

Projet co-eLAB

Année Universitaire 2017 - 2018

Semestre 1

Code projet :

2674

COMMANDITAIRE

YNCREA

SUJET

**ETUDE DE FAISABILITE DU MONTAGE D'UNE STARTUP AUTOUR DES THEMES DE LA TELEDETECTION
ET DE L'AGRICULTURE**

ELEVES INGENIEURS - DOMAINE

Marie MARION - ISA

Geneviève BAUMANN - ISA

Charlotte LEJOYEUX - ISA

Alexandra LEGRAND – HEI domaine MOIL

Matthieu JARLIER – HEI domaine TIMTEX

Victor LEPOUTRE - IESEG

Valentin BEQUART - ISEN

David DESMYTTERE - ISEN

Antoine BEDHOME - ISEN

JURY DE SOUTENANCE

Président de jury Sergio COCCO

Représentant(s) de l'entreprise Marie MARION, Geneviève BAUMANN, Charlotte LEJOYEUX, Louise VERNIER

Professeur(s) superviseur(s) Bertrand VANDOORNE

RESUME

Le projet co-eLAB Farming by satellite, a porté sur la faisabilité technique de l'optimisation du semis des couverts végétaux grâce à l'imagerie satellite au niveau intra-parcellaire.

Grâce à la veille concurrentielle réalisée, on constate qu'il existe de nombreuses entreprises dans le domaine de l'agriculture de précision et la fertilisation azotée et peu d'entreprises dans le domaine des couverts végétaux. Cependant, il n'existe pas aujourd'hui d'entreprise qui conseille sur les couverts végétaux par modulation intra-parcellaire. Il n'y a donc pas de concurrent direct en France pour le moment. Une enquête réalisée auprès des agriculteurs montre leur intérêt pour les couverts végétaux et le concept de couverts connectés. Néanmoins, des contraintes matérielles et financières représentent le principal frein au développement de l'idée.

Différentes méthodes de télédétection sont nécessaires pour effectuer une analyse des caractéristiques du sol.

Le GPR (ground penetrating radar) est un outil utilisant les microondes pour sonder le sol. Aujourd'hui il est principalement utilisé pour mesurer la teneur en eau des sols. A partir de cette teneur en eau la structure du sol peut être appréhendée.

Afin d'obtenir une cartographie de la teneur en azote du couvert, on utilise une mesure de la chlorophylle via l'indicateur MCARI/MTVI2. La biomasse est quant à elle mesurée grâce au NDVI. Ces deux indicateurs sont obtenus grâce à Sentinel 2.

Il est aussi envisageable de détecter le carbone organique du sol (COS) grâce à une méthode d'interpolation hybride, la régression krigage, utilisant la télédétection.

La diffusion de Raman permet d'obtenir le taux de phosphore dans un échantillon. On peut utiliser cette théorie à travers l'outil BRAVO de chez Brucker.

L'imagerie nécessaire à l'analyse du sol a pu être extraite pour le NDVI et le carbone sur un serveur. De plus un site internet qui fait office d'interface avec l'agriculteur client permet également de consulter ces données satellitaires et les cartes de modulation.

TABLES DES MATIERES

INTRODUCTION	1
GESTION DE PROJET.....	2
1. Note de clarification	2
1.1. Présentation	2
1.2. Définition et objectifs du projet	2
1.3. Acteurs du projet.....	3
1.4. Validation.....	3
2. Plannings.....	4
2.1. Planning prévisionnel.....	4
2.2. Planning réel.....	5
2.3. Comparaison des plannings	5
3. Timesheet et bilans compétences.....	6
3.1. Timesheet global	6
3.2. Bilans de compétences	6
4. Conclusion.....	8
ETUDE DE MARCHE.....	9
1. Veille concurrentielle.....	9
1.1. Monde.....	9
1.2. Europe.....	14
1.3. France.....	20
2. Etude de marché en France	24
3. Sondage	26
4. Enquête terrain	33
4.1. Les agriculteurs rencontrés personnellement.....	33
4.2. Les agriculteurs contactés au téléphone	36
5. Etude économique	37
5.1. Mise en place d'une start-up.....	37
5.2. Coût de la prestation	38
6. Conclusion.....	38
7. L'intrapreneuriat	38

ETUDE AGRONOMIQUE	40
1. Cartographie de l'hétérogénéité intra parcellaire de la compaction des sols	40
1.1. Mesure de la densité apparente du sol	40
1.2. Resistance mécanique du sol	40
1.3. Tomographie de la résistivité électrique (ERT).....	40
1.4. Conductivité hydraulique.....	40
1.5. Ground penetrating radar	41
2. Détermination de l'azote	49
2.1. Concept général	49
2.2. Cartographie de la teneur en azote du couvert	50
2.3. Cartographie de la biomasse.....	52
3. Recherches de nouveaux indicateurs.....	53
3.1. Carbone.....	53
3.2. Phosphore	57
4. Identification du mélange d'un couvert végétal	60
4.1. Choix d'un couvert.....	60
4.2. Le mode de destruction	62
4.3. Directive nitrate	63
4.4. Les mélanges	64
4.3. Le choix final du mélange	64
5. Détermination des apports de chaque espèce d'un couvert végétal	67
5.1. Détermination par la méthode MERCI, des apports minéraux de chaque espèce	67
6. Technique de semis.....	73
7.1. Le semis des couverts végétaux	73
7.2. Semis à la volée	74
7.3. Semis en ligne.....	74
7.4. Conclusion.....	76
ETUDE SATELLITE	77
1. Recherche Satellites, premier serveur et NDVI.....	77
1.1. Fonctionnement du programme Copernicus.....	77
1.2. Crédit d'un premier serveur	78
1.3. Calcul du NDVI par traitement d'images.....	79
2. Crédit du site, découpage plus précis, nouveau serveur	81
2.1. Crédit du site	81
2.2. Découpage plus précis	84
2.3. Codage du nouveau serveur.....	84

3. Etude sur le carbone.....	87
3.1. Détermination des variables utiles.....	87
3.2. Codage du calcul sous python	88
3.3. Conclusion sur le carbone	89
4. Conclusion générale	89
CONCLUSION	90
BIBLIOGRAPHIE.....	91
TABLES DES FIGURES.....	96
TABLES DES TABLEAUX.....	99
ANNEXES	100
1. Annexe 1- TIMESHEETS.....	100
2. Annexe 2- PLAQUETTE.....	104
3. Annexe 3- UTILISATION DE LA METHODE MERCI.....	107

INTRODUCTION

De nos jours, l'agriculture se trouve dans un nouveau tournant pour concilier une agriculture durable tout en étant productive. Ce tournant s'appuie sur toutes les technologies disponibles comme les satellites, drones ou encore capteurs... Grâce à ces nouveaux grands enjeux mondiaux, des concours sont montés en vue de trouver de nouvelles solutions et concepts.

En Janvier 2017, le concours européen Farming by satellite a récompensé l'équipe isaïenne pour son idée sur les couverts végétaux connectés. L'idée proposée est d'adapter le semis de couverts végétaux en fonction des propriétés du sol, renseignées par imagerie satellite. Cette idée permettrait de fournir à l'agriculteur une carte de modulation intra-parcellaire. Depuis octobre une équipe pluridisciplinaire d'Yncréa Hauts-de-France s'est formée dans le but de répondre à la faisabilité technique de ce concept.

Une première partie vise à identifier la réceptivité du marché au projet. Pour atteindre cet objectif une veille concurrentielle, une étude de marché et économique ainsi qu'une enquête terrain ont été réalisées.

Une deuxième partie agronomique approfondira les indicateurs étudiés antérieurement et élargira à de nouveaux paramètres qui pourraient optimiser l'analyse du sol. De plus, la mise en place de la technique de semis sera abordée ainsi que l'apport de minéral de chaque espèce dans le sol.

Une dernière partie se penchera sur les recherches satellites du programme Copernicus dans l'optique de produire une cartographie de certains indices agronomiques. Une interface a été créée visant à regrouper les données des agriculteurs clients mais également à automatiser l'extraction de données satellitaires.

GESTION DE PROJET

1. Note de clarification

Etude de faisabilité du montage d'une startup autour des thèmes de la télédétection et de l'agriculture

N° DU PROJET : 2674
DATE : 02/10/2017 au 18/12/2017

1.1. Présentation

a) Contexte

Dans le cadre des projets de 4^{ème} à l'ISA, nous avons participé au concours européen « Farming by satellite ». L'objectif était de trouver une idée répondant à la problématique suivante : « comment faire de l'agriculture plus durable en utilisant les technologies satellites ». Notre idée est d'optimiser l'utilisation des couverts végétaux grâce à l'imagerie satellite. Les informations nous permettent d'établir une carte sur les propriétés du sol de la parcelle. A partir de cette carte, il sera possible de choisir les couverts végétaux les plus adaptés. L'idée est d'optimiser les propriétés de chaque espèce du mélange en jouant sur leurs proportions en fonction des besoins du sol.

Nous avons décidé de poursuivre ce projet en vue d'une potentielle entrée dans l'incubateur d'Euratechnologie ou au sein d'une entreprise. Grâce au projet co-elab, les compétences de chacun vont être mêlées afin d'étudier la faisabilité technique (satellites/agronomique) et la compréhension du marché.

b) Données d'entrée

- Rapport du projet "Farming by satellite" de 4^{ème} année
- Diaporama du concours "farming by satellite"
- Données du satellite Copernicus
- Documentation sur les couverts végétaux

c) Dates (début et fin)

Du 2 octobre 2017 au 18 décembre 2017

1.2. Définition et objectifs du projet

a) Objectif du projet

- Elaborer une étude de faisabilité technique : satellites + agronomique
- Etude de marché
- Réalisation technique

b) Résultats attendus

- Passer de la théorie à la pratique en ayant une idée fiable du marché et de l'avenir
- Pouvoir conseiller les agriculteurs sur les couverts végétaux avec une activité rentable
- Délai du projet : du 02/10/2017 au 18/12/2017

c) Livrables

- Un rapport détaillant les comptes rendus des études de faisabilité et de l'étude de marché
- Le projet est-il réalisable ? Faut-il le développer ?

d) Budget

Pas de budget défini.

e) Contraintes

Les images satellites ne sont pas toujours exploitables à cause de la couverture nuageuse.
Le conseil doit pouvoir être disponible n'importe où et s'adapter à chaque agriculteur.

f) Conséquences attendues

Les conclusions du projet auront un impact sur l'avenir professionnel des commanditaires : stages de fin d'études, création d'une startup ou développement du projet en entreprise.

1.3. Acteurs du projet

Etudiants :

- Marie MARION – ISA
- Geneviève BAUMANN - ISA
- Charlotte LEJOYEUX - ISA
- Alexandra LEGRAND – HEI domaine MOIL
- Matthieu JARLIER – HEI domaine TIMTEX
- Victor LEPOUTRE - IESEG
- Valentin BEQUART - ISEN
- David DESMYTTERE - ISEN
- Antoine BEDHOME – ISEN

Professeur superviseur: Bertrand VANDOORNE

1.4. Validation

Dates et visa

2. Plannings

2.1. Planning prévisionnel

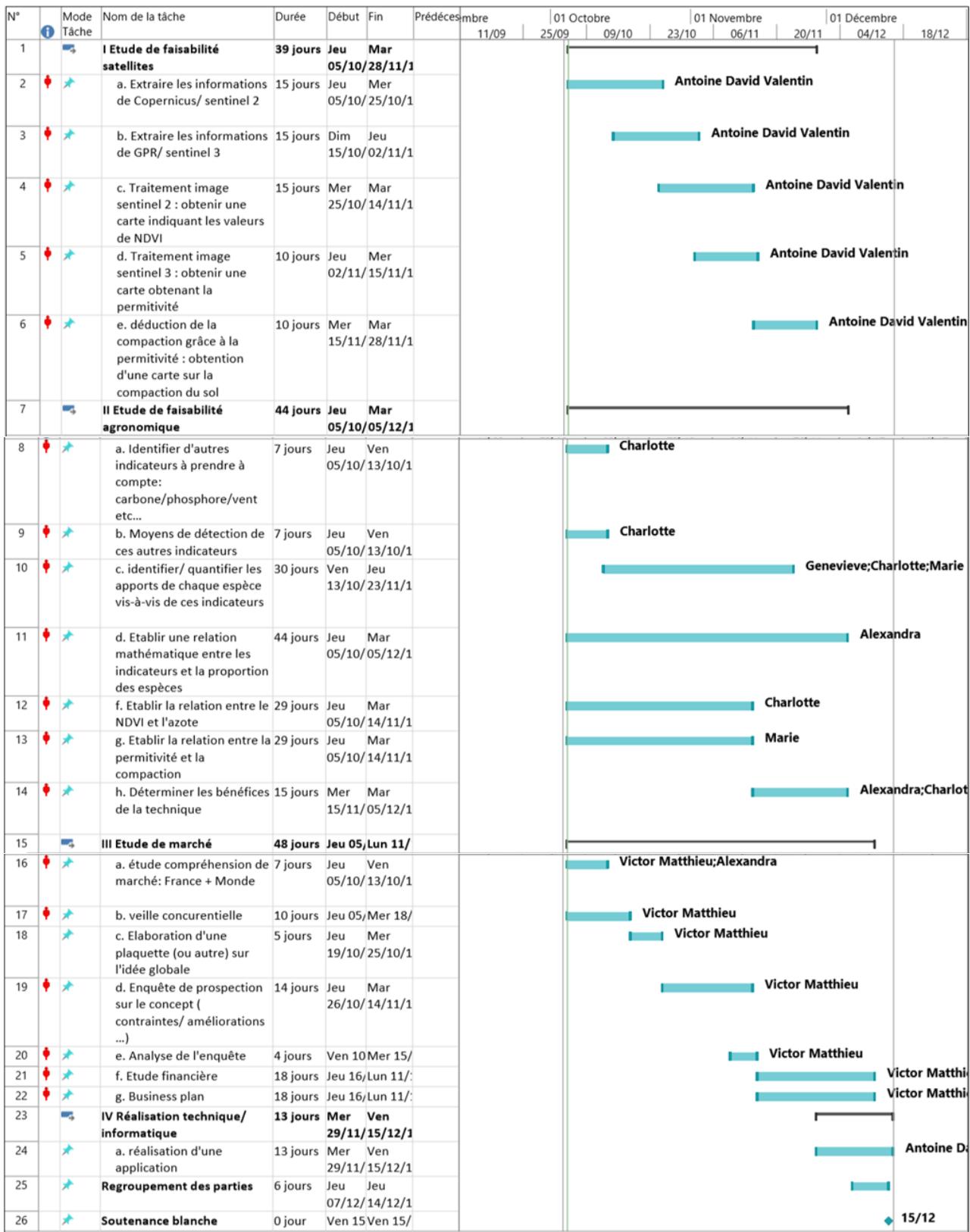


Figure 1- Planning prévisionnel

2.2. Planning réel

N°	Mode Tâche	Nom de la tâche	Durée	Début	Fin	01 Septembre 28/08	11/09	01 Octobre 25/09	09/10	01 Novembre 23/10	06/11	01 Décembre 20/11	04/12	18/12
1	➡	I Etude de faisabilité satellites	47 jours	Jeu 05/10/17	Ven 08/12/17									
2	✳	a. Extraire les informations de Copernicus/ sentinel 2	6 jours	Jeu 05/10/17	Jeu 12/10/17									
3	✳	c. Traitement image sentinel 2 : obtenir une carte indiquant les valeurs de NDVI	11 jours	Ven 13/10/17	Ven 27/10/17									
4	✳	Etude de faisabilité du carbone	7 jours	Jeu 30/11/17	Ven 08/12/17									
5	➡	II Etude de faisabilité agronomique	48 jours	Jeu 05/10/17	Lun 11/12/17									
6	✳	a. Identifier d'autres indicateurs à prendre en compte: carbone/phosphore/vent etc...	7 jours	Jeu 05/10/17	Ven 13/10/17									
7	✳	b. Moyens de détection de ces autres indicateurs	42 jours	Jeu 05/10/17	Ven 01/12/17									
8	✳	c. identifier/ quantifier les apports de chaque espèce vis-à-vis de ces indicateurs	16 jours	Lun 20/11/17	Lun 11/12/17									
9	✳	f. Cycle de l'azote	16 jours	Lun 20/11/17	Lun 11/12/17									
10	✳	g. Etablir la relation entre la perméativité et la compaction	29 jours	Jeu 05/10/17	Mar 14/11/17									
11	➡	III Etude de marché	48 jours	Jeu 05/10/17	Lun 11/12/17									
12	✳	a. étude de marché: France + Europe + Monde	12 jours	Jeu 05/10/17	Ven 20/10/17									
13	✳	b. veille concurrentielle	15 jours	Lun 23/10/17	Ven 10/11/17									
14	✳	c. Elaboration d'une plaquette (ou autre) sur l'idée globale	31 jours	Ven 20/10/17	Ven 01/12/17									
15	✳	d. Enquête de prospection sur le concept (contraintes/ améliorations ...)	11 jours	Lun 20/11/17	Sam 02/12/17									
16	✳	e. Analyse de l'enquête	6 jours	Lun 04/12/17	Lun 11/12/17									
17	✳	f. Etude financière	11 jours	Lun 27/11/17	Lun 11/12/17									
18	✳	g. Business plan	11 jours	Lun 27/11/17	Lun 11/12/17									
19	➡	IV Réalisation technique/ informatique	18 jours	Lun 06/11/17	Mer 29/11/17									
20	✳	a. réalisation d'une application (site web)	18 jours	Lun 06/11/17	Mer 29/11/17									
21	✳	Regroupement des parties	3 jours	Lun 11/12/17	Mer 13/12/17									
22	✳	Soutenance blanche	0 jour	Ven 15/12/17	Ven 15/12/17									15/12

Figure 2- planning réel

2.3. Comparaison des plannings

Tout au long de la réalisation du projet, nous avons fait notre possible pour respecter le planning prévisionnel. Cela n'a pas toujours été évident car les recherches bibliographiques ont pris plus de temps que prévu. Dans l'ensemble, toutes les tâches fixées ont été réalisées dans le temps imparti. Cependant certaines tâches n'ont pas pu être effectuées à cause du manque d'informations et de leur complexité. Pour la partie satellite, les premiers objectifs fixés au début du projet ont pu être globalement atteints, sauf pour le cas du Carbone et de la compaction. Le téléchargement, le stockage et l'utilisation des données de Copernicus se sont avérés beaucoup plus compliqués que prévu. Pour la partie étude de marché, tout a pu se dérouler comme prévu, même si certaines tâches ont été un peu plus longues que ce que nous avions imaginé.

3. Timesheet et bilans compétences

3.1. Timesheet global

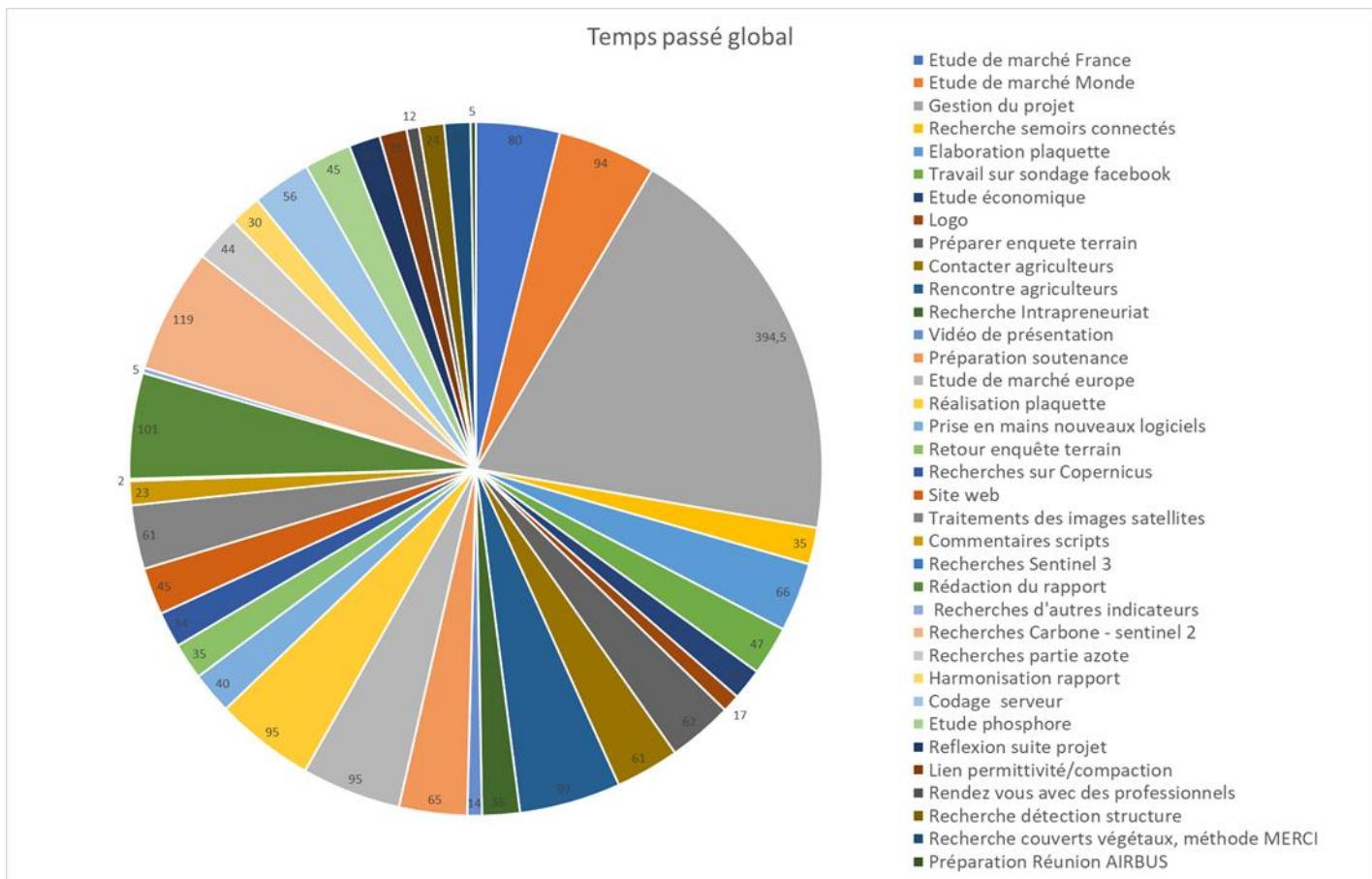


Figure 3- Timesheet global

3.2. Bilans de compétences

a) Alexandra

J'ai trouvé cela très intéressant de travailler avec des étudiants d'autres écoles et de pouvoir mixer nos compétences. J'ai pu développer mes connaissances en agriculture et avoir une nouvelle vision sur le monde agricole. Ce projet a développé mon autonomie et ma façon de travailler en équipe. J'ai pris conscience du travail qui doit être fait avant la création d'une startup et à quel point ce n'est pas un exercice facile. Cela a développé mes compétences en gestion de projet. Je n'avais jamais réalisé d'étude de marché complète et cela a été très enrichissant.

b) Matthieu

Ce projet co-elab a été l'occasion d'apprendre à travailler différemment avec des personnes venant d'écoles différentes et n'ayant donc pas la même formation que moi. En mêlant des étudiants d'HEI, de l'ISA, de l'ISEN et de l'IESEG, des compétences et manières de travailler variées m'ont permis de travailler d'une autre façon. De plus, bien que le sujet ne soit pas en adéquation avec ma formation d'ingénieur textile, j'ai pu découvrir le monde de l'agriculture et utiliser mes compétences de gestion de projet et progresser dans la maîtrise de logiciels de montage. Ce projet m'a donc ouvert l'esprit sur un nouvel univers et fait découvrir toutes les

contraintes liées à la création d'une start-up. Enfin, les rencontres sur le terrain avec les agriculteurs m'ont fait découvrir la réalité de leur quotidien.

c) *Victor*

Lors de cette expérience j'ai dû sortir de ma zone de confort afin d'appréhender des domaines qui ne m'étaient pas familiers : Le monde agricole, l'étude agronomique et l'imagerie satellite. Travailler sur un tel projet m'a incité à m'adapter et à rapidement apprendre les bases nécessaires en agronomie. En définitive ce projet a été extrêmement varié dans ses tâches : Etude économique, rencontre avec les acteurs du milieu, étude de marché, communication... Le travail en groupe a été réellement enrichissant, car chacun venait d'études différentes et avait des compétences nécessaires à l'avancée globale du projet. Le projet étant au stade de simple idée en Septembre j'ai dû faire preuve de créativité et de prévoyance afin d'anticiper le travail nécessaire ainsi que les différents challenges que pourraient rencontrer la mise en place de la start up.

d) *Charlotte*

Ce projet co-elab, continuité du projet « farming by satellite » de 2016, a été intéressant sur le plan gestion de projet. En effet, il m'a permis d'être confronter à la gestion d'un groupe n'ayant pas le même temps alloué au projet. Il n'était pas facile de faire le lien entre les différentes personnes, surtout entre le groupe co-elab et les filles d'agribusiness (Marie, Geneviève). J'ai ainsi pu remarquer qu'une bonne communication était la clé des relations dans le groupe et ainsi d'éviter des malentendus, incompréhensions ou quiproquos. De plus, cette expérience a permis de développer mon efficience dans les recherches bibliographiques. Le bilan global de cette expérience est plutôt positif.

e) *Marie*

Cette expérience depuis son commencement en septembre 2016 a été extrêmement enrichissante. Organisation, créativité, gestion de projet, gestion de réunions, gestion de challenges, connaissances, sont autant de compétences que j'ai pu en retirer. Travailler au sein du projet coelab avec des étudiants venant de trois autres écoles était également très enrichissant. Cela m'a permis de développer mes compétences de gestion de groupe, et de comprendre combien la pluridisciplinarité est un atout pour l'avancée d'un projet. Finalement il découle de ce projet une vraie volonté de poursuivre mon projet professionnel dans un secteur qui me passionne : l'agriculture de précision, mais également dans la gestion de projet, qui est très dynamisante.

f) *Geneviève*

Le projet Farming by satellite a débuté pour nous il y a un an et dès le commencement a pu nous apporter de nouvelles compétences comme en développer d'autres. Cette année, au sein d'une équipe co-élab, j'ai pu faire murir mon projet professionnel à l'aide de nouvelles connaissances comme le management d'équipe ou la gestion de projet. Le projet co-élab m'a également permis de prendre en compte en gestion d'équipes les différentes formations de chacun et leurs forces et faiblesses. Le projet a également permis à chacun de prendre en compte les emplois du temps de chacun d'où la nécessité d'une organisation précise pour permettre au projet d'aller plus loin. J'en ressort surtout des compétences managériales et d'organisation qui me seront indispensables. En dernier point ces mois passés sur un projet très précis et axé sur l'agriculture de précision m'ont fait prendre conscience de ma volonté personnelle sur mon projet professionnel et de ce que je voulais faire au quotidien dans mon futur métier.

g) *Valentin*

Au cours de ce projet, j'ai principalement acquis de nouvelles compétences techniques, en effet jusqu'alors dans le cadre de site Web, je m'occupais surtout du Front ou de l'applicatif, mais jamais du serveur, j'en connaissais la théorie mais cela s'arrêtait là. J'ai donc appris à réaliser un serveur, la logique que cela impliquait, donc à manipuler Node JS, ainsi que les différents packages utilisés pour les besoins du projet.

J'ai également appris à faire un peu de bash et je me suis légèrement amélioré en python. Ce projet m'a aussi permis d'apprendre de nouvelles fonctionnalités en termes de CSS et Javascript, pour améliorer mes sites à l'avenir. De plus, j'ai pu développer ma capacité à expliquer mes réalisations techniques à des personnes n'étant pas du même domaine que le mien, étant donné que tous mes projets précédents étaient dans le seul cadre de l'ISEN.

h) David

Ce projet aura été enrichissant aussi bien d'un point de vue technique que d'un point de vue relationnel. Les ateliers Co-elab nous ont apporté des nouveaux outils de management, et les espaces Adicode sont un lieu agréable pour les projets de groupe. Pour la partie technique, je connaissais déjà les outils avec lesquels nous avons travaillé. Ce projet m'a donc permis d'approfondir mes compétences dans les domaines du bash linux, du traitement d'images en python, et du responsive en HTML/CSS. Des recherches poussées sur l'organisation de l'imagerie satellite à l'échelle mondiale m'ont également apporté de nouvelles connaissances en cartographie, un domaine qui m'était jusqu'alors inconnu.

i) Antoine

Lors de ce projet Co-Elab, j'ai pu participer à des activités qui ont permis d'enrichir ma compréhension du travail de groupe. L'assertivité et l'assiduité sont les valeurs les plus importantes dans ce type d'exercice. Organiser le travail est très certainement une chose primordiale au bon déroulement du projet. La partie informatique a permis de renforcer grandement mes connaissances dans le domaine du codage notamment en JavaScript, en Python, en PHP, en CSS, en HTML et en bash pour le réseau. J'ai appris aussi au cours de ce projet, beaucoup de notion sur l'agriculture et plus particulièrement sur les couverts végétaux. Pour finir, le traitement des images et une discipline particulièrement précise, qui demande beaucoup de temps et de réflexion. La compréhension du montage d'une start-up a été essentielle et fût une découverte pour moi.

4. Conclusion

Le projet s'est bien déroulé dans une très bonne ambiance. Le fait que tous les membres de l'équipe n'aient pas le même rythme sur le projet a été une contrainte. Cependant, grâce à au OneDrive et à Facebook, nous avons su communiquer de façon efficace. Le travail a été réparti de façon homogène et nous avons organisé des réunions pour partager l'avancée de chacun. Nous n'avons pas rencontré de problème important et nous avons su rebondir face aux imprévus. Ce projet a été bénéfique pour chaque personne du groupe en organisation, gestion de projet. Ainsi tout le monde a su acquérir de nouvelles compétences utilisables dans un futur professionnel.

ETUDE DE MARCHE

1. Veille concurrentielle

1.1. Monde

De très nombreuses entreprises de par le monde se sont penchées sur les possibilités qu'offrent les nouvelles technologies dans le domaine agricole. En fonction des besoins et des capacités de chaque pays, ces entreprises ont modelé des services pensés pour assister au mieux les agriculteurs. Cette étude de marché présentera les principaux acteurs du "smart-farming" et leurs spécificités.

Bien que la démocratisation des couverts végétaux soit relativement récente, elle a déjà lieu dans les pays en voie de développement, qui adaptent leurs couverts en fonction des problématiques qu'ils rencontrent.

a) *Le conseil en « smart farming »*

- Cropio

Cropio est un système de management et de gestion de productivité des cultures, qui facilite le contrôle à distance des terres agricoles. Il permet à ses utilisateurs de prévoir et d'appliquer efficacement des opérations agricoles. C'est aussi une application mobile. En cas de ciel nuageux, l'utilisateur peut utiliser ses propres photos et les uploader sur cropio afin d'obtenir son index végétal.

Destiné avant tout aux agriculteurs, Cropio propose une large gamme de services : Alertes automatiques, plans quotidiens, pesage des récoltes, tenues des registres, travail horaire, progrès des travaux agricoles, configuration de capteurs... Ce qui en fait une application très complète. (Cropio, 2017)



Figure 4- Exemple du tableau de bord proposé par Cropio (*iCropio*)

- **DigitalGlobe**

DigitalGlobe est une société américaine spécialisée dans l'imagerie spatiale. Elle propose également un service en ligne proposant différents services pour l'agronomie : Informations sur la vigueur des plantes, l'humidité des sols et le niveau de nutriments présents dans le sol.

Ils permettent aussi de détecter des maladies grâce à leur imagerie multi spectrale. Cela permet d'effectuer un traitement localisé avant que l'infection ne se propage. Ils peuvent aider à irriguer efficacement en indiquant la quantité précise d'eau utilisée par les plantes. Ainsi l'irrigation n'est plus planifiée uniquement en prévoyant les précipitations. (DigitalGlobe, 2017)

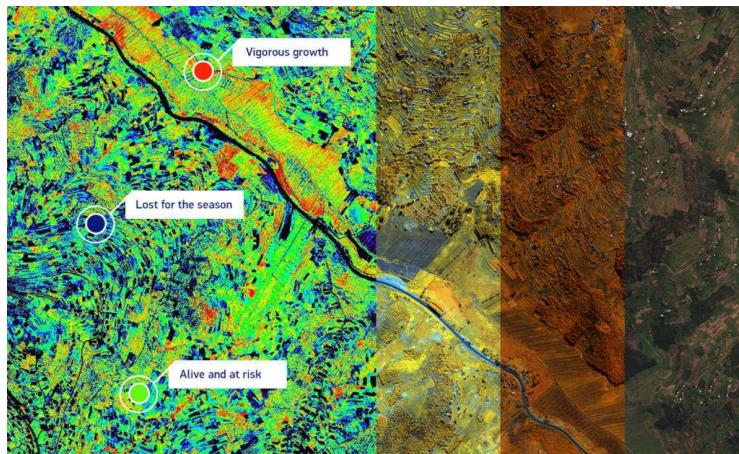


Figure 5- Exemple de filtres permettant de visualiser les maladies chez les plantes

- **Croptrak**

Croptrak est une application complète d'accompagnement. Le site permet d'obtenir de nombreuses informations concernant les plantes : Types de plantations, humidité du sol. La mesure est très précise grâce à leur API et leur système de mesure militaire. Le site permet aussi de digitaliser et simplifier le côté administratif en améliorant l'efficacité de la collection d'informations, du management, des rapports et de la qualité. (Croptrak, 2017)

- **Prospera**

Prospera est une entreprise située en Israël, qui a la particularité d'utiliser l'intelligence artificielle et le deep learning afin de faire des prédictions de productivité et des solutions d'optimisation de la productivité. Outre des conseils agronomiques, Prospera peut aussi aider à prévoir le rendement et les probabilités de maladies des récoltes futures et les manques à gagner éventuels, et ainsi diriger l'agriculteur vers des efforts agronomiques (pesticides, type d'espèces) qui présenteront moins de risques. Ce service utilise à la fois des drones, des satellites, et des caméras qu'il est possible d'installer aux abords des champs afin d'obtenir des informations sur la densité et la qualité des cultures.

Prospera permet également d'enregistrer les travaux effectués sur les champs et les mettre en relation avec les performances, afin de connaître les pratiques agronomiques les plus efficaces. (Prospera, 2017)

- **Agribotix**

Agribotix est à la fois un constructeur de Drone, et un éditeur de logiciel d'imagerie et d'analyse destiné à l'agriculture de précision. Leur drone est équipé de capteurs thermiques et infrarouges qui collectent les informations sur les cultures. Le logiciel décrypte ces images et propose une cartographie aisément lisible. Ce service a plusieurs utilités : Répartition précise des engrains aux endroits voulu, identification précoce des problèmes et maladies rencontrées par les cultures, analyse en direct des effets des conditions climatiques. (Agribotix, 2017)



Figure 6- Drone low cost proposé par Agribotix

b) *Les alternatives gratuites*

Outre ces applications payantes, il existe des services mis en place gratuitement par des états américains, afin de promouvoir l'utilisation des couverts végétaux.

Ainsi, le Natural Ressources Conservation Service de l' Illinois a mis à disposition des agriculteurs un tableau Excel permettant de mesurer les gains/dépenses liées à l'installation d'un couvert végétal. (NRCS, 2017)

On y entre les couts en termes de matériel, travail, essence etc... Ainsi que le cout du couvert végétal, on peut par la suite renseigner les gains en fertilité, réduction de l'érosion etc. Il est aussi possible de créer des scénarios afin d'avoir une idée de ce que l'installation d'un couvert végétal pourrait potentiellement rapporter.

Il existe aussi des services donnant des conseils sur la sélection des espèces de couverts végétaux. Ces services nous permettent de renseigner la rotation de culture, les objectifs espérés (retenir l'azote, décompacter le sol), ainsi que notre budget. L'inconvénient de ces services est qu'ils sont rarement indépendants et appartiennent à des entreprises commercialisant des semences. Ainsi, les semences conseillées sont souvent celles proposées par l'entreprise.

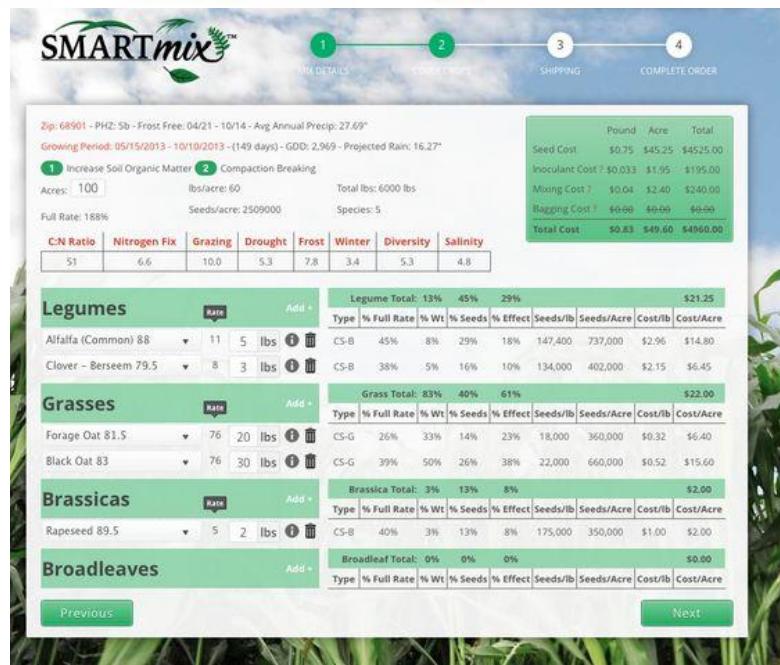


Figure 7- Exemple de conseil donné par Smartmix

c) Les couverts végétaux dans les pays en cours de développement

1. Afrique

En Afrique, les couverts végétaux sont utilisés en fonction de nombreux paramètres autre que leurs propriétés agronomiques : Ils sont souvent aussi sources de protéines afin de servir de nourriture, fournissent du fourrage qui est très important en période de sécheresse, doivent être facile à entretenir sans machines etc..

Exemples :

Mali : Gliricidia Sepium. C'est un grand arbre pouvant mesurer jusqu'à 15 mètres.



Figure 8- Couvert végétal en Afrique

Avantages :

- Crée de l'ombre pour protéger les cultures.
- Maintient le carbone
- Les fleurs sont comestibles pour l'homme
- Les feuilles fertilisent le sol aussi efficacement que l'engrais de vache.
- Produit du fourrage pour le bétail.
- Les agriculteurs peuvent revendre les graines qui ont beaucoup de valeur (de 5 à 10 \$ / kg) ce qui leur apporte une source de revenu supplémentaire et permet de diffuser encore plus l'utilisation de ce couvert.

Rwanda : Lablab Purpureum. C'est une espèce de haricot plantée pour maintenir l'humidité du sol des champs de banane durant la saison sèche. De plus, les haricots sont comestibles et riches en protéines.

Zambie : Cajanus Cajan : Une variété de pois qui peut être coupée court au niveau du sol. Ainsi après quelques années elle a seulement la taille d'un petit buisson et peut cohabiter avec du Maïs, mais elle a un réseau racinaire développé ce qui la rend très résistante aux sécheresses.

2. Brésil

Au Brésil, les surfaces en non-travail du sol couvrent 25,5 millions d'ha en 2005-2006, soit près de la moitié de la surface en cultures annuelles. Le pays est en avance en ce qui concerne l'emploi de couverts végétaux destinés à améliorer la structure du sol et à l'enrichir en carbone et azote.

Le Brésil est un des rares pays au monde où le semis direct est adopté par des petits paysans, 100 000 pratiquant à présent ce système. Les industries du machinisme agricole ont innové et permis ce rapide développement, elles exportent à présent dans le reste du monde des équipements adaptés soit à la traction mécanique, soit à la culture manuelle ou attelée.

Aides publiques : Depuis 2010 le semis direct sous couvert végétal bénéficie du soutien financier du Ministère de l'Agriculture à travers des prêts à taux bonifiés.

L'aide s'inscrit dans le programme Agricultura de Baixo Carbono (ABC) qui vise à séquestrer du carbone tout en accroissant la productivité agricole. Le budget du programme ABC s'élève à deux milliards de réais (Brésil, 2017). Ainsi l'ambition est d'étendre au niveau national la surface en semis direct sous couvert de 25 millions d'hectares en 2005 à 33 millions d'hectares en 2020, notamment par la restauration des pâturages dégradés.

1.2. Europe

a) Le conseil en « smart farming »

- Vista

Cette entreprise allemande est spécialisée dans l'utilisation de la télédétection pour les secteurs de l'hydrologie, de l'agriculture, et de l'environnement. Vista propose un service appelé « TalkingFields » qui a pour but d'améliorer la cartographie des sols, d'anticiper les risques et d'imaginer des moyens de protection des cultures, d'estimer les rendements et de faire une évaluation économique en fonction des stratégies mises en place.

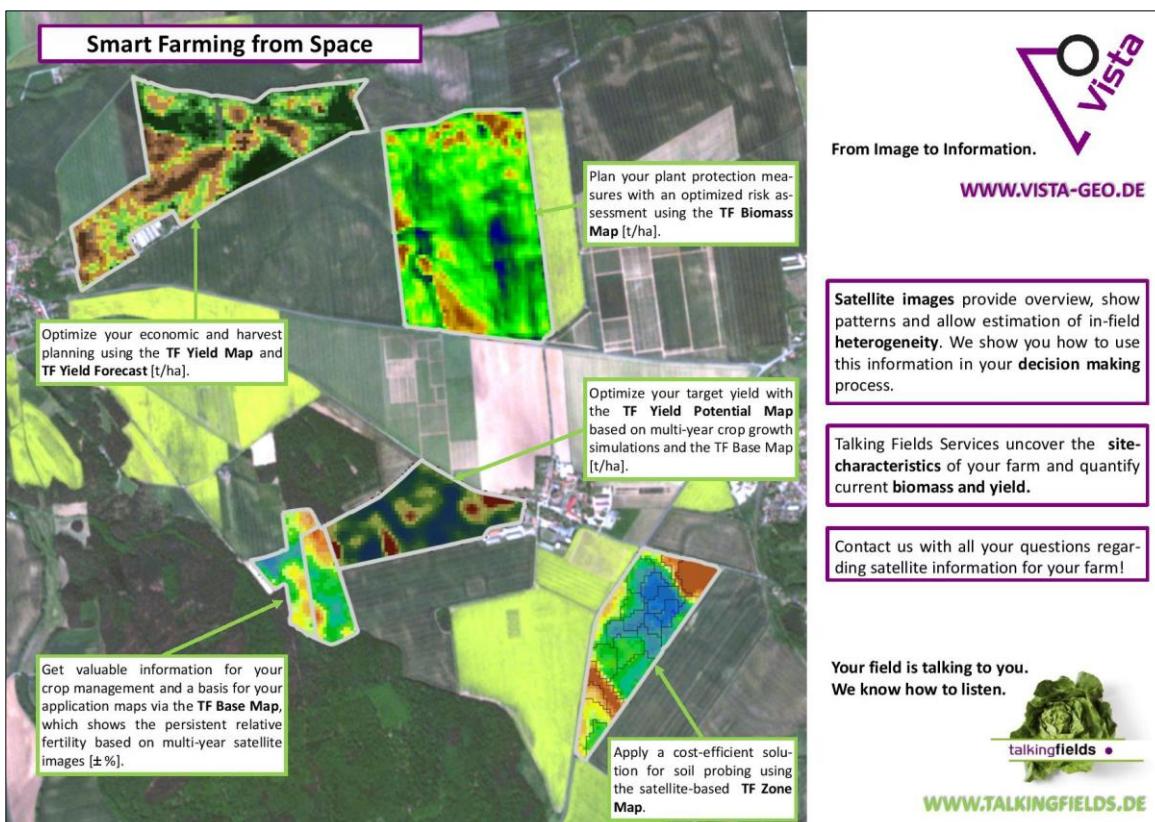


Figure 9- Plaquette illustratrice du service Talkingfields (VISTA)

Le concept de TalkingFields est le suivant : l'agriculteur a recours à un des services proposés par Talkingfields pour une zone particulière de son exploitation qui est localisée grâce aux technologies de navigation. Le fournisseur de conseils, Vista, basée sur les informations de navigation et les observations de la Terre, couplées avec un modèle, sélectionne les produits qui aideront l'agriculteur dans ses décisions. L'agriculteur s'appuie sur le produit sélectionné, son expérience, sur les informations de navigation et réalise ainsi les actions nécessaires aux endroits ciblés de son exploitation. Ainsi, chaque zone de son champ reçoit un traitement particulier, réduisant ainsi ses coûts et optimisant son rendement final.

