



HAL
open science

Évaluation et apports de la technologie de semis Precision Planting pour la culture du maïs dans une démarche d'agriculture de précision

Thibaut Simon

► **To cite this version:**

Thibaut Simon. Évaluation et apports de la technologie de semis Precision Planting pour la culture du maïs dans une démarche d'agriculture de précision. Sciences du Vivant [q-bio]. 2020. dumas-03053413

HAL Id: dumas-03053413

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03053413>

Submitted on 11 Dec 2020

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

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

Année universitaire : 2019 - 2020

Spécialité :

Ingénieur Agronome

Spécialisation (et option éventuelle) :

Sciences et Ingénierie du Végétal.

Agrosystèmes : conception et
évaluation

Mémoire de fin d'études

d'ingénieur de l'École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage (AGROCAMPUS OUEST), école interne de l'institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

de master de l'École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage (AGROCAMPUS OUEST), école interne de l'institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Evaluation et apports de la technologie de semis Precision Planting pour la culture du maïs dans une démarche d'agriculture de précision

Thibaut SIMON



Soutenu à Rennes, le 17 septembre 2020

Devant le jury composé de :

Président : GODINOT Olivier

Maître de stage : BELIARD Anthony

Enseignant référent : CAROF Matthieu

Autres membres du jury :

Rapporteur : Christelle Gée

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

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier tous les membres du bureau de Tessiac pour la sympathie qu'ils m'ont témoigné tout au long de mon stage.

Merci aux agriculteurs Cédric Coignard, Simon Martin, Jérôme Dion et Jean Marc Guillemot qui ont accueilli quatre de mes essais sur leurs terres.

Merci aux chauffeurs des semoirs Precision Planting, Denis, Arnaud, Gautier pour leur patience lors de la mise en place des essais.

Merci aux patrons des ETA Hamon, ETA Guillon-Barbot et SCEA Le Lay pour la confiance qu'ils m'ont accordée.

Merci à Pierre-Henri Hamon pour la confiance qu'il m'a accordé. Merci aussi pour nos discussions, brèves mais toujours instructives.

Merci aussi à mes multiples maîtres de stage, Anthony mon maître de stage officiel pour son aide précieuse sur les essais mis en place mais aussi pour tous les bons moments passés ensemble, Vianney pour toutes les péripéties que l'on a connu lors des montages/démontages Precision Planting et son aide pour la mise en place et la collecte des données et enfin Guillaume qui m'a guidé au début de mon stage.

Enfin merci à ma famille, à Margot et à mes amis pour le soutien qu'ils m'ont toujours apporté. Ce mémoire est la conclusion de cinq années d'étude et l'entrée dans une nouvelle vie.

Table des annexes

ANNEXE 1 : RESULTAT COMPLEMENTAIRE.....	1
FIGURE ANNEXE 1 : CARACTERISATION DES PREPARATIONS DE SOL	1
ANNEXE 2 : DEMONSTRATION MATHEMATIQUE DU CALCUL DES COORDONNEES DES RANGS A PARTIR DES COORDONNEES DU BARYCENTRE DU SEMOIR.....	2
ANNEXE 3 : MODELISATION DE QUELQUES PROPRIETES DES SOLS DE LA BASE DE DONNEES LUCAS A PARTIR DE BANDES SPECTRALES	3

Table des illustrations

FIGURE 1 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UN DOSEUR (ADAPTE DEPUIS ANIMATION PRECISION PLANTING)	4
FIGURE 2: SCHEMA DES FORCES S'APPLIQUANT SUR UN ELEMENT SEMEUR.....	10
TABLEAU 1 : RECAPITULATIF DES FACTEURS D'ETUDE ET DES MODALITES ETUDIEES POUR L'ESSAI REGLAGES	20
FIGURE 3 : EXEMPLE DE DISPOSITIF POUR UN ESSAI REGLAGE	20
TABLEAU 2 : RECAPITULATIF DES FACTEURS D'ETUDE ET DES MODALITES ETUDIEES POUR L'ESSAI REGLAGES EN FONCTION DE LA PREPARATION DU SOL	22
FIGURE 4 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL UTILISE POUR ETUDIER L'EFFET DE DIFFERENTS REGLAGES EN FONCTION DE DE LA PREPARATION DE SOL	22
FIGURE 5 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL UTILISE POUR COMPARER LES SEMOIRS	24
TABLEAU 3 : RECAPITULATIF DES ESSAIS : DENSITE DE SEMIS ET CALENDRIER DES MESURES.....	26
TABLEAU 4 : RESULTATS AGREGES DES COMPTAGES DE LEVEE POUR LES DIFFERENTES PREPARATIONS DE SOL.....	28
FIGURE 6 : TRANSFORMATION MATHEMATIQUE DU NOMBRE DE PLANTES EMERGEES PAR JOUR ...	28
FIGURE 7 : BOITES A MOUSTACHES DES INDICES D'EMERGENCES POUR LES TROIS PREPARATIONS DE SOL	28
FIGURE 8 : NOMBRES DE PLANTS EMERGES PAR JOUR.....	30
FIGURE 9 : BOITES A MOUSTACHES DES INDICES D'EMERGENCES POUR LES DEUX SEMOIRS DE L'ETUDE.....	30
FIGURE 10 : PROFONDEUR REALISEE DE L'ESSAI COMPARAISON DE SEMOIRS.....	30
FIGURE 11 : DISTRIBUTION DES VALEURS D'ESPACEMENT MESUREES POUR CHAQUE MODALITE DE VITESSE.....	32
FIGURE 12 : BOITES A MOUSTACHES DES INDICATEURS % MULTIPLES, INDICE DE PRECISION ET CP3 EN FONCTION DES MODLITES DE VITESSE	32
FIGURE 13 : MESURES DE PROFONDEUR EFFECTUEES SUR LA MODALITE PRESSION DE TERRAGE	32
TABLEAU 5 : TENEURS DES ECHANTILLONS MESUREES ET ESTIMEES	34
FIGURE 14 (A DROITE) : GRAPHIQUE DES TENEURS EN MATIERE ORGANIQUE OBSERVEES EN FONCTION DES TENEURS ESTIMEES PAR SMARTFIRMER.....	34
FIGURE 15 : CARTE REPRESENTANT LES TENEURS EN MATIERE ORGANIQUE ESTIMEES PAR SMARTFIRMER ET LES POINTS D'ECHANTILLONNAGE DE LA VERIFICATION AU SOL	34
FIGURE 16 : LES INDICATEURS DE LA DISTRIBUTION HORIZONTALE UTILISES SUR L'ESSAI MENE AU GAEC GUILLEMOT	36
FIGURE 17 : GRAPHIQUE DES TENEURS EN MATIERE ORGANIQUE OBSERVEES EN FONCTION DES TENEURS ESTIMEES APRES ETALONNAGE PAR LES VALEURS MESUREES	40

Table des matières

Introduction	1
Etude bibliographique.....	2
I. Le semis du maïs : enjeux et déterminants de sa qualité.....	2
A. Les enjeux du semis du maïs.....	2
1. Répartition uniforme des graines au sein du rang pour éviter des compétitions futures	2
2. Placer la graine dans des conditions favorables à sa germination : favoriser une émergence homogène et rapide.....	2
B. Les facteurs déterminants de la qualité de semis du maïs :	3
1. Les facteurs internes :	3
2. Les facteurs externes :	5
II. Les innovations techniques des semoirs Precision Planting	6
A. Améliorer la qualité de semis : à l'échelle de la zone homogène de sol	6
B. Apports pour l'agriculture de précision	7
Problématiques et hypothèses associées :	8
Matériels et méthodes	9
A. Evaluation de la qualité de semis	9
B. Caractéristiques des semoirs de l'étude	10
1. Semoirs tout équipés Precision Planting.....	10
2. Semoir mécanique modifié en semoir à distribution électrique Precision Planting	11
C. Les différents dispositifs expérimentaux	11
1. Essais réglages des semoirs	11
2. Essai réglages en fonction de la préparation de sol.....	11
3. Essais comparaison de semoirs	12
D. Données collectées durant les campagnes de semis 2019 et 2020.....	13
E. Analyses de données non géoréférencées	14
F. Analyse de données géoréférencées : cartes de semis	14
Résultats	15
A. Evaluation de la qualité de semis des technologies Precision Planting dans différents contextes techniques et pédoclimatiques.....	15
B. Positionnement des performances des semoirs Precision Planting par rapport à d'autres semoirs	16
C. Production de références de réglages dans différents contextes techniques et pédoclimatiques.....	17
D. Apports des technologies Precision Planting pour l'agriculture de précision.....	18
Discussion.....	19
A. Evaluation de la qualité de semis des technologies Precision Planting dans différents contextes techniques et pédoclimatiques.....	19
B. Positionnement des performances des semoirs Precision Planting par rapport à d'autres semoirs	19

C. Production de références de réglages dans différents contextes techniques et pédoclimatiques.....	19
D. Apports des technologies Precision Planting pour l'agriculture de précision.....	21
Conclusion	22
Bibliographie	23

Introduction

La culture du maïs (*Zea mays L.*) est importante en France, en effet la sole de maïs s'élève à environ trois millions d'hectares par an (Agreste, 2020). Le maïs est cultivé pour son grain et ses fourrages (1,4 millions d'hectares sont destinés à être ensilés chaque année). La Bretagne, les Pays de La Loire et la Basse Normandie regroupent 55% de la sole de maïs fourrage (Carpentier et Cabon, 2011). Cette culture est en effet à la base de la ration alimentaire de nombreux troupeaux laitiers. Du semis à la récolte, cette culture nécessite des interventions culturales pointues et donc du matériel toujours plus performant. Certaines opérations culturales sont donc souvent déléguées aux Entreprises de Travaux Agricoles (ETA).

Le réseau Cléo est un réseau d'entrepreneurs de travaux agricoles. Il est composé d'ETA situées principalement dans le Grand Ouest. Ces ETA sont des entreprises tournées vers l'innovation, en quête de nouvelles solutions à proposer à leurs clients, agriculteurs. Le réseau Cléo est animé par deux ingénieurs qui assurent une veille des nouvelles technologies en agriculture, mettent en place des essais avec différents partenaires, forment les chauffeurs des entreprises à l'agronomie et à l'utilisation des nouvelles technologies et enfin participent à la communication des entreprises.

Le semis de maïs est une prestation primordiale pour les entrepreneurs du réseau puisqu'au total, plus de 20000 hectares de maïs sont semés par l'ensemble du réseau chaque année. Cette opération culturale est réalisée avec un semoir monograine ou semoir de précision, c'est-à-dire un semoir disposant des graines une à une dans un sillon à un espacement qui se veut le plus régulier possible défini par la densité de semis (Singh et al., 2005). Pour satisfaire leurs clients, les entrepreneurs sont donc intéressés par améliorer les rendements en soignant au mieux l'implantation de la culture. De plus, cette opération culturale est facturée à l'hectare semé. Ainsi, augmenter le débit de chantier (le nombre d'hectares semés à l'heure) est une priorité pour améliorer la rentabilité de ces entreprises. Une hausse de la vitesse d'avancement ne doit cependant pas altérer la qualité de semis.

En ce sens, pour la campagne 2019, deux entrepreneurs du réseau ont investi dans un semoir entièrement équipé de la technologie Precision Planting qui promet d'améliorer la qualité de semis et ainsi d'augmenter les rendements par rapport aux semoirs concurrents. Pour la campagne 2020, un autre entrepreneur du réseau a choisi de transformer son semoir mécanique en semoir à distribution électrique Precision Planting. Ce dernier scénario est plus proche des activités de Precision Planting aux Etats-Unis, qui ne produit pas directement des semoirs mais des éléments pour rééquiper des semoirs déjà existants.

Les objectifs de ce mémoire sont d'évaluer les innovations des technologies de semis Precision Planting pour la culture du maïs, de produire des références techniques de réglages du semoir dans différents contextes techniques et pédoclimatiques et enfin d'envisager les apports d'une telle technologie dans une démarche d'agriculture de précision.

Etude bibliographique

I. Le semis du maïs : enjeux et déterminants de sa qualité

A. Les enjeux du semis du maïs

1. Répartition uniforme des graines au sein du rang pour éviter des compétitions futures

Il est intuitif qu'un espacement régulier entre les plants au sein du rang permet un accès identique aux ressources telles que l'eau, la lumière et les nutriments ; permettant ainsi à chaque plant d'exprimer son potentiel génétique. Griepentrog (1988) illustre cela en traçant des polygones de Voronoï autour des plants. Cependant l'effet de la variabilité spatiale de l'espacement des plants au sein du rang sur le rendement ne fait pas consensus. Des études ont en effet montré qu'un espacement irrégulier des plants de maïs au sein du rang diminuait significativement le rendement puisque le rendement d'une plante individuelle augmentait de 2,5 g par centimètre d'espace supplémentaire (Thompson, 2013) . Ainsi réduire la dispersion des espacements pourrait permettre à chaque plante d'exprimer son potentiel. Krall et ses co-auteurs en 1977 prédisent qu'une diminution de la dispersion des espacements des pieds de maïs de 6,6 cm à 4 cm pourrait permettre un gain de rendement de 219 kg par ha. Dans des cas de répartition plus anarchique, le passage d'un écart-type de 18,4 cm à 4 cm ferait gagner jusqu'à 1211 kg de maïs récolté en grain par ha. Tandis que d'autres montrent que cet effet n'est pas significatif (Liu et al., 2004a, 2004b) ou seulement dans des cas extrêmes où plus d'une graine est semée au même endroit (double, triple, etc) (Lauer et Rankin, 2004). Cette dernière étude explique ainsi que le maïs est capable de compenser les variations d'espacement. Même si le rendement n'est pas affecté par la régularité d'espacement, il apparaît cependant idéal que les graines soient espacées de manière uniforme ne serait-ce que pour valoriser chaque semence. D'autre part les manques (espaces où aucune graine n'est semée alors qu'ils devraient l'être) sont une place privilégiée pour les adventices (Kostić et al., 2018).

2. Placer la graine dans des conditions favorables à sa germination : favoriser une émergence homogène et rapide

A l'instar de la variation spatiale des plants, c'est leur variabilité temporelle qui semble avoir un impact significatif sur le rendement (Ford et Hicks, 1992; Nafziger et al., 1991). Lawles et al. (2012) montrent que la perte de rendement en grain s'élève à 225 kg.ha⁻¹ par jour de décalage d'émergence. En effet, les plants émergents en retard par rapport aux autres souffrent de compétition pour les ressources (lumière, eau et nutriments) car les plants voisins ayant émergés plus tôt sont plus grands et ont un système racinaire plus développé (Liu et al., 2004a). Il a été montré que la perte de rendement était due à un taux d'avortement des grains plus élevé puisqu'une part des soies ne sont pas exposées au pollen de la panicule (Pagano et al., 2007). Dans des cas extrêmes, ces plants en retard miment la fonction d'une adventice puisqu'ils ne produisent pas et sont en compétition pour les ressources.

Pour favoriser l'émergence rapide et homogène des futurs pieds de maïs, il convient donc de placer les graines dans un milieu favorable à leur germination c'est-à-dire un milieu avec une température élevée et une humidité suffisante pour réaliser l'imbibition en eau des graines (Schneider et Gupta, 1985). L'humidité nécessaire peut être trouvée en augmentant la profondeur de semis, sans semer trop profond pour éviter que la graine ne s'épuise avant d'atteindre la surface du sol ou émerge tardivement par rapport aux autres. Une profondeur de semis constante égale à la profondeur prescrite est donc un enjeu important dans le semis du maïs (Özmerzi et al., 2002).

