers
autres céréales	Autres céréales
autres cultures industrielles	cultures industrielles
autres gels	Gel
autres oléagineux	oléagineux
blé tendre	céréales
colza	colza
divers	NA
estives landes	prairies
fourrages	prairies
fruits à coques	vergers
gel industriel	Gel
légumes / fleurs	maraichage
légumineuses à grains	légumineuses
maïs grain et ensilage	maïs
orge	céréales
plantes à fibres	fibres
prairies permanentes	prairies
prairies temporaires	prairies
protéagineux	légumineuses
semences	semences
surfaces gelées sans production	prairies
tournesol	tournesol
vergers	vergers
vignes	vergers

ANNEXE 7: Critères de comparaison des SdCi et choix des indicateurs

Critère	Objectif	Indicateurs	Calcul
Diversification culturale	Identification du niveau de diversification du système en termes de culture et de destination des produits	nb_cultures/année	Nb cultures ¹⁰ présentes dans le système/nb d'années de rotation ou de succession
		nb_espèces/année	Nb espèces ¹¹ présentes dans le système/nb d'années de rotation ou de succession
		familles_espèces/année	Nb familles ¹² présentes dans le système/nb d'années de rotation ou de succession
		nb_espèces_alim_humaine/année	Nb espèces à destination alimentaire présentes dans le système/nb d'années de rotation ou de succession
		nb_espèces_alim_animale/année	Nb espèces à destination fourragère pu ensilage présentes dans le système/nb d'années de rotation ou de succession
		nb_cultures_valeur_bioénergie/année (dans le cadre du système)	Nb espèces considérées comme source de bioénergie présentes dans le système/nb d'années de rotation ou de succession
		nb_cultures_valeur_bioénergie/année (si exploité de vrai en bioénergie)	
Utilisation des ressources renouvelables	Caractérisation du niveau relatif de consommation d'énergie par les différents systèmes	Types d'intrants utilisés	Engrais minérale (azote, phosphore, potassium), les molécules d'herbicides et autres produits phytosanitaires ¹³
		nb passage de fertilisation organique	Somme de tous les passages pour l'application de la fertilisation organique
		nb de passage de fertilisation minérale	Somme de tous les passages pour l'application de la fertilisation minérale
		nb de passage pour d'herbicide	Somme de tous les passages pour le désherbage chimique
		nb de passage de fongicide et insecticide	Somme de tous les passages pour l'application des fongicides et insecticides
		nb de passage pour le travail du sol (labour et autres travaux mécaniques),	Somme de tous les passages pour le travail du sol (chisel, herse rotatif, strip-till, vibroculteur, le labour) + ceux des autres travaux (semis, désherbage mécanique, roulage, broyage, pressage)
		nb de passage pour l'irrigation	Somme de tous les passages pour l'irrigation
Impact sur la vie des agriculteurs	Regarder si le SdCi peut donner des avantages aux agriculteurs du point de vue économique et social	Facilité de gestion : ▪ nb passage de machine ▪ nb d'outil utilisé	Somme des nombres de passages durant toutes les opérations culturales (pour l'application des fertilisants, des pesticides, travail du sol et autres travaux mécaniques et l'irrigation)
		Gain en économie : ▪ rendement moyen des cultures principales ▪ rendement moyen des couverts valorisés ▪ ratio de rendement en maïs	Information issues de la description des systèmes, Pour le ratio de rendement en maïs: $R = (\text{rendement moyen du maïs dans SdCi}) / (\text{rendement de maïs_réf})$

¹⁰ Un couvert : en mélange ou pure est considéré comme une culture.

¹¹ Ici, je considère les espèces des couverts en mélange.

¹² Ici, je considère les familles des espèces composant les couverts en mélange.

¹³ Je les ai posé dans les indicateurs mais sauf que c'est impossible de les calculer. Les informations sont trop insuffisantes : aucune information trouvée sur la fertilisation organique, et seulement quelques infos sur les pesticides et engrais minéraux.