Pour cela, l'entreprise utilise le système GNSS (Global Navigation Satellite System) et travaille avec PC-Agrar, une entreprise allemande spécialisée dans le développement de logiciels de « farm management », et avec l'université Louis-et-Maximilien de Munich qui développe les modèles de production agricole.

Cette entreprise n'est pas positionnée directement sur le marché des couverts végétaux mais propose un ensemble de conseils personnalisés très complet. Nous pouvons imaginer qu'elle se positionnerait sur ce marché si celui-ci venait à se développer. (EUROPEAN SPACE AGENCY, 2014) (VISTA, 2017)

- Farmfacts

Farmfacts est une entreprise allemande spécialisée dans le développement de logiciels agricoles. Ainsi, ce développeur de logiciels est un concurrent indirect qui pourrait se transformer en "partenaire" pour l'exploitation des données et la mise en place d'un logiciel pour accompagner les agriculteurs sur la gestion de leur couverts végétaux.

Les logiciels développés par Farmfacts pour aider les agriculteurs offrent plusieurs services :

- Gestion de l'irrigation avec conseils (en fonction de la météo locale et des caractéristiques de l'exploitation)
- La station météo FarmFacts pour gérer ses propres données météo (historique, prévisions etc. ...)
- Système de tracking GPS en direct
- Gestion des implantations de nitrogène de manière hétérogène en fonction des besoins

Un des logiciels phare de Farmfacts est NEXT Farming. Ce logiciel permet aux agriculteurs de gérer leur exploitation en autonomie en planifiant les prochaines cultures en se basant sur une base de données complète. Pour chacune de ses parcelles, l'agriculteur obtient donc des indicateurs qui aiguillent ses choix.

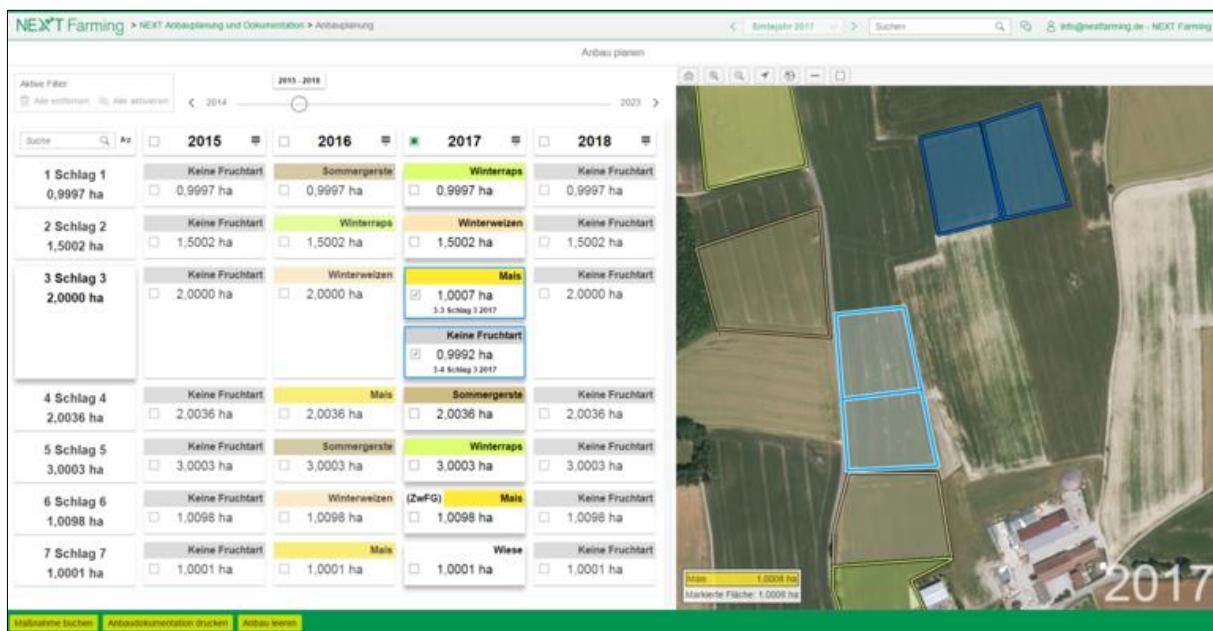


Figure 10- Illustration du logiciel NEXT Farming (Farmfacts)

De plus, Farmfacts propose un service d'échantillonnage du sol avec un accès sécurisé à l'historique de ces données ce qui permet aux agriculteurs une visibilité sur l'évolution dans le temps.

Encore une fois, ce service pourrait être intéressant à coupler aux données satellites afin d'obtenir des prévisions fiables pour le sol des exploitations. (FARMFACTS, 2017)

- WeatherSafe

WeatherSafe est une entreprise britannique spécialisée dans l'exploitation du big data dans l'agriculture. Ainsi, l'entreprise propose des données mises à jour en temps réel pour les exploiter de différentes manières :

- Cartes interactives des exploitations permettant de repérer les nuisibles et plantes malades, de cibler des zones précises, d'analyser le climat : historique et prévisions, de suivre l'évolution de la croissance des plantes, et enfin de combiner des facteurs pour identifier des plans d'actions pour améliorer le rendement de l'exploitation.
- Système de messagerie d'alerte automatique pour conditions climatiques extrêmes, risques de maladies et contaminations.
- Rapport complet sur l'évolution des plantes à chaque étape de croissance.
- Graphiques interactifs pour repérer les risques et opportunités.

De plus, WeatherSafe propose également de nombreux graphiques permettant de visualiser au mieux les données de l'exploitation et de cibler les risques et opportunités associés. En fournissant des graphiques interactifs, les agriculteurs sont ainsi capables de cibler les informations qu'ils recherchent et d'aller directement aux fondamentaux.

Ainsi, WeatherSafe utilise les données satellites pour essayer d'anticiper les risques pour l'exploitation ainsi que pour analyser les tendances mais ne les utilisent pas pour prévoir le type de cultures qui seront les plus adaptées pour l'exploitation. (WEATHERSAFE, 2017)

- AgSpace

AgSpace est également une entreprise britannique qui est spécialisée dans le développement de logiciels et d'algorithmes pour l'agriculture connectée depuis 10 ans. Leur objectif est donc de fournir des solutions web pour le marché moderne de l'agriculture connectée et ainsi faire de l'agri-business connectée en ciblant une clientèle variée : agriculteurs locaux et instituts de recherche. Ainsi, AgSpace cherche à digitaliser l'agriculture en connectant et collectant les datas, et en les sécurisant.

AgSpace fourni des données personnalisées concernant plusieurs paramètres :

- Exploitation des images de la luminosité des sols
- Analyses de sol (données chimiques et physiques)
- Prévisions météos
- Imagerie satellite (NDVI/Chlorophylle)
- Information sur les plantations de cultures
- Le type de sol
- Les niveaux de nutriments (P, K, M)
- Le niveau de pH
- Les applications de nitrogène et de sulfure
- Taux de semence

Les graphiques ci-contre sont des exemples des services proposés par AgSpace.

Pour obtenir ces graphiques, l'entreprise collecte tout d'abord les données citées précédemment. Ces données sont couplées à celles des données d'autres exploitations collectées depuis 10 ans.

Les résultats les plus pertinents sont ensuite mis sous forme de graphiques pour plus de visibilité.

La quantité de données collectées ainsi que les nombreux paramètres observés sont censées assurer des résultats fiables.

(AgSpace, 2017)

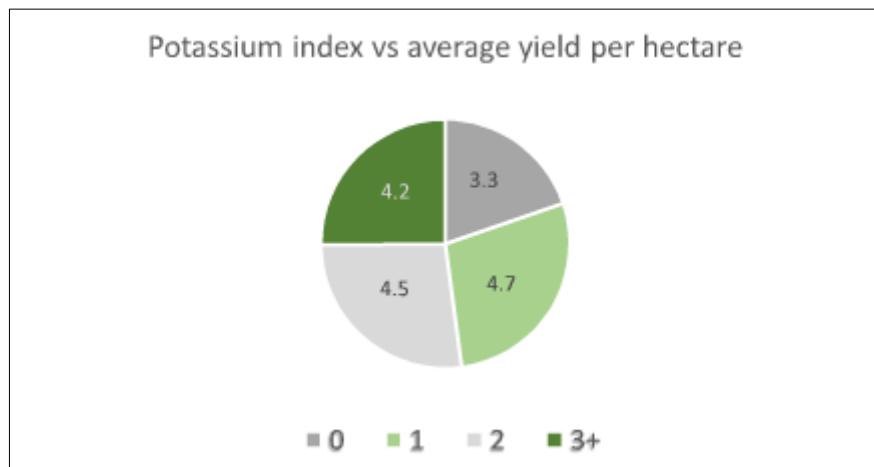


Figure 11- Exemple de graphique croisant l'indice potassium au rendement moyen

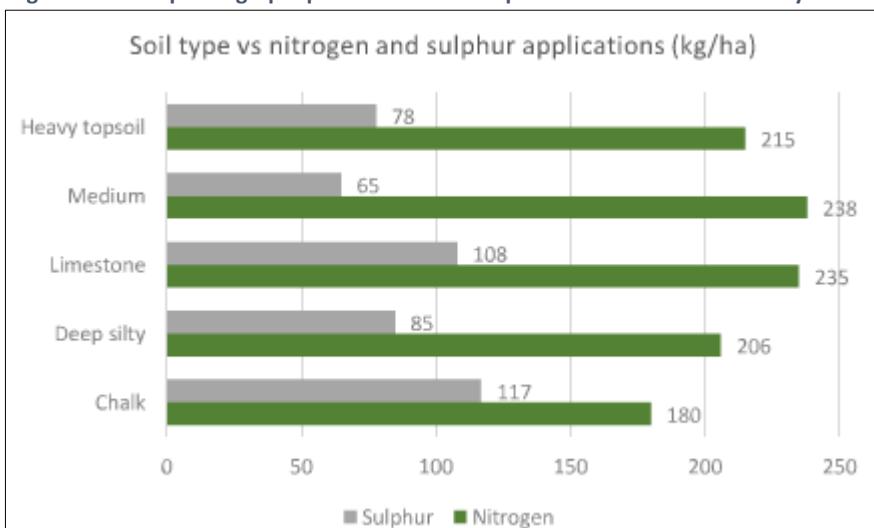


Figure 12- Exemple de graphique proposé concernant le nitrogène et le sulfure en

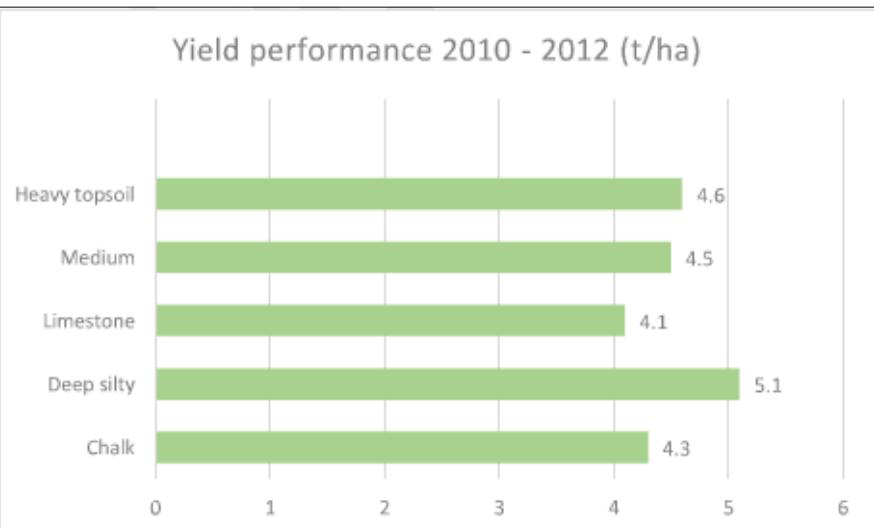


Figure 13- Exemple de l'indice de rendement (AgSpace)

- Geocledian

Geocledian est une entreprise allemande qui propose une application et un site web permettant de faciliter l'accès aux données satellites et à leur interprétation. Cette start-up est spécialisée dans les services web de traitement de données géospatiales. Le but étant de fournir des informations et conseils de qualité et à un moindre coût à partir des données ouvertes en provenance des satellites et d'autres sources.

Ainsi, Geocledian propose différents services :

- Informations basiques (parcelles colorées, variations dans les champs)
- Comparaisons du développement des parcelles entre elles)
- Historique (mapping) de l'évolution des champs
- Statistiques, indices de la végétation, santé des plantations
- Notifications automatiques

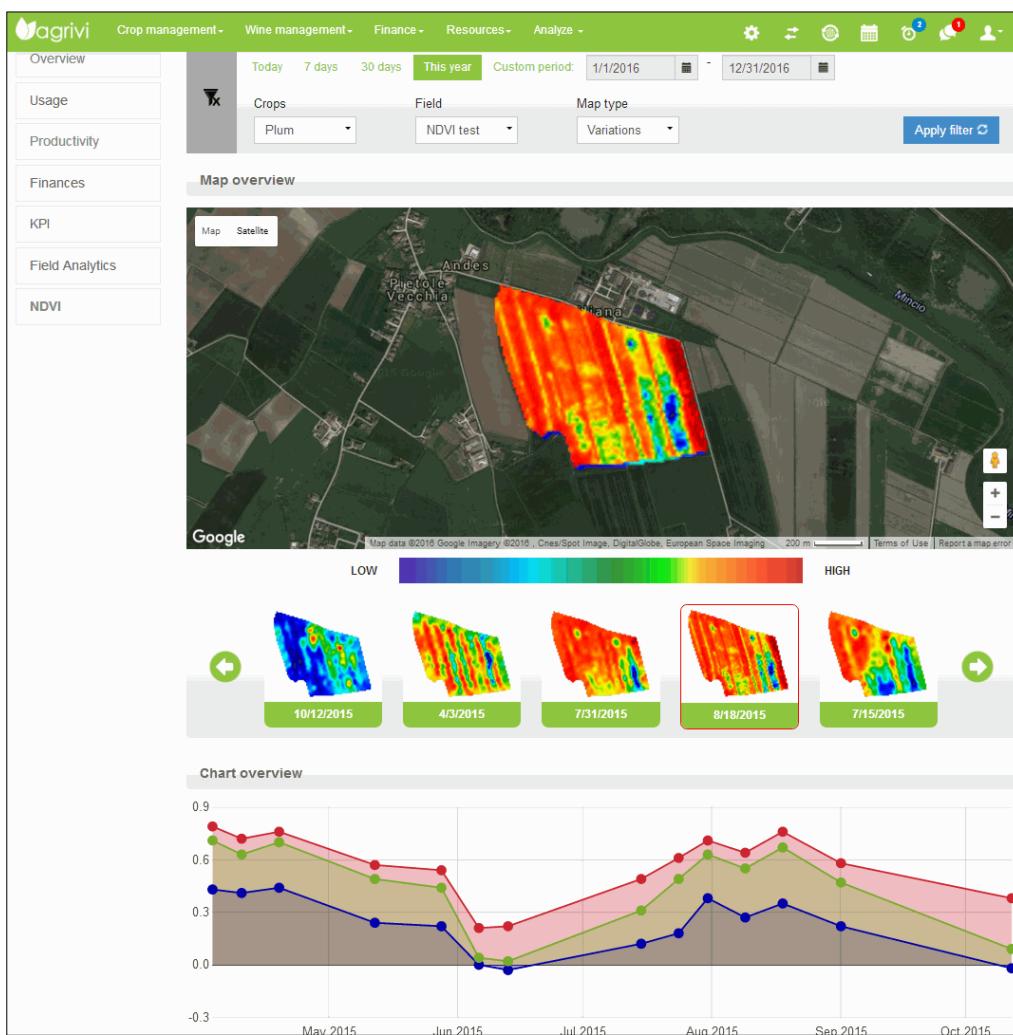


Figure 14- Aperçu du système de « management intelligent de l'exploitation » (Geocledian)

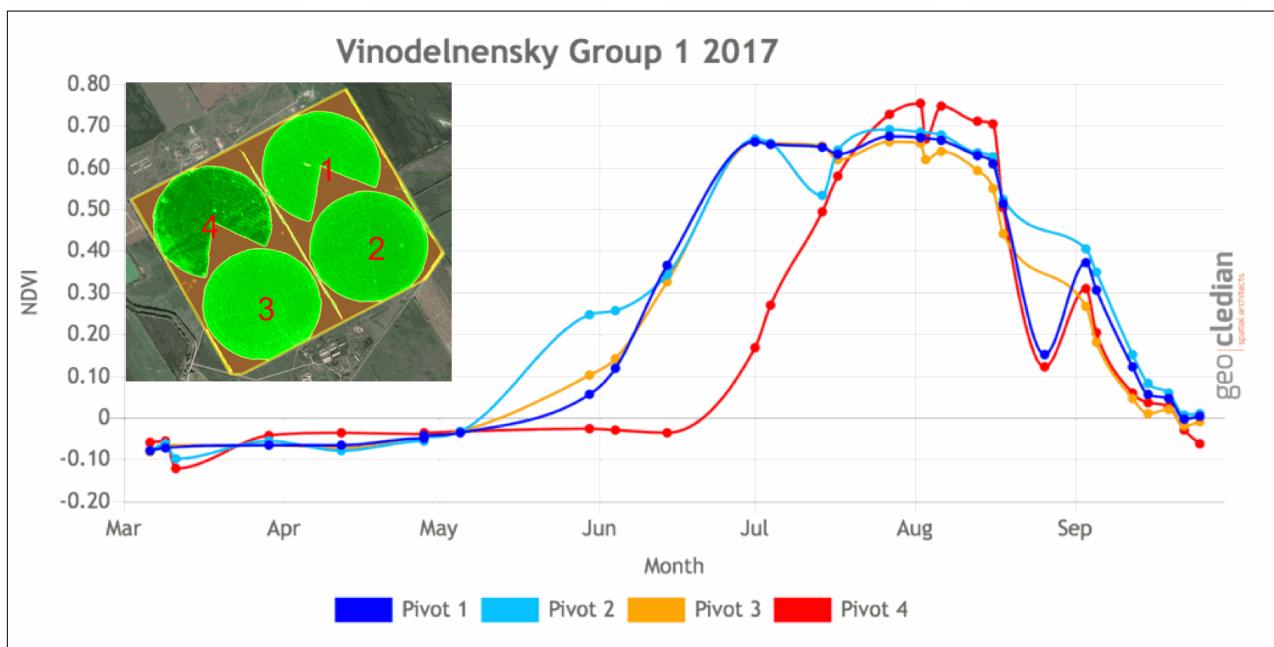


Figure 15- Evolution du taux de NDVI (Geocledian)

Geocledian propose donc de suivre en temps réels de multiples paramètres et ainsi de cibler les points faibles/menaces pour l'exploitation. La présentation visuelle proposée par Geocledian permet de rendre accessible à tous des données qui, brutes, sont très difficilement interprétables. L'entreprise promeut donc une réduction des coûts et une rentabilité améliorée grâce à ses services.

Bien qu'elle ne soit pas encore positionnée sur le marché des couverts végétaux, cette entreprise propose une analyse similaire à notre concept en proposant un conseil aux agriculteurs basé sur la gratuité des images satellites. (GEOCLEDIAN, 2017) (YOUTUBE, 2016)

b) Conclusion

Le marché européen du service en agriculture connectée est donc déjà bien investi avec de nombreux services de management d'exploitation avec des supports très visuels adaptés à tous les agriculteurs. Bien que toutes ces entreprises européennes n'aient pas investies le marché de couverts végétaux, nous pouvons imaginer que si celui-ci se révélait intéressant à l'avenir elles se positionneraient immédiatement dessus. Elles viendraient ainsi ajouter un complément à leur gamme de services proposés.

1.3. France

L'agriculture de précision est un secteur en plein essor depuis quelques années et les entreprises se tournant vers ce secteur sont de plus en plus nombreuses à émerger. Nous avons souhaité connaître les entreprises françaises portant sur l'agriculture de précision et/ou les couverts végétaux, afin de savoir si une forte concurrence était présente.

a) *Les entreprises françaises en agriculture de précision*

- **FARMSTAR**

FARMSTAR est l'entreprise qui fournit un service d'agriculture de précision la plus connue en France. Ce service existe depuis 2002. Aujourd'hui, près de 18 000 agriculteurs utilisent FARMSTAR.

FARMSTAR permet de faire des économies d'engrais et de produits phytosanitaires en ne les apportant qu'aux endroits où ils sont nécessaires. Cela permet d'économiser en moyenne 10 à 20 euros par hectare et d'obtenir de meilleurs rendements.

Grace aux satellites, aux avions et aux drones, FARMSTAR fournit des données directement exploitables sur les parcelles des agriculteurs. Les conseils sont fournis sous forme de cartes de préconisation avec modulation intra-parcellaire. Les agriculteurs reçoivent leurs cartes via le portail web FARMSTAR. Ils peuvent ensuite les introduire dans la console de leur tracteur et le laisser, grâce au GPS, délivrer la bonne dose de produit au bon endroit. L'épandage peut aussi se faire manuellement grâce à une carte de préconisation simplifiée.

Astrium GEO-Information services s'occupe de traiter les images satellites et Arvalis - Institut du végétal et Terres Inovia interprètent les images traitées en conseils à l'aide d'algorithmes agronomiques. On peut alors connaître les caractéristiques biophysiques des plantes comme la biomasse ou la teneur en chlorophylle ou encore être prévenu des maladies. (AIRBUS, ARVALIS, TERRE INOVIA, s.d.) (PLANÈTE SCIENCES MIDI PYRENEES, s.d.) (DECOURT, 2017)

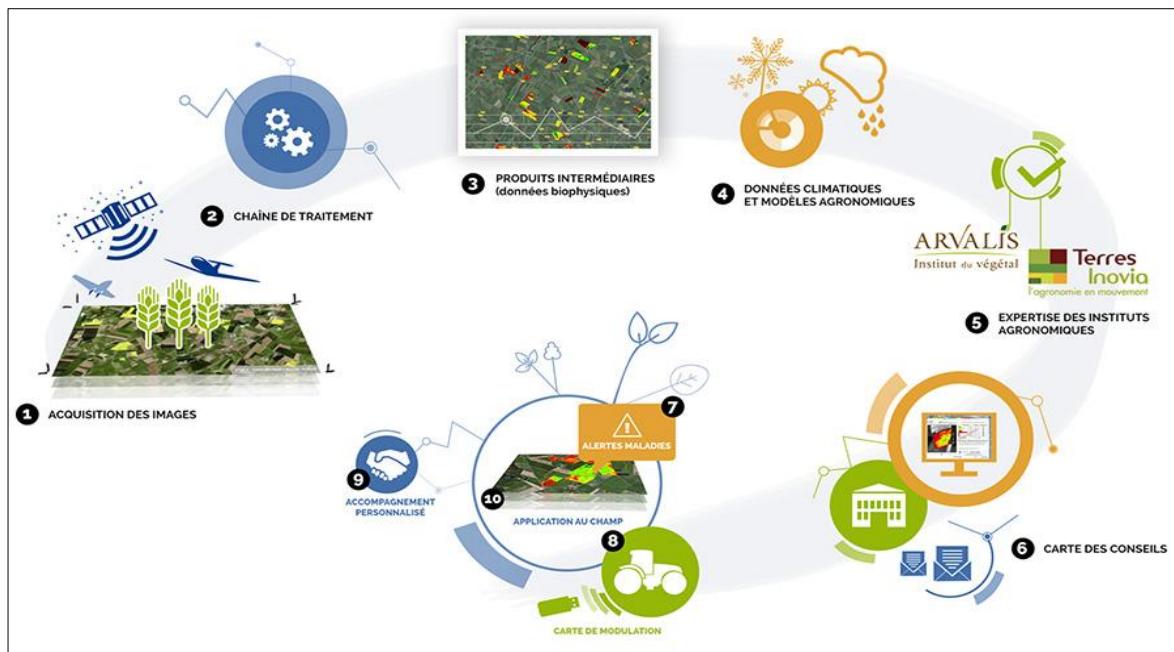


Figure 16- Mode de fonctionnement FARMSTAR (farmstar-conseil.fr)

- AIRINOV

AIRINOV est le leader du drone agricole. Ses drones permettent de survoler les parcelles avec une précision jusqu'à 5 cm par pixel afin de connaître les indicateurs agronomiques du champ au mètre près. 8000 agriculteurs utilisent la technologie AIRINOV.

Le drone fournit des informations sur l'état de santé des plantes et leur besoin en engrais. Les indicateurs sont le pilotage de l'azote, les maladies, le stress hybride, la densité (taux de levée), l'estimation de la date de floraison et le cycle végétatif. Pour le blé, l'orge, le colza et le maïs, le drone peut relever pendant son vol la biomasse, la LAI (densité foliaire) et le taux de chlorophylle.

Tout comme FARMSTAR, AIRINOV conseille les agriculteurs sur les apports d'intrants et le conseil est fourni sous forme de cartes NDVI et de zonage. Ces cartographies sont compatibles avec la plupart des GPS agricoles. (AIRINOV, 2016)

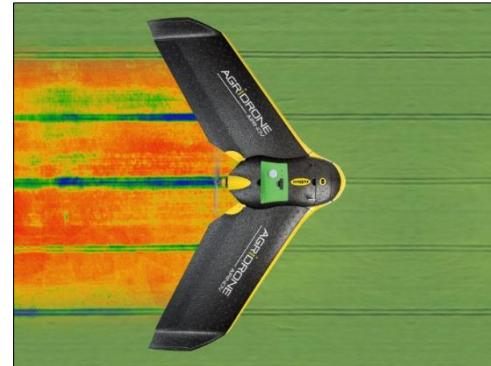


Figure 17-Drone AIRINOV
(campagnesetenvironnement.fr)

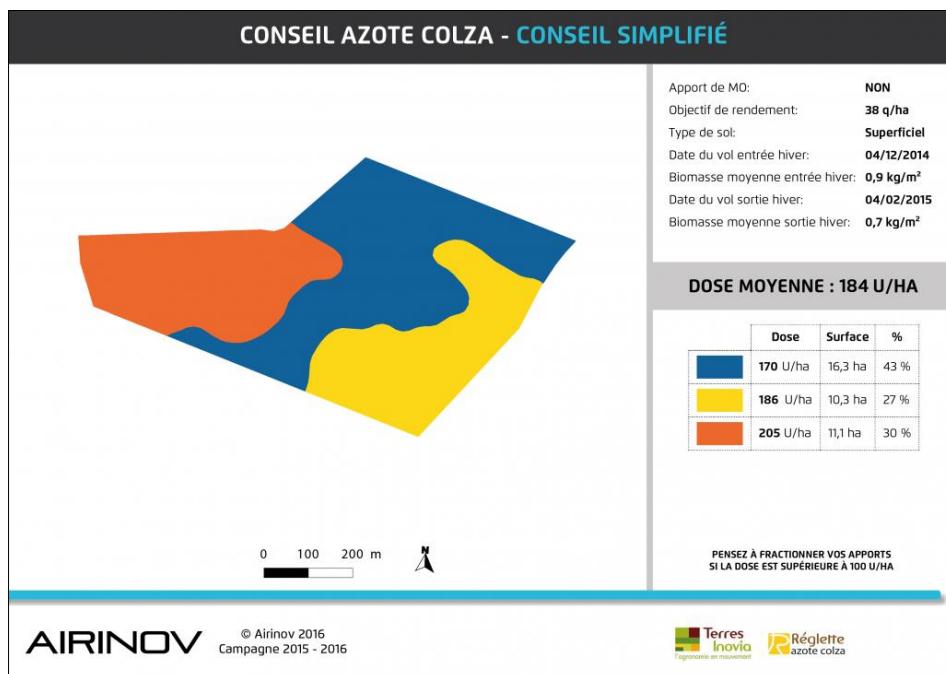


Figure 18- Cartographie conseil azote (airinov.fr)

- CoRHIZE

CoRHIZE est une entreprise qui apporte aux agriculteurs des services d'appui terrain, des équipements intelligents de contrôle et d'aide à la décision. Elle fournit des conseils sur l'irrigation, le climat, les insectes, les maladies et les intrants.

L'entreprise fournit des cartes NDVI visualisant la variabilité intra parcellaire grâce à des capteurs embarqués. Elle utilise également des satellites qui analysent le couvert végétal en cours de cycle. Cela permet aux agriculteurs d'améliorer leurs rendements en agissant sur la structure du sol, les équilibres chimiques et biologiques, le salissement, les ravageurs, les maladies ou encore les problèmes d'irrigation. (CORHIZE, s.d.)

- **Be Api**

Tout comme les entreprises précédentes, Be Api fournit un diagnostic intra-parcellaire et de l'aide à la décision.

Tout d'abord un conseiller Be Api vérifie que l'agriculteur possède les bons équipements pour moduler. Il le conseille s'il doit investir. Ensuite une carte de prélèvements est réalisée à partir de photographies aériennes. Les prélèvements de terre sont réalisés par Be Api à l'aide d'un GPS sur un quad. Les teneurs en P_2O_5 , K_2O , MgO , CaO et le pH sont relevées. Enfin, la coopérative restitue 5 cartes de fertilité (une pour chaque élément) qui conseille sur les besoins en engrangis. De nouvelles cartes sont fournies annuellement sur une période de 10 ans.

Be Api permet également de moduler les semis en fonction des objectifs de rendement et de moduler les doses d'azote et de soufre. Des cartes de végétation, d'aventices ou d'accidents peuvent également être fournies par drone. (BE API, s.d.)

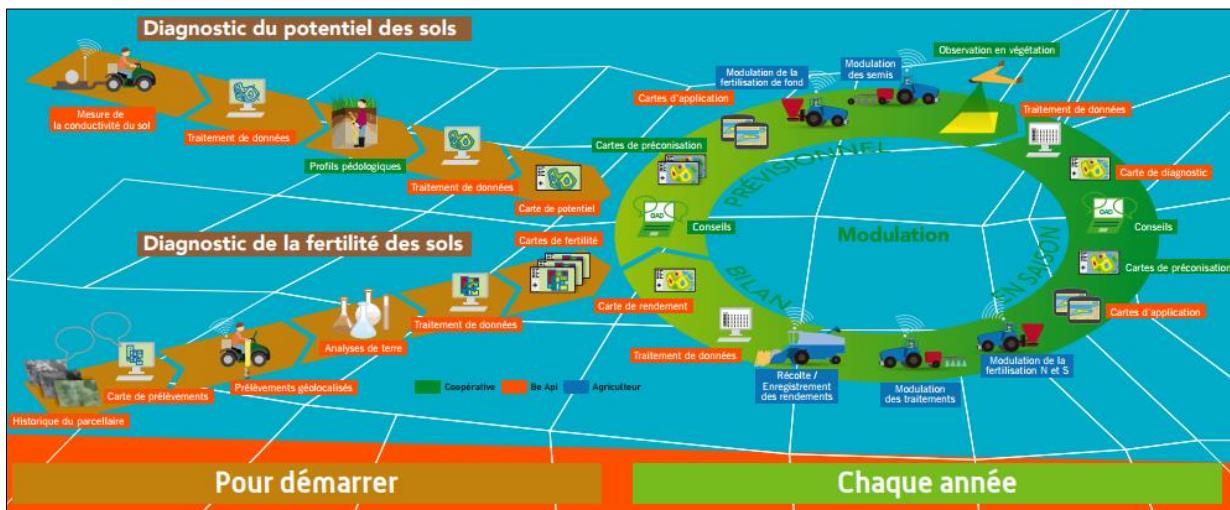


Figure 19-La démarche be Api (BE API, s.d.)

- **Itk**

Itk accompagne les agriculteurs et les conseille en leur fournissant l'état de leurs cultures, les prévisions de la croissance et du rendement, leurs besoins en eau, engrangis et produits de protection. L'entreprise fournit des solutions pour la viticulture, les grandes cultures et les élevages. Elle accompagne plus d'un million d'hectares et 300 000 vaches dans le monde. (ITK, 2017)

- **Wanaka**

Wanaka est une plateforme d'outils d'aide à la décision. Elle fournit un zonage des sols et de la modulation de semis, des conseils sur la gestion de l'azote, des risques phytosanitaires et un diagnostic des dégâts. Tout cela se fait à l'aide d'un drone.

Les cartes de modulation sont compatibles avec les GPS agricoles. (WANAKA, s.d.)

- **Weenat**

Weenat fournit des capteurs connectés que les agriculteurs doivent planter dans leurs parcelles. Ensuite ils visualisent leurs données en temps réel sur l'application et reçoivent des conseils sur les décisions à prendre. Les solutions Weenat permettent de connaître la météo de la parcelle en temps réel, d'être conseillé sur les produits phytosanitaires, les traitements ou encore l'irrigation. Tout cela permet d'avoir une meilleure connaissance des paramètres des parcelles.

Il existe 8 types de capteurs et plus de 2000 sont installés en France. (WEENAT, 2017)

- **Yara**

Yara possède plusieurs outils d'aide à la décision destinés à accompagner les agriculteurs et les techniciens dans leurs apports en fertilisants.

Yara a développé un système de capteurs optiques montés sur le toit du tracteur : Yara N-Sensor. Ces capteurs relèvent l'azote dans les céréales et le colza sur environ 50 m². Le N-Sensor envoie ensuite automatiquement une information à l'épandeur d'engrais pour moduler la dose d'azote en temps réel. L'apport d'engrais doit être préalablement défini par l'utilisateur. Il s'agit uniquement d'une modulation. Le N-Sensor est généralement livré avec un GPS, générant des cartes de biomasse et d'apport en azote. (TERRE-NET MEDIA, 2014)



Figure 20- Capteur N-Sensor (terre-net.fr)

L'entreprise possède une application mobile qui permet d'identifier les carences des cultures à l'aide de photos. L'agriculteur est ensuite conseillé pour le traitement des carences. Elle possède également une application qui évalue la biomasse et la quantité d'azote absorbée par les cultures. Pour cela, il suffit de prendre plusieurs photos de la parcelle et les informations sont envoyées via l'application suite à une analyse complète d'image. Cela permet d'appliquer la bonne dose d'azote. (YARA, s.d.)

b) Les conseillers en couverts végétaux

- **MyChlorofiltre**

MyChlorofiltre est une application permettant de choisir les couverts végétaux, de savoir comment les planter et d'estimer les bénéfices agronomiques avant destruction. L'agriculteur est conseillé tout au long de l'interculture.

L'agriculteur peut estimer la biomasse du couvert grâce à l'application. Pour cela, il doit indiquer la hauteur du couvert et prendre 3 photos. Il connaîtra ensuite la biomasse produite à l'hectare, les éléments fertilisants piégés par le couvert (azote, phosphore et potassium) et ceux potentiellement restitués à la culture suivante. (JOUFFRAY-DRILLAUD, 2017)

- **Arvalis**

Arvalis propose un site internet qui aide à choisir les espèces utilisées dans les couverts végétaux.

L'agriculteur doit indiquer son code postal, la période de semis du couvert, la culture suivante, les cultures de la rotation, la valorisation fourragère, le mode de semis, le mode de destruction souhaité et les objectifs recherchés. Après avoir répondu à toutes ces questions, le site propose une liste de couverts retenus, avec une fiche descriptive pour chaque couvert. (ARVALIS, s.d.)

- **Caussade semences**

Caussade semences a également créé un site sur le même principe. Il faut renseigner le code postal, positionner son champ sur une carte, indiquer le type de sol de la parcelle, la date de semis, la culture suivante, les bénéfices recherchés, le type de semis et le mode de destruction. Une liste d'espèces est ensuite fournie avec les doses de semis et des fiches techniques. (CAUSSADE SEMENCES, s.d.)

c) Conclusion

La liste des entreprises françaises ci-dessus n'est pas exhaustive mais regroupe les principales entreprises connues aujourd'hui. On constate qu'il existe de nombreuses entreprises dans le domaine de l'agriculture de précision et la fertilisation azotée et peu d'entreprises dans le domaine des couverts végétaux.

Cependant, il n'existe pas aujourd'hui d'entreprise qui conseille sur les couverts végétaux par modulation intra-parcellaire. Il n'y a donc pas de concurrent direct en France pour le moment.

Ces entreprises montrent que les agriculteurs sont intéressés par les outils d'aide à la décision. On peut également constater que les entreprises diversifient leurs activités en proposant plusieurs services. Il serait donc judicieux de proposer d'autres services pour se faire une place sur le marché de l'agriculture de précision.

2. Etude de marché en France

L'objectif de l'étude de marché est de savoir si un service sur les couverts végétaux intéressera les agriculteurs en France et si les clients seront assez nombreux pour que ce soit rentable.

Selon un sondage réalisé en juin 2017, 63% des agriculteurs pensent planter des couverts végétaux. Parmi eux 22% prévoient d'en planter plus qu'en 2016. Les chiffres étaient similaires au sondage de 2016. Cela peut s'expliquer en partie grâce au « paiement vert » de la PAC qui est versé aux exploitants agricoles mettant des couverts végétaux sur plus de 5% de leurs terres arables. (LA FRANCE AGRICOLE, 2017)

D'après un autre sondage, ils sont 32% à semer leurs cultures intermédiaires au semoir.

Du côté des objets agricoles connectés, ceux-ci sont en pleine expansion depuis quelques années et de plus en plus d'agriculteurs sont équipés. Une étude en 2016 a révélé que 65% des agriculteurs français comptaient s'équiper en objets connectés les prochaines années. Les agriculteurs ont conscience que le numérique peut améliorer leur travail et les aider. Seulement 12% des agriculteurs ne possèdent pas d'objet connecté aujourd'hui en France.

D'après l'étude, bientôt, 27% des agriculteurs utiliseront des drones, alors qu'ils ne sont que 9% aujourd'hui. L'imagerie satellite sera utilisée à 44%. Ces objets connectés permettront aux agriculteurs de gagner du temps, de ne pas perdre d'argent et de faciliter leur travail. (OBJETCONNECTE.COM, 2016)

79% des agriculteurs français utilisent internet, ce qui est plus que la moyenne française.

Les agriculteurs ont augmenté de 110% leur utilisation d'applications professionnelles entre 2013 et 2015. (AGRICULTURE NOUVELLE, 2017)

Beaucoup de nouveaux objets connectés voient le jour, comme par exemple des robots utilisés pour désherber ou des lunettes pour compter les grains de maïs. (LABBE, 2017)

En 2017 un drone capable de semer et d'épandre de l'engrais a vu le jour. Des tests ont été réalisés en France et en Allemagne pour semer des couverts végétaux. (LA FRANCE AGRICOLE, 2017)



Figure 21- Drone semoir (lafranceagricole.fr)

Grace aux recherches sur les entreprises existantes nous savons qu'il est possible de créer des cartes de modulation compatibles avec les GPS des tracteurs. Néanmoins, les agriculteurs auront besoin de semoirs connectés au GPS pour pouvoir réaliser la modulation intra-parcellaire simplement. Ces technologies existent aujourd'hui mais sont peu répandues. (VIMOND, 2013)

Le constructeur alsacien Kuhn a mis en place la coupure de rang par GPS sur ses semoirs monograines fin 2012. Les rangs peuvent y être coupés un à un. Les agriculteurs peuvent également moduler le dosage de semis et régler l'espacement des rangs. (TERRE-NET MEDIA, 2012)



Figure 22 : semoir monograine Kuhn (terre-net.fr)

Väderstad a également mis au point un semoir de précision nommé Tempo. Ce dernier comporte 6 ou 7 trémies de 70 litres. Il est donc capable de semer plusieurs types de graines en modulant les espacements et les densités de semis. Le semoir est connecté en Wi-Fi au Väderstad E-Control, système de contrôle sur tablette. Il fournit en temps réel le taux de semis, les espacements de rangs, la qualité de semis, les manques, les doublons etc. (VÄDERSTAD, s.d.)

Ces semoirs restent un gros investissement pour les agriculteurs et tous n'ont pas la possibilité d'en acquérir un.



Figure 23 : Väderstad E-Control (vaderstad.com)

3. Sondage

Nous avons réalisé un sondage afin de compléter l'étude de marché et pour avoir des données récentes. Ce sondage a été partagé sur des groupes et pages Facebook réunissant des agriculteurs. Ces pages comptaient en tout 130 000 membres. Nous avons récolté 280 réponses.

Le sondage permet de savoir si les agriculteurs sondés mettent des couverts végétaux et s'ils seraient intéressés par notre service.