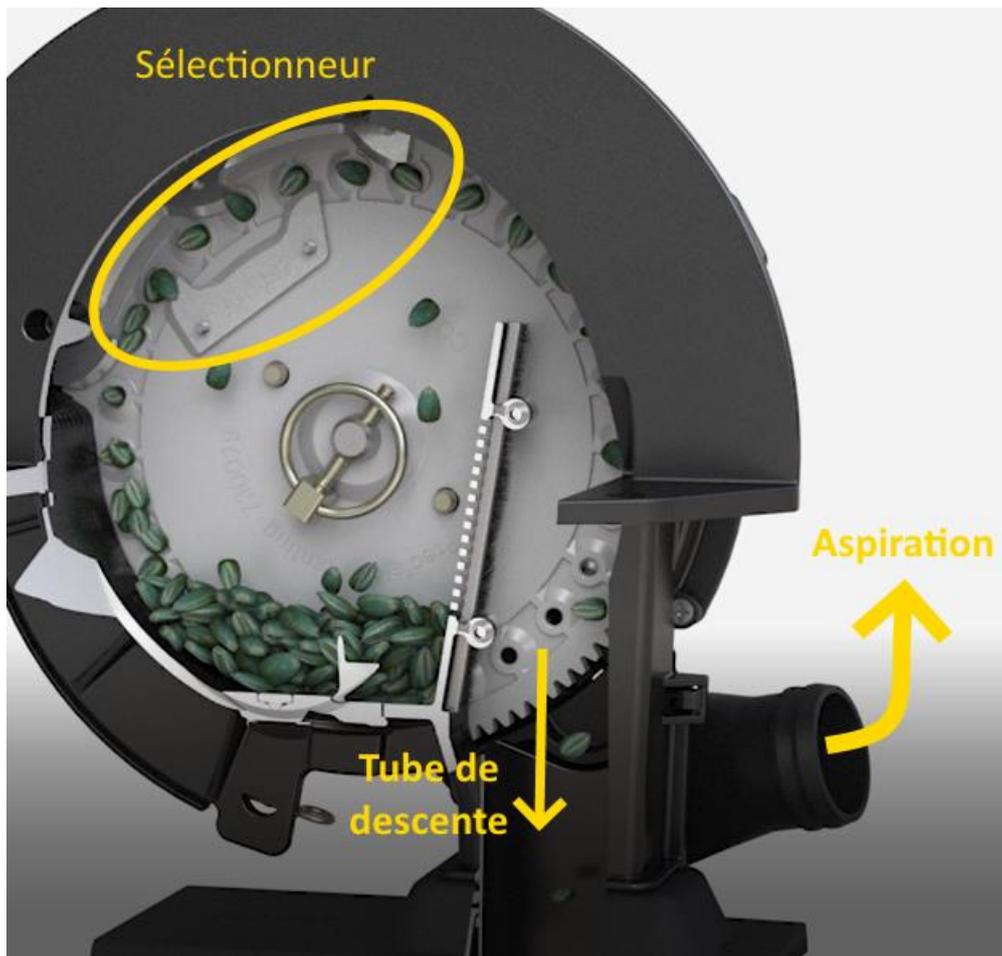


Figure 1 : Schéma de principe d'un doseur (adapté depuis animation Precision Planting)

Ainsi, le semis idéal pour une culture telle que le maïs s'attache à répartir les graines de manière uniforme sur le rang, espacées d'une longueur égale à l'espacement théorique qui est fonction de la densité de semis. Les graines sont placées dans des conditions favorables à leur germination à une profondeur prescrite pour maximiser l'uniformité et la rapidité d'émergence des plants. Cette dernière condition est la plus importante pour maximiser le rendement.

B. Les facteurs déterminants de la qualité de semis du maïs :

Kostić et al. (2018) définissent des facteurs externes et internes influant la qualité de semis. Les facteurs internes sont liés à la conception du semoir tandis que les facteurs externes sont liés au terrain, aux caractéristiques du lot de semence, à la vitesse d'avancement du semoir et à la profondeur de semis prescrite. Ces deux types de facteurs vont influencer la première composante de rendement : la nombre de plants viables au mètre carré, la vitesse d'émergence et l'uniformité d'émergence de ces plants.

1. Les facteurs internes :

On s'intéresse ici à un semoir monograine à distribution pneumatique par dépression. Ces semoirs sont les plus communs et très étudiés dans la littérature.

- Le système doseur/sélecteur combiné à l'aspiration

Les semoirs à maïs les plus communs sont des semoirs à dépression, c'est-à-dire qu'ils sont combinés à une turbine qui aspire les graines de la trémie et les plaquent sur les trous d'un disque en mouvement circulaire. Les trous du disque étant plus étroits que la graine, celle-ci est alors maintenue sur le trou, ce qui permet de l'accompagner jusqu'au tube de descente. Lorsque le disque arrive au niveau du tube de descente, un dispositif bloque l'air qui retenait la graine sur le trou, la graine tombe alors dans le tube de descente (figure 1). Le système de sélectionneur combiné à l'aspiration a pour but de garder une unique graine sur chaque trou du disque (Singh et al., 2005). Si l'aspiration est trop faible, certaines graines ne pourront être positionnées sur les trous du disque : cela peut causer des manques dans la répartition sur le rang (Yazgi et Degirmencioglu, 2014). Si elle est trop élevée, le sélectionneur peut ne pas parvenir à enlever les graines supplémentaires du trou. Le contrôleur de semis présent dans le tube de descente permet de vérifier que chaque trou du disque comporte bien une graine. On définit ainsi la « *singulation* » d'un doseur comme le pourcentage de trous du disque portant effectivement une graine.

Beaucoup d'expériences en laboratoire ont été menées pour optimiser les paramètres du système de dosage. Parmi ces paramètres on peut citer la dépression (en kPa), la forme des trous des disques, leur diamètre, leur nombre et la vitesse de rotation des disques. Des plans de surfaces de réponses sont utilisés pour optimiser les paramètres (Singh et al., 2005; Yazgi et Degirmencioglu, 2014).

Le nombre de trous présents sur le disque a une influence sur la précision de l'espacement (Yazgi et Degirmencioglu, 2014). De plus, la vitesse de rotation du disque a un effet négatif sur la qualité de répartition. Les auteurs suggèrent d'utiliser des disques avec de nombreux trous pour minimiser la vitesse de rotation. En effet, en pratique, la vitesse de rotation du disque est influencée par deux facteurs externes : la vitesse d'avancement et la densité prescrite : la densité de graines que l'on veut semer par unité de surface.

- La forme des tubes de descente

Yazgi (2016) a montré que la régularité d'espacement des graines était conditionnée par la forme du tube descente. De plus, une autre étude réalisée en laboratoire en 2017 par Carpes et al. a montré que l'augmentation de la vitesse de rotation du disque (elle-même induite en pratique par une augmentation de la vitesse d'avancement) entraîne une hausse de la proportion de graines mal placées. Cette diminution d'une des composantes de la qualité de semis s'explique par un effet rebond des graines dans le tube inhérent à sa forme et par la présence d'un capteur, le contrôleur de semis, les graines ricochant sur ce capteur. Cette étude s'attachant à tester différents modèles de tubes de descente montre qu'un tube à la forme parabolique permet d'atténuer cet effet rebond.

- Les chasse-débris

Les chasse-débris permettent d'écarter les résidus du sillon et d'affiner la granulométrie des agrégats. En présence de résidus, l'utilisation de chasse-débris est bénéfique pour la rapidité d'émergence puisqu'elle atteint les vitesses d'émergence sur un sol sans résidus (Raoufat et Matbooei, 2007). Cette étude a aussi montré que l'action des chasse-débris permettait d'améliorer la distribution horizontale en réduisant le nombre de manques, ainsi 70% des pieds étaient bien placés.

- Le type de disque ouvreur

Dans des pratiques de réduction du travail du sol voire de semis direct, le disque qui ouvre le sillon réalise le seul travail du sol qui doit permettre d'affiner suffisamment la terre pour assurer un bon contact terre-graine (Karayel et Šarauskis, 2011; Vamerli et al., 2006). Il est connu que le type de dispositif ouvreur a un effet sur les propriétés du lit de semence et ainsi sur l'émergence du maïs.

- La pression de terrage applicable sur l'élément semeur

Traditionnellement, la profondeur de semis est assurée par des roues de jauge qui permettent de maintenir l'élément à la bonne profondeur. En complément, un système de ressort et de parallélogramme permet d'appliquer une force constante sur l'élément semeur est d'assurer un bon suivi du terrain et donc une profondeur de semis régulière (Hanna et al., 2010). Les auteurs de l'étude précédente ont montré qu'en cas d'humidité élevée l'émergence était plus rapide avec une pression de terrage faible (20 à 50 kg), tandis qu'en cas de sol plus sec, une pression de terrage plus importante (50 à 90 kg) entraîne l'émergence la plus rapide. Cela s'explique par le fait qu'une pression de terrage élevée augmente la profondeur de semis, favorisant ainsi l'imbibition en eau de la semence puisque présente dans une zone plus humide. Cette augmentation de la profondeur n'est pas avantageuse lorsque tout le profil est humide. Cette étude montre que le bon réglage de la pression de terrage en fonction du milieu favorise une émergence rapide. De plus le réglage de la pression de terrage doit se porter sur un compromis entre une pression suffisamment élevée pour maintenir un bon suivi du sol et donc une profondeur de semis constante et ne pas compacter les bords du sillon car cela contraint le développement racinaire avec une pression trop élevée (Jasa, 2010).

- Dispositif de rappui de la graine

La présence d'une languette de rappui à la sortie du tube de descente permet de réduire la variabilité de l'espacement entre graine. Il n'a cependant pas été trouvé d'impact significatif sur le rendement (Staggenborg et al., 2004).

- Les dispositifs de fermeture du sillon

Ces dispositifs ont été très peu étudiés. La fermeture du sillon est pourtant un moment clé puisque ce dispositif a pour but de détruire le sillon préalablement formé par les disques ouvreurs pour assurer un bon contact terre-graine.

2. Les facteurs externes :

- Vitesse d'avancement

La vitesse d'avancement est un facteur important dans la répartition des graines sur le rang puisqu'une augmentation de vitesse implique des fréquences de multiple et de manque plus élevées du fait des vibrations engendrées par la vitesse d'avancement élevée (Badua et al., 2018). Les auteurs concluent qu'il est possible de réduire ces vibrations en augmentant la pression de terrage. En enregistrant les vibrations à l'aide d'accéléromètres disposés sur les éléments semeurs, Zhai et al. (2020) ont montré que l'amplitude des vibrations augmentent avec la vitesse d'avancement. Ces vibrations interfèrent avec le fonctionnement des organes du semoir : par exemple, les semences s'entrechoquent plus entre elles ou avec le tube de descente. Cela implique une qualité de répartition sur le rang moindre.

D'autres auteurs ont testé l'effet de la vitesse d'avancement sur l'espacement pour plusieurs types de semoir. Pour tous les semoirs étudiés, la dispersion des valeurs d'espacement augmentait de 0,4 cm par km.h⁻¹ supplémentaire (Liu et al., 2004c).

- La profondeur de semis

Le taux d'émergence est influencé par la profondeur de semis prescrite (Özmerzi et al., 2002), la valeur la plus élevée ne correspond cependant pas à la profondeur la plus faible mais à une profondeur intermédiaire, 6 cm. La répartition sur le rang est aussi modifiée par la profondeur de semis.

- Les caractéristiques du terrain

Les opérations culturales visant à préparer le sol avant le semis ont deux objectifs principaux. Le premier est de préparer un lit de semence favorable à la levée rapide et uniforme du maïs : un environnement qui se réchauffe rapidement et suffisamment fin pour permettre la germination. Le second est de créer une structure favorable au bon fonctionnement des racines : un environnement suffisamment poreux, laissant infiltrer l'eau et ne présentant pas de barrière physique à la prospection racinaire (zone compactée) (Daouze et Roger-Estrade, 2015).

Les pratiques de réduction de travail du sol prennent de l'ampleur. Le semis est de plus en plus fréquemment réalisé sur un terrain peu travaillé, donc plus compact, plus motteux et présentant des résidus en surface. La présence de résidus dans le sillon entraîne une émergence hétérogène des plants (Kaspar et al., 1990).

La pente du terrain et le sens du travail dans un terrain pentu ont un effet sur la régularité d'espacement (Searle et al., 2008).

La qualité d'un semis dépend donc de multiples facteurs dont certains dépendent du semoir utilisé. D'autres facteurs sont modifiés par le passage du semoir, par exemple en chassant les résidus présents dans le sillon. Nous allons maintenant voir en quoi les innovations techniques des équipements Precision Planting permettent d'améliorer la qualité de semis ou de la maintenir tout en augmentant le débit de chantier. Nous verrons aussi que ces innovations apportent des solutions potentielles pour l'agriculture de précision.

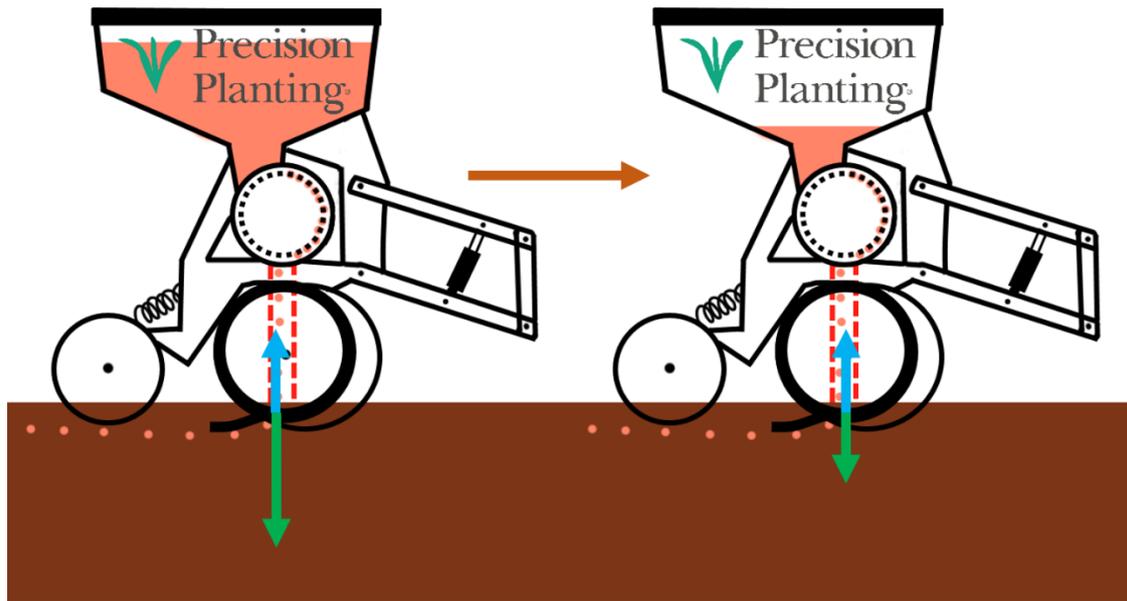


Figure 2: Schéma des forces s'appliquant sur un élément semeur : la flèche verte symbolise le poids de l'élément qui varie de gauche à droite et la flèche bleu symbolise la force de résistance mécanique du sol

II. Les innovations techniques des semoirs Precision Planting

Les noms donnés dans cette partie aux innovations sont les noms commerciaux. Les brevets concernés sont cités dans la bibliographie.