ANNEXE 8: Description de la plateforme MAELIA

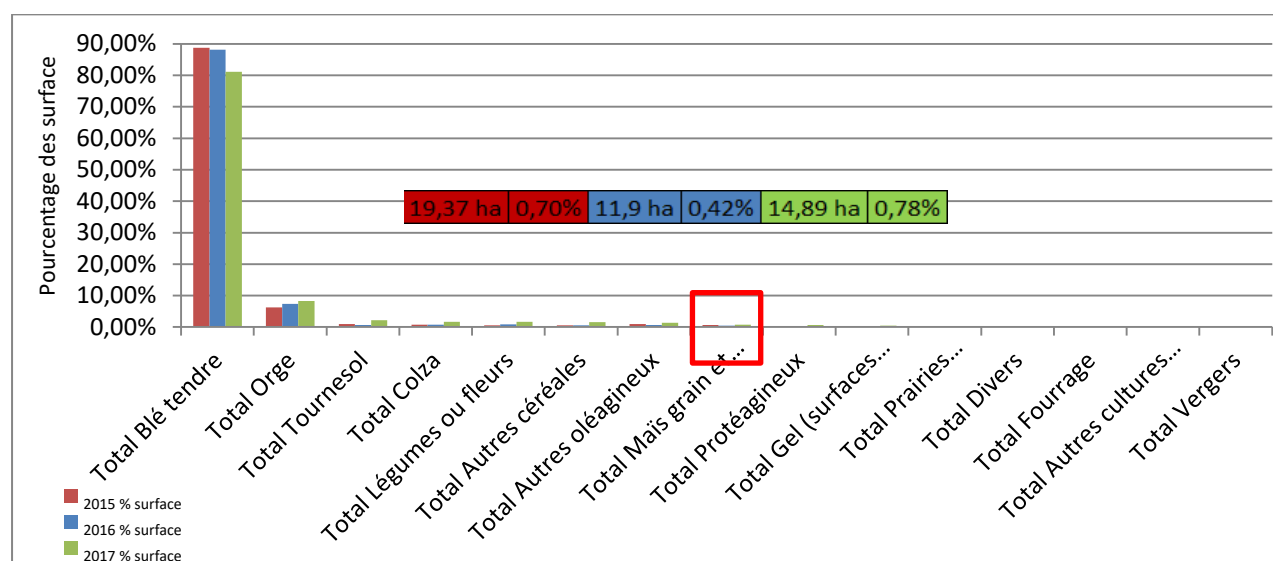
MAELIA ou Multi-Agents for Environmental norms Impact Assessment est une plateforme de modélisation et de simulation multi-agents permettant de représenter le fonctionnement des systèmes socio-écologiques (Bousquet and Lepage 2004). Dans le cadre de notre étude, le système socio-écologique étudié est le territoire Rhin-Vignoble- Grand Ballon. C'est l'outil de modélisation utilisé dans le cadre du projet BESTS pour la simulation et l'évaluation des organisations alternatives des territoires plus durables. L'utilisation de cette plateforme pour simuler des changements de systèmes de cultures vers des systèmes alternatifs nécessite la formalisation des règles de décision (les critères de localisation et les règles de conduite des opérations techniques) des SdC pratiqués actuellement dans RVGB et celles des SdCi alternatifs.

La plateforme de modélisation multi-agent « MAELIA » est un ensemble de fonctionnalités (données, modèles, indicateurs) agencées pour simuler la dynamique dans le temps et l'espace de systèmes de cultures au sein d'un territoire (parcelle, exploitation, territoire continu ou non, de grande étendue (milliers de km²) ou de quelques exploitations). Elle prend en compte les particularités de chaque parcelle (sol, climat, système de culture) et des contraintes de fonctionnement à l'échelle de l'exploitation (ex durées de chantiers, jours utiles). Il permet aussi d'évaluer les impacts environnementaux, économiques et sociaux des changements de systèmes à l'échelle du territoire et de simuler les phénomènes émergeant de l'hétérogénéité des interactions entre les hommes et son environnement.

MAELIA¹⁴ utilise en entrées des bases de données : sur les sols et climats, le registre parcellaire graphique (RPG), sur les séquences de culture observées de 2006 à 2014 au sein des îlots et des règles de décision des opérations techniques. Comme résultat, il va pouvoir sortir des cartes, des bases de données géoréférencés ou des courbes, avec des indicateurs pouvant être biophysiques (rendement, agri-biodiversité, état des ressources en eau, etc.), économiques (production agricole, marge brute et semi-nette, etc.), sociaux (nature/volume de travail, fréquence/gravité des crises, etc.) et/ou des scénarios pouvant être sur le contexte biophysique (climat, ressource, etc.), le contexte économique (prix, primes etc.), le contexte social (contraintes sur le travail, la distribution spatiale de SdC, etc.).

¹⁴ <http://maelia-platform.inra.fr/> consulté le 26/03/2019.