Voici les questions posées et les réponses obtenues :

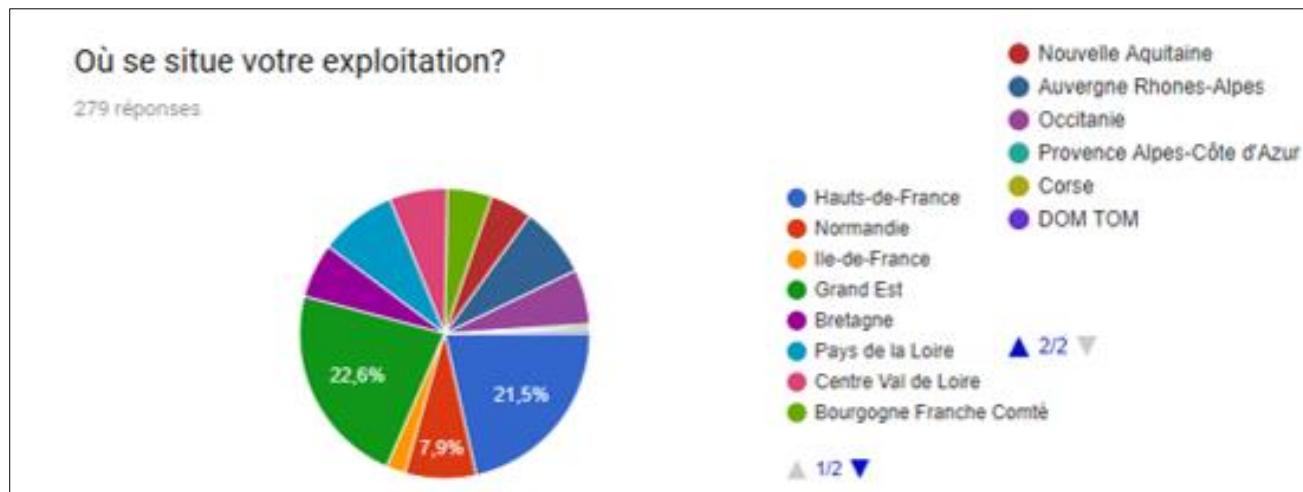


Figure 24- Situation de l'exploitation

Les agriculteurs ayant répondu à notre questionnaire viennent en majeure partie des Hauts-de-France, de Normandie et du Grand-Est, grandes régions agricoles.

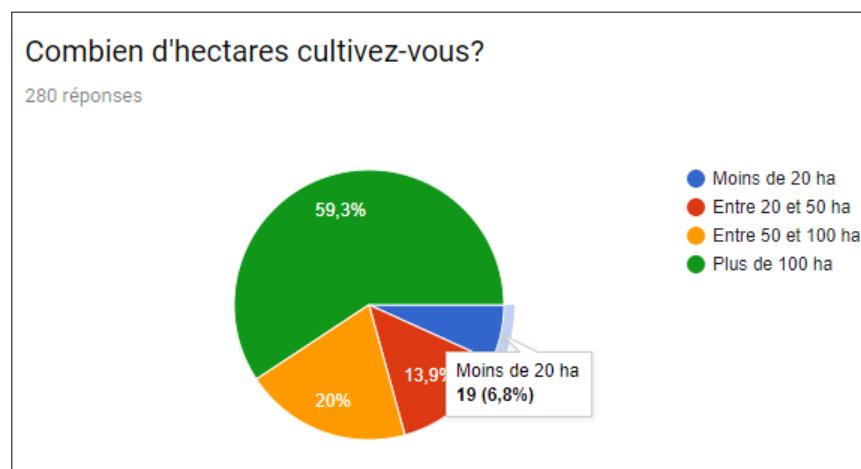


Figure 25- Nombres d'ha cultivés

Utilisez-vous des objets connectés agricoles ?

280 réponses

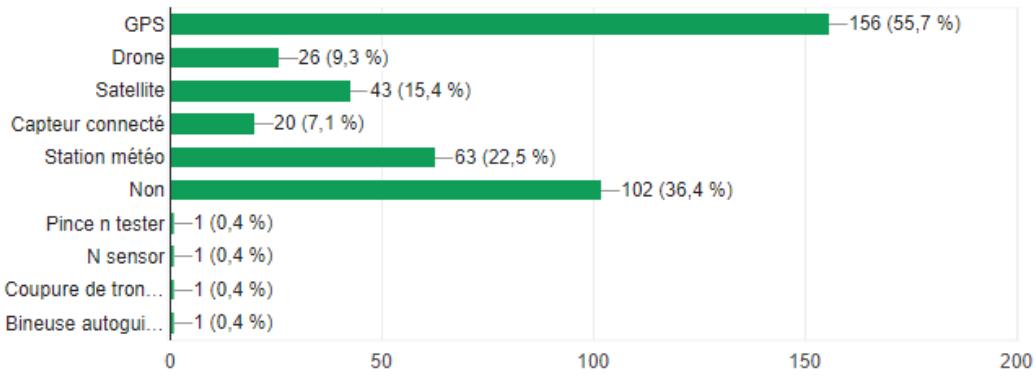


Figure 26- Utilisation d'objets connectés agricoles

En moyenne, 1 agriculteur sur 2 possède un GPS. Nous avons été étonnés du nombre d'agriculteurs utilisant déjà des satellites.

Combien d'espèces utilisez-vous dans vos mélanges de couverts végétaux?

280 réponses

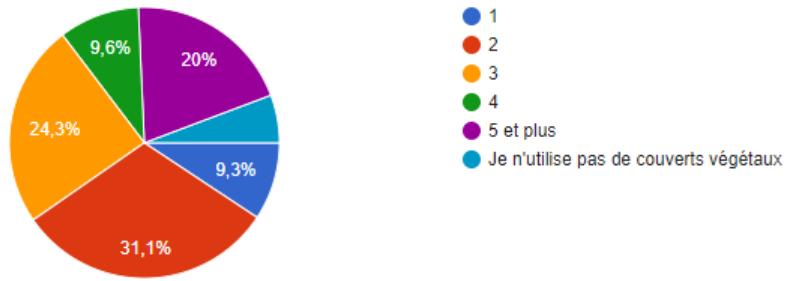


Figure 27- Nombre d'espèces utilisées dans un mélange

Seulement 5,7% des agriculteurs interrogés n'utilisent pas de couverts végétaux.

Pour vous les couverts végétaux sont :

280 réponses



Figure 28- Vision des couverts végétaux

Adaptez-vous vos couverts végétaux en fonction de l'état de votre sol?
(azote, compaction, matière organique...)

280 réponses

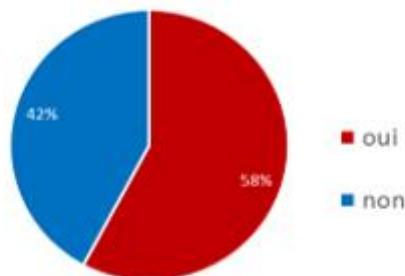


Figure 29- Couverts végétaux adaptés ou non à l'état du sol

Seriez-vous intéressé par un conseil sur la variété de couverts végétaux à semer, après une analyse de vos sols par imagerie satellite? (Le conseil serait apporté sous forme de cartographie de vos sols)

280 réponses

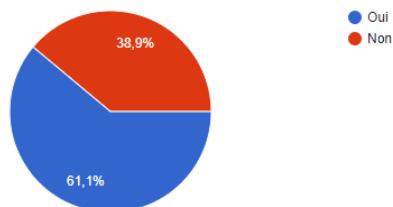


Figure 30- Intérêt sur le concept de préconisation de couverts végétaux

Combien seriez-vous prêt à payer pour un tel service?

280 réponses

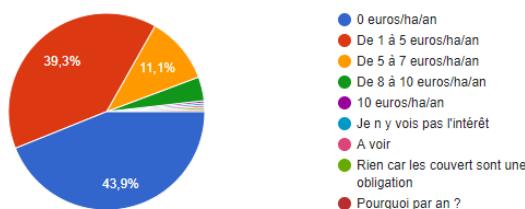


Figure 31- Prix

On constate que la plupart des agriculteurs reconnaissent que les couverts végétaux sont un avantage agronomique et seraient intéressés par un conseil pour adapter leurs couverts au sol mais qu'ils ne sont cependant pas prêts à payer pour cela.

Selon notre sondage, 171 agriculteurs sur 280 seraient intéressés par un conseil sur les couverts végétaux, soit 61%. Nous nous sommes intéressés de plus près aux agriculteurs intéressés. Nous voulions savoir quels étaient leurs profils, c'est-à-dire combien d'hectares ils cultivent, quels objets connectés possèdent-ils déjà, combien d'espèces de couverts végétaux sèment-ils et est-ce qu'ils les adaptent au sol et combien sont-ils prêts à payer.

Parmi eux voici la répartition selon les régions :

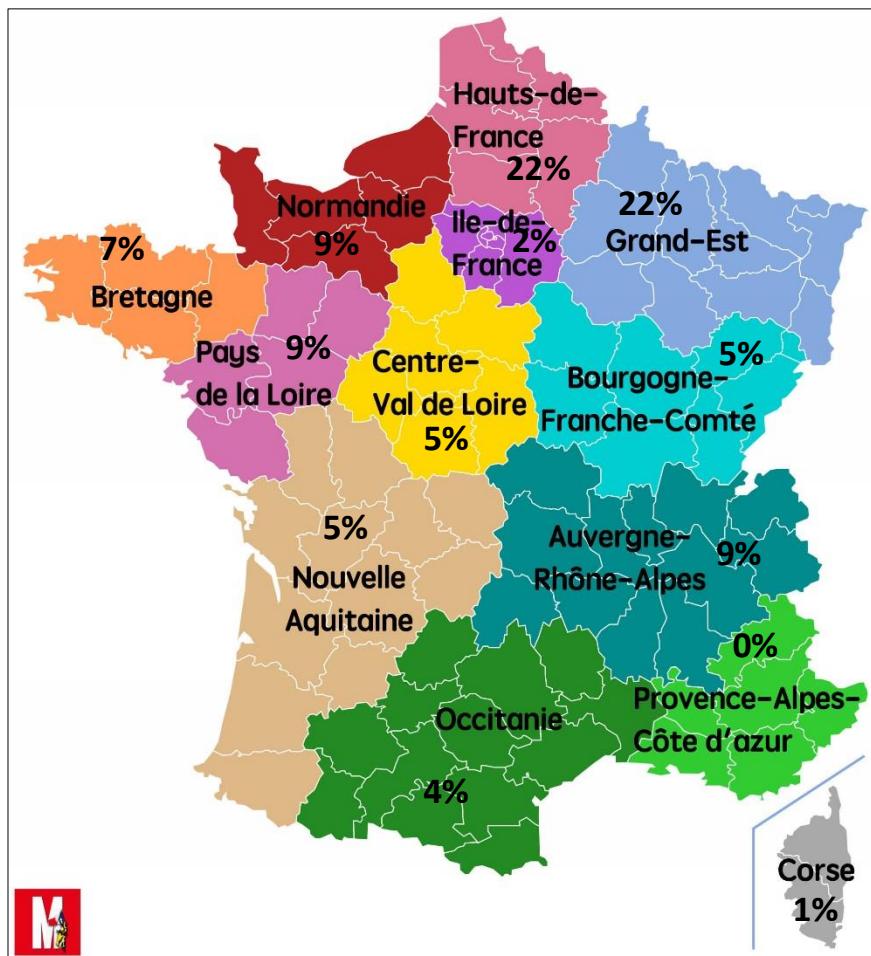


Figure 32- Répartition selon les régions

Les régions les plus intéressées sont les Hauts-de-France et le Grand-Est. Ce sont néanmoins les régions les plus représentées dans le sondage, ces chiffres sont donc relatifs.

On peut constater que plus de la moitié des agriculteurs ont des grandes exploitations et cultivent plus de cent hectares.

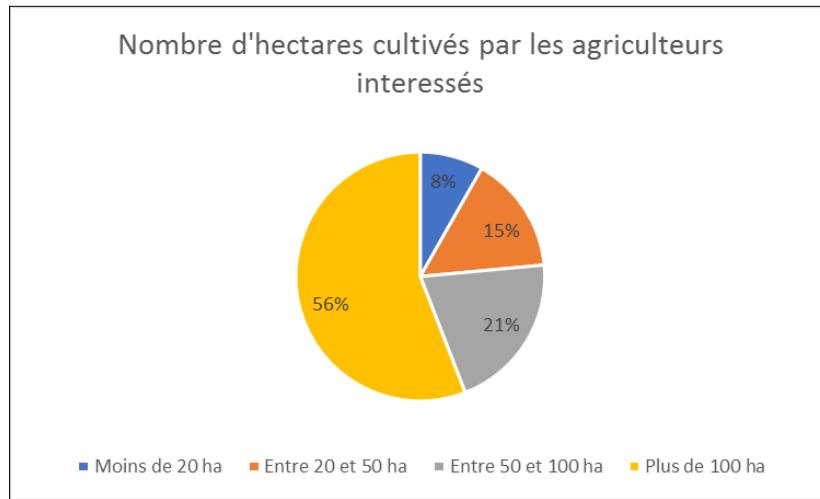


Figure 33- Nombre d'ha cultivés par les agriculteurs intéressés

Parmi les agriculteurs sondés cultivant plus de 100 hectares, 57% sont intéressés par un conseil sur les couverts. Ceux qui cultivent moins de 20 hectares sont 73% à être intéressés et ceux entre 20 et 50 hectares cultivés sont 64%. Ce service semble donc correspondre à différentes tailles d'exploitation.

De plus, 54% des agriculteurs intéressés possèdent déjà un GPS. D'autres objets connectés tels que les drones et les satellites font déjà partie de la vie de certains.

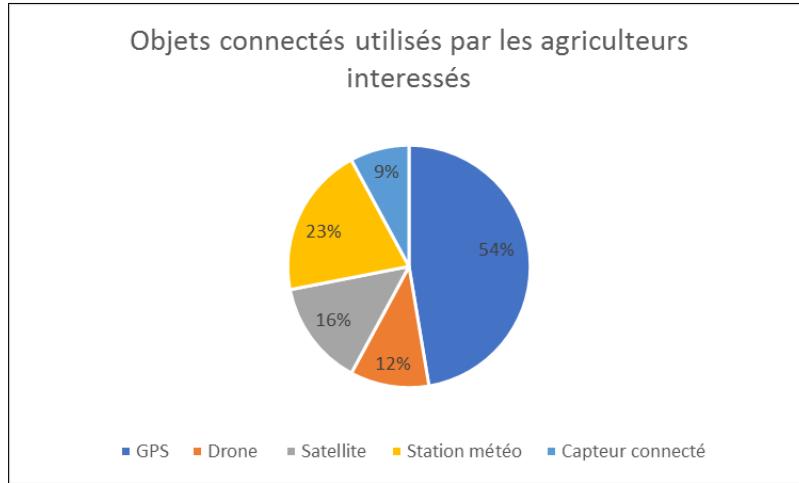


Figure 34- Objets connectés utilisés par les agriculteurs intéressés

59% des agriculteurs utilisant déjà des GPS sont intéressés par un conseil sur les couverts.

La majorité des agriculteurs intéressés utilisent 2 ou 3 espèces dans leurs couverts végétaux. Ils sont cependant nombreux à utiliser 5 espèces voire plus. Seulement 2% n'utilisent pas encore de couverts végétaux. Ce service s'adressera donc plus particulièrement aux agriculteurs qui utilisent déjà des couverts végétaux et qui sont prêts à mélanger plusieurs espèces.

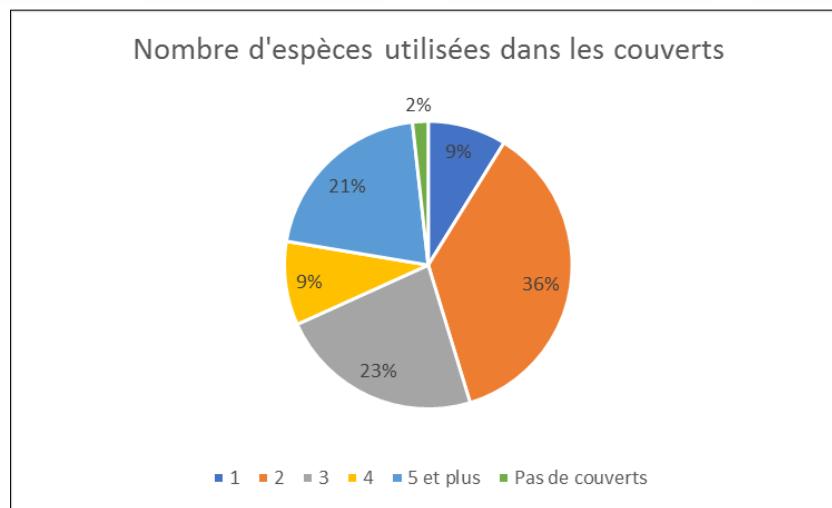


Figure 35- Nombre d'espèces utilisées

Parmi les agriculteurs qui sèment 5 espèces ou plus dans leurs couverts actuels, 62% sont intéressés.

Dans chaque région, on retrouve à peu près la même proportion de couverts adaptés au sol et de couverts non adaptés au sol, à part en Occitanie où les agriculteurs semblent tous adapter leurs couverts à leurs sols.

Le défi sera ici de convaincre les agriculteurs qui n'adaptent pas leurs couverts, des bienfaits de ces derniers. Certains ne le font peut-être pas car ils ne sont pas assez conseillés.

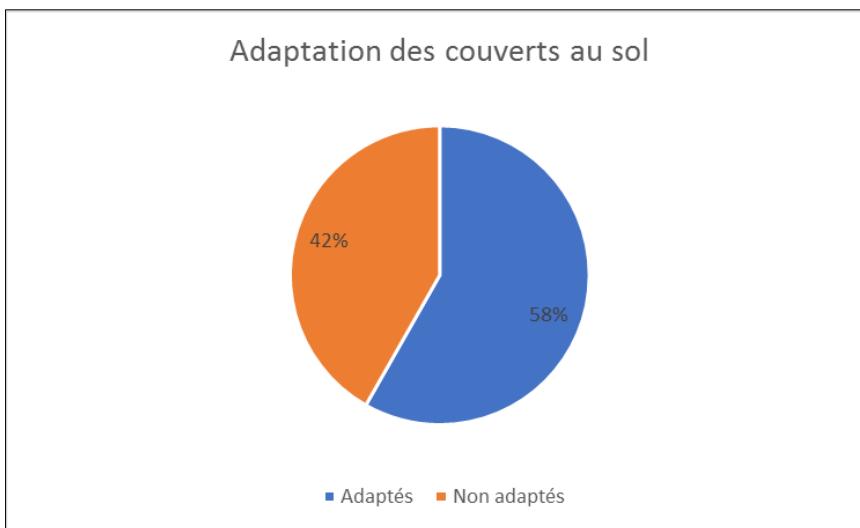


Figure 36- Adaptation des couverts au sol

On relève que parmi les agriculteurs qui adaptent les couverts végétaux à leurs sols, 62% sont intéressés par un conseil. A l'opposé, 60% des agriculteurs qui n'adaptent pas leurs couverts sont intéressés. Le critère « adaptation des couverts au sol » n'est donc pas à prendre en compte pour la recherche de clients.

Enfin, question importante dans notre étude de marché, quel prix sont prêts à payer les agriculteurs pour un tel service ?

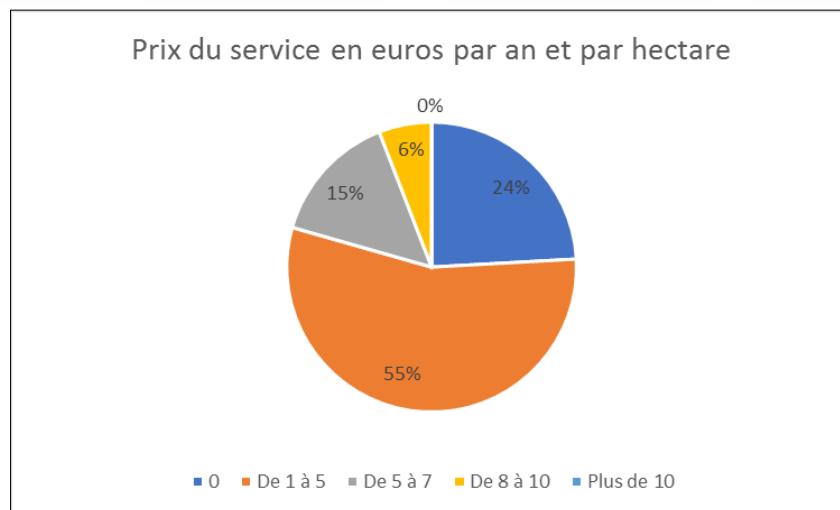


Figure 37- Prix du service

En majorité, le prix qui semblerait le plus adapté serait compris entre 1 et 5 euros par hectare et par an. C'est en tout cas ce que semblent prêts à payer les agriculteurs. On peut cependant prendre en compte le fait que les agriculteurs ayant répondu au sondage n'avaient pas connaissance de la totalité des informations sur le service (modulation intra-parcellaire, bienfaits des couverts etc) et qu'ils seraient peut-être prêts à mettre un peu plus d'argent. Cependant, le prix du service devrait rester inférieur à 7 euros par hectare et par an pour rester attractif.

Pour conclure, les clients pour un service de conseil sur les couverts végétaux par télédétection sont plutôt des agriculteurs ayant de grandes exploitations, qui possèdent déjà des GPS ou d'autres objets connectés et qui sèment déjà plusieurs espèces de couverts végétaux. Comme expliqué précédemment, le prix pour ce service devra être compris entre 1 et 7 euros par hectare et par an pour être abordable pour les agriculteurs.

Il faut cependant prendre en compte le fait que les agriculteurs sondés sont des agriculteurs qui possèdent Facebook et qu'ils ne sont pas représentatifs de tous les agriculteurs de France. De plus, les agriculteurs ayant répondu au sondage portent dans la majorité un intérêt particulier aux couverts végétaux puisqu'ils ont eu envie d'y répondre.

Nous allons effectuer une enquête en allant à la rencontre des agriculteurs sur le terrain. Nous pourrons leur exposer le projet plus en détails, discuter avec eux et relever leurs réactions. Cela permettra d'avoir des avis supplémentaires et de vérifier les observations faites grâce au sondage.

4. Enquête terrain

Nous avons réalisé une plaquette afin d'exposer notre projet aux agriculteurs que nous allons rencontrer. Celle-ci permet d'expliquer brièvement le service que nous voulons leur fournir. (**Cf. annexe 2**)

En contactant des agriculteurs pour leur rendre visite, l'un d'entre eux nous a parlé d'un évènement organisé par la chambre d'agriculture du Nord Pas de Calais sur les couverts végétaux, à Faumont. Il s'agissait d'un essai d'interculture mis en place pendant au moins 5 ans. Nous y sommes donc allés. Le champ était découpé en plusieurs parties, une avec un couvert simple une espèce (moutarde), une avec un couvert 3 espèces (avoine, vesce et trèfle) et une avec un couvert 5 espèces (avoine, vesce, trèfle, phacélie et radis). Pour chaque campagne, le rendement de la culture en place sera mesuré et la qualité analysée.

Cette visite, où une quinzaine d'agriculteurs étaient présents, nous a permis de voir que certains agriculteurs semaient des couverts par obligation mais qu'ils semblaient s'intéresser aux couverts et à leurs effets sur le sol.

L'agronome qui commentait la visite a précisé que les bienfaits des couverts végétaux sur le sol n'étaient visibles qu'après 10 voire 15 ans.

Nous avons réalisé des profils de sols pour voir la différence entre un sol couvert par de la moutarde et un sol couvert par 5 espèces. Après un an, sur le sol avec 5 espèces, la terre était moins compactée et les racines étaient plus développées. Cette visite nous a donc permis d'en savoir plus sur les couverts.

Une enquête sur le terrain permet de discuter de vive voix avec les agriculteurs, les premiers concernés par le projet, et ainsi d'avoir leur ressenti, avis et interrogations sur le sujet. L'enquête réalisée via un sondage sur internet avait l'inconvénient d'être un questionnaire « fermé ». Ainsi, les agriculteurs répondaient à des questions orientées, parfois à choix multiples, mais pouvaient difficilement développer leurs avis sur le sujet ou donner des pistes d'améliorations. De même, il y avait le risque qu'ils ne comprennent pas bien le concept et répondent donc de manière biaisée au questionnaire. L'avantage d'un entretien avec les agriculteurs permet d'une part d'expliquer clairement le concept et d'autre part de leur laisser le champ libre pour qu'ils s'expriment à propos du sujet.

Ainsi, huit entretiens directs et trois entretiens téléphoniques ont permis un retour avec une approche différente sur le concept du projet. Les entretiens comportaient des questions « fermées » (type d'activité (polyculture, élevage, ...), nombre d'hectares exploités, utilisation ou non de matériel connecté/de couverts végétaux, enclin ou non à utiliser le service etc ...) et des questions plus « ouvertes ». Ces questions « ouvertes » ont permis de recueillir un avis général sur les couverts végétaux, sur l'agriculture connectée, sur le concept et d'obtenir les forces et faiblesses du projet ainsi que des pistes d'améliorations possibles.

4.1. Les agriculteurs rencontrés personnellement

Parmi les huit agriculteurs rencontrés en personne dans la région lilloise, six font exclusivement de la polyculture et deux font également de l'élevage en complément. Tous travaillaient sur des petites exploitations (89 hectares en moyenne) et tous utilisaient des couverts végétaux qu'ils perçoivent comme un avantage agronomique plutôt qu'une contrainte. Ils étaient donc du côté des agriculteurs favorables aux couverts végétaux. Enfin, la moitié faisait partie d'une CUMA.

Concernant l'agriculture connectée, ceux-ci ne sont pas très avancés sur le sujet :

- trois ont déjà utilisés Farmstar (mais deux d'entre eux ont eu une mauvaise expérience avec et ont donc arrêté)
- trois n'utilisent pas du tout de systèmes connectés (ils n'en voient pas l'utilité pour une petite exploitation ou se débrouillent très bien sans)
- deux utilisent des systèmes GPS mais disposer de plus de matériel connecté représente un coût trop élevé pour eux.
- Aucun n'est équipé de semoir connecté (nécessaire pour la modulation des couverts végétaux sur la parcelle).

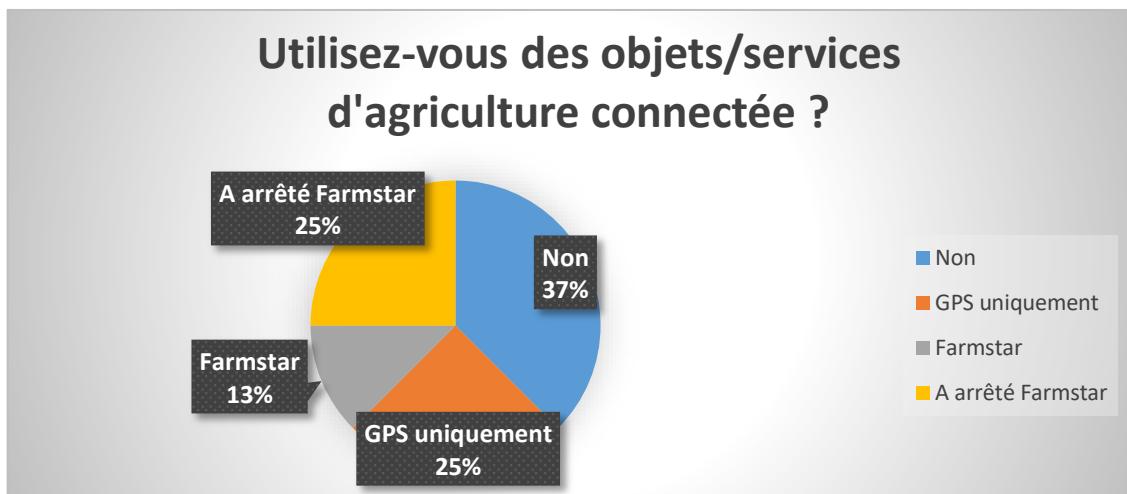


Figure 38- Utilisation d'objets/services d'agriculture connectée

Concernant le service présenté, l'idée paraît séduisante sur le papier mais les agriculteurs ont exprimé de nombreuses réserves quant à l'aboutissement fonctionnel du concept.

Ainsi, leur principal argument est la nécessité d'un semoir connecté pour pouvoir moduler les couverts végétaux. En effet, cela représente un investissement qu'ils ne peuvent assumer. De même, le coût des semences pourrait également être un frein pour les petits exploitants. Selon eux, des propriétaires de plus grandes exploitations seraient plus intéressés par ce service car il est plus facilement applicable à de grandes parcelles. En effet, moduler différentes espèces de couverts végétaux sur une petite parcelle leur semble compliqué et difficilement réalisable d'un point de vue technique.

Le fait que ce soit une start-up qui propose le service n'est pas un frein mais certains verrraient un avantage à ce que le service soit couplé à d'autres dans un « package ».

Que pensez-vous du fait que ce soit une start-up qui propose le service ?

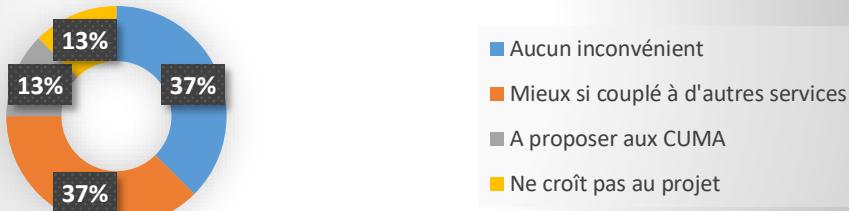


Figure 39- Vision du concept de start up

Les huit agriculteurs se disent tous prêt à essayer notre service mais à condition d'avoir le semoir adapté et des résultats de tests préalables prouvant l'efficacité du service.

Et s'ils devaient payer pour avoir accès au service (fonctionnel), ils sont prêts à investir plus que les agriculteurs ayant répondu au sondage en ligne. Ainsi ils sont quatre à estimer le prix du service entre 5 et 15€/ha/an, un monte jusqu'à 40€/ha/an si le service s'avère vraiment fonctionnel et trois ne sont pas prêt à payer pour un tel service.

Enfin, les agriculteurs ont pointé les principales forces et limites, à leurs yeux, du concept. Ce ne sont que des avis personnels mais qui sont un bon reflet de la réalité du projet.

Tableau 1- Forces et faiblesses du concept

Forces	Limites
Prestation proposée par un entrepreneur.	Nécessité d'un semoir connecté (coût trop important) et coût des semences.
Informations complémentaires sur la parcelle.	Sujet trop jeune, l'ambition de moduler les couverts est trop avancée par rapport à la réalité d'aujourd'hui.
Permettrait de corriger les défauts du sol et d'uniformiser la performance des parcelles.	Problème pour la destruction des espèces (si plusieurs espèces différentes), répartition non uniforme sur la parcelle difficilement réalisable.
	Les couverts végétaux sont parfois vus comme une contrainte plutôt qu'un avantage.
	Adapté pour les grandes exploitations mais pas pour les petites.
	Risque de devoir adapter le service aux différents types de codage sur les tracteurs et boîtiers qui les équipent.
	Pas d'étude scientifique précise qui atteste de l'efficacité des couverts végétaux.
	Disponibilité du matériel. Problème avec la commande des semences (faite en mai/juin) et pourrait ne pas être synchronisée avec l'obtention du conseil.
	Il n'y a pas de récolte en dérobé du couvert possible (si différentes espèces sont mélangées on ne peut pas les donner à manger aux vaches).

En conclusion, sur le papier les agriculteurs trouvent le concept très novateur et plein de promesses mais ils paraissent toutefois sceptiques quant à la réalisation technique. Le ressenti général est que le marché et les mentalités ne sont pas encore assez mûres pour proposer un tel service. En effet, les agriculteurs ont d'autres préoccupations pour l'instant pour investir dans un service dont les bénéfices ne sont pas encore avérés.

4.2. Les agriculteurs contactés au téléphone

Ceux contactés par téléphone ont la particularité d'être équipés en semoirs connectés, et ne devraient donc pas être freinés par le coût de l'investissement dans les machines. Ils ne font que de la polyculture et possède de plus grandes exploitations (373 hectares en moyenne). Ces trois agriculteurs ne font pas partie d'une CUMA et ont une utilisation avancée des couverts végétaux. En effet, ceux-ci réalisent systématiquement des mélanges (entre trois et cinq espèces) pour obtenir des bénéfices sur la culture suivante. Ils voient donc les couverts végétaux comme un véritable moyen d'améliorer la qualité de leur sol.

Un des trois agriculteurs utilise de nombreux objets et services d'agriculture connectée. Ainsi, il utilise le logiciel Geosis (équivalent américain de farmstar), un tracteur RTX, un semoir à céréales pour ses couverts végétaux et un semoir à deux trémies pour moduler la densité de semis sur ses cultures. Un deuxième possède seulement un semoir à trois trémies et des coupures de tronçons. Il trouve que les cartes comme celles proposées par Farmstar ne fournissent pas forcément des analyses très pertinentes. Enfin le dernier a d'autres priorités avant de s'intéresser à l'agriculture connectée. Si sur la question des couverts végétaux ils ont un profil similaire, ce n'est donc pas le cas sur l'utilisation de l'agriculture connectée.

Concernant le concept des couverts « connectés », ces agriculteurs sont emballés et voient ce projet comme une très bonne chose pour les années à venir. L'un d'entre eux propose même d'adapter ce service directement aux cultures car ce sont elles qui rapportent directement de l'argent. De plus, cela lui permettrait d'extraire des informations qui l'intéressent spécifiquement comme l'indice de compaction du sol.

De même, un autre a évoqué la possibilité de coupler ces données avec d'autres sources. Mais concernant le concept en lui-même, il pense que l'analyse et le conseil ne devraient être réalisés que tous les cinq ans afin d'avoir le temps d'observer les résultats sur les cultures. Il est même prêt à réaliser des essais chez lui.

Le dernier voit le concept comme une très bonne idée pour faciliter l'utilisation des couverts végétaux mais ne voit pas le besoin de l'utiliser pour son exploitation. En effet, il estime très bien connaître ses parcelles et l'état de son sol, il n'a donc pas besoin des données satellites en plus.

Ainsi, ces agriculteurs n'ont pas le problème matériel du semoir connecté et semblent très enthousiastes vis-à-vis du concept, en imaginant même d'autres utilisations complémentaires des données. Ils voient un vrai potentiel dans le projet à condition que celui-ci soit techniquement réalisable et fonctionnel. Ils mettent néanmoins une réserve sur le coût que représenterait l'achat des différentes semences, ce qui pourrait être un frein pour des agriculteurs moins favorables aux couverts végétaux.

Cette enquête terrain a donc abouti à une idée générale concernant le projet : en théorie le concept paraît très séduisant avec du potentiel pour les années à venir mais il est peut-être un peu trop tôt pour être lancé à cause des contraintes matérielles (nécessité d'un semoir connecté) et le coût (des semences notamment) que cela représente.

5. Etude économique

La mise en place concrète du projet suppose soit la création d'une start-up indépendante, soit le développement du projet au sein d'une entreprise. Nous allons estimer les coûts que rencontreraient ces projets et le nombre de clients nécessaires pour atteindre la rentabilité.

5.1. Mise en place d'une start-up

La création d'une start-up entraîne différents couts fixes et variables, qu'il faut être capable de prévoir afin d'établir un business plan prévisionnel. Poursuivre le projet en indépendance implique certains frais au moment de la création :

- Immatriculer l'entreprise au registre du commerce et des sociétés, et la publier au journal légal. L'immatriculation coûte environ 65 euros, et la publication au journal légal d'une SARL coûte entre 250 et 450 euros selon le journal.
- L'apport d'un capital social, n'est pas obligatoire dans le cas d'une SARL, mais est néanmoins conseillé. Il est apporté par le créateur de l'entreprise et ses associés.

Une fois l'entreprise créée, différents couts fixes seront alors à payer :

- Les salaires des employés et les charges sociales. Dans ce cas précis, l'équipe serait composée au minimum de deux personnes : Une personne responsable de la partie agronomique, et un développeur web qui se chargera de la mise en place et la maintenance du serveur. Le salaire moyen d'un développeur web se situe aux alentours de 35 000 euros brut par ans. Le salaire moyen d'un ingénieur agronome débutant est d'environ 27 000 euros. En ajoutant les cotisations sociales et patronales, l'embauche d'un développeur web coulera 3800 euros par mois. Au total cela représente environ 73 000 euros de salaires par an.
- Les frais de bureaux et d'électricité qui, dans ce cas précis, peuvent être nuls si la start-up est installée dans un incubateur.
- Le coût du serveur informatique est d'environ 300 euros à l'achat, puis coûte environ 15 euros par mois, ce qui représente environ 500 euros par an.
- L'hébergement et l'entretien du site web, qui représente environ 50 euros par mois.
- Différents frais peuvent être difficiles à prévoir. Ainsi au démarrage de l'activité il est courant de faire appel à des professionnels de différents domaines, aussi bien légaux que commerciaux afin d'obtenir des expertises, des conseils administratifs.
- Les honoraires de comptabilité, qui dépendront du nombre de missions et de leur nature. (Maxime, 2017)
- Les prestations offertes aux agriculteurs entraîneront également des couts variables :
- L'impôt sur le bénéfice. Celle-ci est de 15 % des bénéfices dans la limite de 38 120 euros de bénéfices pour 12 mois, puis de 33%.
- La TVA qui touchera toutes les prestations effectuées par l'entreprise. Ce n'est pas une charge mais elle impactera le prix des services.

En définitive les coûts identifiés lors de la première année d'activité sont les suivants :

- Environ 73 000 de salaires pour la personne chargée de l'agronomie et celle de la partie informatique.
- 1000 euros pour l'achat et l'abonnement du serveur, ainsi que la maintenance du site web.

- 300 euros nécessaires à immatriculer la start up.
- Le conseil d'avocats experts en droit des entreprises et d'un cabinet comptable, qui est difficile à estimer, mais représenterait au minimum 2000 euros.

Cela représente environ 76 300 de frais fixes. Ne sont pas comptés les frais variables qui dépendront de l'activité de la start up.

5.2. Coût de la prestation

L'étude de terrain et le questionnaire en ligne nous ont appris que la majorité des agriculteurs seraient prêt à payer entre 1 et 5 euros par hectares. Cependant, ils n'avaient pas connaissance de la totalité des services qui seraient proposés. Les agriculteurs que nous avons rencontrés étaient prêts à monter jusqu'à 15 euros par hectares. Il n'y a pas pour l'instant de concurrents direct sur le marché des couverts végétaux. Etant un marché de niche, celui-ci autorise de pratiquer une différenciation par la qualité et non par le prix, et n'entraîne pas de compétition directe.

La majorité des agriculteurs intéressés par notre service possédaient plus de 100 hectares. De plus, notre service s'adresse en priorité aux grands exploitants, prêt à investir dans le couvert et disposant d'équipements moderne. En comptant 100 hectares étudiés par agriculteur et facturés 15 euros par hectare, il faudrait travailler sur environ 5 150 hectares dès la première année. Afin de rentabiliser les coûts fixes rencontrés la première année. Cela représente une cinquantaine d'agriculteurs, si l'on estime qu'ils possèdent en moyenne 100 hectares.

6. Conclusion

Une start-up conseillant sur les couverts végétaux à semer grâce à la télédétection semble avoir une place sur le marché français. Aucune entreprise propose ce service aujourd'hui et les entreprises proposant de l'agriculture de précision voient leur nombre de clients augmenter de jour en jour.

Cependant, qu'une partie des agriculteurs est concernée par ce service : ceux prêts à investir pour leurs couverts végétaux. Cette vision est loin d'être partagée par la majorité des agriculteurs, qui ne voient pas l'intérêt agronomique des couverts végétaux. De plus, la plupart seraient prêt à utiliser ce service si les avantages étaient prouvés et que le conseil était uniforme pour la parcelle. L'enjeu sera donc de faire changer les mentalités et de prouver aux agriculteurs qu'ils auront un retour sur investissement.

L'avenir de ce projet étant incertain, il serait plus judicieux de développer le projet dans une entreprise travaillant déjà dans l'agriculture de précision, au lieu de créer une startup qui ferait prendre des risques financiers. C'est ce qu'on appelle l'intrapreneuriat.

7. L'intrapreneuriat

Le concept d'intrapreneuriat est né dans les années 1970. Il consiste à développer un projet innovant au sein d'une entreprise déjà existante. L'intrapreneur transforme une idée en activité rentable pour l'entreprise. (DUSSAPT.C, 2016)

L'avantage de l'intrapreneuriat est de bénéficier de la sécurité de son entreprise. Cela permet de mener à bien un projet sans prendre de risques financiers en termes d'investissement. L'intrapreneur doit cependant gérer un budget pour développer son projet. (ZAKI, s.d.)

L'intrapreneur peut bénéficier des moyens généraux de l'entreprise comme les bureaux, la comptabilité ou d'autres fonctions supports. Il a accès aux ressources qualifiées de l'entreprise.

L'entreprise qui met en place ce concept doit être capable de fournir les moyens financiers et le soutien professionnel nécessaire. L'intrapreneuriat est pour elle un moyen de rester à la pointe du progrès.

L'intrapreneur n'a cependant qu'une indépendance partielle car il doit s'inscrire dans un cadre fixé par l'entreprise et il doit lui rendre des comptes. Il n'est pas le seul décisionnaire et doit respecter la politique interne de l'entreprise. De plus, ce statut n'est pas toujours bien perçu par les collègues, qui peuvent avoir du mal à accepter le changement de statut.

Il y a aussi un risque de perdre le projet une fois que celui-ci sera terminé. L'entreprise peut le remplacer par un patron plus expérimenté. De plus, la rémunération n'est pas liée au succès du projet.

L'intrapreneur doit avoir une force de conviction, des capacités d'adaptation et de la persévérance. Pour mener à bien le projet il doit travailler dans une entreprise capable de lui fournir les ressources nécessaires et dont la direction est motivée par le projet. Les conseils donnés par les intrapreneurs sont de communiquer régulièrement sur l'avancement du projet, d'être transparent sur les risques, sensibiliser sa direction au temps nécessaire pour développer le sujet et créer un réseau de soutien en interne.

Il est également conseillé de faire une étude de marché pour convaincre la direction, d'être discret sur le projet et de négocier un pourcentage sur les ventes. (PLISSON, 2014)

Il est important de bien choisir l'entreprise dans laquelle développer son projet. Il faut se tourner vers une société où une culture propice à l'intrapreneuriat et à l'innovation existe. (GUIOMARD, 2014)

Le projet utilisant des images satellites, il serait judicieux de se tourner avant tout vers une entreprise utilisant déjà ces images. Parmi les entreprises françaises citées précédemment, Farmstar semble être la plus propice à développer le projet. L'entreprise a pour valeur une innovation continue et mène à travers ses partenaires Arvalis, Terres Inovia et Airbus une politique R&D constante. De plus, Farmstar existe depuis 15 ans et possède une clientèle importante. Elle compte se développer à l'international à l'horizon 2020. Rejoindre Farmstar reviendrait à rejoindre Arvalis -Institut du végétal, qui élaboré les modèles agronomiques et co-réalise avec Airbus Defence and Space la conception et la validation finale des conseils. Arvalis possède 27 stations et laboratoires répartis dans toute la France.