A. Améliorer la qualité de semis : à l'échelle de la zone homogène de sol

Les innovations techniques proposées par Precision Planting vont dans le sens d'une amélioration de la qualité de semis tout en permettant d'augmenter le débit de chantier, en augmentant la vitesse d'avancement. L'utilisation d'un des éléments suivant nécessite d'utiliser la console de commande 20|20 combinée à un ordinateur embarqué le DBM. La console sert à régler la machine mais aussi à rendre compte de la qualité du travail effectué et des conditions dans lesquelles le travail est effectué (Sauder et Koch, 2016).

- Le système doseur

Le système doseur vSet (Sauder, 2017) combiné au moteur électrique vDrive est annoncé à des performances de 99% de « *singulation* », c'est-à-dire que sur 100 trous, un seul comporte soit une graine manquante (manque) soit plusieurs graines sur un même trou (multiple).

- Supprimer ou atténuer l'effet rebond des tubes de descentes :

Le tube WaveVision (Sauder et Plantamura, 2014) est doté d'une forme parabolique censée réduire le risque de rebond et donc de variation de l'espacement (Carpes et al., 2017). En plus, le contrôleur de semis optique, qui sert à compter le nombre de graines actuellement semées est remplacé par un contrôleur utilisant des ondes pour compter les graines tombant dans le tube. Ce qui évite les ricochets. Ce contrôleur est disposé en bas du tube. En outre, Precision Planting propose un autre système de descente : le SpeedTube (Radtko, 2018) qui consiste en une courroie accompagnant les semences lors de la descente. Aucune étude sur l'efficacité de ce type de descente n'existe dans la littérature scientifique. Cette descente supprime totalement le risque de rebond et doit ainsi permettre un espacement régulier.

- Chasse-débris réglables en cabine

L'agressivité des chasse-débris est réglable finement en cabine à tout moment puisque chaque chasse-débris est monté sur un vérin pneumatique CleanSweep. Le chauffeur peut s'appuyer sur l'information de propreté du sillon disponible dans sa console (outil d'aide à la décision) pour le réglage.

- Corriger la pression de terrage en fonction du poids de l'élément semeur et de la résistance du sol

Nous avons vu que la pression de terrage était traditionnellement assurée par un ressort et un parallélogramme. Cependant la force exercée sur l'élément semeur résulte aussi d'une force exercée par le poids de l'élément semeur dont la masse varie au cours du semis (déchargement des trémies) et de la résistance du sol (figure 2). Cette résistance est variable car dépendante de paramètres variant dans l'espace : comportement mécanique du sol (plasticité, compaction) lui-même affecté par les caractéristiques physiques du sol (texture, structure, minéralogie et eau) (Fulton et al. 2015). Ainsi il apparaît nécessaire que la force exercée par le système ressort-parallélogramme soit variable. L'innovation DeltaForce (Sauder et Hodel, 2018) de Precision Planting va dans ce sens : le traditionnel ressort est remplacé par un vérin hydraulique double effet qui permet d'augmenter ou d'alléger la force indépendamment sur chaque élément. Ce système, couplé à des capteurs d'effort (Sauder et al., 2013) permet d'assurer un contrôle actif de la pression de terrage et donc de maintenir l'élément au sol sans pour autant compacter le sillon et ainsi entraver la croissance racinaire de l'espèce semée.

Cette dernière innovation va dans le sens de l'agriculture de précision puisque le vérin permet de corriger l'hétérogénéité des propriétés mécaniques du terrain et du poids de l'élément semeur au fur et à mesure de l'avancement.

B. Apports pour l'agriculture de précision

L'agriculture de précision peut être définie comme un mode de production prenant en compte la variabilité intra-parcellaire dans un but de maximisation de la rentabilité pour l'agriculteur en minimisant les nuisances environnementales.

Le dispositif de rappui SmartFirmer (Sauder et al., 2019) proposé par Precision Planting est équipé de capteurs qui permettent de caractériser l'état du sillon, en termes de température, d'humidité, de propreté et d'uniformité. Le dispositif estime aussi la teneur en matière organique et la capacité d'échange cationique (CEC) (prédictions multispectrales à partir de cinq bandes dans le domaine du visible et du proche infra-rouge). Ces capteurs sont une source d'information pour le chauffeur qui effectue le semis, puisqu'il peut corriger la profondeur de semis si le sillon n'est pas assez humide ou encore activer ses chasse-débris en cas de présence de résidus dans le sillon. De plus, cette remontée d'information, du sillon à la console permet à l'opérateur de vérifier la qualité de semis en temps réel. Par exemple, un accéléromètre présent sur chaque élément du semoir permet ainsi d'indiquer que la vitesse d'avancement est trop élevée et qu'il est préférable de ralentir au risque de voir la qualité de l'opération de semis se détériorer à cause des vibrations. Le contrôleur de semis installé sur chaque tube de descente donne aussi des indications sur la qualité du travail : on peut notamment y lire le pourcentage de multiples et de manques.

Toutes ces données sont géoréférencées et enregistrées, ce qui permet de produire des cartes de semis. Le dispositif 20|20 échantillonne à une fréquence de 5 Hz. Ainsi, pour une vitesse d'avancement de 11 km.h⁻¹, la carte compte un point tous les 60 cm ; les points étant écartés de 75 cm (écartement des rangs du semoir), cela représente un point tous les 0,45 m². Sur ces cartes d'autres données sont présentes, telles que la densité prescrite, la densité réalisée, la pression appliquée par le vérin, la pression mesurée par les capteurs d'effort, la vitesse d'avancement, etc. Ces cartes sont aussi une source d'information pour l'agriculture de précision puisqu'elles permettent de mettre en évidence de la variabilité intra-parcellaire. Des auteurs ont pu mettre en évidence que la pression appliquée sur les roues de jauges était corrélée à la conductivité électrique d'un sol, elle-même variant avec plusieurs caractéristiques des sols comme la texture par exemple (Sharda et al., 2016).

La profondeur de semis a fait l'objet de nombreuses recherches et si les semoirs s'attachaient auparavant à maintenir une profondeur de semis constante égale à la profondeur prescrite, il existe aujourd'hui un intérêt grandissant pour la modulation de la profondeur de semis en fonction de l'humidité du profil de sol (René-Laforest et al., 2014). En ce sens Precision Planting commercialise depuis 2019 un module SmartDepth (Sauder et al., 2019) permettant de faire varier automatiquement la profondeur de semis en fonction de l'humidité mesurée par ses capteurs SmartFirmer. Cette dernière innovation n'enlève cependant pas une des principales missions d'un semoir monograine qui consiste à semer à la profondeur prescrite, qu'elle soit variable ou pas.

La distribution électrique implique que le semis peut être arrêté à n'importe quel moment, ainsi couplé à un GPS, le semoir est équipé de la coupure de section ce qui permet d'éviter les recouvrements de semoir et donc d'éviter les surpeuplements. Cela a pour conséquence de valoriser au mieux les intrants (semences, insecticides). De plus le couplage GPS-distribution électrique donne aussi la possibilité de moduler les densités de semis en fonction des zones homogènes de sol préalablement définies. Cela donne la possibilité d'adapter le peuplement au potentiel de ses sols.

Problématiques et hypothèses associées :

[1] Rentabilité pour l'entrepreneur : la technologie de semis Precision Planting permet-elle d'augmenter le débit de chantier de semis tout en gardant une qualité de travail correcte ? Et ce dans quelles préparations de sol ?

Hypothèse : les innovations apportées permettent de maintenir une qualité de semis satisfaisante en augmentant le débit de chantier.

[2] Les pratiques de réduction du travail du sol sont de plus en plus présentes dans les parcelles des clients d'ETA. Qu'est-ce que cela implique sur la qualité de semis ? Quels sont les réglages optimaux pour chaque préparation ?

Hypothèse : la qualité de semis est meilleure dans des préparations plus affinées mais elle reste satisfaisante dans des préparations plus grossières.

[3] Rentabilité pour le client agriculteur : la qualité de semis apportée par les équipements Precision Planting permet-elle de justifier une hausse de la facturation par rapport à un semis classique ?

L'investissement dans cette technologie est élevé pour les ETA. Cet investissement important implique donc une hausse de la facturation de l'opération de semis.

Hypothèses : Le semis au Precision Planting est rentable pour l'agriculteur car celui-ci permet de simplifier la préparation du sol (éviter un passage d'herse rotative par exemple) et d'augmenter les rendements. La possible valorisation des données collectées lors de l'opération de semis peut aussi justifier une augmentation de la facture pour les agriculteurs engagés dans une démarche d'agriculture de précision. A noter que le semoir est aussi doté de la coupure de rangs et peut aussi semer en modulant la densité de semis.

[4] Le contrôle et l'adaptation de la pression sur l'élément semeur en continu pour maintenir une profondeur de semis constante permet-il de gommer les hétérogénéités du terrain ?

Hypothèse : la profondeur est plus hétérogène lorsque le contrôle de la pression de terrage est désactivé.

[5] Les données géoréférencées collectées par les capteurs embarqués sur les semoirs sont-elles valorisables dans une démarche d'agriculture de précision ?

Hypothèses : Les données des capteurs d'effort permettent de retrouver les zones homogènes de sol dessinées à partir du passage de conductivimètre. Les prédictions de grandeurs telles que la matière organique ou la CEC sont fidèles dans les variations au sein de la parcelle mais leur valeur ne correspond pas à ce qui est observé (effet de l'humidité sur la couleur du sol notamment pour la prédiction de la matière organique). La valeur de l'humidité permet de corriger cette grandeur.

Matériels et méthodes

A. Evaluation de la qualité de semis

En introduction nous avons vu les composantes de la qualité de semis. Ainsi, en pratique, pour évaluer un semoir, il apparaît donc nécessaire d'étudier la distribution verticale (position des graines dans le profil de sol : profondeur de semis) et la distribution horizontale (longitudinale : dans le sens du semis : distance entre graines au sein du rang et transversale : distance entre graines entre les rangs). La distribution horizontale transversale varie très peu puisque les éléments semeurs sont fixes dans cette direction. La distribution horizontale longitudinale est souvent approximée par la distance entre plants, car celle-ci est plus facile à mesurer (Kachman et Smith, 1995). Cette distribution n'est cependant pas la résultante exclusive de l'opération de semis puisqu'elle est liée aux qualités inhérentes de la semence et aux bioagresseurs (dégâts de corvidés notamment).

De plus le passage du semoir modifiant les propriétés du milieu, une autre composante de la performance d'un semoir réside dans sa capacité à fournir à la semence des conditions favorables à sa germination et à sa croissance (racinaire notamment). Nous avons vu que ces conditions favorisaient une émergence homogène ce qui permet de limiter les compétitions entre plants et d'augmenter les rendements. Nous étudierons donc l'émergence des plants de maïs ainsi que les décalages de stades phénologiques.

Les variables mesurées ou calculées pour évaluer la qualité de semis sont les suivantes :

- Espacement :

La régularité d'espacement est mesurée sur 10 m² avec un instrument développé par Precision Planting, le POGO qui permet d'enregistrer l'espacement entre deux plants ainsi que leur stade phénologique respectif. Les valeurs d'espacement seront ensuite séparées en classe en fonction de l'espacement théorique (fixé par la densité de semis) comme l'indique la méthode d'évaluation des semoirs monograines standardisée (International Organization for Standardization, 1984) pour ensuite calculer des indices de manques (pourcentage d'espacements supérieurs à 1,5 fois l'espacement théorique), de multiples (pourcentage d'espacements inférieurs ou égaux à la moitié de l'espacement théorique) et de bon placement (pourcentage d'espacements non considérés comme multiple ou manque). En plus de ces indices Kachman et Smith (1995) proposent un indice de précision qui témoigne de la variabilité des espacements considérés comme corrects. Un autre indice, le coefficient de précision à 3 cm CP3 est calculé : c'est la proportion de plants dans l'intervalle de plus ou moins 1,5 cm autour de l'espacement théorique (Yazgi et Degirmencioglu, 2014).

Ces indices sont calculés en gardant trois chiffres significatifs.

- Emergence :

Les dynamiques de levée sont réalisées par des comptages de plants émergents à partir du début de l'émergence sur des placettes de 10 m², ils sont effectués tous les jours jusqu'au troisième jour de levée, puis un autre comptage quelques jours plus tard vient compléter la cinétique. Ces données brutes seront étudiées après transformation mathématique ou après calcul d'indices.

- Transformation mathématique des données de levée en fonction du temps :

Par analogie avec la cinétique michaelienne, la cinétique d'émergence est de type exponentielle croissante à asymptote horizontale soit $y(t) = Dm(1 - e^{-at})$ avec Dm la densité après émergence i e la densité maximale atteinte par l'unité expérimentale considérée + 1, a une constante de vitesse d'émergence et y le nombre de plants émergés au temps t .

On peut donc réaliser une régression linéaire sur ces données en effectuant une transformation mathématique au moyen de l'équation suivante : $\ln\left(\frac{Dm-y(t)}{Dm}\right) = -at$

- Indices calculés à partir des données :

Le pourcentage d'émergence PE est défini par le rapport du nombre total de plants émergés par unité de surface et le nombre de graines semées par unité de surface (Bilbro et Wanjura, 1982).

Le temps moyen d'émergence, TME vaut $TME = \frac{\sum_i N_i D_i}{\sum_i N_i}$ avec N_i le nombre de plants supplémentaires ayant émergés le jour de comptage i et D_i le nombre de jours écoulés entre le comptage i et le semis (Bilbro et Wanjura, 1982; Conceição et al., 2012).

L'indice de taux d'émergence, $ITE = \sum_i \frac{(N_i - N_{i-1}) \times 100}{DS \times D_i}$ où N_i est le nombre de plants supplémentaires ayant émergés le jour de comptage i , DS la densité de semis par unité de surface échantillonnée et D_i le nombre de jours écoulés entre le comptage i et le semis (Erbach, 1982).

L'indice de la vitesse d'émergence, $IVE = \sum_i \frac{N_i}{A \times DJC_i}$, où N_i le nombre de plants supplémentaires émergés le jour de comptage i , A est la surface échantillonnée, DJC_i est la somme des degrés jours au i -ème jours après le semis (température de base : 6°C) (Siemens et al., 2007).

Ces indices sont calculés en gardant deux chiffres significatifs.

- Profondeur :

La profondeur effective est mesurée avant le stade 6 feuilles visibles, en déterrants 10 pieds par unité expérimentale et en mesurant la longueur entre le milieu de la graine et l'extrémité du coléoptile (Conceição et al., 2016; Vameralli et al., 2006). Ces données sont valorisées au travers d'indicateurs classiques tels que la moyenne, l'écart-type et le coefficient de variation.