ANNEXE 9: Surface des groupes de culture avec cultures dérobées



Cultures dérobées associées au maïs dans RVGB (de 2015 en 2017):

Année	Maïs et cultures dérobées	Somme-surface_CD (ha)
2015	Maïs _Seigle_Féverole	5
	Maïs _Trèfle_Vesce	3,21
	Maïs _Féverole_Vesce	1,37
	Maïs _Féverole_Radis (fourrager, chinois)	1,28
	Maïs ensilage _Ray-grass_Trèfle	4,67
	Maïs ensilage _Féverole_Vesce	2,57
	Maïs ensilage _Féverole_Radis (fourrager, chinois)	1,27
	Total superficie de maïs avec CD en 2015	19,37
2016	Maïs _Radis (fourrager, chinois)_Vesce	2,23
	Maïs _Avoine_Vesce	0,8
	Maïs ensilage _Trèfle_Ray-grass	4,52
	Maïs ensilage _Radis (fourrager, chinois)_Vesce	3,64
	Total superficie de maïs avec CD en 2016	11,19
2017	Maïs _Radis (fourrager, chinois)_Vesce	9,21
	Maïs _Avoine_Féverole	3,83
	Maïs ensilage _Avoine_Vesce	1,85
	Total superficie de maïs avec CD en 2017	14,89

ANNEXE 10: Succession culturale avec 2 cultures de maïs

Succession culturale	Surface des successions (ha)	Pourcentages des surfaces
2*maïs/céréales- CD	1970,09	45,63%
2*maïs/céréales	988,93	22,91%
2*maïs/oléagineux	675,57	15,65%
2*maïs/cultures industrielles	281,36	6,52%
2*maïs/tournesol	210,05	4,87%
2*maïs/autres céréales	75,97	1,76%
2*maïs/gel	30,27	0,70%
2*maïs/maraichage	25,71	0,60%
2*maïs/maraichage- CD	19,53	0,45%
2*maïs/tournesol- CD	10,34	0,24%
2*maïs/oléagineux- CD	10,3	0,24%
2*maïs/prairies	7,11	0,16%
2*maïs/cultures industrielles-CD	4,68	0,11%
2*maïs/NA	3,52	0,08%
2*maïs/fourrage	1,97	0,05%
2*maïs/autres céréales- CD	1,94	0,04%
Total général	4317,34	100,00%

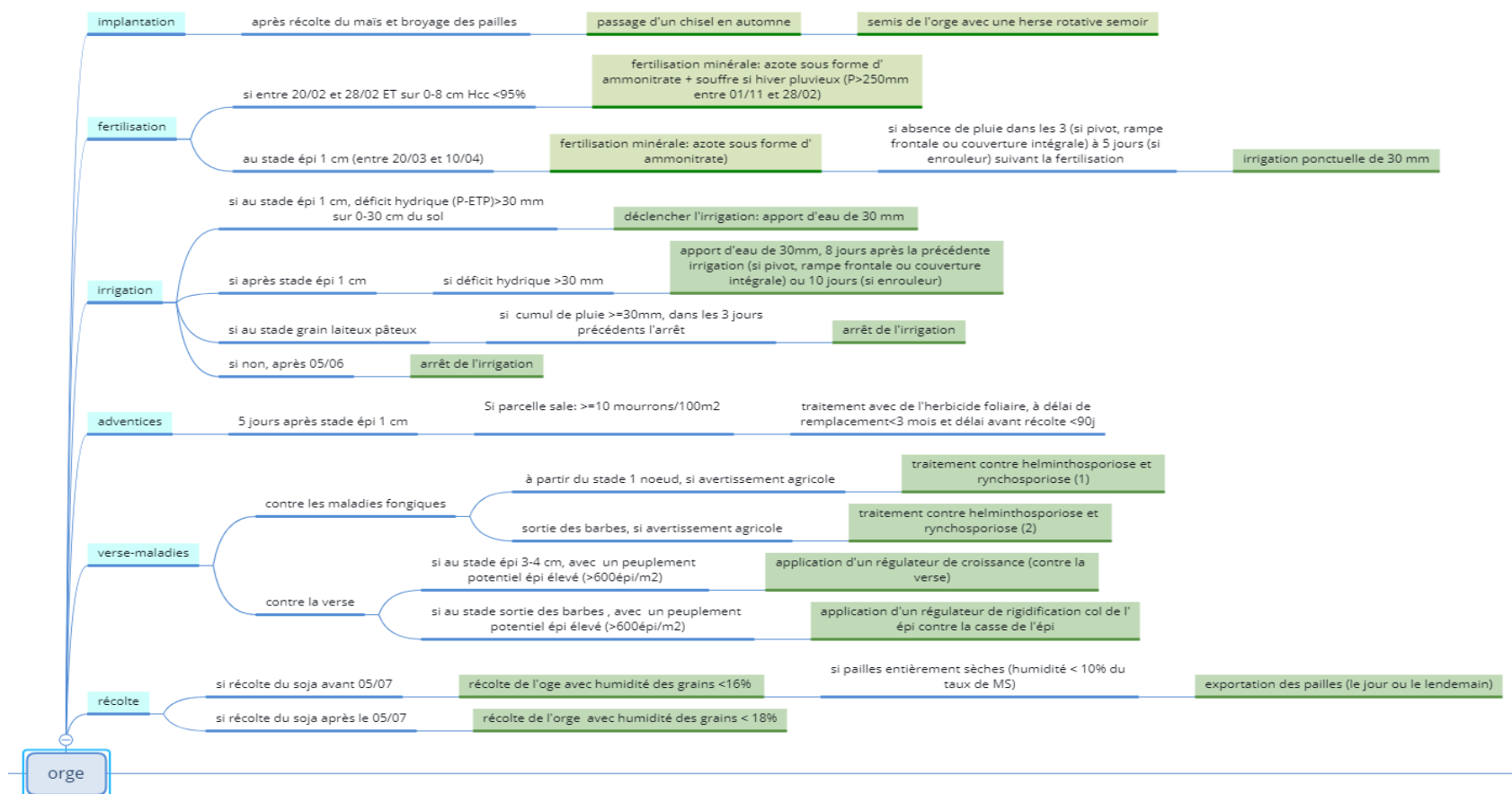
ANNEXE 11: Localisation des grands types de SdCi