CoRHIZE pourrait également être susceptible d'accepter un tel projet. L'entreprise utilise déjà des images satellites, notamment pour analyser des couverts végétaux en cours de cycle. C'est également le cas de Be Api. Cependant ces deux entreprises communiquent peu sur les moyens utilisés et semblent être plus portées sur les capteurs embarqués.

Pour choisir quelle entreprise rejoindre, il faudra avant tout leur exposer le projet et voir laquelle a l'air la plus intéressée. Comme il a été dit précédemment, le soutien de la direction et la mise à disposition des ressources nécessaires sont les deux points les plus importants. Il faudra fortement en tenir compte avant de faire un choix.

ETUDE AGRONOMIQUE

1. Cartographie de l'hétérogénéité intra parcellaire de la compaction des sols

La compaction des sols impacte fortement les pratiques agricoles et le rendement des cultures. Les espèces de couverts végétaux avec des racines fasciculées ou pivotantes permettent de travailler la structure du sol et de réduire sa compaction. C'est pourquoi la compaction est une donnée fondamentale dans le développement de notre concept. Plusieurs méthodes sont identifiables pour déterminer la structure d'un sol.

1.1. Mesure de la densité apparente du sol

La densité apparente du sol correspond à sa masse par unité de volume du sol sec en place. Elle varie de 1,0 à 1,6 g/cm³ pour les sols minéraux et de 0,16 à 0,45 g/cm³ pour les sols organiques. La méthode de mesure consiste à utiliser des cylindres métalliques de volume donné. Ces cylindres sont enfouis à diverses profondeurs du sol puis sont récupérés de façon à minimiser le remaniement des sols. Ensuite les échantillons de sols sont séchés dans une étuve pendant 24 heures à 105°C pour déterminer la masse sèche. Connaissant le volume de sol recueilli (cm³) et sa masse sèche (g), il est donc possible de calculer la densité apparente du sol échantillonné (g/cm³).

1.2. Résistance mécanique du sol

Le pénétromètre est un outil composé d'une tige métallique et d'un manomètre. Les valeurs de pression affichées sur le manomètre augmentent avec la densité du sol. L'unité de la pression est en PSI ("pound per square inch" ou N/cm²).

1.3. Tomographie de la résistivité électrique (ERT)

Le sondage électrique est une méthode d'exploration du sous-sol qui repose sur la mesure de la résistivité électrique ρ (en $\Omega \cdot m$). Celle-ci caractérise la capacité du courant électrique à circuler dans le milieu naturel : sa connaissance permet d'appréhender la structure et la lithologie du sous-sol. L'injection d'un courant d'intensité connue et la mesure de la distribution du potentiel électrique, nous donnent une estimation de la résistivité apparente (ρ_a) du sous-sol.

1.4. Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique d'un sol peut être déterminée en mesurant la vitesse d'infiltration d'un volume connu d'eau dans le sol à travers une section de sol. Pour cela on peut utiliser un infiltromètre à double anneau. (SDEC, 2017)



Figure 40- Infiltromètre à double anneau. (Source : sdec-france.com)

L'ensemble de ces méthodes permettent d'obtenir des valeurs relativement précises de la structure et de l'état de compaction d'un sol. Néanmoins, elles sont relativement lourdes à mettre en œuvre, puisqu'elles nécessitent une prise de mesures physiques sur le terrain. Le nombre d'acquisitions sur une parcelle en est donc fortement limité, en raison de la contrainte temporelle, ce qui ne permet pas de cartographier la structure du sol d'une parcelle. Pour contourner cette contrainte, le GPR, un système d'ondes radar utilisé en archéologie pour détecter les irrégularités des sols pourrait être utilisé.

1.5. Ground penetrating radar

Le GPR (ground penetrating radar) est un outil utilisant les micro-ondes pour sonder le sol. Cette technique est donc une mesure à plus ou moins grande distance des caractéristiques d'un sol. Aujourd'hui, il est principalement utilisé en archéologie et en construction pour détecter les structures enfouies, mais aussi sur des satellites pour mesurer la teneur en eau des sols.

a) Méthode

La technique du GPR (Radar à pénétration de sol ou géo radar) permet de s'affranchir des contraintes météorologiques et de couverture des sols. Il utilise la même méthode que les radars, émettant une onde électromagnétique de la longueur d'onde des micro-ondes. Lorsque ces ondes rencontrent des changements de milieux, donc des changements de conductivité ou de permittivité, une partie est réfléchie, renvoyée vers la surface et enregistrée par l'antenne réceptrice. La vitesse de propagation du signal dans le sol et l'amplitude de sa réflexion sont ensuite analysées :

- **La profondeur de la réflexion** et donc du changement de structure du sol, est déterminé par le temps d'aller-retour du signal. La transposition du temps de parcours en distance/profondeur n'est cependant pas simple. La vitesse de propagation des ondes électromagnétiques varie avec le type de sol or celui-ci n'est pas homogène.
- **L'amplitude du signal** reçu dépend de la différence de permittivité électrique entre les deux milieux traversés. L'énergie réfléchie dépend donc des propriétés des matériaux traversés par le signal, ce qui permet de déterminer la nature des horizons.

Les ondes, une fois reçues par l'antenne, sont retransmises sous forme de radiogramme.

Une fois les échos traités informatiquement, on obtient les informations concernant l'amplitude des échos, leur profondeur et leur positionnement spatial sur différentes couches, c'est-à-dire différentes profondeurs (Cf. figure). Ces couches sont alors superposées par un logiciel de 3D donnant une bonne vision de la composition des sols.

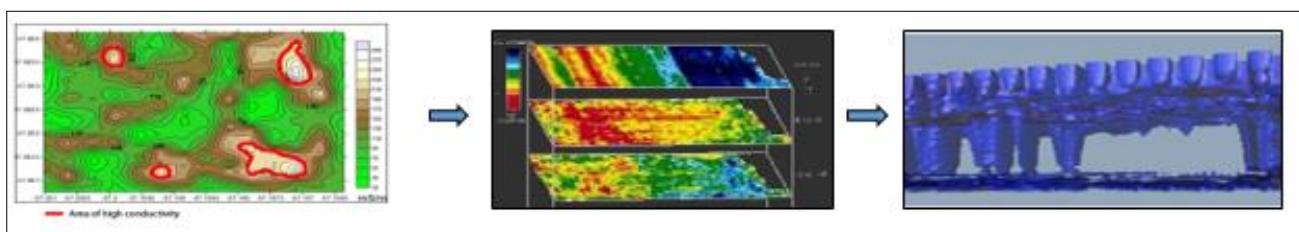


Figure 41- Superposition des couches des mesures de permittivité

b) Outils d'application

Le GPR, en gardant le même mode de fonctionnement, peut être utilisé sur différents outils et à différentes échelles, pour différentes utilisations.

- GEOPHYSIQUE

Il s'agit de la méthode GPR de proxi-détection qui utilise un engin tracté sur lequel est placé l'instrument de mesure. Ils sont utilisés sur des quads ou de petits charriots, pour des applications en archéologie, ou en construction.

- CLOSE RANGE SENSING

L'antenne radar est cette fois-ci positionnée sur un drone. L'équipe de l'université de Louvain travaille actuellement sur le développement de ces prototypes afin de détecter la quantité d'eau dans le sol. Cette méthode permet une acquisition plus rapide et plus automatisée des images, ainsi qu'une modélisation plus simple.

- REMOTE SENSING

Les instruments GPR peuvent également être embarqués sur des satellites. L'information obtenue est alors très différente en raison de la distance d'acquisition. En effet, à la différence des deux autres modes de mesure, les satellites utilisent des longueurs d'ondes beaucoup plus élevées, ce qui ne leur permet d'obtenir qu'une faible profondeur d'investigation du sol (5cm) et une faible résolution (30×30m).

Le satellite Sentinel 3, par exemple, présente de nombreux instruments embarqués, dont le radiomètre MWR. Ce satellite fait partie du programme Copernicus de l'ESA (Agence Spatiale Européenne). Plusieurs satellites sont envoyés en orbites entre 2016 et 2017. Une fois opérationnels, ces satellites fonctionneront par paire afin d'obtenir des données avec une périodicité de 1 à 2 jours. Cet instrument fonctionne à deux fréquences : 23,8 et 36,5 GH, du domaine des micro-ondes.

c) Les longueurs d'onde

Le GPR émet dans le domaine des micro-ondes. Néanmoins tous les outils GPR n'utilisent pas exactement les mêmes longueurs d'ondes. De la longueur d'onde dépend notamment la profondeur d'acquisition de données. Plus celle-ci est basse, plus la profondeur de sol analysée sera grande. En effet les ondes ne sont pas réfractées de la même manière en fonction de leur fréquence, car elles ne sont pas sensibles aux mêmes facteurs. Ainsi différentes longueurs d'ondes permettent de mesurer différentes caractéristiques du sol. Les caractéristiques de l'onde en fonction de la fréquence se retrouvent dans le graphique ci-dessous.

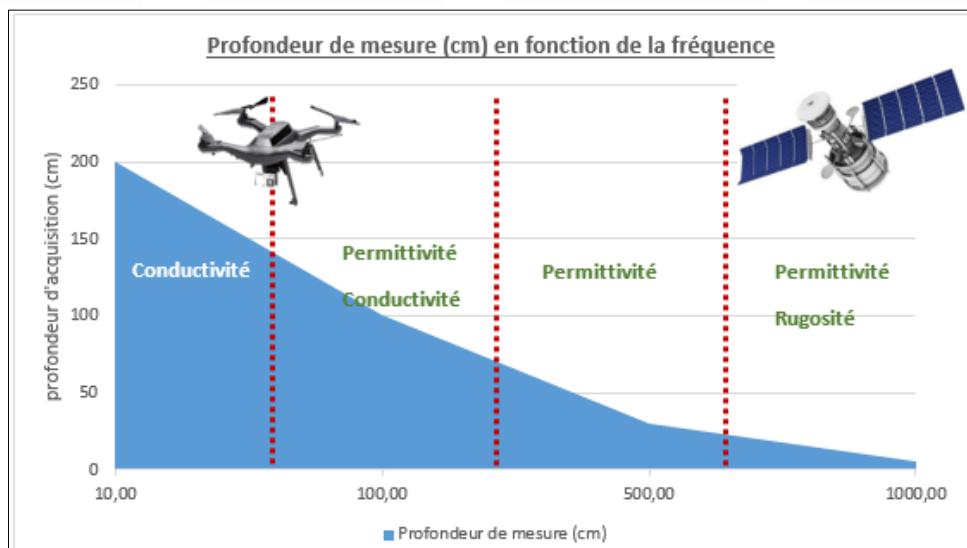


Figure 42- Fréquences GPR en fonction de leur profondeur d'acquisition. (Source : Sébastien Lambot)

Lorsque la fréquence est supérieure à 1 GHz, seul les 5 premiers centimètres du sol sont explorés. L'onde est alors sensible à la fois à la permittivité du sol, mais aussi à sa rugosité. Cette fréquence est principalement utilisée par les satellites, car elle permet d'obtenir des informations à grande distance. Les satellites Sentinel 1 par exemple utilisent une fréquence de 1,5 MHz, ils obtiennent une résolution spatiale de 30m sur 30m et une faible profondeur d'investigation. En raison de la distance parcourue, de la réflexion atmosphérique et de l'influence de la rugosité du sol, les résultats obtenus sont aléatoires et peu précis.

Pour une fréquence de 500 MHz, l'onde est capable d'exploiter les données allant jusqu'à 30cm de profondeur. La réfraction de l'onde ne dépend alors plus que de la permittivité.

Pour une fréquence de 100 MHz, l'onde est capable d'explorer 1m de profondeur, mais celle-ci devient également sensible à la conductivité du sol.

Pour une fréquence de 10 MHz, l'onde est capable d'explorer 2m de profondeur, pour une antenne longue de 4m. La réflexion de l'onde est alors uniquement due aux propriétés de conductivité des sols.

Différents indicateurs du sol peuvent être obtenus avec différentes longueurs d'onde, il peut être intéressant de combiner ces différentes longueurs d'ondes pour obtenir plus d'informations sur les sols et mieux résoudre ces équations.

d) Analyse de données

Une fois obtenues ces données doivent être analysées. Les deux principaux facteurs influençant la réfraction de l'onde dans un milieu sont la conductivité et la permittivité, comme nous avons pu le voir précédemment. Ce sont donc ces deux valeurs qui nous permettront d'obtenir des informations sur les sols.

- Analyse de la permittivité

La composition d'un sol peut être simplifiée en trois principales entités : l'eau, l'air et la matrice du sol en elle-même. Or la permittivité électrique de ces trois composants varie grandement. Ainsi la permittivité de l'air est de 1, celle du sol entre 2.7 et 10 et celle de l'eau 81. La quantité d'eau dans le sol peut être facilement déterminée par cette différence de permittivité.

De nombreux modèles permettent d'obtenir la quantité d'eau dans le sol à partir de sa permittivité. C'est notamment le cas de l'équation de Topp, qui décrit la relation entre la permittivité ϵ_r et le volume d'eau du sol θ_v :

$$\epsilon_r = 3.03 + 9.3\theta_v + 146\theta_v^2 - 76.6\theta_v^3 -$$

Si ce modèle est relativement juste pour des sols sablo-limoneux avec une humidité comprise entre (5-50%), celui-ci est moins significatif pour des sols argileux ou riches en matière organique.

Un second modèle, nommé CRIM, (complex refractive index model) permet d'obtenir des résultats valables pour une grande diversité de sols.

$$\epsilon^e = \left\{ \left(\phi S_w \sqrt{\epsilon_w} \right) + \left[(1 - \phi) \sqrt{\epsilon_m} \right] + \left[\phi (1 - S_w) \sqrt{\epsilon_g} \right] \right\}^2$$

Avec :

- ϕ la porosité du sol ;
- $S_w = \theta_v/\phi$ la saturation en eau ;
- θ_v le volume d'eau du sol ;
- ϵ_w permittivité de l'eau ;
- ϵ_g permittivité de l'air ;
- ϵ_m permittivité de la matrice sol.

En développant l'équation, on obtient l'équation de la porosité du sol en fonction de la permittivité mesurée par GPR, du volume d'eau du sol, et des permittivités de l'air, du sol, et de l'eau.

$$\phi = \frac{\sqrt{\epsilon} - \theta_v (\sqrt{\epsilon_m} - \sqrt{\epsilon_g}) + \sqrt{\epsilon_m}}{(\sqrt{\epsilon_g} - \sqrt{\epsilon_m})}$$

Cette formule permet donc d'établir une relation claire entre la permittivité des différents horizons du sol et leur porosité. Néanmoins de nombreuses inconnues demeurent dans cette formule, comme le volume d'eau des sols et la permittivité des horizons de sol.

Cette équation est principalement utilisée aujourd'hui pour déterminer la quantité d'eau dans les sols à partir de la permittivité. Afin de comprendre comment les scientifiques réussissent à utiliser cette formule qui présente pourtant de nombreuses inconnues, nous avons été interroger Sébastien Lambot, chercheur de l'université de Louvain. D'après lui, la formule peut être largement simplifiée afin d'obtenir le volume d'eau dans le sol. En effet la permittivité dépend en premier lieu du volume d'eau dans le sol, les autres paramètres étant négligeables.

La formule devient donc : $\epsilon = f(\theta_v)$

Le lien entre la permittivité et le volume d'eau dans le sol est donc facilement utilisable.

Dans notre cas où nous cherchons à identifier la porosité du sol, la teneur en eau et autres inconnues ne peuvent donc pas être négligées. D'après Sébastien Lambot, il est difficile voire impossible d'estimer la porosité du sol à partir de la permittivité, car celle-ci n'est que faiblement corrélée à une variation de la permittivité.

- Analyse de la conductivité

La conductivité d'un sol correspond à sa capacité de conduire un courant électrique. Plus celle-ci sera élevée, plus le milieu absorbera l'onde électromagnétique émise par le GPR. Les propriétés de conductivité d'un sol dépendent notamment de la porosité de celui-ci, et de sa teneur en eau. Comme pour la permittivité, chaque changement de milieu entraîne une réflexion de l'onde qui dépend de la conductivité des milieux. La conductivité des sols a pu être modélisée et répond à la formule suivante (KNODEL, 2007) :

$$\sigma = \frac{\phi^m}{a} \sigma_w S_w^n + \sigma_q$$

Avec :

σ la conductivité mesurée

ϕ^m la porosité efficace

a, n, m paramètres du modèle respectivement dépendants du type de sédiment, de la saturation en eau et du taux de cimentation des matériaux.

σ_w la conductivité de l'eau

S_w le volume d'eau

σ_q la conductivité de l'interface eau/sol

Pour résumer, d'après Sébastien Lambot, la conductivité d'un sol dépend principalement de sa porosité, de sa salinité, de sa proportion d'argile, et de sa compaction. Le nombre d'inconnues augmente mais permet d'obtenir plus d'informations sur les sols.

$$\sigma = f(\phi, Salinité, \%A, compaction)$$

La conductivité permet pour les scientifiques d'avoir une autre appréciation de la teneur en eau des sols à une profondeur plus importante. Néanmoins, dans notre cas il est difficile de pouvoir estimer la compaction du sol en fonction de la conductivité car comme pour la permittivité d'autres facteurs plus pondérateurs rentrent en jeu.

e) Complémentarité des résultats

En fonction de la fréquence utilisée par l'antenne, l'onde n'est pas sensible à la même caractéristique du sol. Ainsi, en combinant une première mesure avec une longueur d'onde de 10GHz et une deuxième mesure de 500GHz, on obtient respectivement la permittivité et la conductivité des horizons du sol. Combiner les deux formules à partir desquelles il est possible de déterminer la quantité d'eau dans les sols permet d'obtenir plus de précision et d'informations sur les sols.

f) Résultats

- De la teneur en eau à la conductivité hydraulique

Si la porosité ne peut pas s'obtenir directement par la mesure de la permittivité ou de la conductivité, elle reste néanmoins directement corrélée aux écoulements d'eau dans la parcelle et de la réserve en eau de celle-ci. Selon Sébastien Lambot, il serait donc possible d'étudier les propriétés de conductivité hydraulique des sols grâce à une dizaine ou une vingtaine de mesures GPR par drone sur la parcelle. Les mesures permettraient d'obtenir la teneur en eau des sols à différents moments et d'étudier leur capacité de rétention et d'infiltration en eau. Il s'agira ensuite de relier cette conductivité hydraulique du sol à sa porosité et à sa compaction.

Une limite évidente de cette méthode demeure le temps d'acquisition des données, puisqu'elle nécessite une quinzaine de prises de mesures sur environ 1 mois. Une solution pourrait être d'intégrer l'outil GPR sur le tracteur de l'agriculteur, pour obtenir une acquisition des données en parallèle des travaux agricoles.

- De la conductivité hydraulique à la porosité du sol

La conductivité hydraulique d'un sol répond à la loi de Darcy : $K = \frac{k * \rho_e * g}{\eta_e}$

Avec :

K = conductivité hydraulique (m/s)

k = perméabilité intrinsèque du sol (m²)

g = accélération gravitationnelle (m/s²)

ρ_e = masse volumique de l'eau (kg/m³)

η_e = viscosité dynamique de l'eau (Pa -- s)

La conductivité hydraulique, qui correspond donc à la vitesse d'écoulement de l'eau dans le sol, dépend principalement de la perméabilité intrinsèque du sol, qui dépend elle-même directement de la porosité de celui-ci.

La conductivité hydraulique dépend plus précisément de trois facteurs : la taille des pores, leur tortuosité et leur connectivité.

- La taille des pores correspond à la texture du sol. L'écoulement de l'eau dans un sol saturé dépend du rayon des pores et répond à la loi de Poiseuille : $K = a * R^2$

Ainsi la conductivité hydraulique du sol K est proportionnelle au rayon des pores. Les macroporosités des sols favorisent alors largement l'écoulement de l'eau dans un sol, d'où l'importance des galeries de vers de terre et les conduits racinaires qui créent naturellement cette macroporosité (CALVET.R, 2003). Le tableau ci-dessous indique les valeurs de porosité des sols en fonction de leur conductivité hydraulique.

Conductivité hydraulique d'un horizon		Porosité
cm jour ⁻¹	m s ⁻¹	
< 4	< 4,6 10 ⁻⁷	absence de biopores et de fissures
4-10	4,6 10 ⁻⁷ -1,2 10 ⁻⁶	quelques biopores et fissures
10-40	1,2 10 ⁻⁶ -4,6 10 ⁻⁶	moins de 0,02 % de la porosité sont constitués par des macropores traversant l'horizon
40-100	4,6 10 ⁻⁶ -1,2 10 ⁻⁵	0,02 à 0,1% de la porosité sont constitués par des macropores traversant l'horizon pour certains
100-400	1,2 10 ⁻⁵ -4,6 10 ⁻⁵	0,1 à 0,2% de la porosité sont constitués par des macropores dont des fissures d'au moins 2mm de diamètre traversant l'horizon pour certains
400-1200	4,6 10 ⁻⁵ -1,4 10 ⁻⁴	0,2 à 0,5% de la porosité sont constitués par des macropores avec des fissures d'au moins 2mm de diamètre dont la moitié traverse l'horizon
> 1200	> 1,4 10 ⁻⁴	plus de 0,5% de la porosité sont constitués par des macropores avec des fissures d'au moins 2mm de diamètre dont la moitié traverse l'horizon

Figure 43- Domaine de valeur de la conductivité hydraulique et nature des macrospores correspondants
(source :conductivite.com)

- La tortuosité des pores correspond au rapport entre la distance parcourue par l'eau dans un pore et la distance réelle parcourue dans le sol, plus cette tortuosité sera grande plus la rétention de l'eau dans le sol sera longue.
- La connectivité entre les pores correspond aux connections qui relient les pores entre eux. Cette notion est très difficilement quantifiable ou mesurable mais influe néanmoins grandement sur l'écoulement de l'eau dans un sol.

Communément, des tranches de perméabilité des sols ont été établies en fonction de la conductivité hydraulique du sol (CALVET.R, 2003) :

Tableau 2- relation entre perméabilité et conductivité hydraulique (Source : conductivite.com)

Perméabilité	Conductivité hydraulique
Très petite perméabilité	$K < 10^{-7} ms^{-1}$
Petite perméabilité	$10^{-7} ms^{-1} < K < 10^{-6} ms^{-1}$
Perméabilité moyenne	$10^{-6} ms^{-1} < K < 10^{-5} ms^{-1}$
Grande perméabilité	$10^{-5} ms^{-1} < K < 10^{-4} ms^{-1}$
Très grande perméabilité	$10^{-4} ms^{-1} < K$

Néanmoins, cette classification n'est pas suffisante pour décrire les propriétés hydrauliques d'un sol. En effet, il ne faut pas oublier qu'un sol est constitué de différents horizons dont la structure peut être très variable (compaction de surface, semelle de labour, différence de texture). Aujourd'hui, les technologies GPR développées par l'université de Louvain permet de différencier des couches de sols à différentes profondeurs mais les données ne sont pas encore d'une grande précision. Cela permettrait d'obtenir des variations de la teneur en eau des horizons dans le temps.

- De la porosité du sol à l'application terrain

La porosité obtenue n'est pas exprimée en unités quantifiables, mais plutôt en variation de la porosité par rapport à la moyenne de la parcelle. Ainsi cette méthode permet d'obtenir une tendance des problèmes de structure d'une parcelle, sans réellement parvenir à les quantifier avec des unités. En parallèle, il est difficile de déterminer une donnée précise de la capacité de décompaction d'une espèce de couverts végétaux, mais seulement une estimation de ses propriétés. Il nous suffit de connaître les tendances globales. La carte obtenue ci-contre est une illustration de ce concept qui présente une variation de la compaction des sols par rapport à la moyenne des valeurs obtenues sur la parcelles.

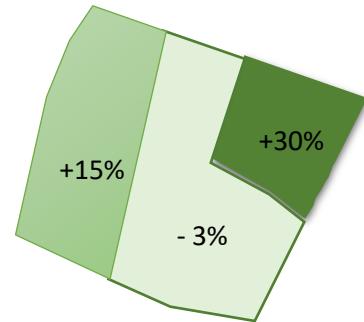


Figure 44: Carte des variations intra-parcellaires de compaction du sol.

Différents types de compaction devront être identifiés, notamment en fonction de leur profondeur. Le GPR permet de déterminer la profondeur de ces mesures et donc des horizons compactés. La structure du sol doit donc être obtenu à la fois en surface, mais aussi à la profondeur de la semelle de labour. A ces différentes compactions correspondront différentes préconisations de couverts, pour répondre aux différents enjeux.

Ainsi pour lutter contre une semelle de labour, il s'agira d'implanter des plantes de couverture aux racines profondes pivotantes. Au contraire, une compaction diffuse des premiers centimètres nécessitera des plantes aux racines fasciculées de surface. La figure ci-dessous illustre ce concept par un exemple.

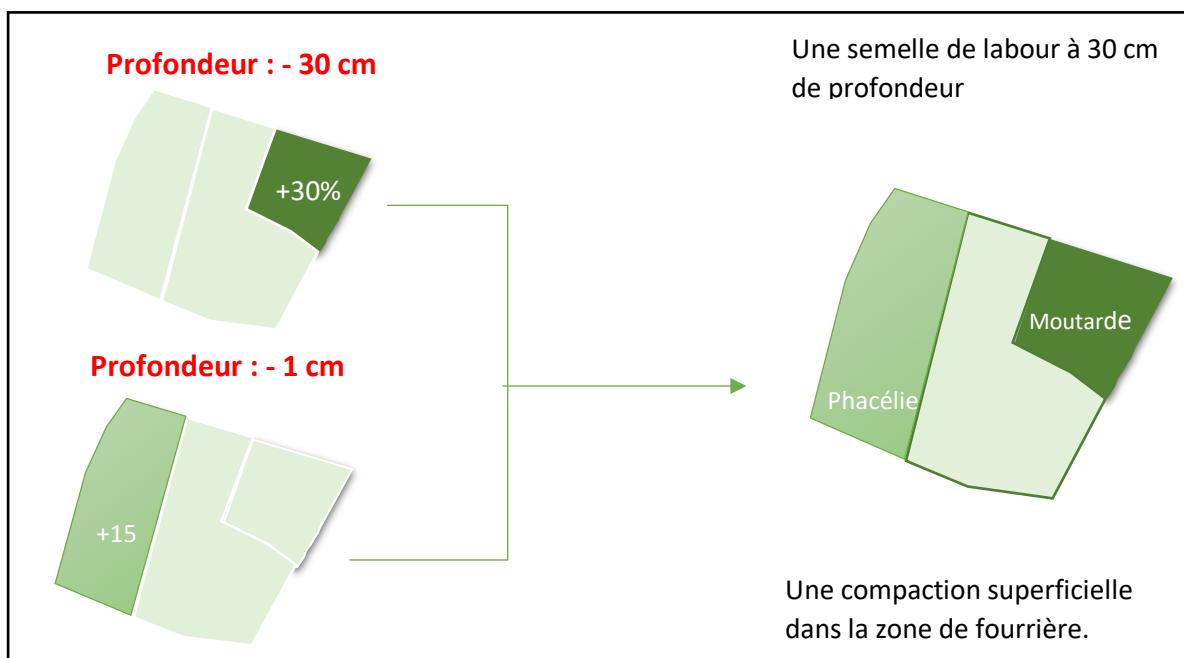


Figure 45: préconisation de couverts végétaux en fonction de l'hétérogénéité intra-parcellaire.

Il faut donc produire des cartes que l'on superposera pour donner une préconisation finale par un conseiller agronomique. Pour cela, il peut être intéressant de définir un mélange type pour 10 situations différentes que l'on affinera avec le temps en passant par de l'expérimentation.

2. Détermination de l'azote

2.1. Concept général

Le concept général de détermination de l'azote sur une parcelle donnée (exemple avec culture de blé) (**Figure 46**) se décline en de nombreuses étapes. L'idée est d'obtenir une cartographie de l'azote dans le sol après une culture, afin de pouvoir donner une recommandation sur un mélange de couverts adapté aux besoins du sol (déficit ou surplus en azote). Le concept repose sur une modélisation du cycle de l'azote dans la parcelle. Dans un premier temps, il serait nécessaire d'obtenir une cartographie de l'azote dans la plante grâce aux mesures satellite des indicateurs MCARI/MTVI2. Ils mesurent le taux de chlorophylle directement corrélé à l'azote dans la plante. Ensuite, les mesures satellite serviraient aussi à obtenir le NDVI permettant de dresser une cartographie de la biomasse dans la parcelle. La quantité d'azote exportée dans le grain pourra être déterminée grâce aux moissonneuses batteuses fournissant une cartographie du rendement. De plus, il serait intéressant de se servir de la cartographie obtenue du carbone organique afin de pouvoir réaliser des analyses stratégiques du sol des reliquats. Il est également possible d'obtenir des informations sur le climat durant toute la culture de blé. Le drainage sera estimé par modélisation. L'idée finale serait de modéliser ces étapes en un enchainement de STICS afin d'obtenir le cycle de l'azote dans la parcelle. Une vérification serait envisagée tous les 2/3 ans.

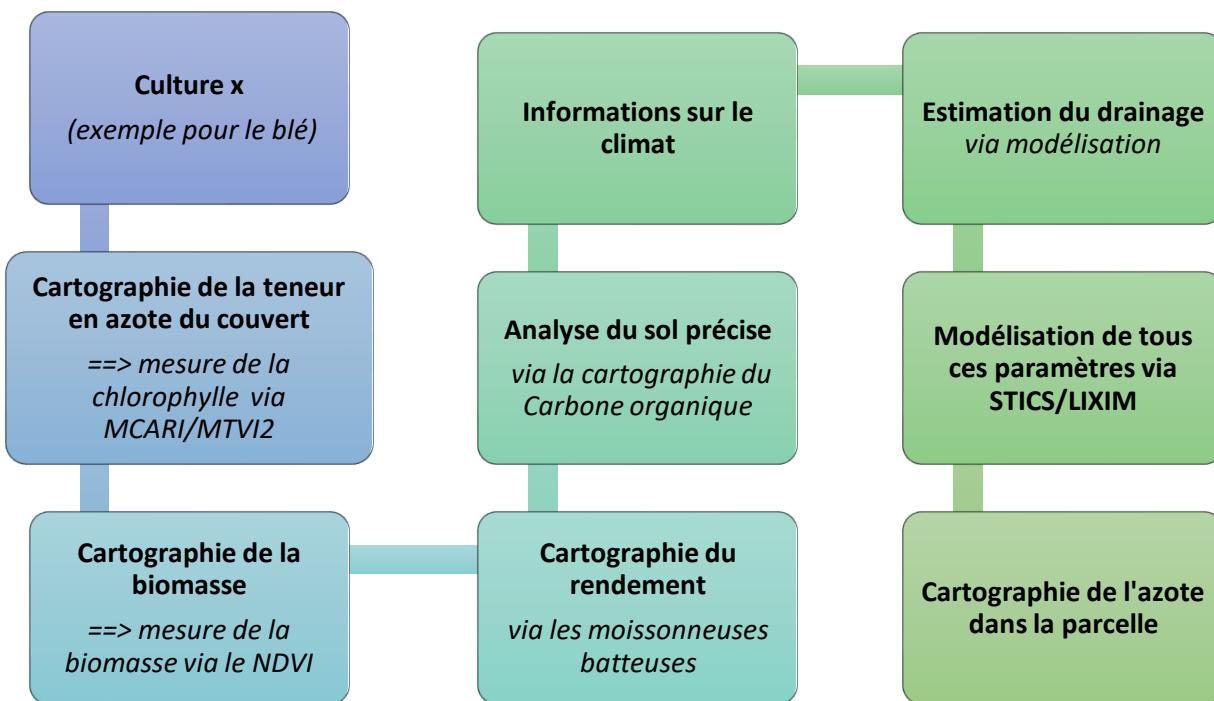


Figure 46- concept général pour obtenir une cartographie de l'azote finale dans la parcelle

Les prochaines parties exposeront l'obtention de cartographies de l'azote dans la plante et de la biomasse. La modélisation pourra être traitée dans un futur projet.

2.2. Cartographie de la teneur en azote du couvert

Il est possible de déterminer la concentration en chlorophylle des feuilles grâce aux indices de végétation basés dans les domaines du visible et de l'infrarouge. En effet, les pigments foliaires sont corrélés à l'azote contenu dans la chlorophylle. (CILIA, et al., 2014)

Une étude a testé 5 indices de végétation afin de mettre en avant le ou les plus adéquate(s) dans la prédiction de la teneur en azote du maïs. Parmi ces 5 indices, il y avait le **NDVI** (normalized difference vegetation index), le **Savi** (soil-adjusted vegetation index), le **Osavi** (optimized soil-adjusted vegetation index), le **MCARI2** (modified chlorophyll absorption ratio index 2) et le **MTVI2** (modified triangle vegetation index 2). La précision de ces indices a pu être mise en évidence grâce la comparaison de leurs mesures avec des valeurs de tests obtenues en laboratoire. Pour corrélérer les indices avec la teneur en azote du maïs, une équation polynomiale de second ordre a été déterminée pour chaque indice. Ce modèle a la faculté d'être le plus adéquate avec un RMSE (erreur quadratique moyenne) faible. (BAGHERI, AHMADI , ALAVIPANAH, & OMID, 2013)

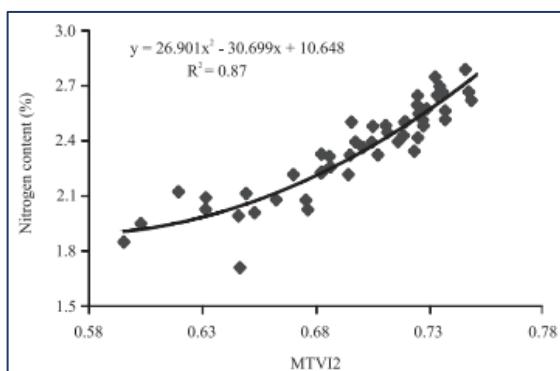


Figure 47- corrélation de MTVI2 avec la teneur en azote
(BAGHERI, AHMADI , ALAVIPANAH, & OMID, 2013)

En conclusion de cette étude, MTVI2 est l'indice détenant la plus forte corrélation ($R^2= 0,87$) et le plus faible RMSE (0,088). (Figure 47) Il est vrai que cet indice est une amélioration d'un autre indice TVI (triangle vegetation index), dépendant de la couleur de la culture et de la teneur en chlorophylle. MTVI2 est donc fortement corrélé avec la teneur en azote et s'impose comme le meilleur indice pour l'estimer. (BAGHERI, AHMADI , ALAVIPANAH, & OMID, 2013)

Cependant, il est important de souligner la forte corrélation de l'indice MCARI2 avec la teneur en azote ($R^2= 0,789$ et RMSE= 0,115). (Figure 48) MCARI2 est aussi une amélioration d'un autre indice CARI (chlorophylle absorption ratio index). De plus, le NDVI détient la plus faible corrélation avec la teneur en azote ($R^2= 0,72$, RMSE= 0,121). Le NDVI n'est pas capable d'enlever les effets du sol et de réflexion. (BAGHERI, AHMADI , ALAVIPANAH, & OMID, 2013)

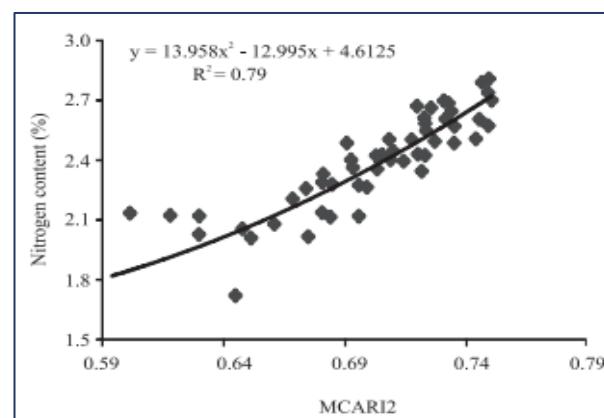


Figure 48- corrélation de MCARI2 avec la teneur en azote
(BAGHERI, AHMADI , ALAVIPANAH, & OMID, 2013)

Dans le premier projet « farming by satellite » de 2016, la teneur en azote de la plante était évaluée grâce aux mesures de NDVI. Il manquait de sources pour évaluer concrètement le lien entre l'azote et le NDVI. Au vu des informations trouvées, il semblerait bien que le NDVI ne soit pas le meilleur indice pour évaluer la teneur en azote de la plante. A l'heure d'aujourd'hui le choix se pencherait plus sur les indices MTVI2 ou MCARI2.

La combinaison des 2 indices les plus propices pour déterminer la teneur en azote de la plante a été effectuée : MTVI/MCARI2. L'objectif est de réduire la sensibilité aux variations du sol et du LAI (indice de surface foliaire). (HUANG, YANG, PU, & YANG, 2014)

- La formule générale du ratio MCARI/MTVI2 est la suivante : (The IDB Project , 2011-2017)

$$\frac{MCARI}{MTVI2} = \frac{((700\text{ nm} - 670\text{ nm}) - 0,2(700\text{ nm} - 550\text{ nm})) \frac{700\text{ nm}}{670\text{ nm}}}{(1,5 \sqrt{(2800\text{ nm} + 1)^2 - (6800\text{ nm} - 5\sqrt{670\text{ nm}})}) - 0,5}$$

- Le sentinel 2a est en capacité de mesurer ce ratio MCARI/MTVI2, la formule adaptée est la suivante : (The IDB Project , 2011-2017)

$$\frac{MCARI}{MTVI2} = \frac{((bande\ 5 - bande\ 4) - 0,2(bande\ 5 - bande\ 3)) \frac{bande\ 5}{bande\ 4}}{(1,5 \sqrt{(2\ bande\ 8 + 1)^2 - (6\ bande\ 8 - 5\sqrt{bande\ 4})}) - 0,5}$$

2.3. Cartographie de la biomasse

Pour dresser le cycle de l'azote sur une parcelle, il serait intéressant de dresser la cartographie de la biomasse de la culture en place. Le NDVI est un indice de végétation qui pourrait être utilisé pour effectuer cette cartographie. En reprenant l'exemple sur une parcelle de blé, la cartographie du NDVI donnerait des indications sur la biomasse du blé, et donc la parcelle serait divisée en tonne de matière sèche/hectare. Les exportations en azote seront, par conséquent, connues.

a) Présentation du NDVI

Pour rappel, le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) est l'un des plus vieux indices de végétation et l'un des plus utilisés. (DEERING, 1978)

Le NDVI correspond à la différence normalisée entre la réflectance dans le domaine proche infrarouge et dans le domaine du rouge. Les valeurs du NDVI sont comprises entre -1 et 1. Les valeurs négatives caractérisent des régions telles que la neige, l'eau et les nuages. Les sols nus sont caractérisés par des valeurs proches de 0. Les régions végétalisées ont un NDVI compris entre 0,1 et 0,7 environ. Un NDVI proche de 0,7 signifie que la région considérée a une forte densité de végétaux. (HENIK, 2012)

$$NDVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R}$$

b) Lien entre le NDVI et la biomasse

Une étude a été réalisée sur 6 espèces de plantes (*Arctophila fulva*, *Carex aquatilis*, *Dupontia fisheri*, *Eriophorum angustifolium*, *Eriophorum scheuchzeri* et *Petasites frigidus*) afin de regarder le lien entre le NDVI mesuré grâce à l'imagerie satellite et la biomasse de ces espèces. La biomasse est mesurée en laboratoire grâce à des prélèvements séchés au four puis pesés. La biomasse pour chaque espèce est calculée grâce à la moyenne des valeurs pour tous les échantillons de la même espèce de la parcelle. Des analyses de régression linéaire ont été effectuées pour toutes les espèces et pour seulement les graminées, afin de voir le lien entre le NDVI et la biomasse. Le NDVI est fortement lié à la biomasse de toutes les espèces ($R^2= 0,70$) **Figure 49 gauche** Il est encore plus corrélé avec la biomasse mesurée chez les graminées ($R^2=0,82$). **Figure 49 droite** (GOSWAMI, GAMON, VARGAS, & TWEEDIE, 2015)

Il est donc possible d'évaluer la biomasse d'une culture grâce au NDVI.

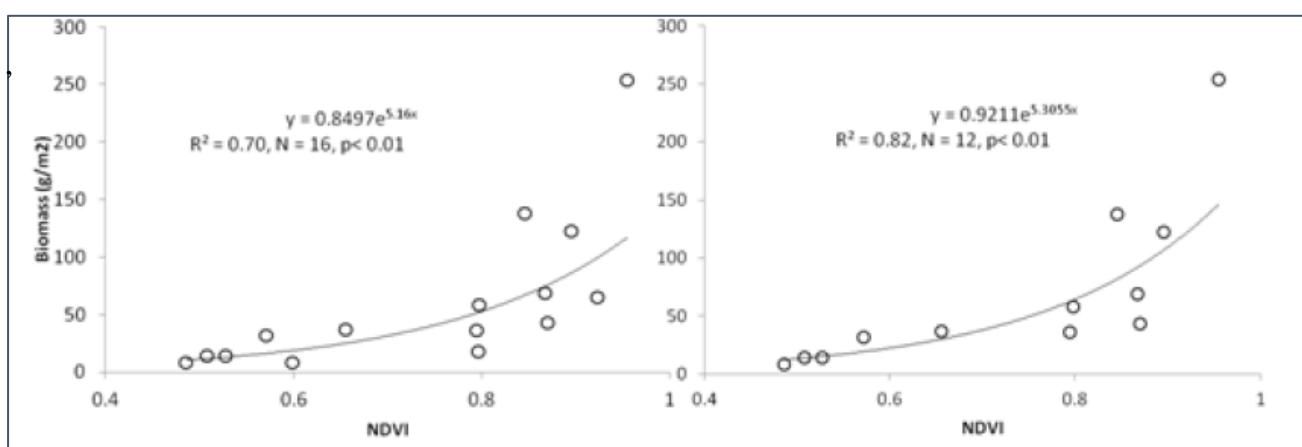


Figure 49- Lien entre NDVI et biomasse (GOSWAMI, GAMON, VARGAS, & TWEEDIE, 2015)

3. Recherches de nouveaux indicateurs

3.1. Carbone

a) Importance du Carbone organique

Le carbone organique du sol est un élément important à prendre en compte dans notre concept de couvert connecté. Il participe à la qualité, santé et structure du sol. Grâce à la synthèse de la matière organique à partir du CO₂ atmosphérique, la culture en place va stocker du carbone sous forme organique. Ainsi le carbone organique va être restitué à l'atmosphère sous forme de CO₂. Ce processus est appelé la minéralisation. Le stockage du carbone est toujours temporaire mais le temps de stockage et les quantités vont dépendre des conditions du milieu : climat, teneur d'origine en carbone du sol. (LABOUBEE.C, Juillet 2007) Le carbone est le principal constituant de la matière organique. Il joue donc un rôle important dans la fertilité des sols. Il est donc intéressant d'ajouter cet élément pour pouvoir déterminer le couvert végétal le plus adéquat en fonction des caractéristiques du sol.

b) Détection du carbone organique

▪ Principe général

Il est envisageable de détecter le carbone organique du sol (COS) grâce à une méthode d'interpolation hybride, la régression krigage, utilisant la télédétection. A l'heure d'aujourd'hui, il est compliqué d'évaluer les stocks de COS à partir de données de localisation ponctuelles. La méthode qui sera décrite par la suite, utilise des points de localisation du COS par des techniques d'interpolation spatiale en prenant en compte les facteurs influençant le COS. (MONDAL, et al., 2017)

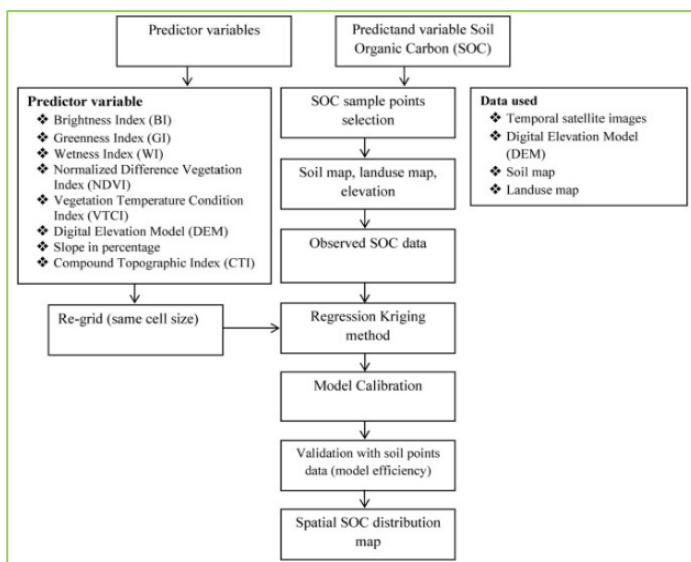


Figure 50- Méthodologie pour déterminer le COS (MONDAL, et al., 2017)

composants topographiques (CTI) rentrent aussi en jeu dans la distribution du COS. Ces variables seront déterminées grâce à la télédétection.