B. Caractéristiques des semoirs de l'étude

1. Semoirs tout équipés Precision Planting

Les deux semoirs tout équipés Precision Planting sont identiques. Ce sont des semoirs 8 rangs. Ils sont équipés des innovations suivantes :

- CleanSweep : chasse-débris réglable en cabine
- SmartFirmer : languette de rappui dotée de capteurs pour caractériser l'état du sillon : température humidité, propreté du sillon, uniformité du sillon
- Capteur de charge sur les roues de jauge
- DeltaForce : vérin hydraulique double effet pour adapter en continu la pression de terrage
- Distribution vDrive + vSet : entraînement électrique de la distribution
- Tubes de descentes SpeedTube : descente de la graine par courroie, contrôleur de semis optique
- Console 20|20 : permet de contrôler le semoir et affiche en temps réel (et enregistre) les informations liées à l'opération de semis

Tableau 1 : Récapitulatif des facteurs d'étude et des modalités étudiées pour l'essai réglages

Facteurs d'études	Modalités	Objectif(s) de l'étude
Chasse-débris	Flottant 0% Agressivité élevée	Effet des chasse-débris sur la qualité de semis
Fermeture du sillon	Position 1 Position 2 Position 3 Position 4	Effet de la pression appliquée à la fermeture du sillon sur la qualité de semis
Profondeur	3 cm 4 cm 5 cm 6 cm	Effet de la profondeur sur la qualité de semis Respect de la profondeur prescrite
Dispositif rappui	de Dispositif Keeton Dispositif SmartFirmer Pas de dispositif	Effet du dispositif de rappui sur la qualité de semis
Pression de terrage	de Automatique faible Automatique moyenne Automatique élevée Uniforme faible Uniforme moyenne Uniforme élevée	Effet de la pression de terrage sur la qualité de semis
Vitesse	8 km.h ⁻¹ 11 km.h ⁻¹ 14 km.h ⁻¹	Effet de la vitesse sur la qualité de semis

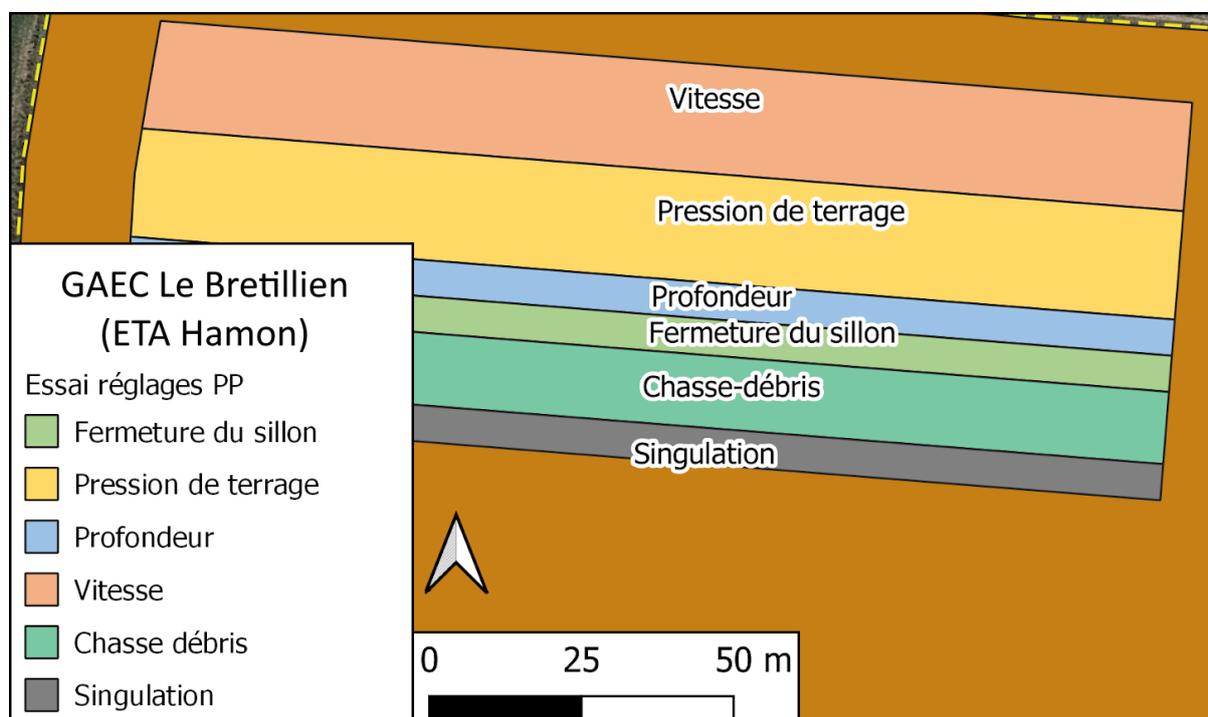


Figure 3 : Exemple de dispositif pour un essai réglage

2. Semoir mécanique modifié en semoir à distribution électrique Precision Planting

Le semoir 8 rangs rééquipé est doté des innovations suivantes :

- SmartFirmer : languette de rappui dotée de capteurs pour caractériser l'état du sillon : température humidité, propreté du sillon, uniformité du sillon
- Capteur de charge sur les roues de jauge
- Distribution vDrive + vSet : entraînement électrique de la distribution
- Tubes de descentes WaveVision : descente de la graine dans un tube à profil parabolique, contrôleur de semis à ondes situé sur la partie inférieure de la descente
- Console 20|20 : permet de contrôler le semoir et affiche en temps réel (et enregistre) les informations liées à l'opération de semis

C. Les différents dispositifs expérimentaux

Plusieurs types d'essai ont été mis en place au sein de la région Bretagne.

1. Essais réglages des semoirs

Trois essais ont été mis en place pour étudier l'effet de différents réglages sur la qualité de semis dans une diversité de conditions pédoclimatiques. Chaque essai est semé avec un menu de base, par exemple, vitesse d'avancement de 11 km.h⁻¹, pression de terrage automatique moyenne, fermeture de sillon en position 1 et chasse-débris en position flottante.

Pour chaque facteur d'étude (tableau 1) un seul réglage varie du menu de base. Par exemple pour le facteur d'étude pression de terrage, seule la pression de terrage change, les autres réglages restent inchangés. Tous les facteurs d'étude ne sont pas testés dans chaque essai. Certaines modalités sont étudiées sur seulement deux rangs du semoir : cela permet de réduire la surface d'essai lorsqu'il est possible de régler le semoir de cette façon.

Le dispositif expérimental est un plan en blocs complets non randomisés. Chaque traitement est testé dans chaque bloc. Les blocs sont disposés dans la longueur de l'essai (axe Ouest-Est sur la figure 3) et chaque modalité est semée en un passage de semoir pour des raisons de contraintes expérimentales. Toutefois, afin de s'assurer de l'absence d'hétérogénéité dans la largeur de l'essai (axe Nord-Sud sur la figure 3), les modalités correspondant au menu de base seront considérées comme des blocs dans une analyse préliminaire.

2. Essai réglages en fonction de la préparation de sol

De la même manière que les essais précédents, on étudie le changement d'un réglage par rapport au menu de base. Mais cette fois, ces modalités sont croisées avec trois modalités de préparation du sol (tableau 2).

L'ensemble de la parcelle a été travaillée à 15 cm de profondeur avec le déchaumeur Terrano (Horsch) pour enfouir le lisier préalablement épandu et les résidus du couvert multi-espèces détruit par désherbage chimique. Le Terrano est un outil à dents de pseudo-labour de six mètres de largeur. Il est équipé de pointes larges et de versoirs dans le prolongement des pointes. Il permet de réaliser un fractionnement du sol en incorporant les résidus présents sur la parcelle. Plusieurs semaines plus tard, cet outil a travaillé l'ensemble de la parcelle à 25 cm.

Deux bandes d'un hectare chacune sont travaillées une nouvelle fois : une première avec un déchaumeur à disques indépendants de six mètres de largeur : le Joker (Horsch). L'outil est combiné à un rouleau à lames de ressort. Il permet un nivellement du sol et une incorporation des résidus de la parcelle, ici les résidus du couvert. Cet outil évolue à vitesse élevée (plus de 10 km.h⁻¹) pour incorporer les résidus dans le flux de terre et affiner le sol. Dans le contexte de l'essai, l'outil travaillait à dix cm de profondeur. Une deuxième bande est travaillée à la herse rotative (Kuhn). C'est un outil animé par la prise de force du tracteur de 4,5 mètres de largeur. La prise de force entraîne le mouvement de plusieurs dents coniques sur la largeur de l'outil. L'outil est combiné à un rouleau de type *packer*. Il est utilisé classiquement en finition d'une préparation de sol. Il permet de produire un lit de semence plan et très affiné. Dans le contexte de l'essai, l'outil travaillait à six cm de profondeur.

Tableau 2 : Récapitulatif des facteurs d'étude et des modalités étudiées pour l'essai réglages en fonction de la préparation du sol

Facteurs d'études	Modalité	Objectif(s) de l'étude
Chasse-débris	Flottant 0% Agressivité moyenne Agressivité élevée	Effet des chasse-débris sur la qualité de semis
Fermeture du sillon	Position 1 Position 2 Position 3 Position 4	Effet de la pression appliquée à la fermeture du sillon sur la qualité de semis
Pression de terrage	Automatique faible Automatique moyenne Automatique élevée	Effet de la pression de terrage sur la qualité de semis
Vitesse	8 km.h ⁻¹ 11 km.h ⁻¹ 14 km.h ⁻¹	Effet de la vitesse sur la qualité de semis
Préparation du sol	Terrano 25 cm Terrano 25 cm + Joker Terrano 25 cm + Herse rotative	Effet des différents facteurs d'études croisés avec les préparations du sol.

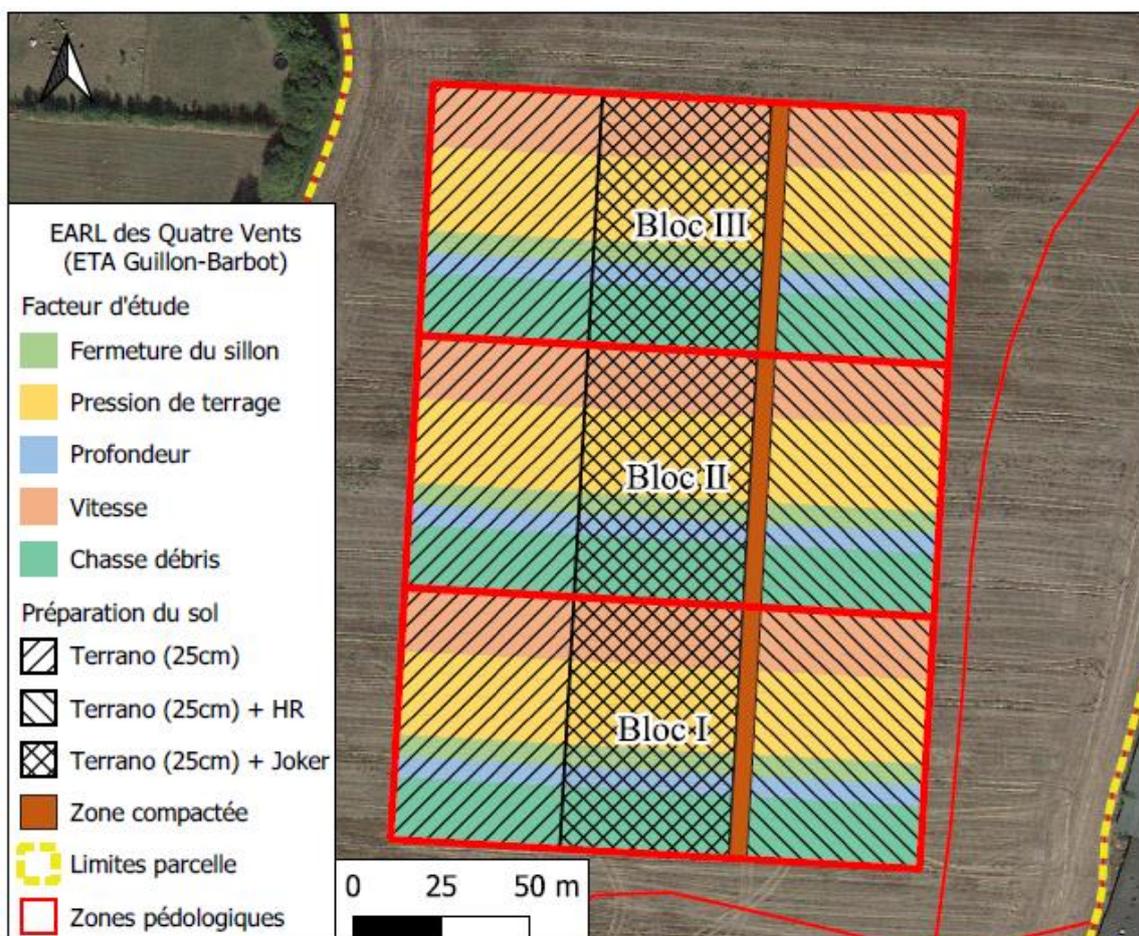


Figure 4 : Dispositif expérimental utilisé pour étudier l'effet de différents réglages en fonction de la préparation de sol

Le semis est réalisé le lendemain de cette dernière étape, le 11/04/2020, en travers de ces trois bandes de préparation du sol (figure 4). Un maïs grain hybride est implanté à 95000 graines par hectare.

i. Plan d'expérience « criss-cross »

Le plan d'expérience est de type « criss-cross » avec trois blocs (figure 4). Les facteurs d'études réglages et préparation du sol sont étudiés au sein de grandes parcelles. La zone compactée n'est pas une modalité puisqu'aucune mesure n'a été effectuée dans cette zone. Cette zone a été réalisée par des passages successifs d'engin sur une largeur d'environ 5 m. Elle est présente pour constater le comportement du semoir lorsque les propriétés mécaniques du terrain changent. Le dispositif est placé en concertation avec la carte pédologique établie quelques années plus tôt par SOYL France.

ii. Caractérisation des préparations du sol

Les préparations du sol ont été caractérisées par granulométrie des agrégats. Un échantillon de sol de 0,25 m² sur 10 cm de profondeur a été prélevé dans chaque préparation de sol. Les échantillons ont été séchés à l'air avant d'être passés au travers de différentes mailles : 23 mm, 12 mm, 3 mm et 2 mm. La masse totale de l'échantillon a été mesurée pour obtenir les différentes fractions granulométriques.

3. Essais comparaison de semoirs

Ces essais permettent de positionner les performances des semoirs équipés des innovations Precision Planting par rapport à des semoirs non équipés. Deux essais ont été réalisés sur la région Bretagne.

Deux modalités sont étudiées : la modalité semoir classique et la modalité semoir équipé des technologies Precision Planting. Les semoirs évoluent sur la même préparation de sol à la même vitesse d'avancement. Le dispositif expérimental est un plan en blocs complets randomisés (figure 5 au verso).

Les caractéristiques des semoirs non équipés Precision Planting sont les suivantes : le premier semoir est un semoir 6 rangs mécanique neuf car acheté en 2020. La vitesse d'avancement dans cet essai était de 7 km.h⁻¹. Le second semoir est un semoir à distribution électrique 8 rangs, de marque identique au semoir rééquipé Precision Planting.