Grands types de SdCi	Grands types de SDCs	Localisation	Nombre de SdCs	Nombre de grand type de SdCis
Monoculture de maïs avec culture intermédiaire	Monoculture de maïs avec culture intermédiaire_CD	Alsace (localité non précisé)	4	26
	Monoculture de maïs avec culture intermédiaire_CIPAN	Bresse (à Cormoz)	6	
		Bresse (à Domsure)	6	
		Bresse Dombes (à Biziat)	3	
		Dombes (à Romans)	6	
	Monoculture de maïs avec culture intermédiaire_CIVE	Sendets de Béarn, à l'est de Pau (64)	1	
Rotation avec maïs de 2 ans + CI	Rotation avec maïs de 2 ans + CD	Muntzenheim (68)	4	4
Rotation avec maïs de 3 ans + CI	Rotation avec maïs de 3 ans + CIPAN	Rouffach (68)	3	3
Monoculture de maïs avec couverture végétale	Monoculture de maïs avec couverture végétale permanente	Les landes	1	26
		Obernai	6	
		Oberschaeffolsheim	4	
		Stutzheim (Bas-Rhin)	1	
		Alsace (non précisée)	1	
	Monoculture de maïs avec couverture végétale temporaire	Belgique, à Corroy-Le-Grand	6	
		Belgique, à Vieusart	7	
Association maïs+légumineuse à grains	Association maïs+légumineuse à grains	Belgique, à Herquegies	6	6
Total			65	65

Sur les 65 SdCi recensés, la monoculture de maïs avec culture intermédiaire et celle avec couverture végétale sont les plus représentés (chacun avec 40% du nombre total de SdCi recensés). Les systèmes avec rotation sont les moins représentés. En termes de diversification culturale, les cultures venant diversifier les SdC à base de maïs sont des cultures principales de légumineuses (soja, pois) ou des céréales (blé, l'orge), ou des cultures dérobées, soient des espèces à forte production de biomasse aérienne (avoine rude) pour la CIVE, des légumineuses en mélange (fétuque élevée et trèfle incarnat, vesce velue et ray-grass, etc.) ou pure (trèfle, soja, etc.) pour la CIPAN, des légumineuses fourragères (ray-grass, trèfle violet, vesce velue, etc.) pour la culture dérobée, les légumineuses à grains (vesce, féverole etc.) pour la culture associée et des espèces en mélange (avoine+orge, trèfle+avoine, etc.) ou pure (trèfles, lotier, luzerne, etc.), à forte biomasse pour les couverts en sous-semis.