La **Figure 50** expose la méthodologie pour déterminer les stocks de COS dans le sol. Deux types de variables sont pris en compte :

- **Le prédictant** qui correspond au COS : cette variable pourra être déduite grâce à la connaissance d'autres variables.
- **Les variables prédictives** : elles sont indépendantes et utilisées dans le krigage pour prédire le prédictant. Huit variables prédictives seront prises en considération.

L'indice de luminosité (Bi), l'indice de végétation (Gi), l'indice d'humidité (Wi), le NDVI, et l'indice de végétation et de températures (VTCI) sont les 5 variables correspondant aux caractéristiques biophysiques de la surface terrestre.

Elles sont fortement corrélées avec la distribution du COS. De plus, **l'altitude (DEM), la pente et les**

- Détermination des variables prédictives

➤ La transformation de Tasseled Cap

La transformation de Tasseled Cap (Kauth-Thomas), datant de 1976, a pour concept de convertir les bandes originales en un nouvel ensemble de bandes avec des interprétations définies utiles pour la cartographie de la végétation. (KARL.J, 2012) Cette technique permet de diminuer à trois composantes principales (Brillance **Bi**, couverture végétale **Gi**, et humidité **Wi**), la quantité de données fournies par les satellites. En effet, une analyse plus précise peut être élaborée grâce à la réduction des influences atmosphériques que permet la transformation de Tasseled Cap. (ESRI, s.d.)

- ⇒ Formule de la transformation de Tasseled Cap : (MONDAL, et al., 2017)

$$\text{Tas.cap}_i = (\text{coeff}_1 \times \text{band}_2) + (\text{coeff}_2 \times \text{band}_3) + (\text{coeff}_3 \times \text{band}_4) + (\text{coeff}_4 \times \text{band}_8) + (\text{coeff}_5 \times \text{band}_{10}) + (\text{coeff}_6 \times \text{band}_{12})$$

- ⇒ Coefficients des indices de la formule avec le sentinel 2 :

Tableau 3- Coefficients des 3 composantes principales de la transformation de Tasseled Cap (*The IDB project, 2011-2017*)

	Band 2	Band 3	Band 4	Band 8	Band 10	Band 12
Brillance	0,3037	0,2793	0,4743	0,5585	0,5082	0,1863
Humidité	0,1509	0,1973	0,3279	0,3406	-0,7112	-0,4572
Couverture végétale	-0,2848	-0,2435	-0,5436	0,7243	0,0830	-0,1800

- ⇒ Conversion du DN (digital number) en luminance : (MONDAL, et al., 2017)

$$L_{TOA} = \left(\frac{L_{max\lambda} - L_{min\lambda}}{QCAL_{max} - QCAL_{min}} \right) * (DN - QCAL_{min}) + L_{min\lambda}$$

Avec :

- $L_{max\lambda} / L_{min\lambda}$ = luminance maximale et minimale

Tableau 4- Références des luminances max et min pour sentinel 2 (*BAILLARIN, et al., 2012*)

	$L_{max\lambda} (W.m^{-2}.sr^{-1}.mm^{-1})$	$L_{min\lambda} (W.m^{-2}.sr^{-1}.mm^{-1})$
Band 2	615,5	11,5
Band 3	559	6,5
Band 4	484	3,5
Band 8	308	1
Band 9	233	0,5
Band 10	83	0,05
Band 12	24,5	0,1

- $QCAL_{max} / QCAL_{min}$ = max/min DN possible

- ⇒ Conversion des luminances en réflectance : (MONDAL, et al., 2017)

Avec :

- ρ = réflectance
- d^2 = distance terre/soleil

$$\rho = \frac{L_{TOA} \pi d^2}{ESUN_\lambda \cos \theta_z}$$

- $ESUN_\lambda$ = irradiance exo atmosphérique dépendante de la bande ($W.m^{-2}. \mu m^{-1}$)
- Θ_z = angle zénithale du soleil ($^\circ$)
- J = Jour julien

$$d = 1.001672 * \sin \left(\frac{2\pi(J-93.5)}{356} \right)$$

Tableau 5- Valeurs de l'irradiance exo atmosphérique (GITHUB, s.d.)

ESUN ($W.m^{-2}.\mu m^{-1}$)	
Bande 2	1941,63
Bande 3	1822,61
Bande 4	1512,79
Bande 8	1036,39
Bande 10	367,15
Bande 12	85,25

⇒ Synthèse du calcul de la transformation de Tasseled Cap

Pour résumer le calcul de la transformation de Tasseled Cap, il faut dans un premier temps calculer la luminance pour les bandes 3, 4 et 9 de Sentinel 2 (bandes dont la longueur d'onde correspond à peu près à la longueur d'onde des bandes de référence (3,4,6) du satellite de Landsat 5. (Tableau 6) Ensuite, la réflectance est calculée pour les bandes 3 et 4. Pour finir la formule de la transformation de Tasseled Cap est utilisée.

Tableau 6- Correspondance bandes Landsat 5 avec bandes Sentinel 2

	Band 3	Band 4	Band 6
Landsat 5	630-690 nm	760-900 nm	1040-1250 nm
Sentinel 2	Band 3- 665 nm	Band 4- 842 nm	Band 9- 945 nm

➤ Le NDVI

Le calcul du NDVI a déjà été expliqué dans la partie azote. Pour rappel, la formule est :

$$NDVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R}$$

➤ Indice de végétation et de température (VTCI)

L'indice de végétation et de température (VTCI) est un dérivé de deux indices : d'une part l'indice de condition de température (TCI) et d'autre part l'indice de condition de végétation (VCI). (AIRBUS, HYDEOMEX). En agriculture, le VTCI permet entre autres d'évaluer le besoin en eau pendant l'été ou l'hiver. Cet indice est déterminé grâce au sentinel 3- SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer). L'instrument SLSTR permet d'avoir accès à des mesures géophysiques de la surface de la mer et terrestre. Le SLSTR utilise 3 canaux situés dans le domaine de l'infrarouge : S7 (3,74μm), S8 (10,85μm) et S9 (12 μm). (ESA, 2000/2017)

Cet indice est déterminé grâce à la formule ci-contre :

$$VTCI = (LST_{NDVIi \max} - LST_{NDVIi}) / (LST_{NDVIi \max} - LST_{NDVIi \min})$$

where, $LST_{NDVIi \max} = a + bNDVIi$ and $LST_{NDVIi \min} = a' + b'NDVIi$

Pour déterminer le VTCI, il est nécessaire d'identifier, dans un premier temps, le LST (Température de Surface du Sol). Le niveau 2 du produit SLSTR du sentinel 3 permet d'acquérir les valeurs de LST pour chaque pixel inclus sur une grille de mesure de 1km. Il fournit également les incertitudes totales estimées. Le traitement du LST utilise l'algorithme « split-window ». Cet algorithme utilise les luminances provenant de 2 canaux, dont les centres de bandes sont proches en longueur d'onde, pour déterminer la température radiométrique de la surface de la Terre. (ESA, 2000/2017)

➤ L'altitude (DEM) et la pente en % (MONDAL, et al., 2017)

L'altitude des parcelles peut être déterminée par satellite. Une relation négative existe entre le DEM/ la pente et le COS.

➤ Les composants topographiques (CTI) (MONDAL, et al., 2017)

Les composants topographiques (CTI) permettent de montrer le mouvement des sédiments, de l'eau sur une parcelle donnée.

Cet indice est déterminé grâce à la formule ci-contre :

Avec :

$$CTI = \ln(A_c / \tan \beta)$$

- A_c = surface de contribution spécifique (m^2) / unité de largeur orthogonale à la direction de l'écoulement
- β = l'angle de pente

▪ Méthode d'interpolation spatiale : le krigeage

Parallèlement à la détermination de ces variables prédictives grâce aux données satellite, il est nécessaire d'effectuer des prélèvements sur le terrain (méthode échantillonnage aléatoire) pour ensuite, par titrage au laboratoire, obtenir la teneur en carbone. Afin d'obtenir une carte de répartition du COS sur une parcelle donnée, il est nécessaire de faire appel à une méthode d'interpolation spatiale, la régression krigeage. Les échantillons de COS effectués de manière aléatoire sont donc interpolés dans le domaine spatial en prenant en compte les variables auxiliaires à ces points de localisation.

Tableau 7- Variables prises en compte dans le krigeage (MONDAL, et al., 2017)

Variables auxiliaires	Variables prédictives
Imagerie satellite, altitude, utilisation des terres, géologie	Transformation de Tasseled Cap, VTCI, NDVI, DEM, CTI, pente

Les observations des variables du sol sont notées comme : $z(sn)$ où $si = (xi, yi)$, soit xi et yi les coordonnées et n est le nombre d'observations. Pour effectuer une interpolation spatiale, le sol a une nouvelle localisation non visitée (So) obtenue par la somme de la dérive et des résidus. (HENGLE, HEUVELINK, & STEIN, 2004)

$$\hat{z}(s_0) = \hat{m}(s_0) + \hat{e}(s_0)$$

\hat{m} = la dérive utilisant une méthode de régression linéaire
 \hat{e} = le résidu interpolé grâce à un krigage simple

$$\hat{z}(s_0) = \sum_{k=0}^p \hat{\beta}_k \cdot q_k(s_0) + \sum_{i=1}^n w_i(s_0) \cdot e(s_i);$$

$$q_0(s_0) = 1;$$

$\hat{\beta}_k$ = coefficients estimés du modèle de dérive
 $q_k(so)$ = la kème variable explicative externe
 $w_i(so)$ = poids déterminés par la covariance
 $e(s_i)$ = résidus de régression

- La validation du modèle

La validation du modèle est calculée avec le RMSE (erreur quadratique moyenne) et le ME (erreur moyenne). Le RMSE permet de montrer la différence entre les valeurs observées et calculées. On appelle cette différence le résolu. (MONDAL, et al., 2017)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

N = nombre des points validés
 y_i = valeur prédictive
 \hat{y}_i = valeur observée

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)$$

N = nombre des points validés
 y_i = valeur prédictive
 \hat{y}_i = valeur observée

Enfin, il est possible de cartographier les stocks de COS à partir des valeurs extrapolées.

3.2. Phosphore

Le phosphore, tout comme l'azote et le potassium est l'un des nutriments les plus importants en agriculture et l'ingrédient prépondérant dans de nombreux fertilisants. Le phosphore et ces nutriments ont toujours été utilisés pour augmenter les rendements des plantes cultivées. Après des années de fertilisation non précise sur les parcelles, une volonté de précision et de réduction des intrants s'est manifestée tant pour la dimension économique qu'écologique. Pour pallier aux méthodes laboratoires comme l'HPLC et la procédure Olsen pour le phosphore qui sont très couteuses, l'agriculture se mobilise pour expérimenter de nouvelles manières d'observer de manière plus large ces concentrations en nutriments dans le sol.

a) Le rôle du phosphore dans la plante

Faisant partie des macroéléments, le phosphore est nécessaire à la plante et doit répondre à des besoins quantitatifs importants de la plante. Le phosphore joue principalement dans la stimulation des racines des plantes et est plus facilement assimilable en fonction du ph du sol notamment aux alentours de 6 – 7. Il est préférentiellement assimilable sous la forme (HPO_4^{2-} , HPO_4^{4-}).

Comme l'on peut voir sur le graphique ci-dessous, adapté de *Taiz et Zeiger, 2002*, la concentration des minéraux comme le phosphore est très importante pour un développement optimum de la plante.

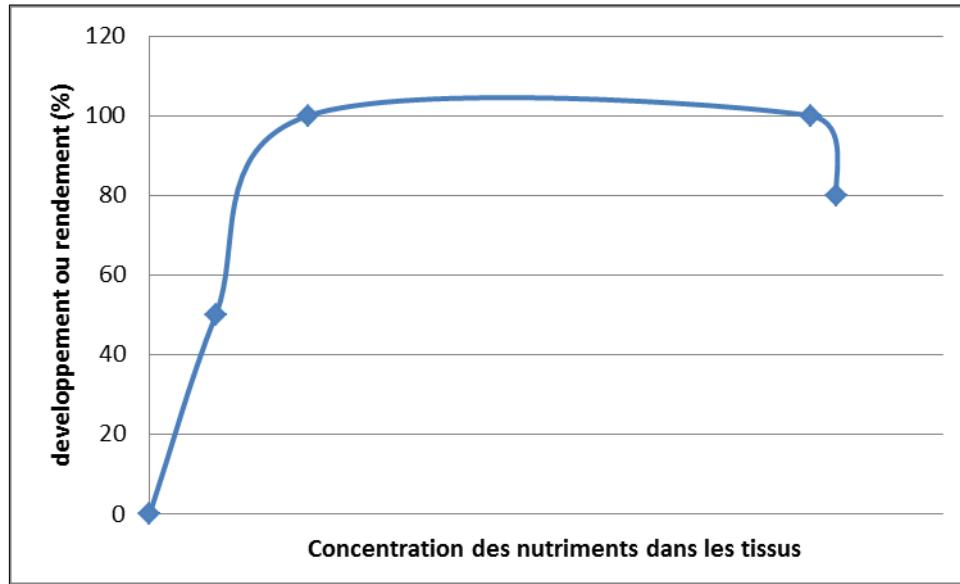


Figure 51: Rendement ou développement de la plante en fonction de la concentration de nutriment dans ses tissus. (Source : Taiz et Zeiger, 2002)

Le phosphore joue un rôle important dans plusieurs cycles de la plante. En effet on peut le retrouver dans les sucres phosphatés dans la respiration et la photosynthèse, dans les phospholipides, dans le métabolisme énergétique (ATP) ainsi que dans l'ADN et l'ARN.

Bien qu'ayant un rôle prépondérant dans le stockage de l'énergie et l'intégrité structural des composés, les carences en phosphore sont moins fréquentes que celles en azote dans le contexte agricole dans les sols de nos régions. Il peut cependant être limitant dans les sols acides.

b) Mise en place technique

- Diffusion de Raman- théorie

La méthode de la diffusion Raman pour l'analyse du phosphore se base sur ce principe de réfraction de la lumière lorsqu'elle est réfléchie sur la surface d'un objet. La lumière va se diviser en quatre groupes : une lumière réfléchie, une lumière transmise à l'objet, une lumière absorbée et transformée en chaleur par l'objet et enfin une lumière diffusée dans toutes les directions de l'espace environnant. (ECOLE DES MINES DE SAINT-ETIENNE)

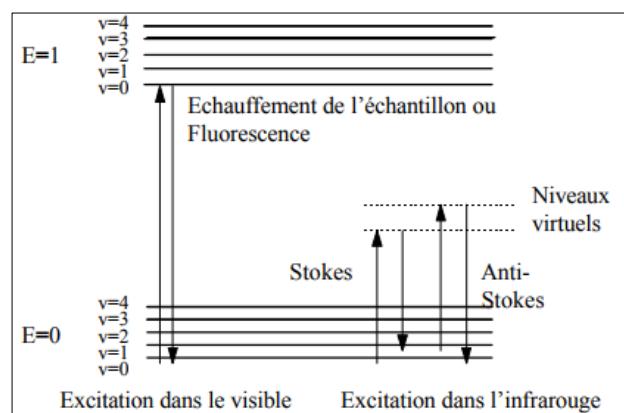


Figure 52- méthode Raman. (Source : Ecole des mines de St-Etienne)

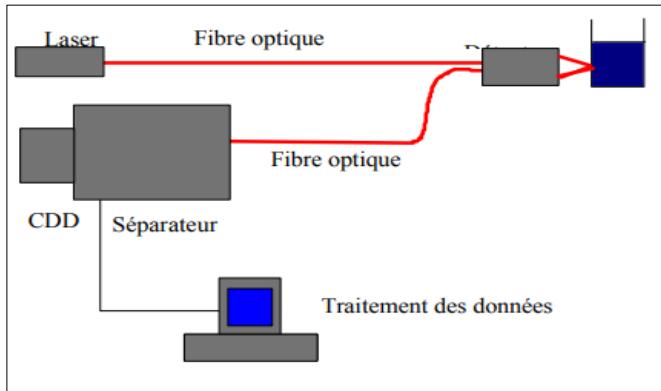


Figure 53- Schéma de principe d'un spectromètre Raman. (Source : Ecole des mines de St-Etienne)

Les radiations d'un laser sont conduites jusqu'à l'échantillon qui sera analysé et provoquent son excitation. La lumière réfractée est recueillie par un capteur, puis acheminée par une fibre optique jusqu'au séparateur. Couplé à un détecteur, il fournit alors des données sur l'échantillon qui n'ont plus qu'à être traitées informatiquement.

Les informations accessibles par spectrométrie Raman sont relativement étendues :

- Identification de phases ou de composés chimiques
- Caractérisation des matériaux
- Détermination de la structure moléculaire
- Étude des systèmes amorphes et cristallins

Le spectre des fréquences diffusées observées est donc indicatif de la composition moléculaire de l'échantillon étudié.

(LANFRANCO, 2003) décrivent l'utilisation d'un système Raman équipé d'un capteur CCD à refroidissement thermoélectrique pour identifier les phosphates de métaux mélangés dans des échantillons de sol en poudre.

▪ L'outil BRAVO

L'outil BRAVO est un outil portable utilisant la spectrométrie RAMAN pour déterminer les matières premières d'un objet/ échantillon. Cet outil utilise un laser pour déterminer les matières premières présentes dans un échantillon comme le phosphore. Cet outil mis en place par Lanfranco et al permet également de palier aux problèmes de fluorescence grâce au SSE™ (SequentiallyShifted Excitation).

c) Conclusion

L'outil BRAVO peut être utilisé dans champs mais il ne produit qu'une donnée à un endroit spécial. Cette donnée est donc limitée car elle ne pourra pas produire des cartes de teneur en phosphore au niveau d'une parcelle précise. La question de l'utilité de cet outil se pose donc et peut-être vaut-il mieux se baser sur les différentes analyses de sols réalisées par les agriculteurs.

Le phosphore étant un nutriment très important dans la nutrition des plantes c'est cependant un facteur essentiel à prendre en compte dans nos analyses pour produire un conseil des plus adaptés.



Figure 54:l'outil BRAVO.
(Source : Bruckeroptics)

4. Identification du mélange d'un couvert végétal

Après avoir déterminé les caractéristiques du sol d'une parcelle, le cœur du concept est de choisir les espèces végétales les plus intéressantes à mettre en place pour répondre au besoin du sol.

Dans un premier temps, avant de pouvoir apporter un quelconque conseil, il faut connaître les caractéristiques des différentes plantes et leur adaptabilité. Il est effectivement indispensable d'adapter les espèces aux caractéristiques de la parcelle (climat, date de semis, rotation, méthode de destruction).

Après avoir sélectionné les plantes réellement utilisables pour un cas donné, il est nécessaire de connaître les caractéristiques qu'elles possèdent et qui sont capables de répondre aux paramètres mesurés du sol (Azote, Phosphore, Carbone, Compaction).

Pour ce qui est des éléments minéraux, une méthode de calcul développée en 2010 par la chambre régionale d'agriculture de Poitou-Charentes, permet de déterminer les quantités d'azote, de Phosphore et de Potassium, potentiellement disponibles après une culture intermédiaire.

A contrario, si on peut déterminer l'effet plus ou moins structurant des racines (pivotante, fasciculé), il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode de quantification de leurs propriétés structurantes vis-à-vis du sol.

4.1. Choix d'un couvert

Le choix des espèces de couverture végétale à mettre en place dépend de nombreux facteurs agronomique, politiques mais aussi économiques. Cette diversité de facteur en font un sujet très complexe, où chaque situation est différente et doit être adaptée. Voici les différents critères influençant le choix d'un couvert.

a) Culture suivante

Il est important de prendre en compte la rotation dans le choix des espèces d'un couvert. En effet afin de limiter les risques de maladie et de travailler le sol différemment les couverts doivent permettre de casser le cycle de la rotation, en évitant de mettre en place des espèces de même type. Par exemple on évitera de choisir des crucifères avant un colza, ou des choux, de même pour les céréales avant un blé, ou des légumineuses avant des pois, ou haricots.

b) Les objectifs de valorisation d'un couvert

Le couvert peut-être tout simplement détruit avant la culture suivante, tout son intérêt est alors agronomique (travail du sol, rétention éléments du sol, etc.), mais il peut également être récolté. On parle alors de couvert végétal en dérobée. Dans des exploitations en polyculture élevage cette solution peut être intéressante afin d'augmenter le stock fourrager (pâturage, ensilage, foin, enrubannage). Le choix des espèces doit alors se faire en fonction des objectifs de la ration. Les dérobées ont généralement un rendement à l'hectare de 2-5T/MS, un PDIN important par rapport à leur PDIE. (INSTITUT DE L'ELEVAGE , 2011)

En fonction de la date de semis et de récolte les espèces implantables diffèrent comme le montre la figure ci-dessous :

Pour récolter:	En automne (sept – oct)	Au printemps (avril)
Vous devez semer :	avant le 15 août	du 15 août au 15 septembre
Céréales	Avoine de printemps Orge de printemps Moha Avoine diploïde (du Brésil)	Seigle Avoine d'hiver Triticale
Graminées fourragères	Ray grass d'Italie alternatif	Ray grass Italie non alternatif Ray grass hybride
Légumineuses (à utiliser de préférence en association) :	Trèfle d'Alexandrie Trèfle de Perse Pois de printemps fourrager Vesce de printemps	Trèfle violet Trèfle incarnat Pois d'hiver fourrager Féverole d'hiver
Association céréales ou graminées avec légumineuses	Possible et conseillée avec les espèces ci-dessus.	Possible et conseillée avec les espèces ci-dessus
Crucifères	Colza ou chou fourrager	

Figure 55: Les choix des espèces en fonction de la date de récolte. (Source : filierechevalpaca.com)

c) La date de semis

La date de semis dépend notamment de la culture précédente et de sa date de récolte. Elle est fondamentale dans le choix des espèces car certaines espèces, comme les légumineuses, nécessitent des dates de semis précoces (avant la mi-août), pour se développer correctement.

d) La date de destruction du couvert

La date de destruction du couvert doit être déterminée pour choisir le mode de destruction. Celle-ci dépend en premier lieu de la culture suivante et du type de sol. Il s'agit de réaliser un compromis entre le développement du couvert qui sera d'autant plus bénéfique pour les sols, et l'effet dépressif sur la culture suivante (compétition en azote, eau). (ARVALIS, 2017)

Type de sol	Date de destruction : intégrer de nombreux facteurs		
	Blé, orge d'hiver	Betterave, lin, orge, pois et féverole de printemps	Mais, tournesol
Limon sain, craie, sable	Juste avant le semis	De mi-novembre à mi-décembre	De novembre à février (au plus tard, début mars)
Limon argileux Sol argilo-calcaire	Juste avant le semis	De mi-novembre à mi-décembre	Labour: dès le 15/11 Non-labour: entre le 15/11 et le 1/2 selon climat et vitesse de ressuyage
Sol argileux	Non-labour: juste avant le semis Labour: anticiper la date de destruction et de labour	Non-labour: 15/11 Labour: anticiper la date de destruction et de labour	Non-labour: mi-novembre à mi-décembre Labour: anticiper la date de destruction et de labour

Figure 56: Date conseillée de destruction des couverts, en fonction du sol et de la culture suivante. Se référer à la directive nitrate de son département pour déterminer à partir de quelle date la destruction d'un couvert est autorisée. (Source : arvalis-infos.fr)

D'après les résultats apportés par Arvalis dans le tableau ci-dessus, on peut conclure que globalement la destruction du couvert peut se faire juste avant le semis des céréales d'hiver et deux mois avant l'implantation d'une culture de printemps. En effet laisser quelques mois entre la date de destruction et la date de semis permet au couvert de se décomposer pour mieux restituer les éléments à la culture suivante. Dans des sols légers, sensibles à la battance, le couvert peut être maintenu plus longtemps pour protéger les sols de l'érosion hydrique, à l'inverse des sols argileux nécessite une date de destruction plus précoce pour ne pas pénaliser les

conditions d'implantation de la culture suivante. Enfin avant un semis d'automne, les besoins des plantes étant faible la destruction du couvert peut se faire juste avant le semis. (LABREUCHE J. , 2008)

4.2. Le mode de destruction

En fonction du type de couvert et du climat différents mode de destruction peuvent être envisagés. Ce choix doit être réfléchi en amont pour répondre aux objectifs de l'exploitation (temps de travail, structure du sol, coût...). Voici les différents modes de destruction envisageables :

a) *Destruction chimique au glyphosate*

C'est un mode de destruction facile d'utilisation, avec un gros débit de chantier, et une belle efficacité, en particulier sur les graminées. Il s'agit néanmoins de consulter la directive nitrate qui peut limiter dans certains départements l'utilisation de ce produit. C'est le cas dans les zones vulnérables où la destruction chimique est interdite. De plus au vu des polémiques actuelles, l'utilisation de ce désherbant pourrait être interdit.

b) *Destruction par broyage*

Le broyage permet de réduire le volume de végétaux et donc de faciliter le travail du sol par la suite. Il présente également l'avantage de conserver une couverture de résidus de culture en surface ce qui protège les sols de l'érosion. Néanmoins ce mode de destruction n'est pas adapté aux graminées qui sont capables de repousser.

c) *Destruction par le labour*

C'est le mode de destruction le moins couteux, car il ne présente pas de travail supplémentaire par rapport à l'itinéraire cultural classique. Néanmoins certaines espèces peuvent repartir à partir de leur racine, c'est le cas du radis et de la navette par exemple, de plus sur un couvert très développé, des phénomènes de bourrage de la charrue peuvent apparaître. Pour éviter ce phénomène le couvert peut être broyé, roulé, couché par des chaînes, avant d'être retourné. On peut également privilégier des espèces à plus faible biomasse.

d) *Destruction par le gel*

Il s'agit certainement de la méthode la plus pertinente agronomiquement et économiquement, néanmoins elle est soumise aux incertitudes climatiques. En effet pour que la destruction soit efficace il faut choisir des espèces gélives, mais aussi avoir des températures en descendant en dessous de -5°C. Cette méthode est donc mieux adaptée à des climats froids continentaux. Afin de renforcer l'action du gel, les couverts peuvent être roulés, quand les températures sont basses.

Cette méthode présente deux limites importantes. D'une part elle est contraignante d'un point de vue organisation du travail puisqu'elle impose à l'agriculteur d'être disponible au moment de la gelée (souvent de nuit). D'autre part elle n'est pas adaptée aux semis d'automne dans des régions où les gelées surviennent tard dans la saison.

e) *Le Déchaumage*

Technique alternative qui présente l'intérêt de réaliser un travail du sol avant le semis. Il peut être effectué avec différents types d'outils. Pour éviter le bourrage, il est possible de réaliser un broyage comme avant un labour.

4.3. Directive nitrate

La directive nitrate mise en place par l'union européenne impose la mise en place d'une couverture végétale pendant la période d'interculture dans les ZV (Zones Vulnérables). En voici les spécificités. (CHAMBRE D'AGRICULTURE, 2016)

a) *Les règles en interculture longue*

En interculture longue, c'est-à-dire entre une culture récoltée en été et un semis au printemps, la législation impose l'implantation des couverts suivants :

- CIPAN pour une durée minimale de **2 mois**, avec une destruction au plus tôt le **1 novembre**.
- Culture dérobée
- Repousses de colza denses et homogènes
- Repousses de céréales denses et homogènes dans la limite de 20 % des surfaces en interculture longue
- Broyage fin des cannes de maïs grain, de sorgho ou de tournesol suivi d'un enfouissement dans les 15 jours qui suivent la récolte.

Pour les îlots culturaux avec un taux d'argile supérieur à 30%, ou pour un couvert monté à floraison, la destruction est possible à partir du 15 octobre.

Dérogations à l'implantation d'un couvert. Il n'est pas obligatoire de semer un couvert si :

- Si la culture précédente est récoltée après le 5 septembre (sauf derrière maïs grain, sorgho ou tournesol pour lesquels il faut faire un broyage fin des cannes),
- Si un travail du sol est nécessaire pour détruire des adventices ou lutter contre les limaces (ce cas doit faire l'objet d'une déclaration auprès de la DDT(M)),
- Si le taux d'argile est supérieur à 37%,
- Sur les îlots culturaux sur lesquels certains épandages de boues de papeterie sont réalisés.

Si l'agriculteur utilise l'une des dérogations ci-dessus, il doit calculer le bilan azoté post-récolte de la parcelle concernée et l'inscrire dans son cahier d'enregistrement.

b) *En interculture courte*

Ce sont les intercultures situées entre une récolte en été et un semis à l'automne. La mise en place d'un couvert n'est obligatoire qu'entre un colza et une culture d'automne, les repousses de colza doivent être maintenues au moins 1 mois.

c) *Espèces de couverts*

Toutes les espèces sont autorisées sauf les légumineuses pures. Elles doivent être associées avec d'autres espèces.

De manière générale la destruction chimique est interdite en zone vulnérable sauf pour les parcelles :

- En TCS (techniques culturales simplifiées),
- Destinées à des légumes, maraîchage, porte-graines, car elles nécessitent un travail du sol avant le 15 novembre.
- Infestées par des adventices vivaces (ce cas doit faire l'objet d'une déclaration auprès de la DDT(M))

4.4. Les mélanges

Dans notre projet nous cherchons à mettre en place des mélanges d'espèces de couverts végétaux. Mélanger les espèces végétales permet de bénéficier de leurs différentes propriétés mais aussi de réaliser des effets de synergie entre les espèces permettant un meilleur développement général. Dans le cas des mélanges légumineuse/non-légumineuse par exemple la légumineuse permet un meilleur développement de la plante associée.

Ces mélanges augmentent néanmoins la complexité du choix de mélange, car les différentes espèces doivent être complémentaires et suivre le même itinéraire technique : date de semis, date et mode de destruction similaire, les mêmes objectifs de valorisation. En absence de semoirs multi trémies il est également important de choisir des espèces avec des tailles de semences relativement similaires, pour éviter une sédimentation au fond du semoir.

Enfin il faut bien raisonner les densités de semis. Pour cela on peut se baser sur la dose de semence préconisée en dose pure puis de les pondérer par le pourcentage final de l'espèce désirée dans le mélange. Néanmoins certaines espèces comme la moutarde se développent plus rapidement et deviennent rapidement étouffantes, empêchant le développement du reste du mélange. Il s'agit donc de prendre en compte dans la densité de semis, ce phénomène, pour obtenir une densité finale de plantes voulue.

4.3. Le choix final du mélange

Le choix d'un couvert végétal est donc complexe car il prend en compte de très nombreux facteurs. Il s'agit de bien connaître les propriétés des différentes espèces disponibles. Pour cela de nombreux documents sont disponibles sur internet, détaillant leurs caractéristiques (CADILLON.A, s.d.).

L'ITAB et le réseau technique AB des Chambres d'Agriculture, assemblant des conseillers agricoles, des animateurs et des professionnels ont réalisé un ensemble de 40 fiches de couverts, disponible sur le lien suivant :<http://agriculture-de-conservation.com/sites/agriculture-de-conservation.com/IMG/pdf/interculture-bio-2013.pdf>.

En raison de la complexité du choix, de nombreux organismes agricoles ont par ailleurs développé des outils d'aide à la décision en ligne, permettant de simplifier le choix de l'agriculteur en renseignant ses différents objectifs et contraintes. En voici quelques-uns :

- Caussade semence propose un outil permettant de renseigner les coordonnées GPS, ainsi que le type de sol et apporte un conseil de mélanges dans le catalogue de variétés qu'il développe. (CAUSSADE Semence , s.d.),
- Jouffray Drillaud dispose d'une application permettant le choix de couverts dans leur gamme de variétés (DRILLAUD, s.d.)
- Arvalis a également mis au point un OAD, suivant le même concept. (ARVALIS, s.d.)

Les deux premiers outils ont l'avantage d'être réalisés directement par des semenciers et donc d'être issus de résultats d'essais, utilisant les variétés qui sont recommandées dans l'outil. Ils apportent donc plus de précision. Néanmoins dans notre cas nous nous baserons sur les résultats obtenus par Arvalis, afin d'apporter un conseil adaptable à tout type de semence et plus indépendant.

Pour mieux comprendre le fonctionnement de l'outil nous réaliserons quelques simulations, sur une parcelle de la région lilloise, dans une rotation blé, orge, betterave sucrière, pomme de terre, haricots, et petits pois :

- Première simulation avec un semis de couverts végétaux, au semoir à dent avant la mi-août, entre un blé et des pommes de terre. L'outil Arvalis nous propose alors en espèces pures : de l'avoine de printemps, de l'avoine rude, de l'avoine d'hiver, de la phacélie, du fenugrec, des féveroles. Soit un mélange avoine/féverole ou avoine/phacélie.

Composition du mélange	Densité (kg/ha)	PMG (g)	Densité (grains/m²)	Coût (Euros/ha)	Composition du mélange	Densité (kg/ha)	PMG (g)	Densité (grains/m²)	Coût (Euros/ha)
Avoine de printemps	30	36.1	83.1	-	Phacélie	3.5	2	175	-
Féverole de printemps	90	525	17.1	-	Avoine rude	17.5	16.9	103.6	-
Mélange	120 kg/ha	-	-	26 à 40 €/ha	Mélange	21 kg/ha	-	-	41 à 55 €/ha

Figure 57- 2 mélanges préconisés par Arvalis. (Source : [choix-des-couverts.arvalis-infos.](#))

- En sélectionnant des caractéristiques recherchées du couvert, le conseil peut être affiné. Par exemple en cherchant des espèces piégées à nitrates, ou ayant un effet fertilisant. Arvalis nous conseille alors de l'avoine, et de la phacélie dans le premier cas ; de la féverole, du fenugrec, et du trèfle incarnat dans le deuxième cas. Une dernière recherche avec les mêmes critères nous permet d'obtenir comme le montre le tableau ci-dessous les mélanges disponibles combinant ces deux critères.

		Période de semis	Culture suivante	Mode de semis	Piège à nitrate	Effet fertilisant
Score	COUVERT <i>Famille</i>	Du 30/07 au 16/08	Pomme de terre	Semis avec semoir à dents	Oui	Oui
3.5	Avoine de printemps + Féverole de printemps <i>Mélange</i>			++	++	++
2.2	Radis chinois + Avoine rude + Phacélie <i>Mélange</i>			++	++	++
2.1	Féverole de printemps + Moutarde blanche nématicide <i>Mélange</i>			++	+/-	++
1.7	Radis chinois + Alpiste des Canaries + Phacélie + Fenugrec <i>Mélange</i>			++	+	++
1.5	Radis chinois + Niger + Phacélie + Fenugrec <i>Mélange</i>			++	+	++

Figure 58: Choix d'un mélange en fonction de la période de semis, de la culture suivante, du mode de semis, de l'effet piège à nitrate et fertilisant. (Source : choix-des-couverts.arvalis-infos.fr).

Les mélanges les plus adaptés semblent être les mélanges 1 et 3, car ils présentent le meilleur équilibre entre l'ensemble des critères. Néanmoins certains facteurs ne sont pas étudiés par cet outil comme leur capacité à limiter l'enherbement, ainsi que la capacité structurante du système racinaire. Par exemple le mélange N°1 permet une structuration profonde et de surface avec le système racinaire fasciculé de l'avoine et pivotant de la féverole. Le mélange N°3 quant à lui serait plus adapté à un sol présentant une forte semelle de labour car les deux espèces ont un système pivotant.

Il s'agit de vérifier ensuite sur les fiches de chaque espèce qu'elles présentent bien les bonnes caractéristiques et sont bien compatibles (destruction, semis, lutte adventice, vitesse de développement etc.). De plus il est important de prendre du recul par rapport aux informations apportées, car il existe des variations importantes en fonction de la variété choisie (sensibilité au gel, sensibilité aux ravageurs, date de floraison, production de biomasse).

5. Détermination des apports de chaque espèce d'un couvert végétal

Les outils décrits plus haut permettent donc de faciliter le choix des couverts néanmoins, ils ne détaillent pas précisément les apports des différentes espèces. Des études ont pourtant été réalisées afin de déterminer la fixation et restitution en azote, phosphore, potassium et carbone des différentes espèces composant un couvert végétal. Ces connaissances permettent d'affiner le choix des espèces, par exemple dans le cas où plusieurs légumineuses sont utilisables, pour identifier celle capable de fertiliser au mieux le sol. Cela permet également de calculer les apports des couverts végétaux pour les faire rentrer dans les bilans de fertilisation.

Voici quelques études intéressantes sur les couverts végétaux.

5.1. Détermination par la méthode MERCI, des apports minéraux de chaque espèce

a) Présentation méthode MERCI

La méthode Merci (Méthode d'estimation des éléments restitués par les cultures intermédiaires), permet d'identifier :

- La MS produite par le couvert ;
- L'azote, phosphore et potassium stockés par le couvert ;
- Les minéraux disponibles après une culture intermédiaire.

La méthode de calcul :

ETAPE 1 : Mesure biomasse verte

ETAPE 2 : Mesure biomasse sèche ou application d'un coefficient correcteur à partir de la biomasse verte.

ETAPE 3 : Evaluation de la quantité d'éléments piégés dans le couvert lors de sa destruction. Le résultat est obtenu en multipliant la biomasse produite, par la richesse en éléments N, P, K de la plante. Le % de chaque élément dans la plante dépend bien entendu de l'espèce et a donc été déterminé par des mesures terrains.

ETAPE 4 : Calcul de la quantité d'éléments disponible pour la culture suivante, en utilisant le logiciel de modélisation STICS.

La méthode MERCI a été réalisé à base d'essais en Poitou- Charente, mais aussi de référence de nombreuses autres chambres d'agriculture en France. Le résultat de ces calculs peut donc être facilement utilisable partout en France. Ces essais ont permis de confirmer la fiabilité du modèle avec une erreur moyenne de +/- 15kgN/ha.

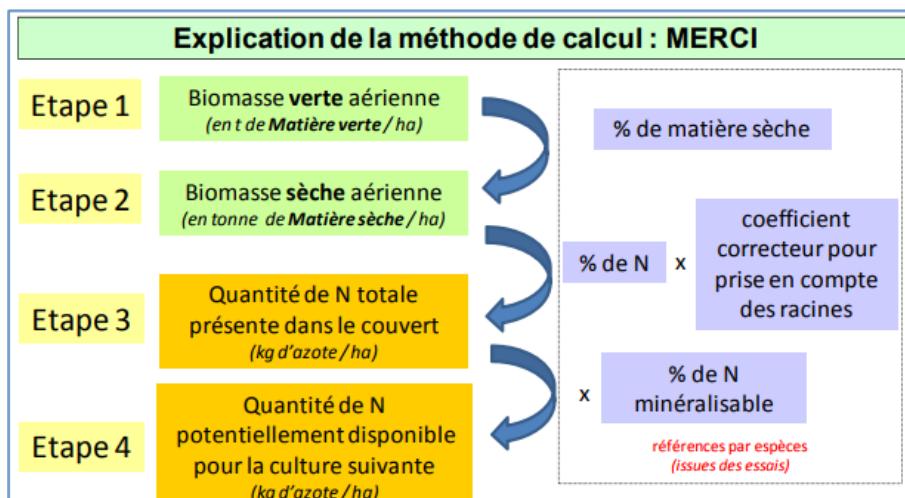


Figure 59: Etapes de calcul de la méthode MERCI. Source <http://agriculture-de-conservation.com/MERCI-mesurez-les-elements.html>.

Ainsi l'utilisateur doit simplement renseigner des mesures de la biomasse produite sur la parcelle. Cette biomasse peut être renseignée en biomasse verte, biomasse sèche ou hauteur. Il doit également renseigner la date de semis et de destruction, afin de prendre en compte le taux C/N du couvert qui varie au cours de sa croissance et influence fortement sa décomposition. Pour plus de détails sur la méthode de mesure se référer à l'Annexe 1.

Dans notre projet nous cherchons à prodiguer un conseil sur l'implantation des cultures intermédiaires, nous ne pouvons donc réaliser ses mesures terrain puisque notre conseil intervient avant la date de semis. Une valeur moyenne devra être utilisée, en prenant en compte la date prévisionnelle de destruction du couvert.

Limites :

- Il s'agira donc d'être prudent quant aux résultats de biomasse apportés qui pourront être sur ou sous-évalués en fonction de la météo, du type de sol, des conditions d'implantations, et autres facteurs pouvant influer sur la croissance du couvert.
- De plus, la lixiviation des éléments minéraux n'est pas prise en compte dans les calculs MERCI, il s'agit donc de relativiser les résultats, ou d'utiliser un modèle complémentaire comme Lixim qui détermine la lixiviation.
- Les valeurs obtenues sont à diminuer de 25 % pour le semis direct et les intercultures courtes (blé tendre, colza d'hiver, ...)