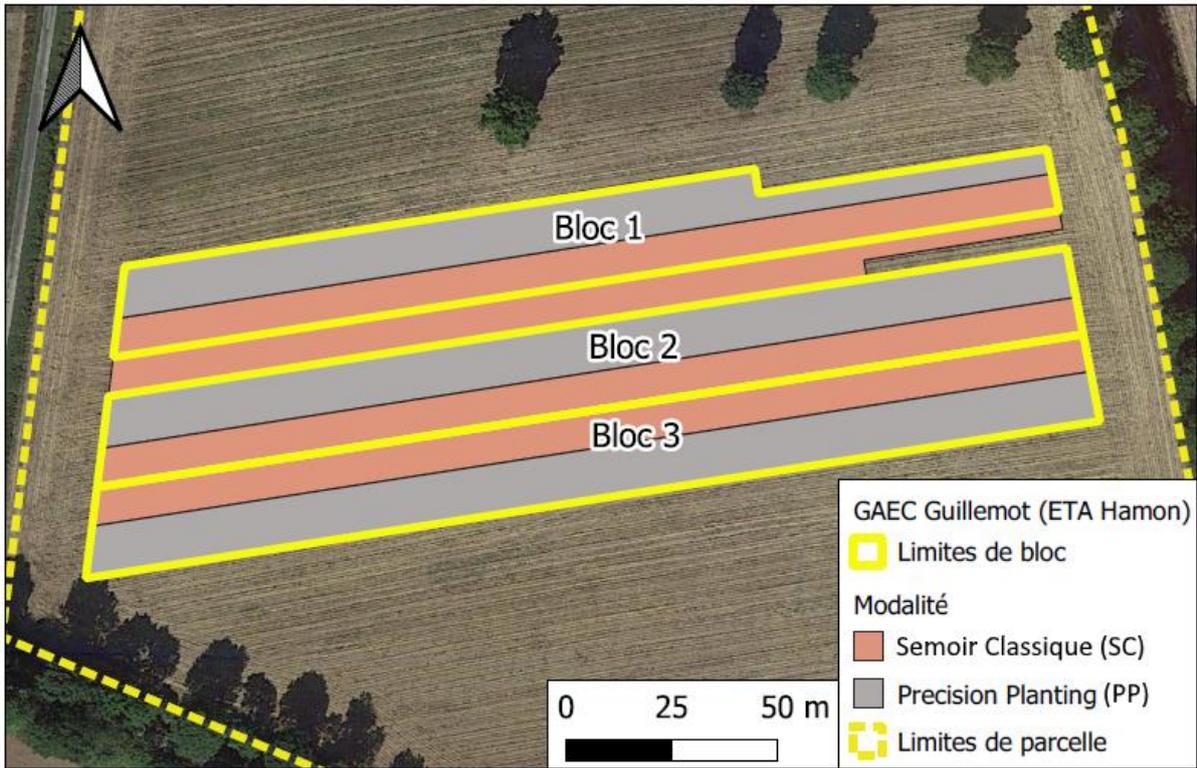


Figure 5 : Dispositif expérimental utilisé pour comparer les semoirs

D. Données collectées durant les campagnes de semis 2019 et 2020

Ces données sont toutes les données qui ont été collectées depuis la mise en route des semoirs. La chaîne de traitement de ces données est complexe. Elle est résumée dans les points suivants :

- Exportation des données : de .2020 à .csv avec ADAPT

Les données de semis sont stockées dans un fichier propriétaire (fichier avec extension « .2020 »), produit par la console 20|20 pour chaque champ semé. Ces fichiers sont illisibles en l'état. Cependant un module a été développé par Precision Planting pour permettre aux applications telles que des logiciels de gestion parcellaire (Farm Management Information Software) d'interagir avec les données « .2020 ». Ce module a été développé en utilisant le cadre de travail ADAPT (*Ag Data Application Programming Toolkit framework*). ADAPT est un projet mené par le consortium AgGateway qui réunit plus de 200 acteurs du monde agricole et qui a pour objectif de faciliter la mise en œuvre de l'agriculture digitale.

ADAPT a été développé pour faciliter l'interopérabilité des technologies en agriculture. Il est constitué d'une interface de programmation normalisée (*Agricultural Application Data Model*), d'une interface de programmation d'application (*Application Programming Interface*). Ce cadre de travail est libre d'accès, de redistribution et de modification (projet *open source*). Chaque acteur désirent faciliter l'interopérabilité de sa technologie peut ensuite développer un module (*open source* ou propriétaire) pour permettre d'interagir avec sa technologie. Il est ainsi possible à un logiciel de gestion parcellaire d'importer et de traiter des données de machines produites par des machinistes différents.

L'accès aux données générées par la console 20|20 a donc nécessité l'utilisation du module PrecisionPlanting.ADAPT.2020 (version 2.4.2). Une application avec interface en ligne de commande a été développée dans le langage C# (.NET Core 3.1) pour exporter les données au format .csv. Le code de cette application est disponible sur GitHub (Simon, 2020). Les données sont extraites dans leur entièreté : c'est-à-dire à la fréquence d'échantillonnage de la console 20|20 : 5 Hz, ainsi, en fonction de la vitesse d'avancement du tracteur, on a environ deux points par mètre carré.

- Passage d'un point unique à des points multiples

Les données ainsi extraites au format CSV rentrent alors dans une chaîne de traitement effectuée avec le logiciel R (version 3.6.2). Les données spatiales sont traitées à l'aide du package *sf*.

Les données, initialement géoréférencées dans le système WGS84 (European Petroleum Survey Group (EPSG) 4326), sont projetées dans le système de coordonnées RGF93-Lambert 93 (EPSG 2154) pour effectuer des calculs de distances. Ces coordonnées correspondent au barycentre du semoir. Cependant chaque point du jeu de données est associé avec les données de chaque rang. Pour effectuer des analyses géostatistiques, il convient donc de retrouver les coordonnées de chaque rang et d'y associer les données correspondantes. Pour un semoir de huit rangs, chaque barycentre à l'instant t doit donc donner huit points représentant les positions des éléments au même instant t.

La méthode et la démonstration mathématique du calcul des coordonnées des rangs pour chaque position du semoir sont présentées à l'annexe 2.

Tableau 3 : Récapitulatif des essais : densité de semis et calendrier des mesures (DJC : Degrés Jours Cumulés depuis le semis en base 6°C, NJ : nombre de jours après le semis)

Essai	Type d'essai	Densité (graines/ha)	Evènement	Date	NJ	DJC (°C)
EARL Des Quatre Vents (ETA Guillon- Barbot)	réglages x préparation du sol	95000	semis	11/04/2020	0	0,0
			comptage jour 1	22/04/2020	11	93,0
			comptage jour 2	23/04/2020	12	103,6
			comptage jour 3	24/04/2020	13	112,0
			mesures écartement B1	06/05/2020	25	191,1
			mesures écartement B2	05/05/2020	24	200,9
			mesures écartement B3	04/05/2020	23	210,0
GAEC Guillemot (ETA Hamon)	comparaison	95000	semis	25/04/2020	0	0,0
			comptage jour 1	05/05/2020	10	78,5
			comptage jour 2	06/05/2020	11	87,9
			comptage jour 3	07/05/2020	12	96,9
			comptage jour 6	10/05/2020	15	130,9
			mesures écartement	05/06/2020	41	386,9
			mesures profondeur	05/06/2020	41	386,9
EARL Du Gouello (ETA Hamon)	réglages	75000	semis	15/04/2020	0	0,0
			comptage jour 1	25/04/2020	10	87,8
			comptage jour 2	26/04/2020	11	96,1
			comptage jour 3	27/04/2020	12	101,9
			mesures écartement	12/05/2020	27	225,3
GAEC Le Bretillien (ETA Hamon)	réglages	92000	semis	18/05/2020	0	0,0
			comptage jour 1	25/05/2020	7	69,0
			comptage jour 2	26/05/2020	8	80,5
			comptage jour 3	27/05/2020	9	92,5
			comptage jour 8	01/06/2020	14	160,0
			mesures écartement	08/06/2020	21	221,4
SCEA Le Lay (ETA Le Lay)	réglages	91000	semis	14/05/2020	0	NA
			mesures écartement	03/06/2020	20	NA
			mesures profondeur	03/06/2020	20	NA

E. Analyses de données non géoréférencées

Les analyses sont menées avec le logiciel R (version 3.6.2). Les packages *car*, *lme4*, *emmeans*, *outliers* et *multcomp* sont utilisés.

Pour les essais réglages, un modèle mixte plaçant le facteur bloc en aléatoire est utilisé. L'absence d'hétérogénéité dans la largeur de l'essai est vérifiée avec une analyse par bloc de l'effet modalité qui devient alors un effet bloc. L'effet bloc est placé en effet aléatoire car c'est une source de variation que l'on souhaite contrôler dans le modèle mais on ne souhaite pas la tester.

L'essai réglages en fonction de différentes préparations de sol est analysé avec un modèle mixte global, plaçant tous les effets dans l'analyse par facteur d'étude réglage : un modèle pour la vitesse, un autre pour la pression de terrage, etc. Un modèle se focalisant particulièrement sur une préparation de sol pourra aussi être utilisé. A chaque fois, l'effet bloc est placé en effet aléatoire et la résiduelle est modifiée en conséquence du dispositif expérimental.

Les essais comparaisons de semoirs sont analysés avec un modèle mixte avec effet bloc placé comme effet aléatoire.

Les modèles utilisés sont systématiquement validés avant de tirer des conclusions. Ainsi, les hypothèses de normalité, d'indépendance et d'homoscédasticité sont testées ou au moins validées visuellement pour tous les effets aléatoires du modèle (résidus du modèle et autres effets aléatoires comme l'effet bloc ou la résiduelle adaptée en conséquence du dispositif). Le test de Grubbs est utilisé pour détecter la présence de données suspectes.

Des comparaisons multiples de moyennes sont mises en œuvre avec la méthode de Tukey. Des intervalles de confiance sont construits en utilisant la méthode de Sidak pour ajuster le risque d'erreur de première espèce α (Makowski et al., 2018).

F. Analyse de données géoréférencées : cartes de semis

Etude de la fiabilité de prédiction de la matière organique par SmartFirmer :

Les données de semis sont extraites avec la méthode développée plus haut. Elles correspondent à une parcelle semée par l'ETA Hamon le 18/04/2020. Cinq échantillons composites géoréférencés de terre sont prélevés le 16/06/2020 dans cette même parcelle pour que la teneur en matière organique soit mesurée par le laboratoire Auréa. L'échantillonnage est orienté par la carte de conductivité déjà disponible pour cette parcelle. La matière organique est obtenue en multipliant par 1,72 la teneur en carbone organique mesurée. Une zone tampon de 20 m de diamètre autour de chaque point est utilisée pour obtenir une moyenne des estimations faites par SmartFirmer par le biais d'une jointure spatiale.

Tableau 4 : Résultats agrégés des comptages de levée pour les différentes préparations de sol (J1, J2, J3) : nombre de plants émergés le 1, 2 et 3ème jour du comptage, ITE : Indice du Taux d'Emergence, IVE : Indice de Vitesse d'Emergence, TEM : Temps d'Emergence Moyen, PE : Pourcentage d'Emergence). La valeur sans crochets correspond à la moyenne, la valeur entre crochets correspond à l'écart-type

Modalité	J1	J2	J3	ITE	IVE	TEM (jour)	PE (%)
T25	52 [14]	70 [13]	76 [12]	7,0 [1,2]	0,078 [0,013]	11 [0,45]	80 [13]
T25+J	56 [7,9]	74 [7,0]	78 [5,6]	7,2 [0,52]	0,081 [0,006]	11 [0,29]	82 [5,5]
T25+HR	65 [5,6]	78 [5,8]	82 [6,0]	7,7 [0,55]	0,086 [0,006]	11 [0,00]	86 [6,3]

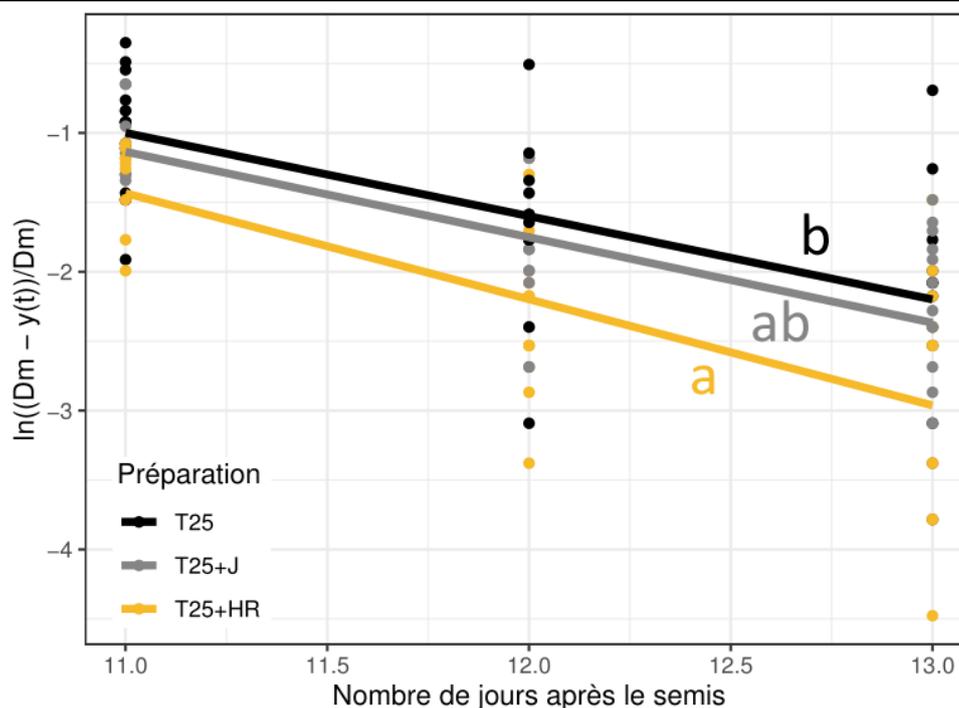


Figure 6 : Transformation mathématique du nombre de plantes émergées par jour

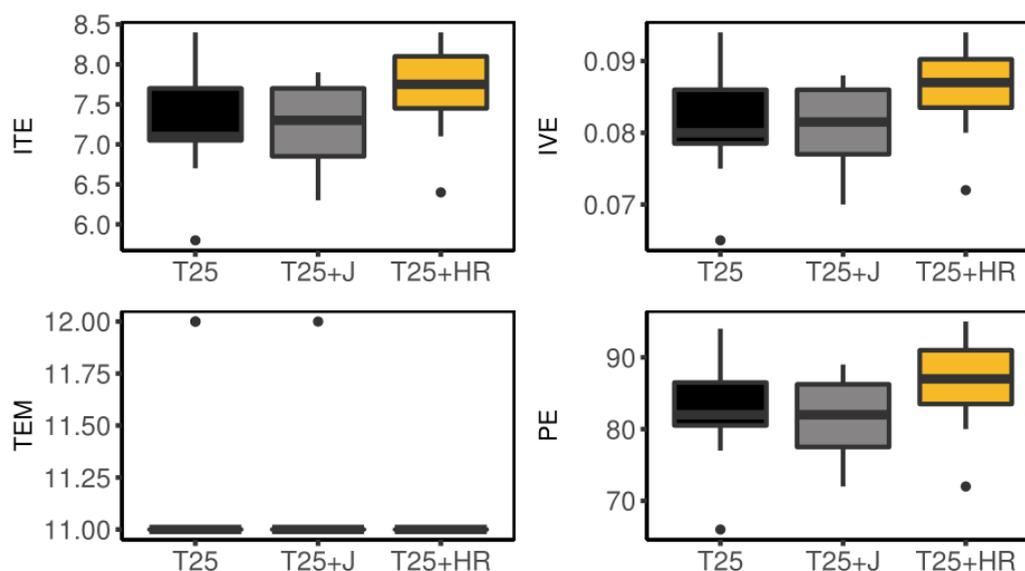


Figure 7 : Boîtes à moustaches des indices d'émergences pour les trois préparations de sol

Résultats

- A. Evaluation de la qualité de semis des technologies Precision Planting dans différents contextes techniques et pédoclimatiques
- Effet de la préparation du sol sur la qualité de semis

Les modalités de préparation du sol sont vues comme des contextes techniques différents. Les résultats de la caractérisation de préparation du sol (figure annexe 1) révèlent que la préparation à la herse rotative (T25+HR) affine le plus le sol : plus de 40% de la masse de sol prélevée est de la terre fine. L'échantillon de la préparation au déchaumeur à disques indépendants (T25+J) est composé de 30% de terre fine contre 23% où la préparation finale a été faite avec seulement un passage de déchaumeur à dents. Cette dernière préparation comptait beaucoup de grosses mottes (supérieures à 23 mm de diamètre) peu poreuses (mottes delta).