[illegible]

ANNEXE 13: Exemple de règles de décision régissant la plantation de l'orge dans le SdCi "rotation de 2ans maïs/orge d'hiver_soja dérobée (+CIPAN)



ANNEXE 14: Implémentation des règles de décision dans MAELIA

Les règles de décision régissant ces systèmes sont ensuite intégrées dans MAELIA, pour servir de données d'entrée au modèle. Pour cela nous avons utilisé le site « <https://analytics.huma-num.fr/Renaud.Misslin/proterr/> » servant pour la déclaration des itinéraires techniques pour la plateforme MAELIA. Certaines informations obtenues durant l'entretien avec l'expert, telles que les stades phénologiques exprimées en nombre de feuilles, longueur d'épi ou la maturité des grains, ne sont pas prises en compte par la plateforme en tant que tels. Il a été nécessaire de les traduire en indicateur propre à la plateforme (l'échelle végétale¹⁵), dont le calcul est fonction de la somme de température nécessaire, de la levée de la plante au stade avec échelle végétal à déterminer. Pour cela, il nous a fallu une correspondance entre la somme de température des stades phénologiques et l'échelle végétale. Pour ce faire, nous nous sommes basés la base de données du modèle AqYield, utilisé aussi dans MAELIA et nous avons établis une correspondance en précisant l'équation de régression. Par la suite, nous avons fait de la recherche bibliographique pour obtenir les sommes de températures correspondant à aux différents stades phénologiques de nos cultures et faire le calcul de l'échelle végétale de chaque stade par le biais de l'équation de régression obtenu de la base de données de AqYield. Il est à noter que certaines valeurs de somme de température des stades phénologiques à chercher ont été calculées sur la base de celles des cultures de la même famille ou sur la base du nombre de jour séparant certains stades phénologiques (informations décrits dans nos règles de décision), faute d'informations sur le sujet. Par ailleurs, certaines informations obtenues des règles de décision n'ont pas pu être intégrées dans la version actuelle de la plateforme. Elles ont été saisies et capitalisées au format Excel et vont permettre d'enrichir le modèle pour la prochaine étape d'élargissement du modèle MAELIA. Aussi, pour les valeurs avec intervalle par exemple : le débit de chantier qui dépend de l'outil utilisé, le nombre de jour d'attente avant une opération culturale qui est fonction de la précipitation, etc., nous avons choisi toujours les valeurs extrêmes supérieures.

¹⁵ Echelle végétal (j) = Echelle végétal (j-1) + max (entre 0 et min (entre Tmoy ;Tmax) – Tbase) / °JFlo x frein (dépend de la photopériode dépend de la latitude)). (Communication personnelle avec Laurène CASAL « en post doctorant travaillant dans l'unité mixte de recherche AGIR », 2019).

RÉSUMÉ

En Alsace, le maïs est la céréale la plus cultivée. Elle constitue une des cultures la plus rentable de la région avec un rendement figurant parmi les plus élevés de la France. Elle est cultivée en monoculture et présente des effets néfastes pour l'environnement, tels la pollution de la nappe, le ruissellement et l'érosion et la perte de biodiversité. Partant de cette problématique, notre étude vise à identifier des systèmes de culture innovants, alternatifs à la monoculture de maïs, susceptibles d'être adoptés en Alsace, notamment à l'échelle du territoire Rhin Vignoble Grand Ballon. Pour ce faire, une identification des systèmes de culture diversifiés à base de maïs, adaptables au contexte alsacien a été faite. Ensuite, une formalisation des règles de décisions régissant ces systèmes de cultures innovants et les systèmes de culture actuellement pratiqués dans le territoire ont été effectués afin de réaliser des scénarios de changement de système, à l'échelle du territoire d'étude, ceci, moyennant la plateforme de modélisation MAELIA. La culture de maïs en succession sur 3 ans domine les surfaces agricoles en maïs de la région en 2017. Quelques successions diversifiées sont observées mais demeurent faiblement adoptées. Des essais systèmes testés en alternatifs à la monoculture de maïs s'observent mais restent très relatifs aux objectifs de l'auteur. Par ailleurs, deux systèmes de culture innovants sont retenus, ils partent des systèmes de culture innovants testés en Alsace. L'implémentation des règles de décision au sein du modèle de simulation requiert du temps et mérite d'être mieux caractérisée.

Mots-clé : maïs, système de culture innovant, modélisation, MAELIA, Pays Rhin Vignoble Grand Ballon