D'une manière globale la méthode MERCI permet d'obtenir une bonne approche de l'apport des couverts en distinguant chaque espèce. Néanmoins il ne faut pas oublier qu'il s'agit d'un modèle général, basé sur des mesures nationales, et qui ne prend pas en compte les spécificités locales de la parcelle.

Pour diminuer les incertitudes et réaliser un conseil plus personnalisé à la parcelle, nous pourrions envisager :

- De réaliser des mesures de biomasse produite chez l'agriculteur afin d'obtenir un historique spécifique à chaque parcelle. Cette mesure pourrait être effectuée comme pour la méthode MERCI, mais aussi par imagerie. Cette problématique pourrait être intéressante à développer.
- Utiliser le logiciel de modélisation STICS pour déterminer le %MS, le %N, %P, %K, du taux de minéralisation, du taux de lixiviation, en fonction des caractéristiques intrinsèques de la parcelle, (météo, analyse de sol, ITK, etc.). Nous pourrions même en poussant notre réflexion imaginer faire tourner ce modèle en utilisant des informations de la parcelles spatialisées (fertilisation, azote, rendements). Cette étape n'est néanmoins pas à réaliser à court terme, mais pourrait être envisagée dans le futur.

b) Identification de la biomasse produite

Pour faire tourner le logiciel de calcul MERCI, nous cherchons à identifier la biomasse produite par espèce, pour cela nous nous baserons sur de la bibliographie. Une étude Arvalis menée de 2001 à 2011, a permis de mesurer les valeurs de biomasse moyenne des différentes espèces de couverts végétaux. (ARVALIS, Arvalis-infos, 2014) Voici, ci-dessous, les caractéristiques de cette étude : (LABREUCHE J. , s.d.)

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">- Localisation des essais : 11 essais à Boigneville (91) de 2001 à 2011, autres essais les automnes 2009 à 2011 à Etoile-sur-Rhône (26), Mesnil-Bruntel (80), La Brillanne (04), Rots (14), Remilly (21), La Cheppe (51), Genas (69) et Le Magneraud (17).- Date de semis : 10 - 25 août.- Date de mesure de la biomasse : fin octobre à fin novembre- Mesure de biomasse : Partie aérienne y compris le collet dépassant de terre. |
|--|

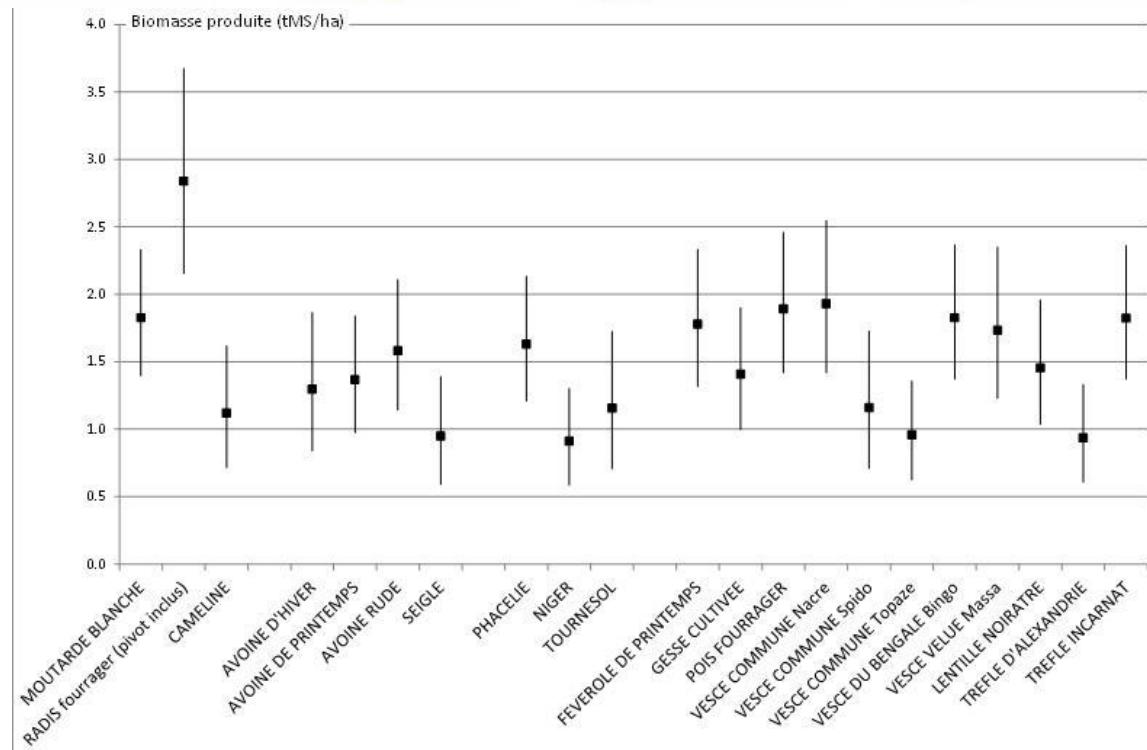


Figure 60: Biomasse de différentes espèces ou variétés de cultures intermédiaires (résultats obtenus sur 23 essais et traités en utilisant un modèle linéaire mixte. Le point représente la moyenne et le tiret l'intervalle de confiance). (Source Arvalis institut du végétal)

Ce graphique, nous donne la moyenne de la biomasse mesurée par espèce de couverts végétaux en tonne de MS/ha. Pour pouvoir intégrer cette valeur dans la feuille de calcul MERCI, il faut convertir en g par m².

c) Calcul des apports des espèces par la méthode merci

A partir de ces valeurs de biomasse il est possible de calculer grâce à la feuille de calcul, les apports de chaque espèce. Pour cela nous fixons, des dates de semis et de récolte identique au paragraphe précédent, pour être cohérent avec les mesure de biomasse d'Arvalis.

Date de semis : 17 aout
Date de récolte : 15 novembre

Ainsi nous obtenons grâce à la méthode MERCI les caractéristiques de chaque espèce végétale, en Azote, Phosphore, Potassium et Carbone, restituables à la culture suivante. Notre concept consistant à adapter les espèces de plante en fonction des propriétés des sols, ces résultats permettront de réaliser un choix objectif.

Le choix des espèces se fera en fonction des différents paramètres étudiés. Nous allons donc étudier un par un les résultats obtenus pour chacun de ces paramètres afin d'identifier les espèces les plus intéressantes. En utilisant la méthode MERCI associée aux mesures de biomasse d'Arvalis, nous obtenons les graphiques suivants des restitutions minérales par espèce.

➤ L'AZOTE :

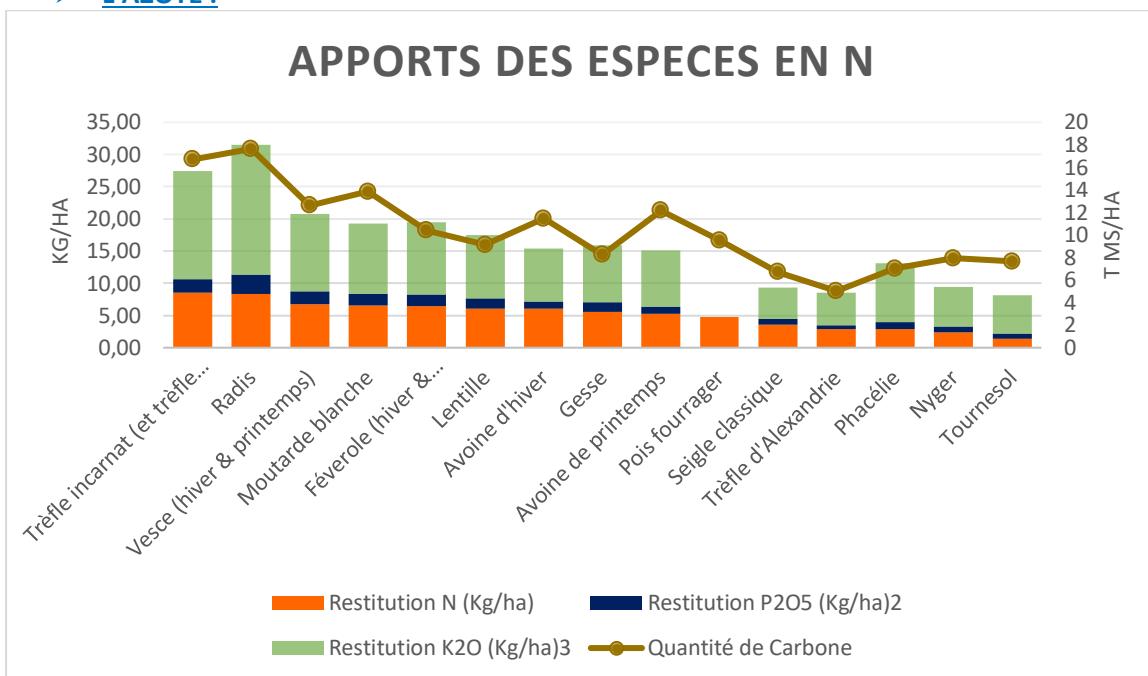
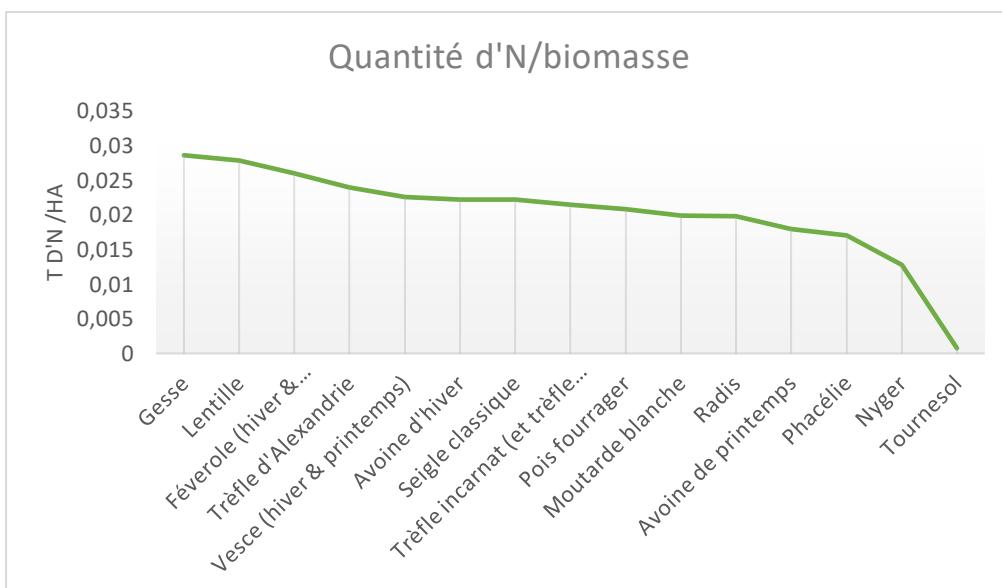


Figure 61: Apport des espèces en N. (Source MERCI.)

Dans ce graphique les espèces sont classées en fonction de capacité de restitution d'azote pour l'année suivante. Les plantes assurant la meilleure restitution d'azote pour la culture suivante sont donc le trèfle incarnat, le Radis, la moutarde blanche, la féverole, et la lentille. On remarque néanmoins que ce ne sont pas forcément les légumineuses qui restituent le plus d'azote dans les sols. En outre ce résultat est à relativiser, car l'azote capté par la légumineuse est avant tout d'origine symbiotique et enrichit le sol, tandis que les autres plantes ne font que stocker de l'azote déjà présent dans le sol. Les faibles résultats obtenus par les légumineuses pourraient également s'expliquer par une production de biomasse plus faible par les légumineuses. En croisant quantité d'azote par rapport à la biomasse produite par une même plante on peut déterminer la concentration en azote dans la plante. Ce calcul a été effectué et étudié dans le graphique ci-dessous.



Ce graphique montre bien que ce sont chez les légumineuses que la concentration en azote dans les plantes est la plus forte. Elles jouent donc bien leur rôle d'enrichissement des sols en azote à partir du diazote de l'air.

Figure 62:concentration en azote dans les plantes. (Source MERCI.)

Afin de réaliser notre conseil il s'agit de bien distinguer les résultats obtenus par les légumineuses qui enrichissent les sols en azote de ceux des autres plantes qui ne font que capturer l'azote déjà présent dans les sols. Le rôle de ces deux catégories de plantes ne sera pas le même dans notre préconisation.

- Les légumineuses seront apportées sur des sols pauvres en azote. Dans ce cas le graphique suivant peut nous aider à déterminer les espèces les plus appropriées, comme le trèfle incarnat, la vesce, la féverole, les lentilles, et la gesse, qui apportent respectivement une quantité très importante d'azote.
- Les autres jouent le rôle de CIPAN culture intermédiaire piège à nitrate. Plus la quantité d'azote stockée sera importante mieux celles -ci joueront leur rôle de fixation de l'azote dans les sols. C'est notamment le cas du radis, de la moutarde, et de l'avoine, qui sont de particulièrement bons pièges à nitrates.

➤ LE PHOSPORÉ

Le phosphore est un élément indispensable à la croissance des plantes, qui l'absorbent majoritairement sous sa forme soluble dans le sol (ions). Il est majoritairement stocké sous forme minérale (roches) ou organique (matière organique) formes très difficilement utilisables par les plantes. La solubilisation de ce phosphore dans la solution du sol est généralement très courte et a tendance à reformer des complexes non absorbables. Les racines, grâce à leurs exsudats racinaires, peuvent dissoudre ce phosphore, néanmoins cela nécessite une grande prospection racinaire, car le phosphore est très peu mobile dans le sol. Il peut être intéressant de mettre à profit la période d'interculture pour mobiliser le phosphore via les racines des couverts végétaux. Transformé en phosphore organique celui-ci sera plus facilement utilisable par la culture suivante.

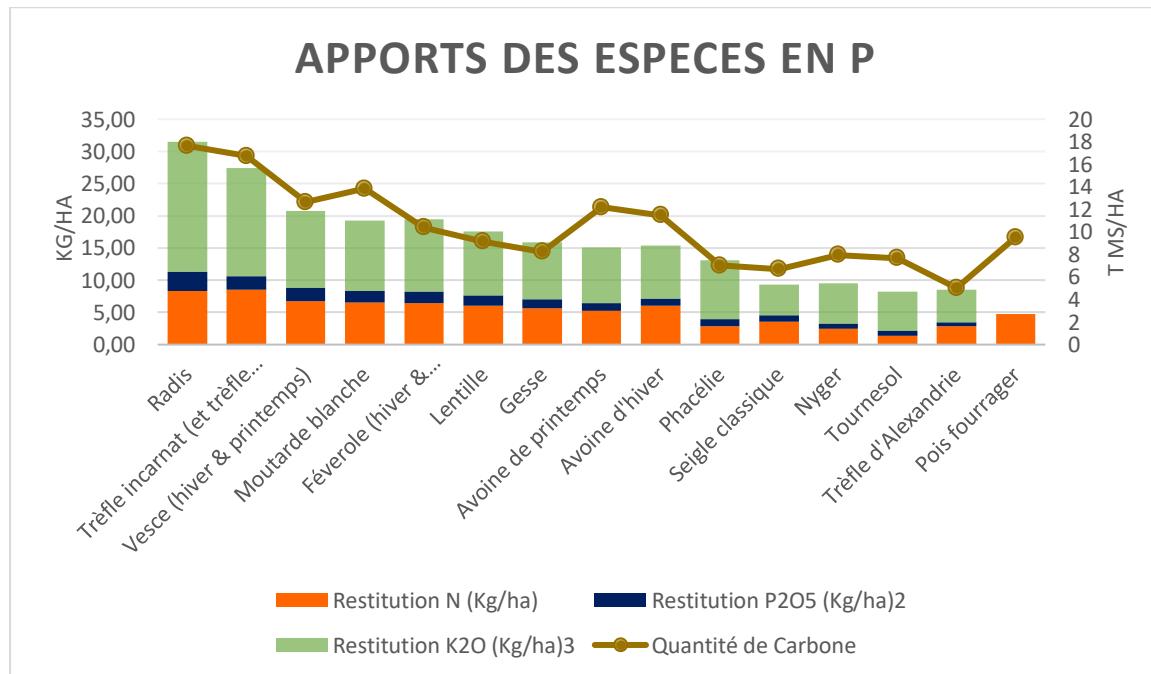


Figure 63: Apports en phosphore des espèces. (Source MERCI.)

Dans le graphique ci-dessus les espèces de couvert végétal sont classées en fonction de leur capacité de restitution du phosphore dans la culture suivante. On remarque que la capacité de restitution du phosphore est fortement corrélée à la biomasse. L'espèce la plus restitutrice de phosphore est donc le radis, suivi par le trèfle incarnat, la vesce, la moutarde blanche, et la féverole.

➤ LE CARBONE :

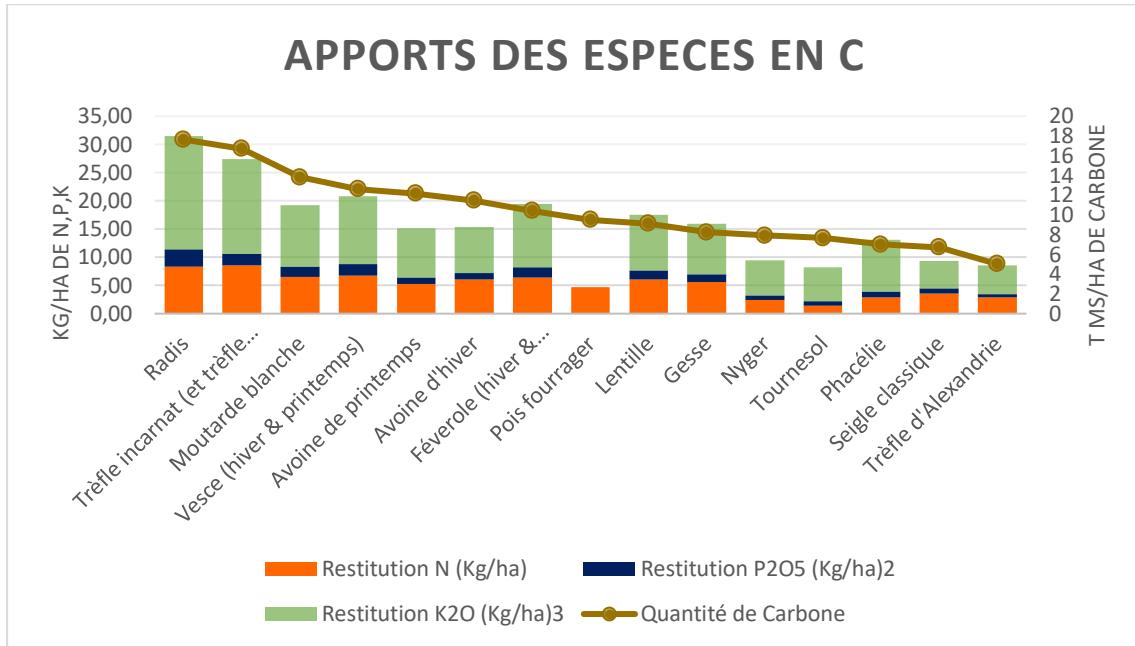


Figure 64: Apport en carbone des espèces. (Source MERCI.)

Dans le graphique ci-dessus, les espèces ont été classées en fonction de leur capacité de restitution de carbone au sol, et donc leur capacité d'augmentation du taux de Mo. Comme pour les autres paramètres, le radis, le trèfle et la vesce présentent des résultats très positifs. Le radis est de loin le meilleur producteur de matière organique.

Il nous manque donc la biomasse produite par de nombreuses espèces identifiable grâce à la méthode MERCI : blé tendre d'hiver, choux fourrager, colza d'hiver, fenugrec, lin, luzerne, mélilot, mercuriale, minette, navette, orge de printemps, orge d'hiver, pois protéagineux, radis chinois, ray-grass d'Italie, ray-grass hybride, repousses de blé tendre, repousses de colza d'hiver, sarrasin, seigle hybride (J.D.), sorgho fourrager, trèfle blanc, trèfle souterrain, trèfle violet (et trèfle de Perse).

6. Technique de semis

La modulation des couverts végétaux proposée par notre modèle consiste à semer différents types de semences en simultané et d'adapter la densité de chacune des espèces du mélange en fonction de l'hétérogénéité du sol. La densité de semis doit donc être modulée sur la parcelle au cours du semis. Les semences ne peuvent donc pas être mélangées initialement dans une seule trémie, mais directement au champ.

La technique nécessite donc un semoir de 3-4 trémies, pour chacune des espèces de couverts végétaux. Chacune de ces trémies présente un débit prédéfini, qui varie par réglage électronique via une cartographie connectée par GPS.

7.1. Le semis des couverts végétaux

a) *Le semis sous la coupe*

Semis directement à la moisson, la graine est déposée sur le sol et recouverte de paille broyée. Elle a l'avantage de bénéficier au maximum de l'humidité restant dans le sol après la moisson et d'augmenter la durée de développement du Couvert végétal. (ARVALIS, 2015)

b) *Le semis direct sur chaume*

Le couvert est implanté sur les chaumes, soit peu de temps après la moisson. Il permet de ne pas trop stimuler la levée des repousses, ce qui est intéressant pour semer dans un délai très court après moisson. Pour cela on peut utiliser un semoir à disques pour enfouir la graine, mais qui risque d'enfouir de la paille dans les sillons, ou un semoir à dent qui permet un meilleur contact entre le sol et la graine mais qui entraîne une levée d'adventices comme s'il s'agissait d'un faux semis.

Mode de semis	Technique de semis	Illustration	Avantages	Inconvénients
Semis sous mulch de paille	Semis sur moissonneuse-batteuse		- Peu onéreux - Pas de passage spécifique	- Ne convient pas à toutes les espèces - Implantation très précoce - Opération supplémentaire à gérer lors de la récolte
Semis sur chaume	Semoir SD à disques		- Qualité de distribution - Pas de bouleversement du sol - Puissance nécessaire peu élevée	- Levée moyenne sur pailles mal réparties - Débit de chantier faible
	Semoir SD à dents		- Qualité de la distribution - Placement de la graine - Peu de bouleversement du sol	- Débit de chantier faible
Semis sur sol déchaumé	Outil animé + semoir à disques		- Qualité de la distribution	- Débit de chantier - Puissance nécessaire
	Semis sur déchaumeur avant le rouleau		- 2 passages de déchaumeur - Débit de chantier	- Graines à peine recouvertes de terre
	Semis à la volée enterrée avec un passage de déchaumeur		- 2 passages de déchaumeur - Débit de chantier	
	Semis à la volée puis rouleau		- Coût - Possibilité de combinaison	- Graines à peine recouvertes de terre

Figure 65: Performance de différents chantiers de semis de cultures intermédiaires derrière un précédent paille restituée. (Source :arvalis-infos.fr).

c) Le semis à la volée sur un outil de déchaumage juste après moisson

Le semis se fait juste après un déchaumage. Il permet un travail du sol pour la mise en place du couvert. Mais il y a un risque de levée des adventices et donc de concurrence avec le couvert.

d) Le semis sur sol déchaumé

Le semis sur sol déchaumé permet une levée homogène du couvert car il facilite le travail des semoirs. Néanmoins il existe des problèmes de levée d'adventices et de sécheresse car les 10 premiers centimètres sont asséchés. La levée est donc retardée par rapport à un semis directement après la moisson.

Deux types de semis peuvent être alors employés :

- **Le semis avec un semoir traditionnel ou adapté au semis direct** : Permet une bonne mise en place du couvert, avec un contact sol/ graine. Il assure également une bonne précision de semis et est compatible avec tout type de graine (grosses et petites)
- **Le semis à la volée (centrifuge ou pneumatique)** : Les graines sont réparties aléatoirement en surface, le passage d'un rouleau est donc nécessaire pour assurer le bon contact entre le sol et la graine. Toutes les espèces ne tolèrent pas ce type de semis, les plus adaptées sont les crucifères type moutarde.

7.2. Semis à la volée

« Si les solutions de semis à la volée sont intéressantes (notamment avant ou pendant la récolte) en assurant des coûts très faibles, elles ne permettent pas de mettre en place des mélanges complexes. Mieux vaut alors investir dans un semis classique, en TCS ou en semis direct, au disque ou à la dent. Le positionnement de la graine dans le sol permet, comme pour une culture, de mettre l'ensemble des semences en conditions favorables, d'autant plus en été que le risque d'assèchement de la surface est grand. » (ARCHAMBEAUD.M, 2009)

Le semis à la volée ne semble donc pas être une solution à retenir pour la mise en place de notre concept. Trois raisons peuvent être identifiées :

- Le semis à la volée ne permet pas une implantation des semences favorable à une bonne levée.
- Absence de précision dans le semis qui se fait généralement par un outil de distribution à force centrifuge, propulsant les semences sur une distance pouvant aller jusqu'à 24m de large. La distribution des graines est donc aléatoire, et fortement influencée par la forme et la taille de chaque graine.
- Absence d'outils de semis à la volée avec plusieurs distributions qui nous permettraient de moduler la densité de semis par espèces.

7.3. Semis en ligne

Le semis en ligne permet donc une meilleure implantation des semences mais aussi plus de précision qu'un semis à la volée.

Des semoirs composés de 2-3 trémies existent aujourd'hui sur le marché. Ils sont destinés entre autres au semis des couverts végétaux mais aussi aux grandes cultures blé, orge etc. Ils sont également utilisés pour épandre des engrains simultanément d'un semis. Ces types de semoirs sont particulièrement utilisés en TCS.

Plusieurs types de semoirs multi trémies existent et diffèrent légèrement dans leur mode de distribution des graines :

- 1 trémie principale divisée en deux compartiments par une paroi. Celle-ci est mobile et permet d'augmenter ou diminuer la taille d'un des compartiments en fonction de la différence de volume des semences.
- 2 trémies fixes avec deux distributions différentes qui s'adapte à des types de graines différentes.

Ces deux types de semoirs sont relativement répandus chez de nombreux constructeurs de semoirs en semis-porté : Sky, John Deere, Sulki.

Il n'est pas rare que les agriculteurs rajoutent d'eux même une distribution supplémentaire pour épandre l'engrais en simultané par exemple.

D'après Hugues Lecars, Gérant du constructeur de machines agricoles Costa, ce type d'outil coûte environ 100000€ en 6m et serait actuellement utilisé par 15% de leurs clients agriculteurs.

Sur ce type de matériel la densité de semis de chaque trémie est bien modulable, via l'ordinateur de bord. L'agriculteur effectue un préréglage de ses trémies avant de rentrer dans le champ. D'après Hugues Lecars, il semble néanmoins impensable de demander à un agriculteur de régler son semoir manuellement sur l'ordinateur de bord à chaque fois qu'il change de zone. En effet pour des raisons de rapidité de travail les zones de peuvent pas être semées une par une, mais simultanément en bande, en fonction de la configuration de la parcelle et de la localisation des fourrées. Sur l'exemple ci-contre il faudrait donc changer 6 fois les réglages sur une seul aller-retour. Il est donc indispensable de fournir à l'agriculteur une cartographie de sa parcelle qu'il pourra directement entrer dans l'ordinateur de bord et qui modulera lui-même la densité de semis.

Voici l'exemple ci-contre d'un modèle de semoir 3 trémies de la marque SKY :



Figure 66- modulation de semis



Figure 67- Trémie pro (source : agriculture.com)

Pour approfondir les connaissances ci-dessus, nous avons échangé par entretien téléphonique avec Christophe de Carville, de Sky Agriculture.

Les semoirs plusieurs trémies ont été développé dans un premier temps pour épandre les engrais en simultané mais ils ont été de plus en plus utilisés par les agriculteurs pour semer des multi espèces, des couverts végétaux ou des plantes compagnes.

Chez Sky deux gammes de semoirs multi trémies, de prix moyen 100000€ :

- EsayDrill

Semoirs adaptés au semis sous couvert, composés de 2 à 3 trémies. Ce type de semoir est vendu à 100% en double trémie avec une petite partie en triple trémie. Ces semoirs sous couverts ne sont quasiment plus produits en simple trémie.

- Semoirs Maxi Drill

Ce sont des semoirs adaptés aux TCS. La part des semoirs équipés de plusieurs trémies est moins importante dans cette catégorie de semoirs mais existe.

La modulation de densité de semis :

La modulation de la densité de semis est possible avec ces deux types de semoirs, elle peut se faire de différentes manières :

- Manuellement : l'agriculteur depuis sa cabine peut moduler de +/- 10% la densité de semis de l'ensemble en fonction de la connaissance de sa parcelle, et du taux de levée. Cette méthode nécessite un technicien investi et expérimenté car elle demande de la concentration.
- Par carte de modulation de semis :

L'ensemble des semoirs sont automatiquement équipés de cette fonction mais seule une infime minorité d'exploitants l'utilise réellement, sur des semoirs. Il est donc possible de rentrer une carte SD dans la console de guidage du tracteur, ou dans le boîtier de géolocalisation. Le système va chercher la dose de semence dans la carte et permet ainsi de moduler jusqu'à deux trémies.

Il est bien entendu nécessaire d'être équipé d'un tracteur utilisant des techniques de géolocalisation. Néanmoins les problèmes de compatibilité entre les systèmes de traitements de la donnée sont une difficulté technique récurrente. Les semoirs SKY utilisent un système de BDS avec le langage LH5000, compatible avec le système de leur partenaire anglais SOIL SYSTEM.

Il est bien entendu possible d'utiliser d'autres systèmes et fournisseur de géolocalisation, néanmoins les risques d'incompatibilités augmentent.

Contacts : Le spécialiste chez Sky de la modulation et ses techniques : M. Serge Nourry 0612414709, serge.nourry@sulkyburel.com

7.4. Conclusion

Le semis des couverts végétaux avec 3 espèces différentes est techniquement faisable aujourd'hui. Il est possible de moduler 2/3 densité de semis des espèces désirées. Néanmoins ces techniques ne sont disponibles que pour des agriculteurs en TCS ou semis sous couverts équipés de ce type de semis, et de système de géolocalisation. La clientèle est donc extrêmement faible à ce jour.

ETUDE SATELLITE

1. Recherche Satellites, premier serveur et NDVI

1.1. Fonctionnement du programme Copernicus

La première étape de l'étude de faisabilité technique a consisté à choisir les outils les plus pertinents, par rapport aux attentes de la startup. Se présentait en effet le choix entre divers outils : imagerie satellite, photographies et mesures par survol en drone, ou encore effectuer des relevés sur le terrain, par exemple. La décision finale s'est arrêtée sur l'imagerie satellite, puisque cela permettra à la fois d'automatiser toutes les tâches, d'éviter les déplacements donc des frais supplémentaires, sur le terrain et de couvrir de grandes surfaces.

L'objectif était d'automatiser un maximum d'étapes lors de l'établissement des cartes, pour éviter à la startup de faire les tâches rébarbatives. Pour cela, les choix de conception ont été orientés vers l'élaboration d'outils capables de suivre un processus allant du téléchargement des données brutes du satellite vers la création de la carte qui sera envoyée à l'agriculteur.

Il n'y avait alors plus qu'à choisir le programme satellite parmi ceux qui existent. Les deux principaux concurrents sur ce marché sont les programmes américains LandSat et européen Copernicus. Les deux programmes fonctionnent à peu près sur le même principe, il existe des API pour accéder à leurs bases de données. La balance a finalement basculé vers Copernicus, car le principe des bandes de fréquences était plus simple à utiliser, que le programme est durable (jusque 2030 au moins), et qu'en plus, le programme est européen.

Le choix des satellites ayant été fixé à Copernicus, il a fallu chercher le moyen d'accéder à toutes ses données. Diverses possibilités étaient envisageables. Il existe une API Copernicus, accessible via un navigateur internet à l'adresse <https://scihub.copernicus.eu/>. Cette API propose une carte du monde, sur laquelle il faut dessiner la zone à étudier. Un menu déroulant contient un filtre pour sélectionner les données intéressantes. Il est possible de filtrer par date, par satellite, par instrument de mesure etc... Cette solution n'a pas été retenue, puisque pour atteindre une donnée en particulier, un grand nombre d'étapes doit être réalisé à la main.

Il existe également une copie des données de Copernicus sur un serveur Google, accessible à partir de Google Earth Engine. Cette méthode a été évitée également, étant donné que les données sont exploitables manuellement par navigateur internet.

La copie conservée par Google est également accessible sur Google Cloud Platform, où les données sont accessibles par un fastidieux système d'arborescences, où chaque groupe d'image satellite est rangé selon ses coordonnées GPS.

Finalement, en poussant les recherches sur les sites officiels du programme spatial Sentinel, un fichier de commande bash linux a été découvert. Celui-ci permet d'effectuer de nombreuses opérations de lecture et de tri dans les données des satellites Sentinel. Il a donc subi quelques adaptations pour notre utilisation : il a été simplifié et épuré au maximum, et le nombre d'arguments a été fortement réduit, pour n'arriver qu'aux coordonnées de la zone qui s'avère intéressante. Par exemple, les arguments concernant les identifiants de connexion au hub de Sentinel, les instruments qui sont intéressants, les satellites concernés, le nombre d'images désirées ont été intégrés au script pour ne pas avoir à les renseigner à chaque appel du script.

Le script bash permet donc de faire ceci :

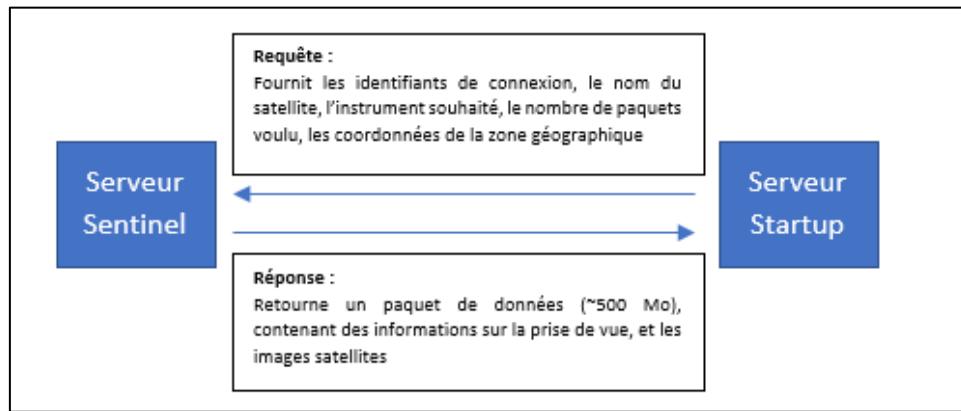


Figure 68- Schéma de fonctionnement du Bash

Il a donc été possible de récupérer des données satellites depuis internet. Il suffit dès lors de renseigner les coordonnées GPS standard (avec latitude / longitude) pour avoir accès à de nombreuses données correspondant à un endroit donné (par exemple, le rayonnement infrarouge)

1.2. Création d'un premier serveur

Une fois l'existence du fichier Bash découverte, une répartition des tâches a été effectuée, certains ont travaillé sur la compréhension et la simplification dudit fichier, tandis que d'autres se sont attelés à savoir comment l'utiliser de manière automatisée. C'est ainsi qu'il a été constaté qu'il existait des modules en Node Js. Il s'agit d'une plateforme logicielle libre codée en JavaScript, permettant de mettre en place des serveurs web. Etant donné que la mise en place d'une application web avait été décidée, pour le côté multiplateforme, cette solution était parfaite.

Il a donc fallu se lancer dans l'apprentissage de Node JS, ne disposant de personne dans l'équipe qui ait déjà utilisé cette technologie. Pour ce faire, l'équipe dédiée à cette partie a suivi un tutoriel présent sur OpenClassroom. Ensuite, une communication en temps réelle était désirée pour le serveur. Il fut alors nécessaire de se pencher sur le système de socket, permettant d'établir ce genre de communication sur les serveurs, disposant également d'un module pour Node JS.

Cette version de site/serveur servait vraiment de base au projet, et à l'utilisation de bash et de Copernicus. Il y avait donc plusieurs boutons permettant d'indiquer au serveur de lancer telle ou telle fonctionnalité, afin de tester directement ces dernières, d'évaluer leurs robustesses, et surtout de ne pas avoir à relancer un téléchargement pour le test de fonctionnalités qui nécessitaient juste d'intervenir sur les dossiers/archives.

Les fonctionnalités présentes à ce moment étaient donc :

- Lancement du fichier bash de Copernicus, en lui passant latitudes et longitudes
- Extraction des images du fichier Zip ainsi téléchargé, en supprimant le reste, afin de répondre à la problématique posée par le poids des données de Copernicus.
- Suppression des fichiers de téléchargements de Copernicus, pour indiquer les noms de paquets téléchargés.
- Puis, lorsqu'il fut effectué, le calcul du NDVI à partir des images téléchargées.

Nous pouvions ainsi vérifier et garder une maîtrise sur toutes les étapes du serveur. Cette partie technique fut assez complexe, étant donné que l'apprentissage et la découverte de Node JS était en cours, et dans le même temps les modules utilisés qui s'avéraient pour certains assez complexes.

Parmi, les modules utilisés à ce moment-là, il y avait :

- Http pour lancer le serveur.
- Fs et path pour la manipulation de fichiers et de dossiers dans le dossier de stockage du serveur.
- Socket io pour permettre les connexions et la communication en temps réel.
- Child_process pour lancer les fichiers bash et python depuis le serveur
- Csv-parse pour extraire les noms des archives téléchargées depuis un fichier csv créé par Copernicus.
- Adm-zip pour extraire uniquement les dossiers images des archives de Copernicus

Cette version de serveur était donc capable de télécharger les données nécessaires à la création d'un NDVI pour une zone donnée, de générer ce NDVI et de nettoyer les fichiers restants.



Figure 69- Image du premier site

1.3. Calcul du NDVI par traitement d'images

Un souci se posait pour le traitement du NDVI. Les images téléchargées par Copernicus étaient au format JP2, un format qui paraissait à l'origine inexploitable. Plusieurs mesures ont été tentées pour contourner ce problème, notamment la conversion de ces images en jpg, via le python ou encore le langage Java, mais ces deux méthodes se sont soldées par des échecs. De plus, au cours des tentatives, il a été constaté que la conversion en JPG causerait une perte d'information. Des recherches ont donc été lancées afin de trouver un moyen d'exploiter tout de même les JP2.

Une piste a finalement fini par être exploitée, l'utilisation de la bibliothèque Rasterio pour Python. Cette bibliothèque était justement utilisée pour le traitement des images téléchargées via Copernicus. Cette découverte a pu permettre le lancement du codage du script Python nécessaire à la génération du NDVI.

La bibliothèque Rasterio permet en effet d'ouvrir un fichier JP2 et de lui appliquer diverses modifications. Le point intéressant de cette bibliothèque est qu'elle permet d'exploiter et de conserver les informations concernant les coordonnées UTM contenues dans le fichier image. Voici comment fonctionne ce système de coordonnées militaire :

Chaque endroit de la planète appartient à une zone de 6° de largeur. Il y en a 120 au total (60 hémisphère Nord et 60 hémisphère Sud). Par exemple, voici la zone 31N :



Figure 70-Zone 31 N (Source : spatialreference.org)

Rasterio permet de récupérer ces informations sur une image de type JP2. Celles-ci ont une résolution de 10m et représentent un carré de 100 km de côté. Chaque pixel de cette image peut donc facilement être mis en relation dans ce système de repérage planétaire.

Ce sont ces informations qui nous permettent de superposer plusieurs images satellites et de générer le NDVI. Il suffit alors de considérer les photographies infrarouges comme des matrices de pixels, où les 2 premières coordonnées représentent la position du pixel dans l'image, et où la 3ème dimension donne la réponse au rayonnement infrarouge. La formulation suivante, celle du NDVI, est ensuite appliquée à chacune des entrées de la matrice :

$$\text{ndvi} = ([\text{Near InfraRed}] - [\text{RED}]) / ([\text{Near InfraRed}] + [\text{RED}])$$

Le résultat de ces opérations est stocké dans une matrice suivant le modèle des deux premières. Chaque pixel se voit attribuer une valeur de NDVI comprise entre 0 et 1 (cette valeur pourra être changée d'échelle de façon proportionnelle).

Une fois que ce script python a été mis en place, il fallait l'appeler depuis le serveur, comme expliqué précédemment au moyen du module Child Process, en lui envoyant les chemins d'accès aux deux images de bandes B04 et B08. Le script python récupérait ces données comme il récupérerait des arguments dans un exemple d'utilisation normal. Une image .tif était alors générée pour le NDVI, et stocké dans le dossier du serveur.

Il était donc possible d'obtenir les images NDVI automatiquement grâce au Python, Bash, et Node JS.

2. Création du site, découpage plus précis, nouveau serveur

2.1. Crédit du site

Une fois l'image NDVI obtenu, une proposition de réaliser un site Web qui permettrait à l'utilisateur de saisir ses informations personnelles, sur l'ensemble de ses parcelles, puis sur chaque parcelle précisément, ces informations seraient récupérées par un serveur puis stockées en interne, avec un référencement effectué par une base de données d'agriculteurs ayant utilisés le service. Il y aurait ensuite une interface de connexion, dans laquelle les agriculteurs pourraient se connecter pour récupérer les informations et conseils saisis par les experts de la start-up, et les dit experts pourraient se connecter pour accéder aux données saisies par les agriculteurs, et alors formuler leurs conseils. Il a été décidé, sous contrainte de temps, de ne réaliser que la première partie, pour déjà lancer une base de stockage et de réadapter le premier serveur à cette plateforme.

L'objectif était donc que l'utilisateur réponde à une suite de questions, afin d'obtenir le maximum d'informations sur ses parcelles, afin que le stockage des documents renseignés et du NDVI téléchargé soit fait, et que la récupération des données codées soit déjà prête. Il ne restera alors plus qu'à coder la partie administrateur et connexion, et de stocker les données textuelles au format désiré par l'équipe qui se chargera de cette partie.

En ce qui concerne le site internet, il a été décidé de rendre le site le plus simple et fonctionnel possible. En ce sens, l'utilisateur n'est invité qu'à renseigner les informations qui sont indispensables à sa prise en charge par la startup, comme ses coordonnées personnelles ou des informations simples sur ses parcelles. Les autres champs à remplir ne sont pas obligatoires. Et le renseignement de ces informations est la seule chose à faire pour recevoir les conseils agronomiques. En moins de 10 minutes, toutes les étapes sont passées, et l'agriculteur n'a plus qu'à attendre le mail qui va lui envoyer le conseil agronomique.

D'un point de vue visuel, le site a été travaillé pour que la simplicité d'utilisation saute aux yeux dès le premier coup d'œil. Le but étant de donner confiance au client dès le départ. Il va sans dire que le site a été pensé en responsive design, et qu'il est donc compatible sur toutes les plateformes web (PC, mobile, tablette).