Le tableau 4, montre les données agrégées par type de préparation de sol, le pourcentage d'émergence est faible car il est calculé après seulement trois jours de comptage. Cependant l'écart-type élevé du pourcentage d'émergence témoigne des dégâts de corvidés qui sont survenus sur l'essai. La figure 6 représente les différentes courbes issues de la transformation mathématique de la cinétique d'émergence pour les trois préparations du sol. La pente de ces courbes a la dimension d'une vitesse. Un modèle mixte est utilisé pour modéliser l'évolution de la grandeur en fonction du temps et des préparations du sol.

Le test de Grubbs est utilisé pour détecter les données suspectes. Ce test a révélé que trois individus étaient considérés comme des individus extrêmes. Après vérification, ils ont été retirés de l'analyse.

Une analyse de la covariance permet de tester le modèle. Celle-ci révèle trivialement que le nombre de plants émergés varie dans le temps. De plus l'effet de la préparation du sol sur la grandeur calculée est significatif, en effet la *p-value* associée à cet effet vaut 0,03, ainsi l'hypothèse H_0 «la préparation du sol n'a pas d'effet sur la vitesse d'émergence » peut donc être rejetée au seuil de risque $\alpha = 0,05$. La comparaison multiple des moyennes obtenues permet d'indiquer quelle courbe est significativement différente des autres. Les lettres sur la figure 6 sont le résultat de ce test de Tukey. Cependant la préparation de sol n'a pas d'effet sur la vitesse d'émergence : en effet l'effet conjoint de la pente et de la préparation du sol n'est pas significatif.

L'ANOVA sur les indices d'émergence (figure 7) n'a cependant pas révélé d'effets significatifs de la préparation du sol. En tendance, on peut seulement dire que la préparation herse rotative semble se dégager des autres pour l'ITE, l'IVE et le pourcentage d'émergence. Mais le dispositif expérimental et les analyses n'ont pas pu révéler de différences significatives entre les préparations.

Les analyses menées sur les indicateurs de la qualité de la distribution horizontale ne révèlent pas de différence significative en fonction des préparations du sol. Seul le coefficient de variation semble être plus élevé pour la préparation de sol la plus grossière. Mais la *p-value* de 0,08 ne permet pas de rejeter l'hypothèse nulle au seuil de confiance 95%.

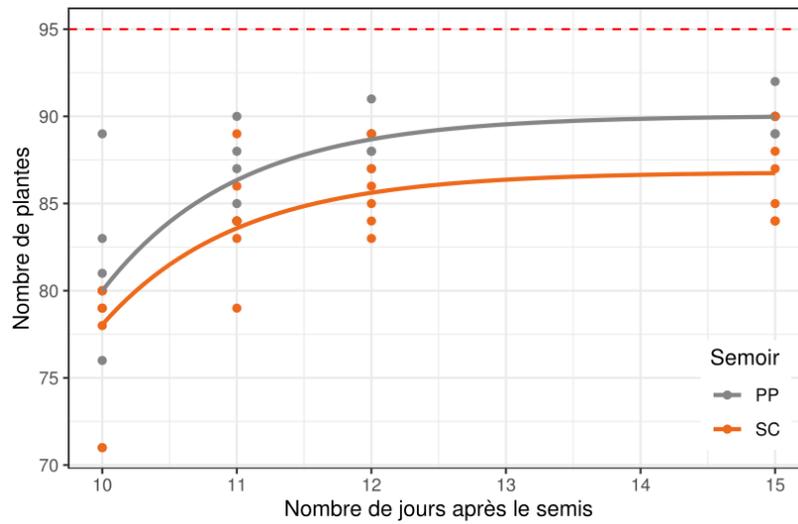


Figure 8 : Nombres de plants émergés par jour, la droite horizontale en pointillés rouge correspond à la densité prescrite

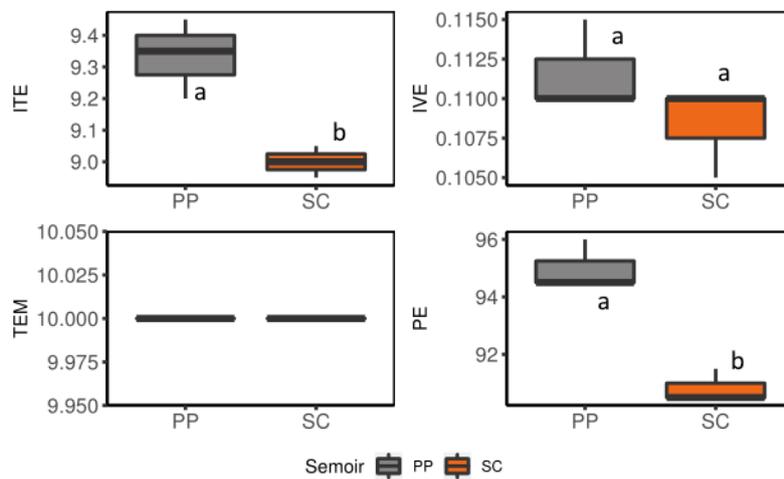


Figure 9 : Boîtes à moustaches des indices d'émergences pour les deux semoirs de l'étude

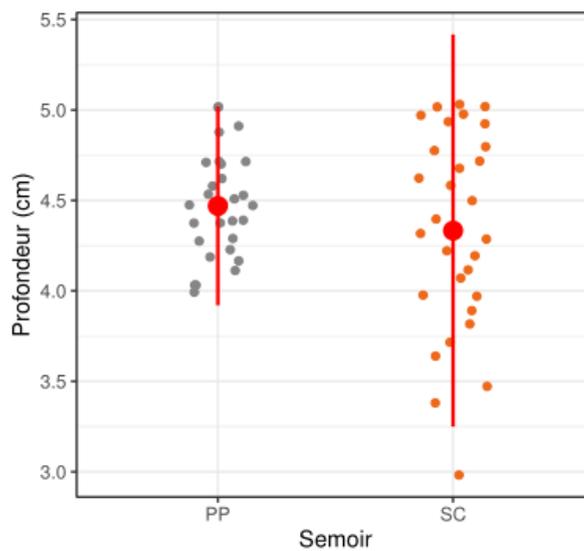


Figure 10 : Profondeur réalisée de l'essai comparaison de semoirs

- B. Positionnement des performances des semoirs Precision Planting par rapport à d'autres semoirs
- Emergence

L'essai comparaison de semoirs qui a été mené au sein du GAEC Guillemot est le seul essai comparaison où des comptages de levée ont été faits. La figure 8 montre les résultats de ces comptages d'émergence. L'analyse sur la cinétique transformée révèle que les pentes des droites linéaires sont significativement différentes pour les deux traitements ($p\text{-value} = 0,02$). De plus l'analyse sur les indices montre que l'indice du taux d'émergence est significativement plus élevé pour le semoir Precision Planting. Enfin, le pourcentage d'émergence est significativement plus élevé pour ce même semoir (figure 9). L'estimation de l'effet vaut 4,17% de plants émergés en plus lorsque le maïs est semé avec Precision Planting.

- Profondeur

Toujours au sein du même essai, les mesures de profondeurs (figure 10) semblent indiquer que les valeurs sont plus dispersées, les écart-types (tous les blocs confondus) valent respectivement 0,28 cm pour la modalité Precision Planting et 0,55 cm pour la modalité semoir classique. Cependant, il n'y a pas de différence significative entre les écart-types des deux modalités, une fois l'hétérogénéité des blocs prise en compte ($p\text{-value} = 0,10$). La profondeur moyenne est semblable, ce qui permet de confirmer que les deux modalités ont bien été semées à la même profondeur.

- Espacement

La régularité d'espacement est semblable pour les deux semoirs. Aucune différence significative n'a été mise en avant. Les résultats des mesures d'espacement sur l'autre essai comparaison de semoirs montrent que la qualité de répartition du semoir à distribution électrique est moins bonne que la qualité du semoir rééquipé Precision Planting : la médiane du pourcentage de graines bien placées vaut 81 % pour le semoir dit classique contre 92 % pour le semoir Precision Planting. De même la médiane du pourcentage de multiples vaut 9 % pour le semoir classique contre 3 % pour le semoir Precision Planting ; l'effet semoir n'est cependant pas significatif au seuil de 95 %, puisque la $p\text{-value}$ vaut 0,08.

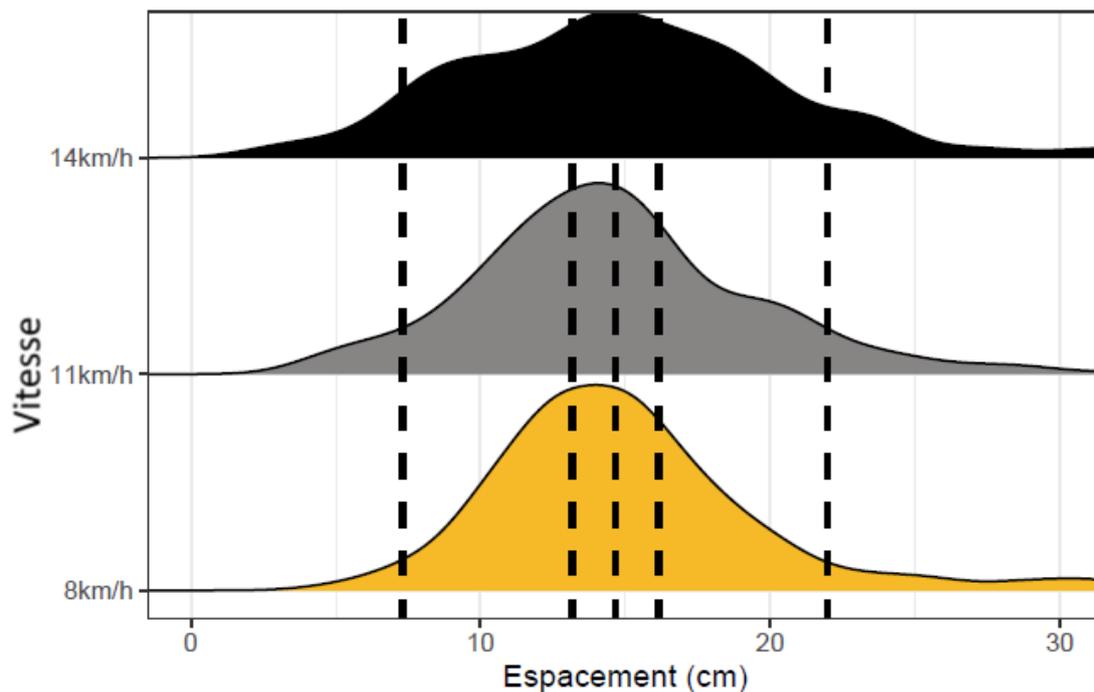


Figure 11 : Distribution des valeurs d'espacement mesurées pour chaque modalité de vitesse. De gauche à droite, les traits verticaux représentent : la limite multiple/bon placement, limite inférieure du CP3, écartement de référence fixé par la densité, limite supérieure du CP3, limite bon placement/manque.

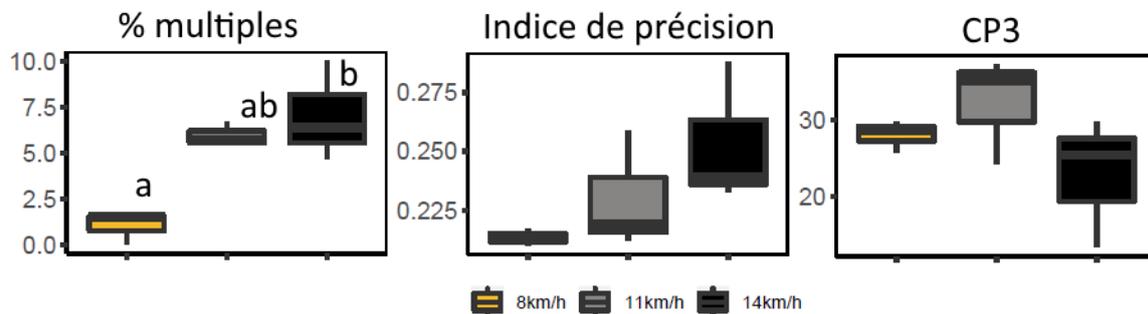


Figure 12 : Boîtes à moustaches des indicateurs % multiples, indice de précision et CP3 en fonction des modalités de vitesse, la présence de lettre indique que l'effet vitesse est significatif sur la grandeur, de plus les modalités partageant une lettre ne sont pas classées significativement différentes selon le test de Tukey

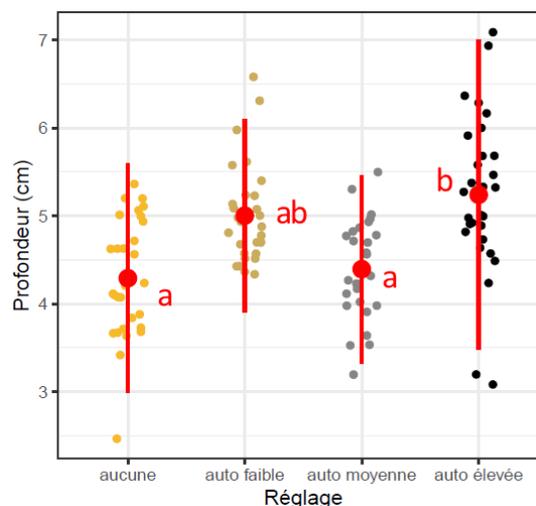


Figure 13 : Mesures de profondeur effectuées sur la modalité pression de terrage. Les lettres de Tukey concernent la profondeur moyenne (symbolisée par le rond rouge).

C. Production de références de réglages dans différents contextes techniques et pédoclimatiques

- Effet de la vitesse d'avancement sur la qualité de semis

Le rééquipement du semoir mécanique en semoir électrique Precision Planting est un contexte technique : en effet ce semoir n'est pas équipé de l'innovation DeltaForce. Les résultats du facteur d'étude vitesse montrent que la qualité de semis sur les critères de distribution horizontale et verticale se dégradent avec la vitesse d'avancement. La figure 11 représente la distribution des valeurs brutes d'espacement mesurées pour chaque vitesse. A la vitesse maximale considérée dans l'essai, 14 km.h⁻¹, la distribution s'étale. Les analyses menées sur les indicateurs qualifiant la distribution horizontale confirment cela (figure 12). Les indicateurs Indice de Précision et Coefficient de Précision à 3 cm sont significatifs au seuil de risque $\alpha = 0,10$. Le pourcentage de multiples est significatif au seuil de risque $\alpha = 0,05$. En moyenne, à 14 km.h⁻¹, le semoir sème 7% de graines en multiple, c'est-à-dire à une distance inférieure à 0,5 fois l'écartement théorique, à 11 km.h⁻¹, 6% et à 7 km.h⁻¹ seulement 1%. Les autres essais réglages, semés avec l'innovation DeltaForce, n'ont pas révélé d'effet de la vitesse d'avancement qui viendrait dégrader la qualité de semis.

- Effet de la fermeture du sillon sur la qualité de semis

Un essai a révélé que les modalités de fermeture du sillon avaient un effet significatif sur le pourcentage d'émergence. Les deux modalités de plus haute pression de fermeture (position 3 et 4) semblent ainsi maximiser le pourcentage de plants émergés par rapport au position 1 et 2. Cependant la comparaison multiple (test de Tukey) n'a pas permis de différencier les effets. La distribution horizontale n'était pas impactée par les différents niveaux de pression.

Les autres essais n'ont pas révélé d'effet significatif des niveaux de pression de fermeture sur les différents indicateurs employés pour caractériser la qualité de semis.

- Effet de la pression de terrage sur la qualité de semis

La partie réglage de l'essai conduit avec le semoir rééquipé a pu mettre en évidence un effet du réglage de la pression de terrage sur le pourcentage de multiple. La pression uniforme la plus faible permet une distribution horizontale avec seulement 2,5 % de multiples. On rappelle que ce réglage est testé à la vitesse d'avancement de 11 km.h⁻¹, ainsi il permet de minimiser le pourcentage de multiples, par rapport au réglage de la pression uniforme moyenne à 11 km.h⁻¹ (résultat précédent, figure 13). L'estimation du pourcentage de multiples pour la pression uniforme moyenne vaut bien 5,9 %. Pour la pression la plus élevée, le pourcentage est intermédiaire et vaut 4,9 %. Un autre essai au plan similaire mais avec un semoir équipé de l'innovation DeltaForce révèle que la profondeur moyenne mesurée est significativement différente selon les modalités de réglage de la pression. Ainsi, lorsque la pression de terrage est désactivée, c'est-à-dire que l'élément semeur est gardé au sol uniquement par son propre poids, la profondeur moyenne est alors plus faible que lorsque la pression de terrage est réglée à son maximum. La désactivation de la régulation continue de la pression de terrage n'est pas significativement différente des autres niveaux de réglages de la pression de terrage (pression automatique faible et pression automatique moyenne). Si la valeur moyenne de la profondeur se trouve changée en fonction du niveau de pression appliquée, il n'a pas été mis en évidence d'effet de ces mêmes modalités sur la dispersion des données de profondeur, l'échantillonnage n'est peut-être pas assez représentatif de la population.

- Effet de la profondeur de semis sur la qualité de semis

Des retards d'émergence et des pertes de pieds ont pu être constatés pour les modalités semées à 6 cm. Cependant, dans des zones subissant des dégâts de corvidés, les modalités 6 cm dépassaient finalement en nombre de pieds par hectare les modalités plus superficielles.

Tableau 5 : Teneurs des échantillons mesurées et estimées (COrg : Carbone Organique, MO Matière Organique, MO SF : MO estimée par SmartFirmer)

Point	COrg (%)	MO (%)	MO SF (%)
A	1,04	1,79	2,15
B	1,5	2,58	2,17
C	1,45	2,49	2,47
D	1,52	2,61	2,18
E	2,08	3,57	1,79

Figure 14 (à droite) : Graphique des teneurs en matière organique observées en fonction des teneurs estimées par SmartFirmer (la ligne rouge représente la modélisation linéaire de la teneur mesurée en fonction de la teneur estimée, le R^2 et la Root Mean Square Error sont les indicateurs choisis pour évaluer la fiabilité de la prédiction.

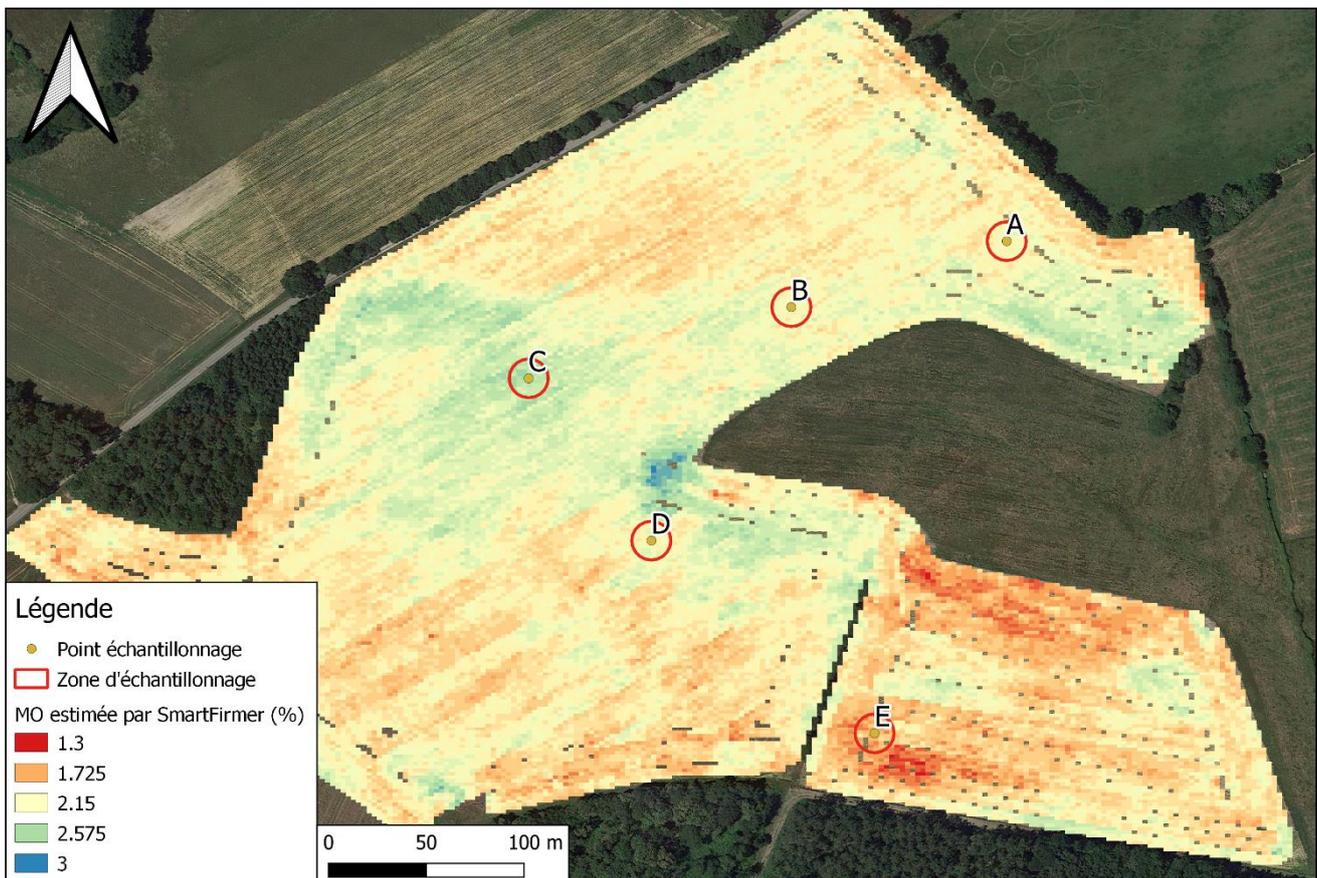
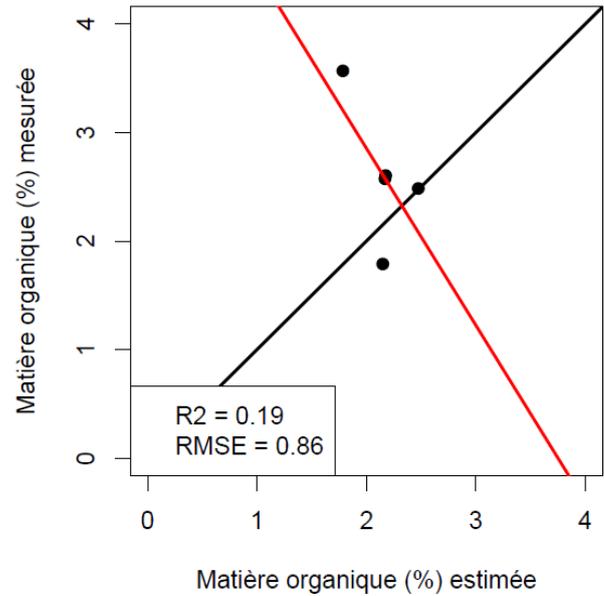


Figure 15 : Carte représentant les teneurs en matière organique estimées par SmartFirmer et les points d'échantillonnage de la vérification au sol. Les zones tampons aux bordures rouges sont les zones utilisées pour la jointure spatiale avec les données SmartFirmer. MO : Matière Organique

D. Apports des technologies Precision Planting pour l'agriculture de précision

L'évaluation de la fiabilité de l'estimation de la matière organique par la languette SmartFirmer a été effectuée au moyen d'une vérification au sol.

La carte présentée en figure 15 montre les points d'échantillonnage et le résultat de l'estimation des teneurs en matière organique par SmartFirmer. Il semble que la parcelle présente une hétérogénéité en matière organique.

D'après le tableau 5, l'échantillonnage aux points révèle que la parcelle présente effectivement une hétérogénéité en matière organique. En effet, l'écart-type sur la série de données mesurées vaut 0,63%. Cependant, en considérant uniquement ces points, les valeurs estimées par le dispositif SmartFirmer ne permettent pas de se rendre compte d'une telle hétérogénéité puisque l'écart-type de la série vaut 0,24%.

La représentation graphique (figure 14) montre les teneurs en matière organique observées en fonction des teneurs estimées par SmartFirmer. Les points ne s'alignent pas tous sur la première bissectrice, un des points (E) est très largement sous-estimé par SmartFirmer. La modélisation linéaire (ligne rouge) des teneurs en matière organique observées en fonction des teneurs estimées révèle que moins de 20% de la variabilité est expliquée par le modèle. L'erreur quadratique moyenne (*RMSE : Root Mean Square Error*) vaut 0,86% de matière organique. La RMSE du modèle moyen pour estimer les teneurs en matière organique a aussi été calculée, elle vaut 0,22%. Ainsi, on fait plus d'erreur en utilisant le modèle implémenté dans SmartFirmer qu'en utilisant la moyenne des mesures réalisées en laboratoire pour estimer chaque point.

Ce résultat permet aussi de valider les méthodes mises en place pour extraire les données de fichier propriétaire .2020 à fichier .csv et recalculer les positions de chaque élément (Simon. (2020) et annexe 2).

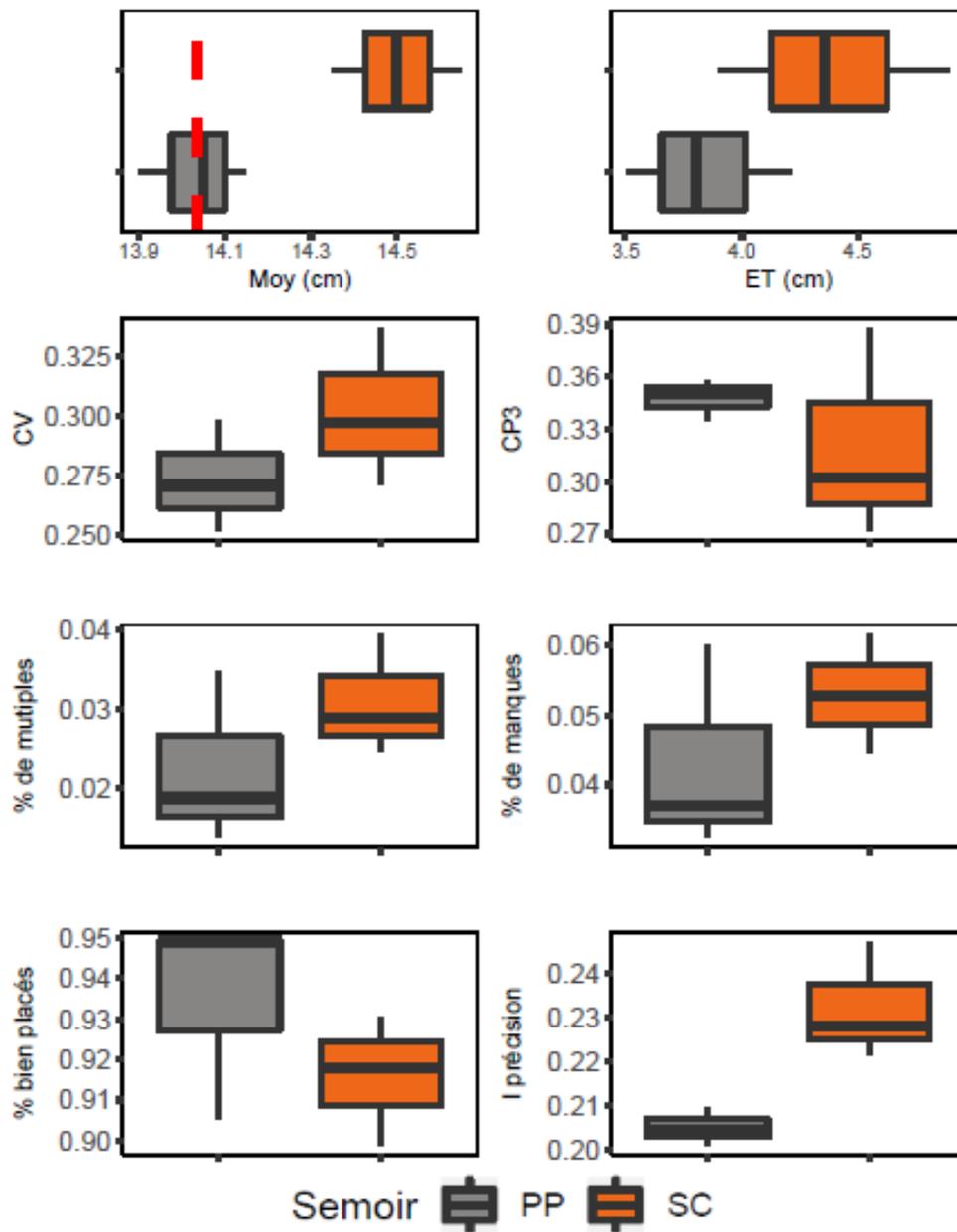


Figure 16 : Les indicateurs de la distribution horizontale utilisés sur l'essai mené au GAEC Guillemot

Discussion

A. Evaluation de la qualité de semis des technologies Precision Planting dans différents contextes techniques et pédoclimatiques

Les différents contextes techniques générés par le dispositif avec plusieurs préparations du sol n'ont pas permis de mettre en évidence de réelle différence autant dans la dynamique de levée que dans la répartition au sein du rang. Cet essai a subi des dégâts de corvidés après les comptages d'émergence. Ces dégâts ont pu amener de la variabilité dans le dispositif. En raison de ces dégâts et vu les dimensions de l'essai nous n'avons pas souhaité effectuer les mesures de profondeur. L'essai sera tout de même récolté avec la cartographie de rendement.