Pour ce qui est de la partie applicative de la plateforme web, celle-ci a été réalisée entièrement en Javascript. L'enchaînement des questions dans le site se faisant par groupe de questions, le Javascript servait essentiellement à vérifier et valider le cas échéant si un formulaire était validé, et donc d'afficher le suivant. Il envoie également une requête au serveur à certains moments clés du formulaire, notamment lorsque l'agriculteur a saisi les coordonnées de ses parcelles, afin de directement lancer le téléchargement d'un package Copernicus correspondant à ces coordonnées.

Dans un premier lieu, une vérification va être effectuée sur si l'utilisateur a correctement saisi ses informations personnelles, par exemple l'absence de chiffres dans son Nom/Prénom, ou encore par des expressions régulières (méthode informatique de validation de chaîne devant correspondre à un format précis) si son numéro de téléphone et son adresse e-mail étaient valides.



Figure 71- Interface d'accueil du site

Ensuite, la carte Google Map est affichée. A ce moment, le clic sur la carte est récupéré, afin de récupérer les latitudes et longitudes correspondantes, et d'afficher un marqueur à cet endroit. Au deuxième clic, les données sont de nouveau récupérées et stockées, un deuxième marqueur affiché, la carte reste affichée 1 seconde afin que l'utilisateur puisse visualiser la zone envoyée, puis l'on affiche la troisième partie du formulaire. Dans le même temps, un appel au serveur est effectué pour lui envoyer les informations déjà récupérées et lancer le téléchargement des données de Copernicus correspondantes.

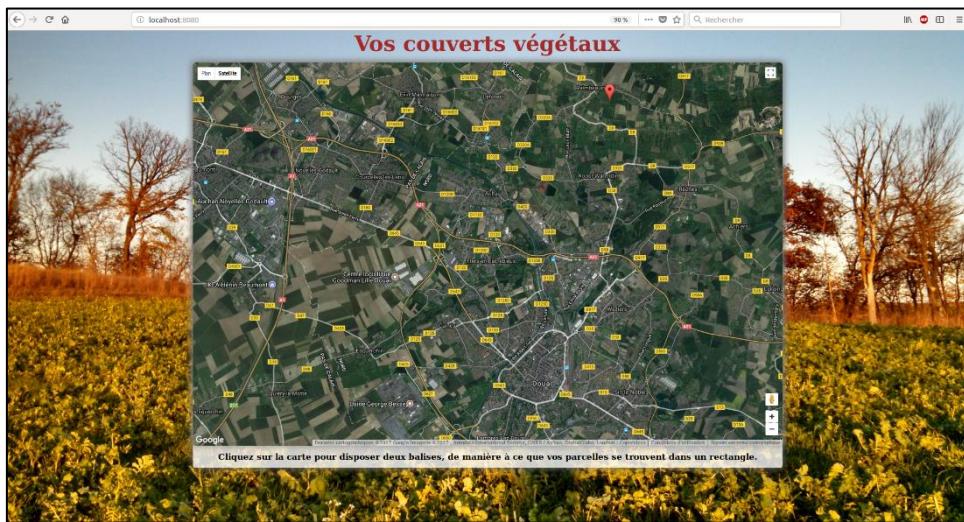


Figure 72- Placement des deux points dans lesquels sont compris les parcelles

Il est alors demandé à l'utilisateur sa surface totale, son nombre de parcelles et un bouton pour envoyer sa déclaration de PAC au serveur est affiché. Une vérification est effectuée pour vérifier que les deux premières données sont bien des nombres, puis un simple clic sur le bouton va afficher un gestionnaire de fichier pour que l'utilisateur indique sa déclaration PAC. Le fichier est alors uploadé sur le site, à la fin de l'upload un appel est lancé au serveur, stockera de son côté le fichier envoyé.



Figure 73- Données sur les terres en général

Enfin, la partie applicative va gérer l'affichage d'un formulaire qui se répète pour chaque parcelle de l'agriculteur, où diverses informations sur ladite parcelle lui seront demandées, ainsi que des documents (les documents étant optionnels, mais les renseigner permet une analyse plus précise pour cette parcelle). Le principe pour ces documents est le même que pour la déclaration PAC à l'étape précédente. Tant qu'il n'est pas à la dernière parcelle, un bouton "suivant" lui est affiché, puis un bouton "terminer" lorsqu'il atteint cette dernière. Un simple texte de remerciement est alors affiché à l'utilisateur.

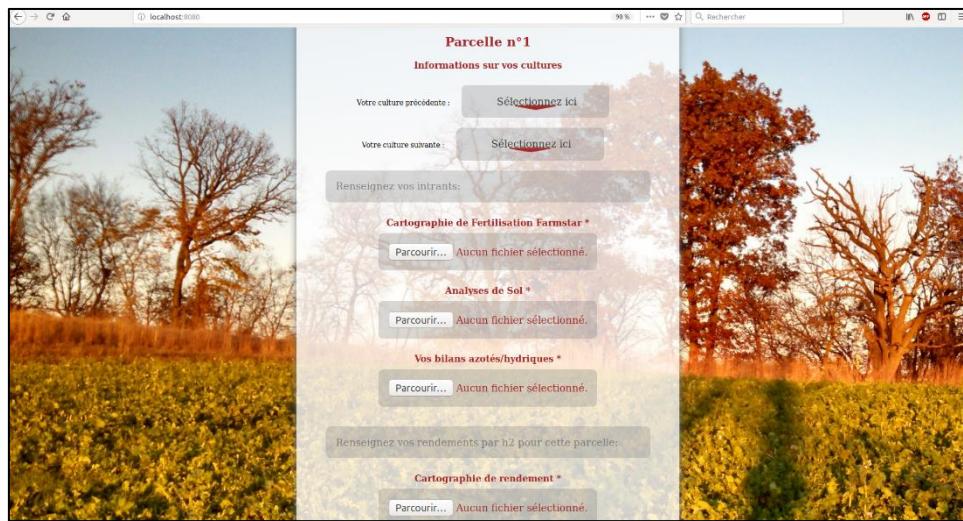


Figure 74- Données par parcelle



Figure 75- Fin du formulaire

2.2. Découpage plus précis

Il restait une dernière étape de traitement d'image à effectuer. En effet, une fois les images superposées pour obtenir le NDVI, par exemple, il faut encore ajuster l'image sur la surface agricole qui correspond. Il faut utiliser, à ce moment-là, les coordonnées qui ont été renseignées par l'agriculteur lors de l'étape avec la carte Google Map.

Après avoir convertis ces coordonnées sous le format UTM (découpage par zones), il est possible de repérer les coordonnées de l'agriculteur sur les différentes images. Le script élaboré permet donc de récupérer, à partir de la zone dessinée par l'agriculteur, l'ensemble des pixels contenus dans l'image. On stocke donc l'information de ces pixels dans une nouvelle image, et une modification des informations qui concernent le pixel en haut à gauche de l'image est effectuée pour conserver le repérage UTM sur cette nouvelle image.

Ce nouveau script a été mixé avec le précédent permettant d'obtenir le simple NDVI. Les deux images sont donc stockées dans le dossier de l'agriculteur, la complète contenant 100km², et la deuxième ne contenant que la partie découpée. A voir plus tard selon la politique et les désirs de la start-up, si l'agriculteur doit avoir accès au complet ou non.

2.3. Codage du nouveau serveur

Pour penser le nouveau serveur correspondant à la nouvelle plateforme web, il a fallu prendre en compte une première problématique majeure, comment télécharger du côté serveur les fichiers upload par le serveur, et également comment différencier et savoir dans quel dossier les stocker. Deux modules de Node JS ont donc été utilisés : Formidable, pour pouvoir télécharger cette donnée côté serveur, et Express, pour détecter quand un upload a eu lieu et déclencher un évènement serveur. Enfin, il y a une variable wichStep, initialement à 0, qui change une fois que la déclaration PAC est reçue, afin que le serveur sache que les documents suivants seront pour les parcelles. Le problème posé par cette méthode, cependant, est que dès qu'un fichier est upload, le serveur le récupère, ce qui fait qu'une erreur de la part de l'agriculteur est directement enregistrée.

Ensuite il a fallu ajouter la récupération de données passées par message au serveur dans des tableaux, et se servir de ces données. Notamment le trio Nom, Prénom et Numéro de téléphone, qui servent à générer un dossier dans le dossier de stockage, FarmingData, un dossier propre à l'agriculteur, donc le nom est tout simplement de la forme Nom_Prénom_Numéro, ce qui permet de les retrouver rapidement. Dès que les données personnelles et les coordonnées englobant les parcelles sont saisies par l'agriculteur, ces dernières sont envoyées, puis une vérification est effectuée, pour savoir si un dossier à ce nom existe déjà, sinon on le crée.

Dans ce dossier seront stockés la déclaration PAC de l'agriculteur, puis un dossier par parcelle sera créé au cours du formulaire, dossiers dans lesquels seront stockés les documents relatifs à telle ou telle parcelle. Ceci permet également une récupération plus précise et facilité des documents pour l'équipe qui s'occupera de l'interface Administrateur. Ensuite, les images pour les terres de l'agriculteurs de Copernicus sont extraites puis stockées dans ce dossier également, et le NDVI ainsi généré est également stocké dans ce dossier.

On notera le codage d'une base de données JSON (un format de donnée en javascript) qui n'est actuellement pas utilisée par le serveur en l'état, mais qui sera laissée dans le code GitHub, elle permet de stocker précisément les données utilisateurs à l'intérieur de ce JSON, qui peut ensuite être chargé via du javascript, ce qui permettra d'afficher notamment les données textuelles pour un utilisateur dans la partie interface administrateur.

La communication entre le client et le serveur est donc gérée, comme précédemment, par Socket Io, lorsqu'une étape nécessitant un appel au serveur est validée, la fonction javascript du bouton validant l'étape appelle une fonction permettant d'émettre un socket.emit, élément qui contient l'intitulé d'un message pour que le serveur sache le capter et quelle partie doit le traiter, et un message en lui-même, ici ce sont des tableaux. Le javascript permet de stocker plusieurs types de données différentes dans un seul et même tableau, ce qui permet d'envoyer facilement les données de l'utilisateur.

Pour la partie entière du téléchargement des données, avec l'extraction, la suppression et l'appel du script Python, là où avant tout fonctionnait avec des boutons qui appelaient chaque partie, désormais le tout s'enchaîne automatiquement. En effet, dès la réception des coordonnées, la requête de téléchargement est immédiatement lancée, ce qui est un choix de l'équipe, car l'agriculteur pourrait très bien finir par abandonner, mais s'il ne le fait pas, il recevra ses données plus rapidement. Le téléchargement est donc lancé, et dès qu'il se termine, un appel informant le client est lancé, qui va alors lancer la deuxième phase, l'extraction, qui elle-même préviendra le client, et ainsi de suite jusqu'à la dernière étape. Cette architecture est un choix de l'équipe, afin de toujours pouvoir mesurer côté serveur et côté client la fiabilité de ses mesures, mais pourrait tout simplement être changé en une suite de fonction s'appelant elles-mêmes dans le serveur uniquement, pour ne prévenir qu'à la toute fin.

Il faut cependant insister que toute cette architecture de serveur et ce fonctionnement a été pensé et codé par des personnes découvrant cette technologie, ne commençant qu'avec la théorie sur comment fonctionnait un serveur. Le tout est donc largement améliorable et comporte sûrement quelques failles en l'état actuel des choses, failles provoquées notamment par le manque de temps pour réaliser ce projet compte tenu des défis techniques imposés.

Pour le site internet, la création d'une base de données a permis de gérer les personnes enregistrées sur le site. Cette base de données a été codées en Json, qui est un dérivé du JavaScript, permettant la gestion de celles-ci. Il y a donc un attribut particulier à chaque instance. Une instance étant un inscrit, et un attribut peut être par exemple, son nom ou sa date de naissance. Le choix du Json pour coder la base de données est pensé de façon à ce que le codage soit simple. Dans le cas de la start-up, cela suffit amplement. Si par la suite, cette start-up venait à se concrétiser, il faudrait passer sur un langage plus professionnel, comme MongoDB.

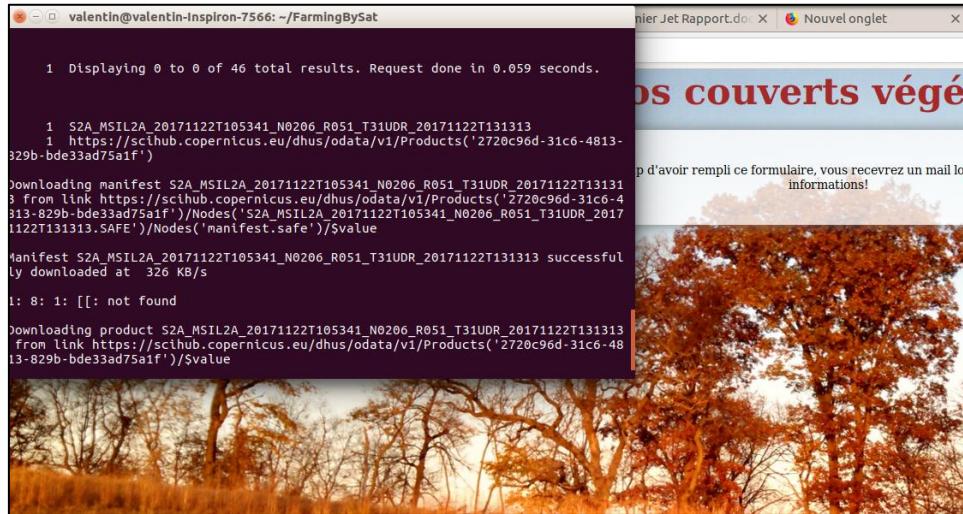


Figure 76- Lancement du téléchargement du paquet nécessaire sur le serveur

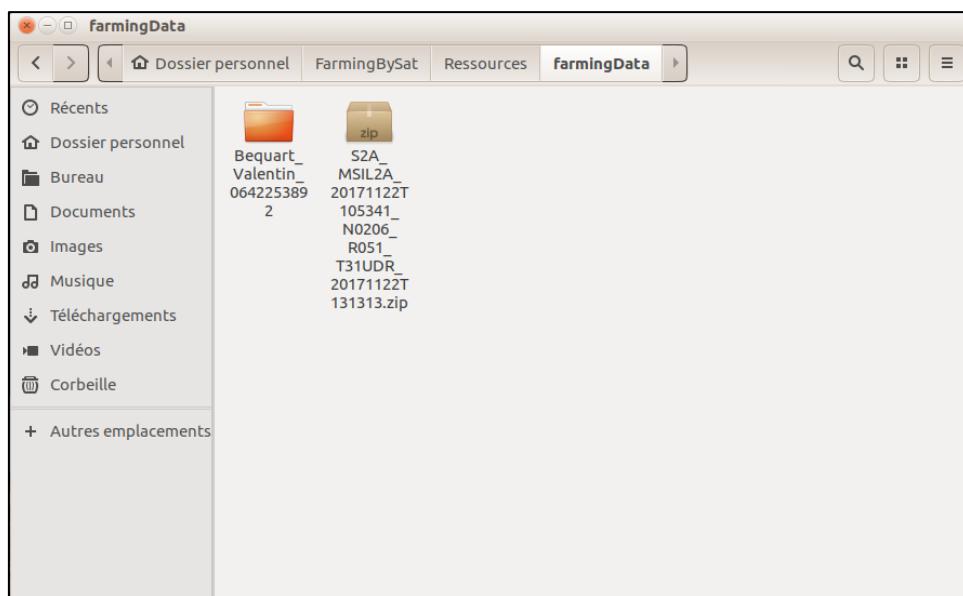


Figure 77- Dossier de l'agriculteur créé, et le paquet en cours de téléchargement

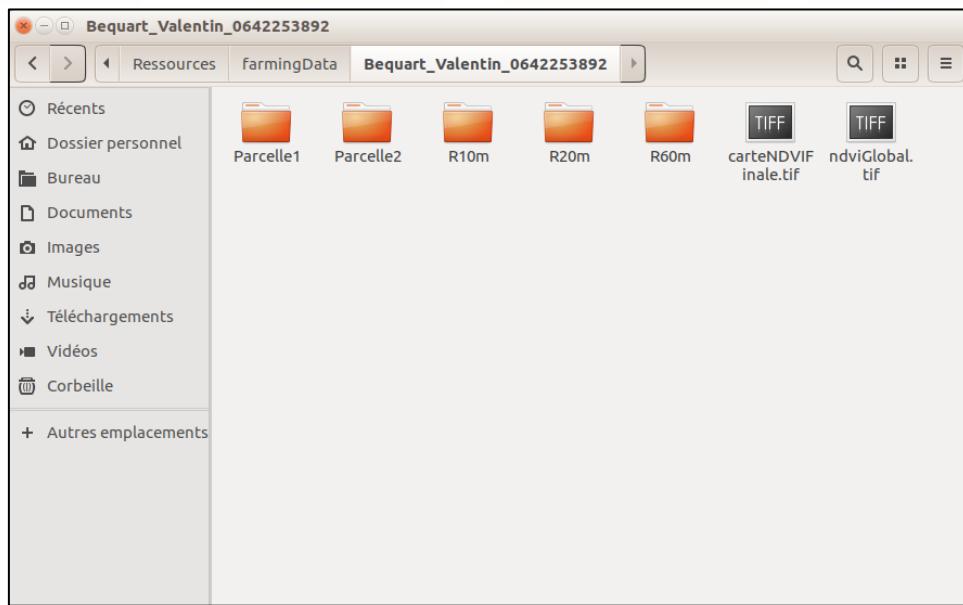


Figure 78- Paquet téléchargé, dossiers des parcelles, cartes NDVI terminées, stocké dans le dossier Agriculteur

3. Etude sur le carbone

Dans cette partie nous allons essayer de concevoir un script sous python, nous permettant d'obtenir une carte contenant les indices de carbone contenues dans les sols.

3.1. Détermination des variables utiles

Pour cela nous avons besoin en entrée des réponses spectrales du MSI pour les bandes 2, 3, 4, 8, 10 et 12 :

Tableau 8- Différentes bandes du MSI utilisées pour le calcul des indices

	Utilité	Longueur d'onde (nm)	Résolution (m)
Bande 2	Bleu	490	10
Bande 3	Vert	560	10
Bande 4	Rouge	665	10
Bande 8	NIR	842	10
Bande 10	Cirrus	1375	60
Bande 12	SWIR2	2190	20

Un problème se posait alors, quant à la taille des pixels, et donc la résolution des cartes. Nous avons donc choisi, tout comme le NDVI, que la résolution serait de 10 mètres, et les données proposées par Sentinel-2, nous proposons des résolutions normalisées à 10 mètres pour les bandes 10, et 12.

Afin d'obtenir le résultat attendu, nous avons besoin des variables prédictives suivantes : Greenness Index (GI), Wetness Index (WI), Brilliance Index (BI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Vegetation Temperature Condition Index (VTCI), Digital Elevation Model (DEM), Slope in percentage (S%) et le Compound Topographic Index (CTI).

3.2. Codage du calcul sous python

Commençons par la transformation de Tasseled Cap, qui va nous permettre de trouver BI, WI, GI.

Tableau 9- Coefficients des 3 composantes principales de la transformation de Tasseled Cap (The IDB project, 2011-2017)

	Bandé 2	Bandé 3	Bandé 4	Bandé 8	Bandé 10	Bandé 12
Brillance	0,3037	0,2793	0,4743	0,5585	0,5082	0,1863
Humidité	0,1509	0,1973	0,3279	0,3406	-0,7112	-0,4572
Couverture végétale	-0,2848	-0,2435	-0,5436	0,7243	0,0830	-0,1800

La formule de Tasseled Cap est la suivante :

➤ **Formule de la transformation de Tasseled Cap : (MONDAL, et al., 2017)**

Tas.cap= (coeff₁ x band₂) + (coeff₂ x band₃) + (coeff₃ x band₄) + (coeff₄ x band₈) + (coeff₅ x band₁₀) + (coeff₆ x band₁₂)

Maintenant nous pouvons procéder à l'élaboration du script pour ces 3 indices.

Voici ci-dessous, celui de pour le Greenness Index.

Comme on peut le voir, le script est assez court, et seules les variables du tableau de Tasseled Cap changent d'un script à l'autre.

```

1 import os,rasterio
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 import numpy as np
4 import sys
5 from scipy import misc
6
7 b2 = sys.argv[1]
8 b3 = sys.argv[2]
9 b4 = sys.argv[3]
10 b8 = sys.argv[4]
11 b10 = sys.argv[5]
12 b12 = sys.argv[6]
13 name = "greenness_index"
14
15 outfile = r'farmingData/' + name + '.tif'
16
17 with rasterio.open(b2) as b2:
18     B2 = b2.read()
19 with rasterio.open(b3) as b3:
20     B3 = b3.read()
21 with rasterio.open(b4) as b4:
22     B4 = b4.read()
23 with rasterio.open(b8) as b8:
24     B8 = b8.read()
25 with rasterio.open(b10) as b10:
26     B10 = b10.read()
27 with rasterio.open(b12) as b12:
28     B12 = b12.read()
29
30 bi = ((0.1509*B2.astype(float))+ (0.1973*B3.astype(float))+(0.3279*B4.astype(float))
31         +(0.3406*B8.astype(float))+(-0.7112*B10.astype(float))+(-0.4572*B12.astype(float)))
32
33 profile = b4.meta
34 profile.update(driver = 'GTiff')
35 profile.update(dtype = rasterio.float32)
36
37 with rasterio.open(outfile, 'w', **profile) as dst:
38     dst.write(bi.astype(rasterio.float32))
39
40 monImage = misc.imread(name + ".tif")

```

- Importation du module rasterio (le plus important).
- Déclaration des bandes indispensables au calcul des indices.
- Ouverture des images grâce à rasterio.
- Calcul des coefficients.
- Enregistrement de l'indice '-.tiff'

Nous avons donc en notre possession, les 3 indices BI, WI, et GI, ainsi que le NDVI.

Figure 79- Script Python pour création du GI

3.3. Conclusion sur le carbone

Malheureusement, les indices restants, c'est-à-dire VTCI, DEM, S%, et CTI nécessitent l'utilisation du satellite Sentinel-3, dont l'API est encore en construction. Ceci nous a donc empêché de pouvoir mener à bien l'élaboration du COS (Carbone Organique du Sol) dans les délais demandés. En effet, il aurait été très certainement possible de trouver des relations mathématiques permettant de les calculer, mais ceci aurait demandé un mois de plus.

De ce que nous avons pu constater, l'unique moyen est manuel via l'API Pre Opérationnelle de Sentinel 3. Qui plus est, on ne télécharge pas des images, mais un ensemble de fichiers nécessaires à la reconstruction de celles-ci via un logiciel fourni par Copernicus. Le désir d'automatisation n'est donc pas respecté pour le moment.

4. Conclusion générale

Sur le plan technique, l'ensemble du projet représente un challenge certain. Il demande de mettre en œuvre beaucoup de connaissances, divers langages de programmation, et une rigueur de codage suffisante. En effet, selon les sondages effectués par l'équipe marketing, il y aurait une certaine quantité d'agriculteurs intéressés, il faudra donc un serveur robuste, qui sache tenir face aux connections, et surtout avec une capacité de stockage suffisante pour conserver les données, au vu du poids des données imposés par Copernicus.

Ce dernier représente en lui-même une grosse difficulté du projet, il s'est notamment avéré handicapant de par le téléchargement de ces paquets, et des paquets de Sentinel 3, nécessaires à l'élaboration de la carte du Carbone, qui ne peut pas se faire automatiquement via le serveur au vu du format interne de données. Le projet est donc réalisable techniquement, mais il faut prévoir le temps nécessaire à la mise en place d'un serveur robuste, le prix dû au coût de l'hébergement dudit serveur, et à l'emploi de développeurs pour achever le projet et surtout l'entretenir, car il nécessitera de l'entretien.

Enfin, pour la partie Carbone, il ne sera pour le moment pas possible de le faire de manière automatisée, un logiciel étant nécessaire pour reconstruire les images de Copernicus. Il faut donc prévoir quelqu'un pour s'en occuper, le temps que le service s'améliore.

Donc techniquement, ce projet est faisable, cependant son coût sera tout de même assez lourd, donc à voir s'il y a viabilité au vu du business plan.

CONCLUSION

En conclusion, l'objectif de ce projet était de définir la faisabilité du concept de couverts végétaux connectés.

Une étude agronomique a permis d'identifier les différents indicateurs qui peuvent être utilisés dans l'analyse des caractéristiques du sol, à travers l'imagerie satellite, capteurs, ou drones. Elle a également permis de remettre le concept dans un contexte terrain, via les techniques de semis.

L'imagerie nécessaire à ce projet, une fois identifiée, a abouti à la création d'un site sur lequel elle peut être consultée. Ce site servira également d'interface avec l'agriculteur client où il renseignera les données de son exploitation. Il est donc possible d'extraire, d'analyser, et de stocker ces données mais des surcoups peuvent survenir.

La veille concurrentielle a mis en évidence que le projet se situe sur un marché de niche. En effet, nombreuses entreprises se positionnent sur le marché de l'imagerie satellite et dans celui des couverts végétaux, mais pas directement sur le secteur visé. La concurrence est donc indirecte.

Les enquêtes terrains ont identifié l'intérêt du monde agricole pour le concept. Néanmoins, la majorité des agriculteurs interrogés ne sont pas prêts à investir dans le concept. Les cibles visées seront les agriculteurs en TCS et semi direct. Ils définiront le marché de niche.

En raison des difficultés techniques, financières, et pratiques, il en ressort que la piste de développement du projet sous la forme d'une start-up ne paraît pas la plus adaptée. En effet, ce projet nécessite de fortes compétences en recherche scientifique, mais également des apports financiers importants. Cependant la piste de l'intrapreneuriat semble être un bon compromis en rassemblant les attentes des commanditaires.

BIBLIOGRAPHIE

- (s.d.). Récupéré sur <https://gis.stackexchange.com/questions/238789/bad-results-ndvi-in-rasterio-with-jp2-sentinel-2-bands>
- (s.d.). Récupéré sur <https://scihub.copernicus.eu>
- HENIK, J. (2012). *Utilizing NDVI and remote sensing data to identify spatial variability in plant stress as influenced by management*. Iowa State University.
- (2016, Septembre 8). Récupéré sur OBJETCONNECTE.COM: <https://www.objetconnecte.com/agriculteurs-iot-etude-0809/>
- (2017, Janvier 2). Récupéré sur AGRICULTURE NOUVELLE: <https://www.agriculture-nouvelle.fr/agriculture-connectee/>
- Agribotix. (2017). Récupéré sur <https://agribotix.com/>
- AgSpace. (2017). Récupéré sur <http://www.ag-space.com/>
- AIRBUS, ARVALIS, TERRE INOVIA. (s.d.). Récupéré sur Farmstar: <http://www.farmstar-conseil.fr/>
- AIRBUS, HYDEOMEX. (s.d.). *Index-based approaches for drought monitoring*. Récupéré sur <https://auth-ceh.axis12.com/sites/default/files/Airbus%20-%20review%20of%20indices%20for%20drought%20monitoring.pdf>
- AIRINOV. (2016). Récupéré sur Airinov: <https://www.airinov.fr/>
- ARCHAMBEAUD.M. (2009). *vie du sol*. Récupéré sur TCS n°51:
<https://viedusol.wordpress.com/documents/couverts-vegetaux/ouverts-vegetaux-dune-contrainte-technique-a-des-outils-agronomiques-performants/>
- ARVALIS. (s.d.). Récupéré sur Choix des couverts: <http://www.choix-des-couverts.arvalis-infos.fr/en-savoir-plus.php>
- ARVALIS. (s.d.). Récupéré sur <http://www.choix-des-couverts.arvalis-infos.fr/>
- ARVALIS. (2017, novembre 13). *opter-pour-la-technique-de-destruction-des-couverts-la-plus-appropriee*. Récupéré sur arvalis-infos.
- ARVALIS. (2014, juillet 17). *Arvalis-infos*. Récupéré sur <https://www.arvalis-infos.fr/les-differentes-especes-de-couverts-presentees-enquelques-lignes-@/view-10548-arvarticle.html>
- ARVALIS. (2015, juillet 25). *Bien adapter sa technique de semis*. Récupéré sur <https://www.arvalis-infos.fr/quelles-techniques-de-semis--@/view-10741-arvarticle.html>
- BAGHERI, N., AHMADI , H., ALAVIPANAH, S.-K., & OMID, M. (2013, Septembre). *Multispectral remote sensing for site-specific nitrogen fertilizer management*. Récupéré sur <http://www.scielo.br/pdf/pab/v48n10/v48n10a11.pdf>

BAILLARIN, S., MEYGRET , A., DECHOZ, C., PETRUCCI, B., LACHERADE, S., TREMAS, T., . . . SPOTO, F. (2012, Septembre). *Sentinel-2 Level 1 Products and image Processing Performances*. Récupéré sur <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXIX-B1/197/2012/isprsarchives-XXXIX-B1-197-2012.pdf>

BE API. (s.d.). Récupéré sur beapi.coop: <https://beapi.coop>

BE API. (s.d.). Récupéré sur beapi.coop: http://www.preprod.beapi.coop.invivo-aws-wbdd-02.invivo.lbn.fr/wp-content/uploads/2017/01/Be-Api_ETAPES.pdf

brésil, M. a. (2017). Récupéré sur www.agricultura.gov.br

CADILLON.A. (s.d.). *agriculture de conservation*. Récupéré sur <http://agriculture-de-conservation.com/sites/agriculture-de-conservation.com/IMG/pdf/interculture-bio-2013.pdf>

CALVET.R. (2003). *Le sol: propriétés et fonctions, Volume 2*. Récupéré sur https://books.google.fr/books?id=5l7g5L8x5VgC&pg=PA134&lpg=PA134&dq=conductivit%C3%A9+h%ydraulique&source=bl&ots=4y48GiTC2x&sig=5hrDTYdYLUZRyc8cMpKi3jl_pXA&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwjU2IfKjPjXAhWSh7QKHeTnBaw4ChDoAQgsMAE#v=onepage&q=conductivit%C3%A9+20hydratation

CAUSSADE Semence . (s.d.). Récupéré sur <http://www.choisirsoncouvertvegetal.com/#fin>

CAUSSADE SEMENCES. (s.d.). Récupéré sur [choisirsoncouvertvegetal:](http://www.choisirsoncouvertvegetal.com/)
<http://www.choisirsoncouvertvegetal.com/>

CHAMBRE D'AGRICULTURE. (2016). Récupéré sur <http://www.chambres-agriculture.fr/agriculteur-et-politiques/politiques-environnementales/directive-nitrates/>

CILIA, C., PANIGADA, C., ROSSINI, M., MERONI, M., BUSETTO, L., AMADUCCI, S., . . . COLOMBO, R. (2014, Juillet). *Nitrogen status assessment for variable rate fertilization in maize through hyperspectral imagery*. Récupéré sur <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC90737>

CORHIZE. (s.d.). Récupéré sur <http://www.corhize.com/fr/>

Cropio. (2017). Récupéré sur <https://cropio.com/>

Croptak. (2017). Récupéré sur <https://icroptak.com/>

DECOURT, R. (2017, Mars 2). Récupéré sur FUTURA SCIENCES: <http://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/astronautique-satellites-service-agriculture-29034/>

DEERING, D. (1978). *Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft*. College Station.

DigitalGlobe. (2017). Récupéré sur <https://www.digitalglobe.com/>

DRILLAUD, J. (s.d.). Récupéré sur <http://www.mychlorofiltre.com/>

DUSSAPT.C. (2016, Avril). Récupéré sur Challenges: https://www.challenges.fr/start-up/qu-est-ce-que-l-intrapreneuriat_28858

ECOLE DES MINES DE SAINT-ETIENNE. (s.d.). *Spectroscopie Raman*. Récupéré sur <https://www.emse.fr/spip/IMG/pdf/raman.pdf>

ESA. (2000/2017). *User Guides*. Récupéré sur Sentinel online:

<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-slstr/product-types/level-2-lst>

ESRI. (s.d.). *Fonction Tasseled Cap*. Récupéré sur Arc Map:

<http://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/tasseled-cap-transformation.htm>

EUROPEAN SPACE AGENCY. (2014, Février). *Talkingfields feasibility study- services for precision farming*.

Récupéré sur <https://business.esa.int/projects/talkingfields-feasibility-study>

FARMFACCTS. (2017). Récupéré sur <https://www.farmfacts.com/>

GEOCLEDIAN. (2017). Récupéré sur <https://www.geocledian.com/>

GITHUB. (s.d.). Récupéré sur Brief Introduction to Remote Sensing:

https://github.com/semisautomaticgit/SemisAutomaticClassificationManual_v5/blob/master/remote_sensing.rst

GOSWAMI, S., GAMON, J., VARGAS, S., & TWEEDIE, C. (2015). *Relationships of NDVI, Biomass and Leaf Area Index (LAI) for 6 key plant species in Barrow, Alaska*. Récupéré sur

<https://peerj.com/preprints/913v1/>

GUIOMARD, G. (2014, Septembre 25). Récupéré sur emploipro.fr: <https://www.emploi-pro.fr/edito/article/devenir-intrapreneur-permet-de-booster-sa-carriere-aea-5402>

HENGLE, T., HEUVELINK, G., & STEIN, A. (2004). *A generic framework for spatial prediction of soil variables*.

Récupéré sur https://ac.els-cdn.com/S0016706103002787/1-s2.0-S0016706103002787-main.pdf?_tid=d6653fae-cbad-11e7-badc-0000aab0f6c&acdnat=1510933495_ea2f035c2b0ccbe8941277ab47258d07

HUANG, W., YANG, Q., PU, R., & YANG, S. (2014, Octobre). *Estimation of Nitrogen Vertical Distribution by Bi-Directional Canopy Reflectance in Winter Wheat*. Récupéré sur

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4279486/>

INSTITUT DE L'ELEVAGE . (2011, Mai). Récupéré sur <http://www.filiererechevalpaca.com/pdf/213.pdf>

ITK. (2017). Récupéré sur <http://www.itk.fr/>

JOUFFRAY-DRILLAUD. (2017). Récupéré sur Mychlorofiltre: <http://www.mychlorofiltre.com/>

KARL.J. (2012). *Tasseled Cap Transformation* . Récupéré sur The Landscape Toolbox:

http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://wiki.landscapetoolbox.org/doku.php/remote_sensing_methods:tasseled-cap_transformation&gws_rd=cr&dcr=0&ei=OnMAWuU2g5KwB8ybnYgD

KNODEL. (2007). *InTech basics and application of ground penetrating radar as a tool for monitoring irrigation process*.

LA FRANCE AGRICOLE. (2017, Juillet 25). Récupéré sur La France Agricole:

<http://www.lafranceagricole.fr/actualites/cultures/cultures-intermediaires-davantage-de-couverts-vegetaux-prevus-apres-les-recoltes-1,1,3926116568.html>

LA FRANCE AGRICOLE. (2017, Octobre 12). Récupéré sur La France Agricole:

<http://www.lafranceagricole.fr/tracteur-et-materiel/des-drones-pour-semer-et-fertiliser-1,2,507734078.html>

LABBE, P. (2017, Mars 21). Récupéré sur OBJETCONNECTE.COM: <https://www.objetconnecte.net/top-agriculteur-connecte-2103/>

LABOUBEE.C. (Juillet 2007). *Retour au sol des matières organiques nécessaire à leur maintien en état des sols agricoles*. Arvalis, Prolea Onidol.

LABREUCHE, J. (2008, Novembre). *perspectives agricoles*. Récupéré sur <http://agriculture-de-conservation.com/Choisir-les-especes-de-couverts.html>

LABREUCHE, J. (s.d.). *Prespectives agricoles*. Récupéré sur https://www.perspectives-agricoles.com/file/galleryelement/pj/b6/3b/21/65/418_1396940738549168816.pdf

LANFRANCO. (2003).

Maxime. (2017). Récupéré sur <https://www.captaincontrat.com/articles-creation-entreprise/combien-coute-creation-start-up>

MONDAL, A., KHARE, D., KUNDU, S., MONDAL, S., MUKHERJEE, S., & MUKOPADHYAY, A. (2017, Juin). *Spatial soil organic carbon (SOC) prediction by regression kriging using remote sensing data*. Récupéré sur ScienceDirect:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110982316300266#f0010>

NEBRA.M. (2017, Aout). Récupéré sur <https://openclassrooms.com/courses/des-applications-ultra-rapides-avec-node-js?status=published>

NRCS. (2017). Récupéré sur <https://www.dnr.illinois.gov/naturalresources/Pages/default.aspx>

PLANETE SCIENCES MIDI PYRENEES. (s.d.). Récupéré sur Un autre regard sur la Terre: http://regard-sur-la-terre.over-blog.com/pages/La_precision_des_satellites_pour_une_agriculture_de_precision-2837892.html

PLISSON, P. (2014, Septembre). *Bonnes pratiques pour l'intrapreneur (et l'intrapreneuse !)*. Récupéré sur https://www.mines-paris.org/global/gene/link.php?doc_id=2485&fg=1

Prospera. (2017). Récupéré sur <https://www.prospera.ag/>

RAMAN. (s.d.). Récupéré sur <https://www.bruker.com/fr/products/infrared-near-infrared-and-raman-spectroscopy/raman;bravo/overview.html>

SCHLUETER.I-Z. (2017, Octobre). Récupéré sur <https://www.npmjs.com>

SCHMITT.J. (2017, Décembre 8). Ingénieur commercial IRTF-RAMAN. (BAUMANN.G, Intervieweur)

SINFIELD, J., FAGERMAN , D., & COLIC, O. (2009). *Evaluation of sensing technologies for on-the-go detection of macro-nutrients in cultivated soils*.

TAIZ, & ZEIGER. (2002).

TERRE-NET MEDIA. (2012, Décembre 19). Récupéré sur Terre-net: <https://www.terre-net.fr/materiel-agricole/travail-sol-semis/article/kuhn-installe-la-coupeure-de-rang-par-gps-sur-ses-semoirs-monograine-210-85411.html>

TERRE-NET MEDIA. (2014, Avril). Récupéré sur <https://www.terre-net.fr/materiel-agricole/traitement-epandage/article/moduler-pour-homogeneiser-et-doper-le-rendement-209-99374.html>

The IDB Project . (2011-2017). *Index MCARI/MTVI2*. Récupéré sur Index Data Base:
<https://www.indexdatabase.de/db/i-single.php?id=197>

The IDB project. (2011-2017). *Sensor: Sentinel-2*. Récupéré sur Index Data Base:
<https://www.indexdatabase.de/db/s-single.php?id=96>

VÄDERSTAD. (s.d.). Récupéré sur <https://www.vaderstad.com/fr/semoirsdeprecision/tempo/tempo-t-6-7/>

VIMOND, L. (2013, Mars 7). Récupéré sur REUSSIR GRANDES CULTURES: <http://grandes-cultures.reussir.fr/actualites/semoirs-monograines-l-entrainement-electrique-permet-la-coupe-automatique-des-rangs:EABYCC5A.html>

VISTA. (2017). Récupéré sur Talkingfields: <http://www.talkingfields.de/en/>

WANAKA. (s.d.). Récupéré sur <http://www.wanaka.io/index.html>

WEATHERSAFE. (2017). Récupéré sur <http://weathersafe.co.uk/>

WEENAT. (2017). Récupéré sur <https://www.weenat.com/>

YARA. (s.d.). Récupéré sur <http://www.yara.fr/>

YOUTUBE. (2016, Octobre). Récupéré sur Satellite Images for Farm Management Systems:
https://www.youtube.com/watch?v=8_jj3wPl4oM

ZAKI, R. (s.d.). Récupéré sur Open Work par lemonde-apres.com: <https://www.lemonde-apres.com/fr/blog/lintrapreneuriat-la-cle-du-succes-de-lentreprise-de-demain>

TABLES DES FIGURES

Figure 1- Planning prévisionnel	4
Figure 2- planning réel	5
Figure 3- Timesheet global	6
Figure 4- Exemple du tableau de bord proposé par Cropio (iCropio)	9
Figure 5- Exemple de filtres permettant de visualiser les maladies chez les plantes	10
Figure 6- Drone low cost proposé par Agribotix	11
Figure 7- Exemple de conseil donné par Smartmix	12
Figure 8- Couvert végétal en Afrique	12
Figure 9- Plaquette illustratrice du service Talkingfields (VISTA)	14
Figure 10- Illustration du logiciel NEXT Farming (Farmfacts)	15
Figure 11- Exemple de graphique croisant l'indice potassium au rendement moyen (AgSpace)	17
Figure 12- Exemple de graphique proposé concernant le nitrogène et le sulfure en fonction du type de sol). (AgSpace)	17
Figure 13- Exemple de l'indice de rendement (AgSpace)	17
Figure 14- Aperçu du système de « management intelligent de l'exploitation » (Geocledian)	18
Figure 15- Evolution du taux de NDVI (Geocledian)	19
Figure 16- Mode de fonctionnement FARMSTAR (farmstar-conseil.fr)	20
Figure 17-Drone AIRINOV (campagnesetenvironnement.fr)	21
Figure 18- Cartographie conseil azote (airinov.fr)	21
Figure 19-La démarche be Api (BE API, s.d.)	22
Figure 20- Capteur N-Sensor (terre-net.fr)	23
Figure 21- Drone semoir (lafranceagricole.fr)	24
Figure 22 : semoir monograine Kuhn (terre-net.fr)	25
Figure 23 : Väderstad E-Control (vaderstard.com)	25
Figure 24- Situation de l'exploitation	26
Figure 25- Nombres d'ha cultivés	26
Figure 26- Utilisation(s) d'objets connectés agricoles	27
Figure 27- nombre d'espèces utilisées dans un mélange	27
Figure 28- Vision des couverts végétaux	28
Figure 29- Couverts végétaux adaptés ou non à l'état du sol	28
Figure 30- Intérêt sur le concept de préconisation de couverts végétaux	28
Figure 31- Prix	28
Figure 32- Répartition selon les régions	29
Figure 33- Nombre d'ha cultivés par les agriculteurs intéressés	30
Figure 34- Objets connectés utilisés par les agriculteurs intéressés	30
Figure 35- Nombre d'espèces utilisées	31
Figure 36- Adaptation des couverts au sol	31
Figure 37- Prix du service	32
Figure 38- Utilisation d'objets/services d'agriculture connectée	34
Figure 39- Vision du concept de start up	35
Figure 40- Infiltromètre à double anneau. (Source : sdec-france.com)	40
Figure 41- Superposition des couches des mesures de permittivité	41
Figure 42- Fréquences GPR en fonction de leur profondeur d'acquisition. (Source : Sébastien Lambot)	43

Figure 43- Domaine de valeur de la conductivité hydraulique et nature des macrospores correspondants (source :conductivite.com)	47
Figure 44: Carte des variations intra parcellaires de compaction du sol.	48
Figure 45: préconisation de couverts végétaux en fonction de l'hétérogénéité intra-parcellaire.	48
Figure 46- concept général pour obtenir une cartographie de l'azote finale dans la parcelle	49
Figure 47- corrélation de MTVI2 avec la teneur en azote (BAGHERI, AHMADI , ALAVIPANAH, & OMID, 2013)	50
Figure 48- corrélation de MCARI2 avec la teneur en azote (BAGHERI, AHMADI , ALAVIPANAH, & OMID, 2013)	50
Figure 49- Lien entre NDVI et biomasse (GOSWAMI, GAMON, VARGAS, & TWEEDIE, 2015)	52
Figure 50- Méthodologie pour déterminer le COS (MONDAL, et al., 2017)	53
Figure 51: Rendement ou développement de la plante en fonction de la concentration de nutriment dans ses tissus. (Source : Taiz et Zeiger, 2002)	58
Figure 52- méthode Raman. (Source : Ecole des mines de St-Etienne)	58
Figure 53- Schéma de principe d'un spectromètre Raman. (Source : Ecole des mines de St-Etienne)	59
Figure 54:l'outil BRAVO. (Source : Bruckeroptics)	59
Figure 55: Les choix des espèces en fonction de la date de récolte. (Source : filierechevalpaca.com)	61
Figure 56: Date conseillée de destruction des couverts, en fonction du sol et de la culture suivante. Se référer à la directive nitrate de son département pour déterminer à partir de quelle date la destruction d'un couvert est autorisée. (Source : arvalis-infos.fr)	61
Figure 57- 2 mélanges préconisés par Arvalis. (Source : choix-des-couverts.arvalis-infos.)	65
Figure 58: Choix d'un mélange en fonction de la période de semis, de la culture suivante, du mode de semis, de l'effet piège à nitrate et fertilisant. (Source : choix-des-couverts.arvalis-infos.fr).	66
Figure 59: Etapes de calcul de la méthode MERCI. Source http://agriculture-de-conservation.com/MERCI-mesurez-les-elements.html .	67
Figure 60: Biomasse de différentes espèces ou variétés de cultures intermédiaires (résultats obtenus sur 23 essais et traités en utilisant un modèle linéaire mixte. Le point représente la moyenne et le tiret l'intervalle de confiance). (Source Arvalis institut du végétal)	69
Figure 61: Apport des espèces en N. (Source MERCI.)	70
Figure 62:concentration en azote dans les plantes. (Source MERCI.)	70
Figure 63: Apports en phosphore des espèces. (Source MERCI.)	71
Figure 64: Apport en carbone des espèces. (Source MERCI.)	72
Figure 65: Performance de différents chantiers de semis de cultures intermédiaires derrière un précédent paille restituée. (Source :arvalis-infos.fr).	73
Figure 66- modulation de semis	75
Figure 67- Trémie pro (source : agriculture.com)	75
Figure 68- Schéma de fonctionnement du Bash	78
Figure 69- Image du premier site	79
Figure 70-Zone 31 N (Source : spatialreference.org)	80
Figure 71- Interface d'accueil du site	82
Figure 72- Placement des deux points dans lesquels sont compris les parcelles	82
Figure 73- Données sur les terres en général	83
Figure 74- Données par parcelle	83
Figure 75- Fin du formulaire	84
Figure 76- Lancement du téléchargement du paquet nécessaire sur le serveur	86
Figure 77- Dossier de l'agriculteur créé, et le paquet en cours de téléchargement	86

Figure 78- Paquet téléchargé, dossiers des parcelles, cartes NDVI terminées, stocké dans le dossier

87

Agriculteur

Figure 79- Script Python pour création du GI

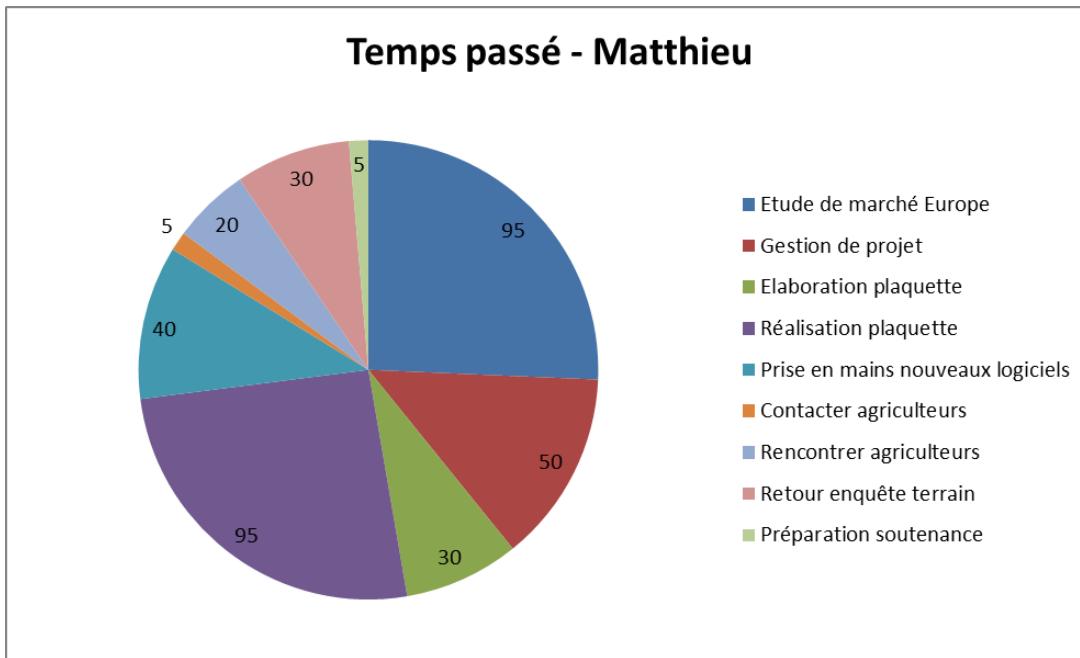
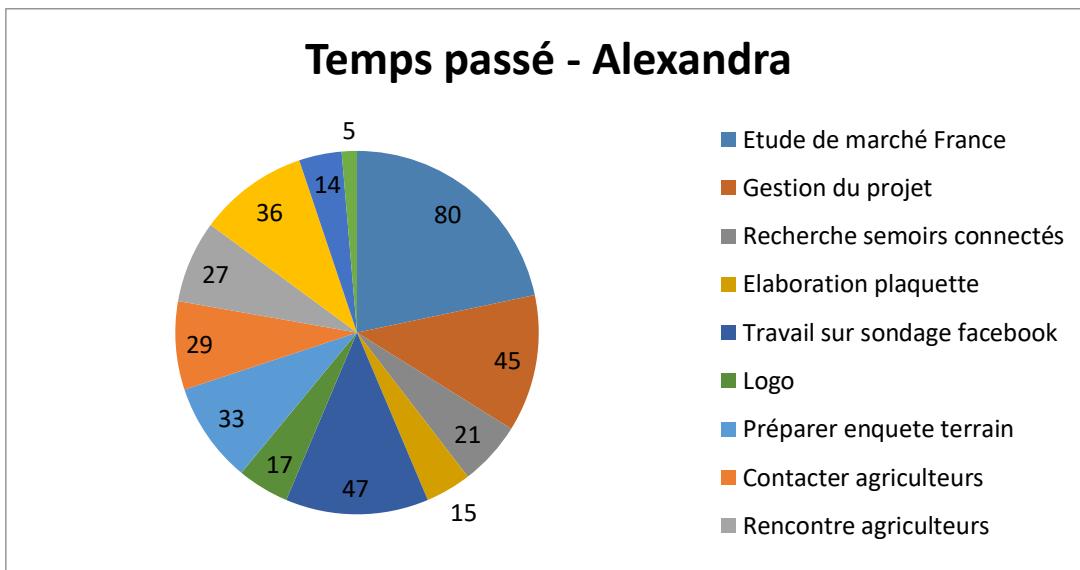
88

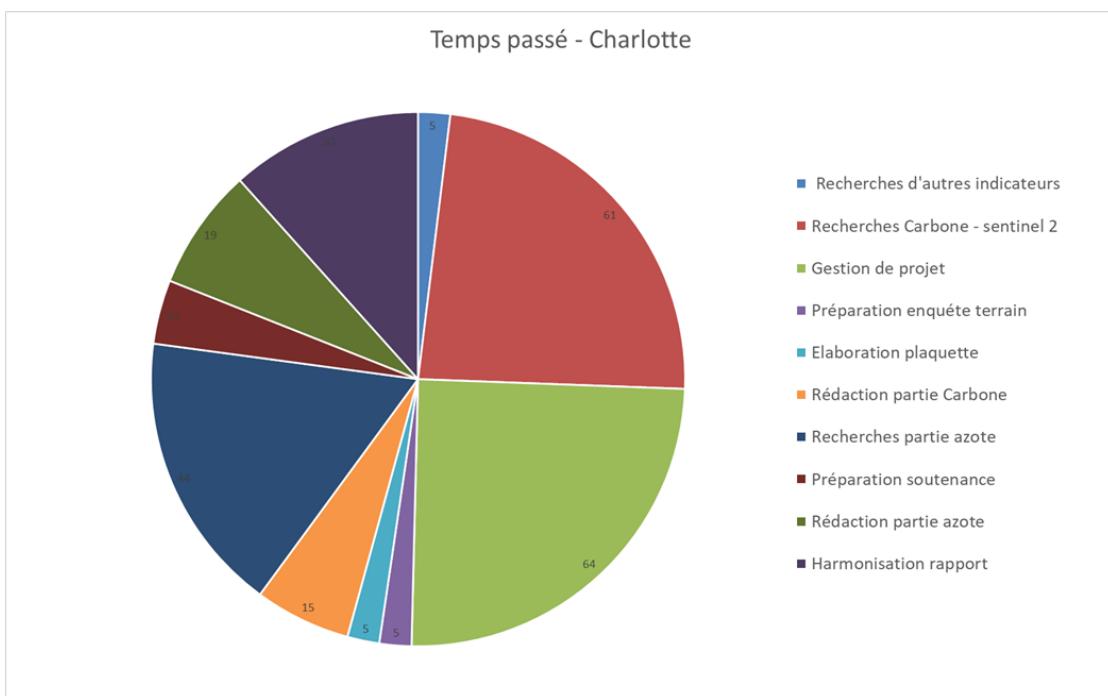
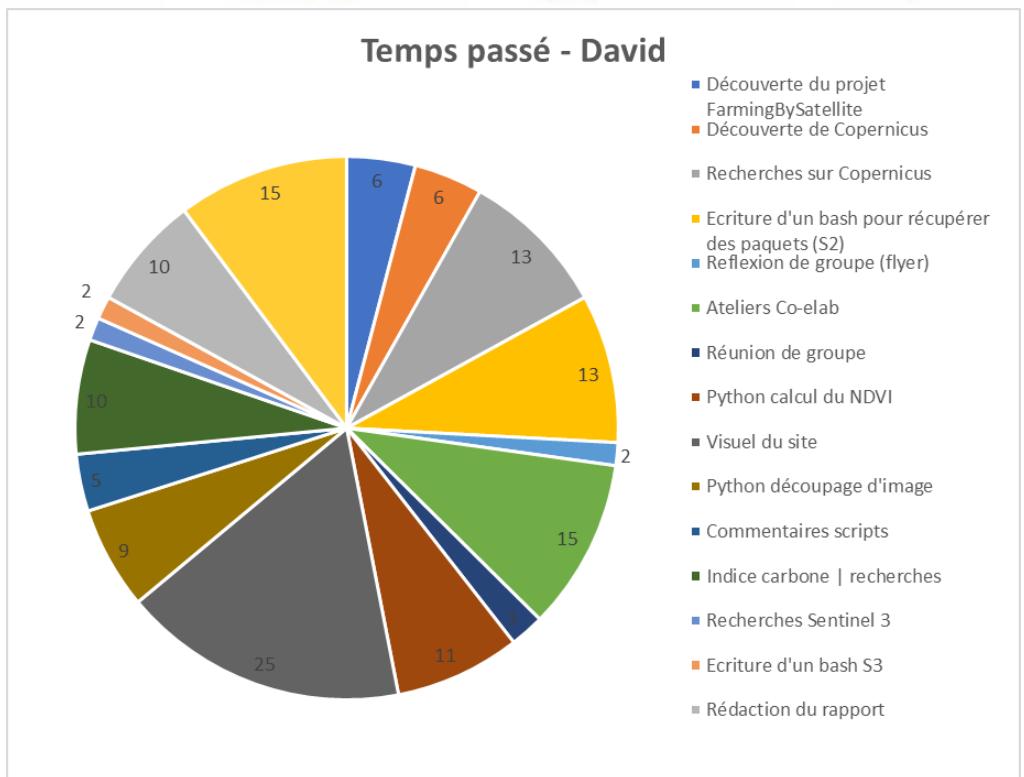
TABLES DES TABLEAUX

Tableau 1- Forces et faiblesses du concept	35
Tableau 2- relation entre perméabilité et conductivité hydraulique (Source : conductivite.com).....	47
Tableau 3- Coefficients des 3 composantes principales de la transformation de Tasselled Cap (The IDB project, 2011-2017)	54
Tableau 4- Références des luminances max et min pour sentinel 2 (BAILLARIN, et al., 2012).....	54
Tableau 5- Valeurs de l'irradiance exo atmosphérique (GITHUB, s.d.).....	55
Tableau 6- Correspondance bandes Landsat 5 avec bandes Sentinel 2	55
Tableau 7- Variables prises en compte dans le krigeage (MONDAL, et al., 2017)	56
Tableau 8- Différentes bandes du MSI utilisées pour le calcul des indices	87
Tableau 9- Coefficients des 3 composantes principales de la transformation de Tasselled Cap (The IDB project, 2011-2017)	88

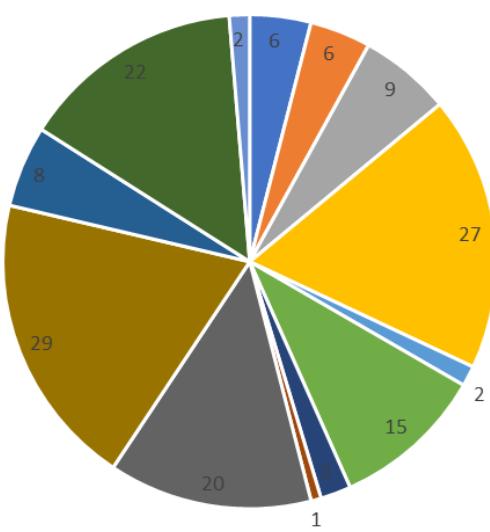
ANNEXES

1. Annexe 1- TIMESHEETS





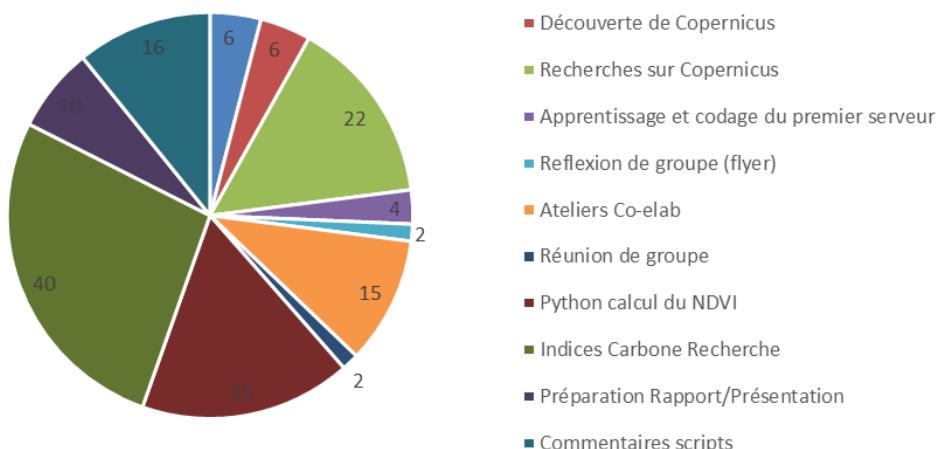
Temps passé - Valentin

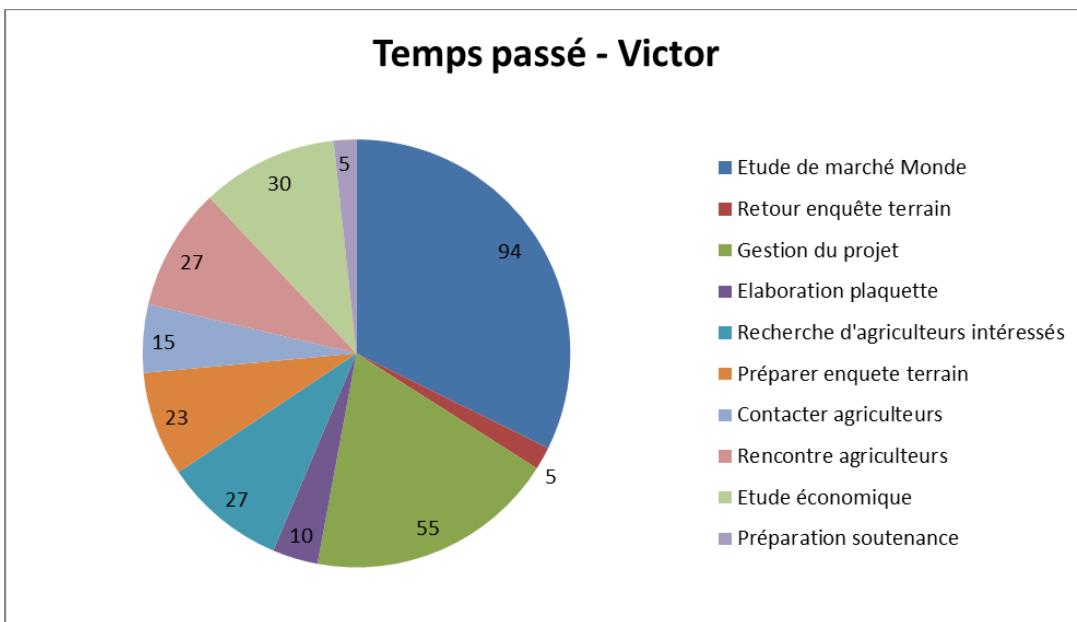
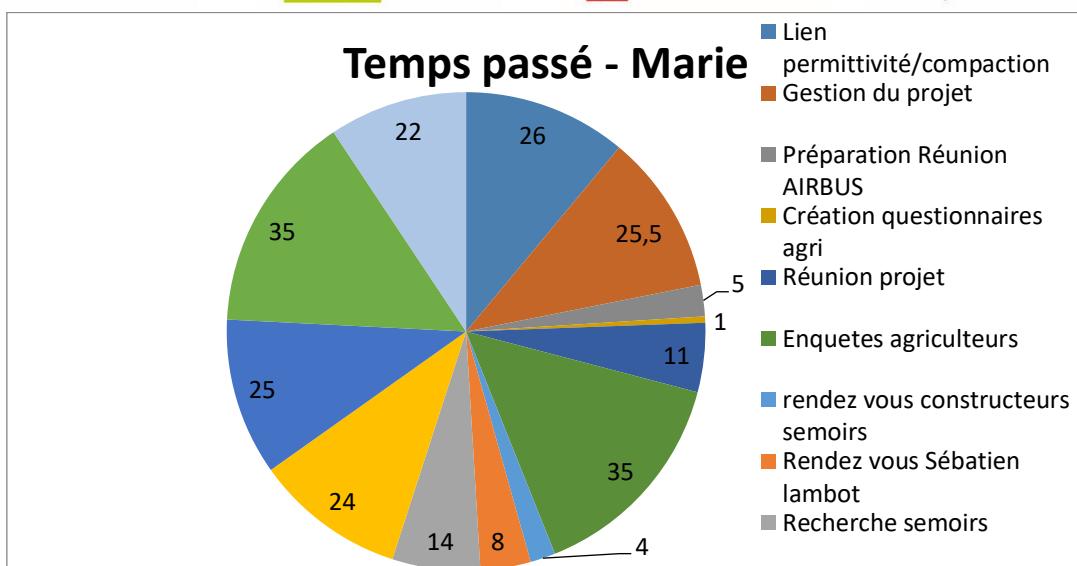


Temps passé - Geneviève



Temps passé - Antoine





2. Annexe 2- PLAQUETTE

Les couverts connectés

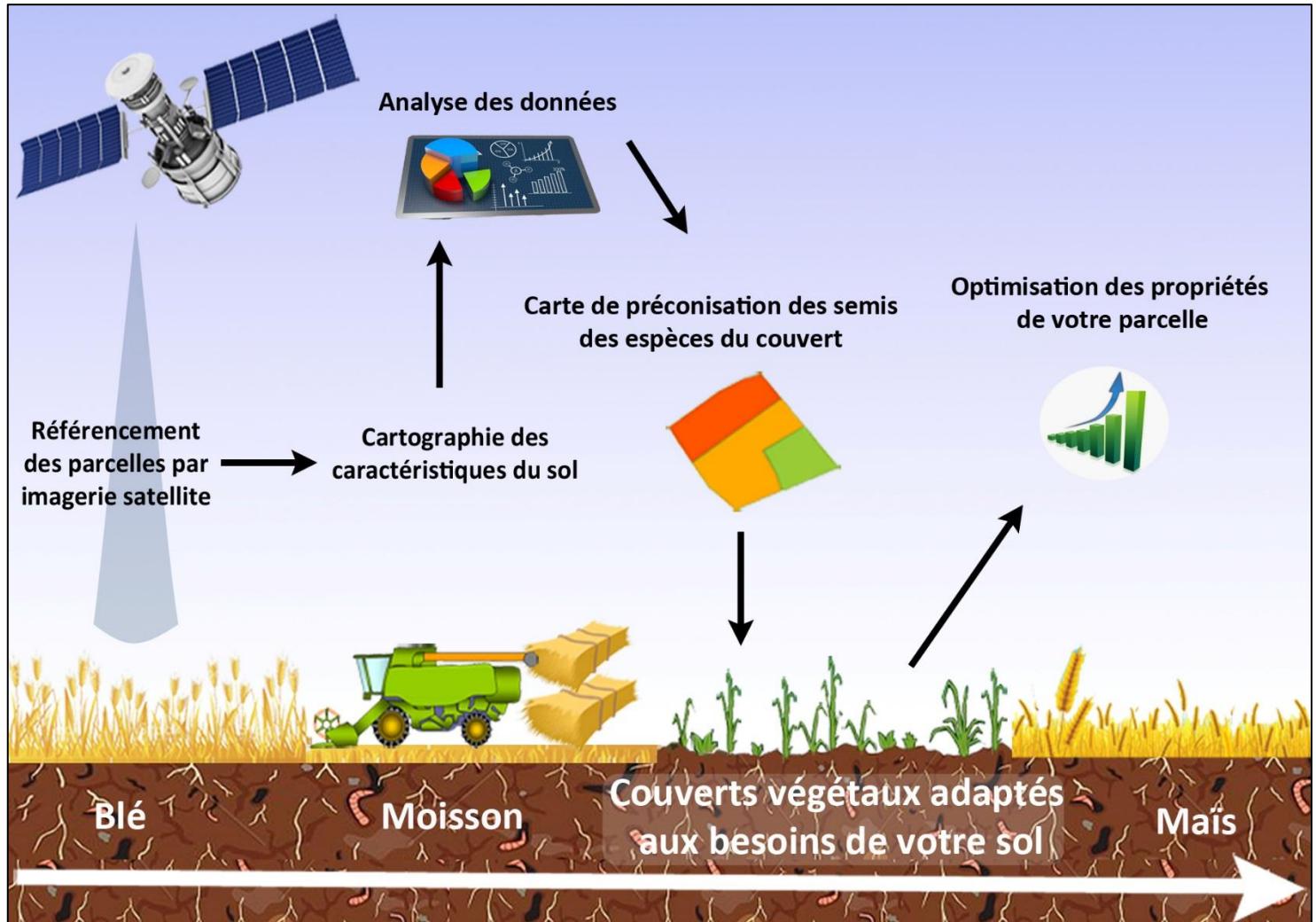
Pilotez facilement votre interculture

The diagram shows four satellite icons orbiting around a central Earth globe. Each satellite is labeled with a service name:

- Verdissement PAC**: A satellite icon with a cross-shaped antenna.
- Imagerie satellite**: A satellite icon with a cross-shaped antenna.
- Optimisation couverts végétaux**: A satellite icon with a cross-shaped antenna.
- Modulation intra-parcelaire**: A satellite icon with a cross-shaped antenna.

Each service is represented by a rectangular callout pointing towards its respective satellite icon.

«Optimisez l'utilisation des couverts végétaux sur vos parcelles grâce à l'imagerie satellite ! »





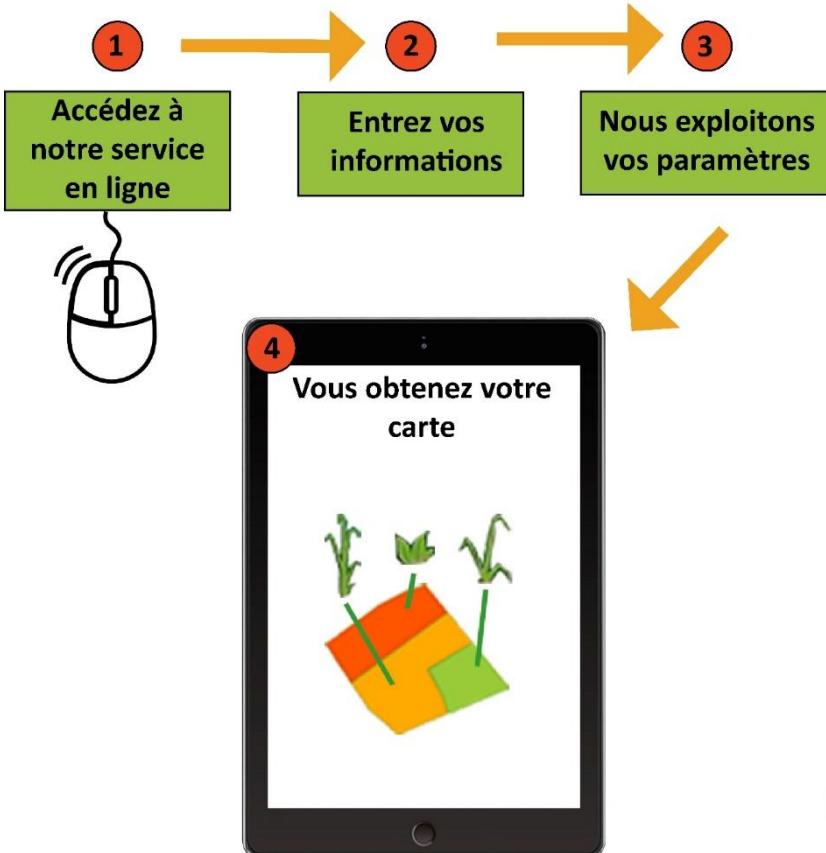
Améliorez la vie biologique de vos sols



Améliorez la fertilité du sol



Réduisez vos intrants



The diagram illustrates a four-step process:

- 1 Accédez à notre service en ligne
- 2 Entrez vos informations
- 3 Nous exploitons vos paramètres
- 4 Vous obtenez votre carte

A computer mouse icon is shown above step 1, indicating interaction with a computer. A large arrow points from step 3 down to a smartphone displaying the result.

Qui sommes nous ?



Janvier 2017 : Nous sommes lauréates du concours européen «farming by satellite». C'est ainsi que le concept du couvert végétal est né.



Marie ROLLOY
marie.rolloy@isa.yncréa.fr

Geneviève BAUMANN
genevieve.baumann@isa.yncréa.fr

106

3. Annexe 3- UTILISATION DE LA METHODE MERCI

MERCI

MESUREZ LES ÉLÉMENTS MINÉRAUX DANS VOS COUVERTS

La mise en place de couverts végétaux est théoriquement bénéfique au sol, qu'il s'agisse de la structure, de la protection et de la nutrition de l'activité biologique, etc. On se doute également que l'introduction de légumineuses apporte un plus en termes de biomasse, de captage d'éléments minéraux et de fixation d'azote. La question est de savoir combien d'éléments minéraux sont recyclés et fixés dans le couvert, et sur combien l'on peut compter pour la culture suivante. Après les travaux de Christophe Barbot et de la chambre d'agriculture du Bas-Rhin, Sébastien Minette et Grégory Véricel de la chambre régionale d'agriculture de Poitou-Charentes ont mis à disposition depuis janvier 2010 un modèle de calcul simple et relativement précis qui fait désormais entrer les couverts végétaux dans le bilan de fertilisation.

Une méthode de calcul simple et efficace

L'équipe de la CRA Poitou-Charentes mène depuis 2001 une série d'essais qui ont débouché en 2009-2010 sur la mise au point de Merci (Méthode d'estimation des éléments restitués par les cultures intermédiaires). À partir de la biomasse mesurée de chaque espèce présente dans le couvert, sont calculées les quantités d'éléments présents dans le couvert. L'originalité de l'outil est d'être adaptable à tous les mélanges d'espèces, qu'il s'agisse d'un couvert, d'une culture

ou d'un mélange fourrager et quelle que soit sa complexité. La robustesse de Merci repose sur des mesures effectuées pendant huit ans en région Poitou-Charentes. La méthode de calcul repose sur la valorisation des mesures de terrain (% matière sèche, % d'azote...) complétées par l'utilisation de la simulation (modèle Stics, développé par l'Inra) pour des données difficilement accessibles sur le terrain (niveau de restitution à la culture suivante). Afin d'évaluer la fiabilité de l'outil et des calculs, les résultats obtenus ont été confrontés à des mesu-

res réalisées dans des parcelles. Sébastien Minette estime la fiabilité de la méthode de calcul à plus ou moins 15 kg/ha d'azote. Les données utilisées dans l'outil sont issues en grande partie d'essais conduits en Poitou-Charentes mais aussi de références obtenues par différentes chambres d'agriculture en France dans des contextes « grandes cultures » avec des cultures intermédiaires non fertilisées. Merci est donc utilisable, dans ce contexte, dans la France entière et est un outil de terrain relativement simple à mettre en œuvre. Le deuxième

intérêt de l'outil est qu'il ne se cantonne pas au piégeage mais aussi à la production d'azote avec l'intégration des légumineuses, ainsi qu'aux teneurs en phosphore et en potasse.

Le C/N du couvert détermine la dynamique de restitution des éléments

Le calcul repose sur la biomasse mesurée des couverts à la date de destruction ou lorsque celui-ci ne pousse plus. La date de mesure est en effet primordiale puisqu'elle détermine le rapport C/N (% carbone/% azote) du couvert et par conséquent

TABLEAU 1 : PART D'AZOTE MINÉRALISÉ POTENTIELLEMENT DISPO- NIBLE POUR LA CULTURE SUI- VANTE EN FONCTION DU C/N DES COUVERTS	
(EN % DE L'AZOTE STOCKÉ DANS LES COUVERTS) – S. MINETTE ; CRA POITOU-CHARENTES	
C/N	% de N relargué
< 15	50 %
15 à 20	40 %
20 à 25	30 %
25 à 30	25 %
> 30	20 %

sa capacité à fournir de l'azote rapidement. Sachant que la proportion de carbone est quasi stable (42 %) quels que soient l'espèce ou le stade du couvert, il suffit donc de connaître la quantité d'azote présente dans la matière sèche : l'azote détermine à la fois la quantité et la dynamique de restitution. En règle générale, plus le couvert est développé, plus le C/N est élevé et plus la libération d'éléments est lente. Aussi, la présence de légumineuses, en améliorant la part d'azote, permet de conserver des C/N plus bas et donc de restituer plus rapidement des éléments pour la culture suivante.

Utiliser Merci

Le calcul peut être réalisé à la main avec les données fournies ci-jointes, mais il est plus facile d'utiliser la feuille de calcul Excel, éditée par la CRA Poitou-Charentes. Cel-le-ci est disponible en ligne sur www.agriculture-de-conservation.com dans la rubrique « couverts », ainsi que les documents concernant la méthode Merci.

1. Mesurer ou calculer une biomasse sèche du couvert

La biomasse du couvert étant la seule variable mesurée, la pesée du couvert doit être précise. La mesure se fait, au minimum, sur 3 placettes par parcelle (ex. : 3 x 1m²) : toute la biomasse aérienne est prélevée, y compris d'éventuelles parties racinaires affleurant (radis chinois, navette). Il est important de ne peser qu'une biomasse ressuyée (pas de pluie, pas de rosée), toute humidité superflue entraînant des erreurs de calcul (1 mm d'eau pèse 10 t/ha !). Chaque espèce est pesée séparément

		colonnes A			colonnes B			col. C	colonnes D	
Famille	Espèce	% de MS en fonction de l'âge du couvert			% d'azote de la MS en fonction de la biomasse			Coefficient correcteur racinaire pour l'azote	% de P dans la MS	% de K dans la MS
		< 60 jours	< 90 jours	> 90 jours	< 1 t	< 2 t	< 3 t			
Composées	Nyger	13	17	21	2,5	2,5	1,6	1,2	1,1	0,4
	Tournesol	12	13	16	1,9	1,9	1,9	1,6	1,1	0,4
Crucifères	Crucifères (moyenne)	16	17	18	3,1	2,7	2,6	2,3	1,2	0,4
	Choux fourrager	22	22	22	4,2	2,7	2,6	2,3	1,2	0,6
	Colza d'hiver	14	15	18	3,4	2,5	2,0	2,0	1,2	0,6
	Moutarde blanche	13	16	18	3,6	2,8	2,5	2,3	1,1	0,5
	Navette	10	13	21	2,9	2,6	2,4	2,1	1,2	0,6
	Radis	11	13	15	3,3	3,0	2,7	2,4	1,2	0,6
	Radis chinois	12	12	12	2,4	2,4	2,3	2,2	1,3	0,6
	Repousses de colza d'hiver	20	23	25	3,2	2,5	2,5	2,5	1,2	0,6
Graminées	Graminées (moyenne)	18	20	21	3,1	2,6	2,2	2,1	1,2	0,3
	Avoine de printemps	16	19	21	3,0	2,7	2,4	2,3	1,2	0,3
	Avoine d'hiver	16	19	21	3,7	2,8	2,6	2,5	1,2	0,3
	Avoine strigosa	18	18	20	2,3	2,3	1,5	1,5	1,2	0,4
	Blé tendre d'hiver	23	23	23	3,0	2,1	2,1	2,1	1,2	0,4
	Orge de printemps	12	14	17	3,1	2,6	2,2	1,6	1,2	0,4
	Orge d'hiver	17	19	24	3,1	2,6	2,2	1,6	1,2	0,4
	Ray-grass d'Italie	16	16	19	2,8	2,5	2,0	1,7	1,2	0,5
	Ray-grass hybride	16	16	19	2,2	2,0	1,8	1,7	1,2	0,5
	Repousses de blé tendre	18	18	23	2,7	2,4	2,1	1,7	1,2	0,4
	Seigle classique	16	16	17	3,7	2,9	2,3	2,3	1,2	0,5
	Seigle hybride (J.D.)	23	23	24	3,3	2,7	2,3	2,1	1,2	0,5
	Sorgho fourrager	14	14	14	3,0	3,0	2,4	1,9	1,2	0,4
Hydrophyllacées	Phacélie	8	9	11	3,1	2,7	2,5	2,4	1,1	0,6
Légumineuses	Légumineuses (moyenne)	16	16	14	3,6	3,5	3,3	3,2	1,3	0,4
	Fenugrec	16	16	16	3,2	3,2	3,2	3,2	1,3	0,6
	Fèverole (hiver & printemps)	14	14	14	4,0	4,0	4,0	3,2	1,3	0,6
	Gesse	16	16	14	4,4	4,1	3,9	3,4	1,3	0,6
	Lentille	18	18	15	4,3	3,5	3,5	3,2	1,3	0,6
	Luzerne	32	32	32	2,3	2,3	2,3	2,3	1,3	0,6
	Mélilot	30	30	30	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	0,6
	Minette	19	19	19	3,0	3,0	3,0	2,4	1,3	0,6
	Pois fourrager	12	12	12	3,2	3,2	3,2	3,2	1,3	0,6
	Pois protéagineux	19	19	19	3,2	3,2	3,2	3,2	1,3	0,4
	Trefle blanc	24	24	24	2,2	2,2	2,2	1,8	1,3	0,4
	Trefle d'Alexandrie	10	11	13	3,7	3,2	3,0	2,5	1,3	0,4
	Trefle incarnat (et trefle hybride)	21	21	22	3,3	3,3	2,7	2,2	1,3	0,4
	Trefle souterrain	24	24	24	1,8	1,8	1,8	1,8	1,3	
	Trefle violet (et trefle de Perse)	17	17	17	3,3	3,3	2,7	2,2	1,3	0,4
	Vesce (hiver & printemps)	21	21	20	4,1	3,9	3,9	3,7	1,1	0,5
Linacées	Lin	22	22	22	2,5	2,2	2,0	2,0	1,1	0,3
Polygonacées	Sarrasin	22	23	25	2,6	2,2	2,0	1,8	1,1	0,6
Autres	Mercuriale	15	15	15	3,5				1,2	

et fera l'objet d'un calcul spécifique. La biomasse peut être pesée fraîche, auquel cas on lui appliquera un coefficient lié à l'espèce et à l'âge du couvert (tableau 2 – colonnes A). La mesure de la biomasse sèche est plus précise, mais bien entendu contraignante car il faut disposer d'une étuve ou d'un système permettant de déshydrater l'échantillon pendant

48 h à une température de 75 °C à 80 °C.

2. Calculer les quantités d'azote, de phosphore et de potasse présentes dans le couvert

En multipliant la matière sèche (en kg/ha) par les coefficients correspondants à chaque élément (tableau 2 – colonne B et D), on obtient les quantités d'éléments disponibles dans le couvert. La précision est d'en-

viron plus ou moins 15 kg/ha pour l'azote ; on peut par principe arrondir à la dizaine inférieure pour éviter une sureévaluation. Une fois obtenues les teneurs en N, on leur applique un facteur « racine » (tableau 2 – colonne C) pour prendre en compte l'azote présent dans le système racinaire de la plante, soit + 10 % à + 50 % en fonction de l'espèce.

TABLEAU 3	Biomasse verte (en t/ha)	Matière sèche après 90 jours (en t/ha)	Quantité d'azote (en kg/ha)	Correction racinaire	C/N	Restitution potentielle (en kg/ha)
Tournesol	12,5	0,16 x 12,5 = 2	0,019 x 2000 = 38	38 x 1,1 = 42	42 / 1,6 = 26	42 x 25% = 10,5
Phacélie	18	0,11 x 18 = 1,98	0,025 x 1980 = 49	49 x 1,1 = 54	42 / 2,5 = 17	54 x 40% = 21,5
Pois fourrager	8	0,12 x 8 = 0,96	0,032 x 960 = 31	31 x 1,3 = 40	42 / 3,2 = 13	40 x 50% = 20
Vesce commune	5	0,2 x 5 = 1	0,039 x 1000 = 39	39 x 1,1 = 43	42 / 3,9 = 11	43 x 50% = 21,5
Total	43,5	5,94	157	179		73,5

Afin de compléter et d'améliorer la précision de l'outil, Sébastien Minette est intéressé par toute donnée de terrain concernant les coefficients % MS (rapport matière verte/matière sèche), % N, % P et % K que vous seriez amenés à réaliser sur vos essais (analyse % MS ou % N, P ou K sur vos essais). Et en particulier :

- ✓ pour les espèces non présentes dans la base de références;
- ✓ pour les situations avec une fertilisation des cultures intermédiaires (par effluents organiques autorisés dans certains départements en fonction de la réglementation).

Contact : sébastien.minette@poitou-charentes.chambagri.fr



En ce qui concerne le phosphore et la potasse, le travail de validation doit être poursuivi et affiné, mais ces valeurs permettent d'obtenir un aperçu et d'apprécier les niveaux de restitution et de mise à disposition de ces éléments pour la culture suivante.

3. Calculer la quantité d'azote potentiellement disponible pour la culture suivante

Si la quantification des éléments du couvert est assez précise, sa dynamique de restitution l'est moins puisqu'elle dépend non seulement des caractéristiques du couvert, mais également de la variabilité climatique, de la texture des sols et du travail du sol. On restera donc prudent sur les valeurs disponibles pour la culture suivante.

En ce qui concerne le couvert, c'est le rapport C/N qui détermine la vitesse de décomposition de la biomasse et donc la disponibilité en NPK pour la culture suivante. La part de carbone étant stable (42 %), il suffit de connaître la teneur en azote pour obtenir le C/N et calculer l'azote immédiatement disponible (tableau 1). Cela dit, les chiffres du tableau 1 sont les moyennes mesurées après destruction des couverts et enfouissement (déchaumage et/ou labour) : on n'hésitera pas à réduire la quantité d'azote disponible pour la culture suivante en TCS superficiel et semis direct (résidus non enfouis ou

mulchés en surface). La formule est : $C/N = 42\% N$.

Exemple de calcul pour un biomax âgé de plus de trois mois

Tableau 3 : la restitution potentielle d'azote est estimée à 70 kg (73,5 kg/ha ramenés à la dizaine inférieure) dans le cas d'un enfouissement des résidus après destruction. Cependant, il s'agit de l'azote « potentiellement » disponible, sachant que même avec un couvert, une partie de cet azote pourra être soumis à lessivage et donc ne pas être disponible pour la culture suivante.

Si l'on reste prudent et réaliste, on peut estimer la quantité d'azote restituée à la culture suivante à 50 kg/ha. Sans aucun travail du sol, la restitution est probablement inférieure et comprise entre 30 et 40 kg/ha (dégradation plus lente des résidus).

Tous les éléments restants ne sont bien entendu pas perdus : ils sont capitalisés dans la matière organique et seront redistribués les années suivantes. Comme à l'accoutumée, il est nécessaire de ne pas trop réflé-

necessary de ne pas trop réfléchir à l'année et de trouver le compromis entre le court terme (C/N bas : fertilité minérale) et le long terme (C/N haut : fertilité organique). Il ne faut pas hésiter à produire des couverts à forte biomasse pour restructurer et démarrer la « machine » sol qui a besoin de carbone. On abaissera le C/N en y ajoutant des légumineuses. On retiendra surtout que cette méthode permet de quantifier les éléments minéraux recyclés et produits et qu'il faut rester plus prudent sur les quantités d'éléments restitués l'année suivante. Ce dont on est par contre sûr, c'est que plus de biomasse est produite sur un sol, plus celui-ci devient fertile et restitue d'éléments sur l'année.

La CRA Poitou-Charentes a intégré cette méthode de calcul à un logiciel réalisant les plans prévisionnels de fertilisation azotée et estimant les pertes par lessivage en fonction du climat automnal/hivernal.

Matthieu ARCHAMBEAUD
avec le concours de
Sébastien MINETTE