Il aurait été appréciable de conclure cet objectif du mémoire avec une figure de type *forest-plot*, regroupant les moyennes ajustées de quelques indicateurs permettant de qualifier la distribution horizontale et verticale des différents semoirs étudiés et dans les différents contextes étudiés. Cependant l'utilisation des modèles linéaires mixtes n'a pas permis d'obtenir les moyennes ajustées et les bornes des intervalles de confiance.

B. Positionnement des performances des semoirs Precision Planting par rapport à d'autres semoirs

Les essais comparaisons de semoir mettent en évidence que le semoir d'étude, Precision Planting sème à une qualité supérieure que les semoirs auxquels il était confronté. Il a ainsi pu être mis en évidence que le semoir Precision Planting avait permis de gagner 4 % sur le pourcentage de plants émergés. Cette différence d'émergence peut avoir deux causes : le semoir classique ne sème pas à la densité prescrite ou le Precision Planting met les graines dans de meilleures conditions, ce qui favorise leur germination. Il semble que la première explication soit la plus plausible car la mesure des écartements a révélé que l'espacement moyen du semoir classique était plus grand que l'espacement moyen du semoir d'étude (figure 16) qui était lui en phase avec l'écartement théorique fixé par la densité (trait pointillé rouge sur la figure 16). Même si cette différence est due à un défaut de distribution, 4% de pieds supplémentaires sur 95000 graines/ha (densité à laquelle l'essai a été semé) représente tout de même près de 4000 pieds à l'hectare. Or ce maïs a été semé pour être récolté en fourrage, cette différence de densité de semis pourra donc peut-être expliquer des différences de rendement lorsque l'essai sera récolté. Pour l'autre essai, seuls les écartements ont été mesurés, les résultats montrent que la répartition des graines est meilleure pour le semoir rééquipé Precision Planting, le système de distribution, de la trémie jusqu'au sillon, est donc plus performant que le semoir classique.

Même si dans les essais comparaisons de semoirs, les semoirs confrontés semaient à la même vitesse, nous avons vu dans d'autres essais que l'augmentation de la vitesse n'était pas un facteur qui dégradait très fortement la qualité de semis quand le semoir était équipé de l'innovation DeltaForce. L'augmentation du débit de chantier en conservant une qualité de semis correcte est donc envisageable. De plus le dispositif reliant préparations de sol et modalités de vitesse n'a pas mis en évidence de perte de qualité de semis. Ainsi on peut donc répondre par l'affirmative à la problématique [1].

C. Production de références de réglages dans différents contextes techniques et pédoclimatiques

Le dispositif reliant préparations de sol et les modalités de réglage du semoir n'a pas permis de mettre en évidence des réglages optimaux pour chaque préparation. Il peut être conclu que le semoir Precision Planting utilisé lors de l'étude sème de manière convenable dans des préparations plus ou moins affinée. La possibilité de régler la pression de terrage à une valeur assez élevée pourrait rendre possible l'utilisation de semoir Precision Planting en préparation très simplifiée. Il n'a pas pu être trouvé de réglage optimal pour chaque facteur d'étude dans l'essai croisant les réglages et les préparations de sol. Le choix du dispositif « criss-cross » est peut-être à remettre en cause puisque ce dispositif est puissant pour tester les interactions

des deux facteurs d'études qui le compose mais moins puissant pour tester l'effet de chaque facteur. Les dégâts de corbeaux sur ce même essai n'ont sans doute pas arrangé les choses.

Le facteur d'étude fermeture du sillon a été étudié car c'est un réglage très peu utilisé par les chauffeurs des ETA. Les études menées n'ont cependant pas permis de mettre en évidence de réels effets du réglage du dispositif de fermeture du sillon sur la dynamique d'émergence, la profondeur et l'espacement.

Le temps d'émergence moyen ne semble pas être un bon indicateur pour étudier la dynamique d'émergence d'un semis de maïs. L'analyse de cet indicateur a d'ailleurs souvent provoqué des problèmes de matrices de variance-covariance rendant ainsi les données inutilisables avec la méthode de modélisation employée. De plus son utilisation doit se faire de manière rigoureuse : il faut en effet bien penser au nombre de chiffres significatifs qu'on lui accorde, comme c'est une somme de comptages pondérés par le nombre de jour après le semis, il convient d'accorder à cet indicateur seulement deux chiffres significatifs. Au début de l'analyse des résultats, cet aspect avait été négligé et le coefficient s'avérait souvent significatif.

La méthode proposée dans ce mémoire, qui consistait à effectuer une transformation mathématique des données brutes de nombre de plants comptés par jour pour se rapprocher d'un modèle linéaire simple s'est avérée intéressante. Cette méthode permet souvent de différencier les modalités. Cependant le sens du coefficient a qui a la dimension d'une vitesse est difficile à saisir.

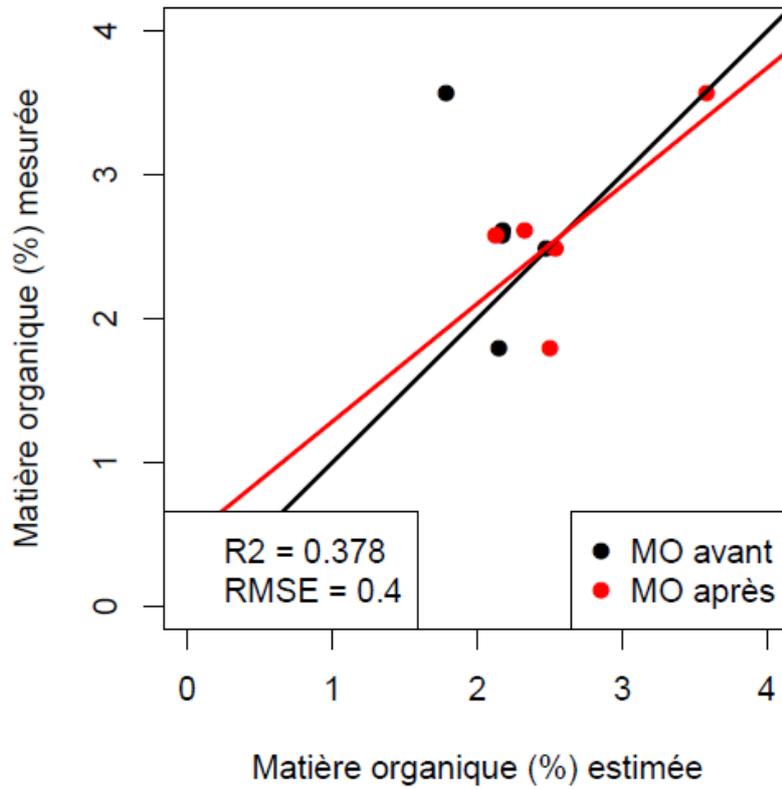


Figure 17 : Graphique des teneurs en matière organique observées en fonction des teneurs estimées après étalonnage par les valeurs mesurées (la ligne rouge représente la modélisation linéaire de la teneur mesurée en fonction de la teneur estimée après étalonnage par les valeurs mesurées, le R^2 et la Root Mean Square Error sont les indicateurs choisis pour évaluer la fiabilité de la prédiction, les points rouges sont les données après étalonnage, les points noirs correspondent aux données brutes, en sortie de SmartFirmer)

D. Apports des technologies Precision Planting pour l'agriculture de précision

La vérification sur le terrain de la validité des teneurs en matière organique estimées par SmartFirmer révèle que le dispositif ne peut pas être utilisé en l'état pour créer des cartes de teneurs en matière organique. Ce résultat est en accord avec Lund et Maxton (2019), puisque ceux-ci concluent également que les données SmartFirmer produisent plus d'erreurs que l'estimation par la moyenne des données mesurées en laboratoire. Cependant, ils suggèrent d'étalonner les prédictions avec des échantillons analysés en laboratoire : le modèle moyen estime alors moins bien les teneurs en matière organique que le modèle SmartFirmer étalonné. Precision Planting met à disposition un outil en ligne qui permet de joindre des résultats d'analyse avec les cartes issues du semis. En fonction de ces résultats, les données estimées par le dispositif SmartFirmer sont réajustées : une nouvelle carte de teneur en matière organique est produite : la figure 17 montre les résultats de cet étalonnage sur les points échantillonnés : la RMSE passe donc de 0,86% (résultat précédent, figure 14) à 0,40% de matière organique. Les points s'alignent mieux sur la courbe, mais le modèle moyen présente toujours l'estimation la moins erronée.

Si la prédiction de la CEC n'a pas été vérifiée au sol, une étude a été menée pour évaluer le potentiel de prédiction de quelques propriétés du sol par un dispositif multispectral aux mêmes longueurs d'onde que SmartFirmer (5 bandes dans le domaine du visible et du proche-infrarouge). L'étude s'attache ainsi à prédire des grandeurs d'un jeu de données indépendant (LUCAS *Topsoil Survey*) qui pour chaque observation associe des propriétés du sol (texture : teneurs en sables, limons et argiles ; carbone organique, azote, phosphore, potassium, CEC et pH) et un spectre d'absorbance (de 400 à 2500nm).

La méthode complète et les résultats de cette étude n'ont pas été présentés dans ce rapport mais sont disponibles en annexe 2. Les principaux résultats de cette étude exploratoire montrent qu'il pourrait être possible de prédire les teneurs en sables, limons et argiles (R^2 de validation des modèles : 0,43, 0,43 et 0,32 respectivement, RMSE de validation des modèles : 19,4%, 15,4% et 7,7%). Cependant deux freins restent à lever. Le premier est que les bandes spectrales qui permettent de construire les modèles sont mesurées sur sol sec or le dispositif SmartFirmer évolue sur des sols humides, il est donc nécessaire de construire un autre jeu de données pour prendre en compte l'humidité résiduelle du sol. Le second frein est que les données de réflectance ne sont pas disponibles comme les autres grandeurs qui ont pu être extraites avec le module ADAPT et l'application développée. Ces valeurs sont bien existantes dans le fichier propriétaire .2020 mais sont protégées.

Par manque de temps, l'estimation de la variabilité intra parcellaire avec les données issues des capteurs d'effort combinés au vérin hydraulique DeltaForce n'a pas pu être menée rigoureusement. Les premiers résultats ont montré que les corrélations point par point des images géoréférencées (*raster*) de la force appliquée sur les roues de jauge avec la conductivité électrique mesurées au champ étaient très faibles. Cependant, les méthodes développées pour extraire les données de fichier propriétaire .2020 à fichier .csv et recalculer la position des éléments semeurs pourront être réutilisées ultérieurement (Simon. (2020) et annexe 2). Ces données sont certainement une source importante d'informations si elles sont combinées à d'autres données (Barbosa et al., 2020).

La problématique [5], « Les données géoréférencées collectées par les capteurs embarqués sur les semoirs sont-elles valorisables dans une démarche d'agriculture de précision ? » reste donc partiellement irrésolue, puisqu'on a vu que l'estimation de la matière organique n'était pas fiable.

Conclusion

Les technologies de semis Precision Planting ont été évaluées dans différents contextes techniques et pedoclimatiques. Même si souvent les dispositifs expérimentaux et les analyses n'ont pas permis de différencier les effets des modalités testées, des conclusions ont tout de même pu être tirées quant aux performances des semoirs équipés des technologies Precision Planting. Il apparaît ainsi que l'innovation DeltaForce est essentielle pour maintenir l'élément semeur au sol, surtout à grande vitesse. D'autre part, la préparation du sol peut être simplifiée ce qui peut justifier un écart de tarification par rapport à un semis classique, en effet, un passage de herse rotative coûte environ 40 € à l'hectare lorsque celui-ci est délégué à une ETA. De plus, l'analyse à venir des rendements de chaque essai permettra de conclure sur ce dernier point

Une méthode d'analyse de la dynamique de levée a été proposée et s'est révélée utile tout au long de l'étude. D'autres méthodes ont été proposées pour extraire les données des cartes de semis. Ces méthodes ont été valorisées une seule fois dans l'étude, mais une analyse du lien entre conductivité électrique des sols et pression appliquée par le vérin pourrait être envisagée.

Si le semis de maïs requiert de la précision, la réussite du semis de cultures à plus forte valeur ajoutée peut aussi intéresser des clients des ETA. Par exemple, la culture du haricot en plein champ (légume industrie) requiert une grande précision à l'implantation : le potentiel de rendement de cette espèce peut être fortement impacté si les graines ne sont pas réparties uniformément sur le rang. De plus les retards de levée peuvent entraîner des conséquences lourdes sur une culture avec un cycle aussi court, la précision de la profondeur de semis doit donc être au rendez-vous pour éviter les décalages de croissance. Ainsi lors de mon stage un essai similaire à ceux présentés dans ce mémoire a été mis en place pour évaluer les technologies Precision Planting sur le semis du haricot extra-fin. Un semoir hybride a été monté à partir d'un semoir mécanique : deux rangs ont été démontés et remplacés par des éléments Precision Planting : le vérin hydraulique DeltaForce, la distribution électrique vSet/vDrive, le tube de descente WaveVision et enfin la languette de rappui Keeton. Les autres rangs du semoir ont été laissés tels quels. Les premiers résultats révèlent cependant que si la qualité de levée est au rendez-vous, la répartition sur le rang n'est pas satisfaisante, mais ceci s'explique par le fait que le système disque/sélectionneur utilisé était inadapté à la taille et à la forme de la graine de haricot. D'autres disques doivent être développés avant de transférer les innovations Precision Planting pour le semis de la culture du haricot.

Bibliographie

- Agreste, 2020. Statistique agricole annuelle 2018-2019 (No. 2). Services régionaux de l'information statistique et économique des Directions régionales de l'agriculture, de l'alimentation et de la forêt.
- Badua, S., Sharda, A., Strasser, R., Ciampitti, I., Griffin, T.W., 2018. Influence of Planter Downforce Setting and Ground Speed on Seeding Depth and Plant Spacing Uniformity of Corn. Présenté à Proceedings of the 14th International Conference on Precision Agriculture, Montreal, Quebec, Canada.
- Barbosa, A., Trevisan, R., Hovakimyan, N., Martin, N.F., 2020. Modeling yield response to crop management using convolutional neural networks. *Comput. Electron. Agric.* 170, 105197. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105197>
- Bilbro, J.D., Wanjura, D.F., 1982. Soil Crusts and Cotton Emergence Relationships. *Trans. ASAE* 25, 1484–1487. <https://doi.org/10.13031/2013.33750>
- Carpentier, B., Cabon, G., 2011. Le maïs fourrage : élaboration du rendement et de la qualité, récolte et conservation 13.
- Carpes, D.P., Alonço, A. dos S., Rossato, F.P., Veit, A.A., Souza, L.B. de, Francetto, T.R., 2017. Effect of different conductor tubes on the longitudinal distribution of corn seeds. *Rev. Bras. Eng. Agríc. E Ambient.* 21, 657–662. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n9p657-662>
- Conceição, L.A., Barreiro, P., Dias, S., Garrido, M., Valero, C., da Silva, J.R.M., 2016. A partial study of vertical distribution of conventional no-till seeders and spatial variability of seed depth placement of maize in the Alentejo region, Portugal. *Precis. Agric.* 17, 36–52. <https://doi.org/10.1007/s11119-015-9405-x>
- Conceição, L.A., Elorza, P.B., Freixial, R., Dias, S., Valero, C.U., 2012. Effects of different soil management practices on soil mechanic resistance and seed depth placement in a maize crop in Alentejo, Portugal Mediterranean region. Présenté à International Conference of Agricultural Engineering - CIGR - AgEng 2012, Valencia, Spain, p. 9.
- Daouze, J.-P., Roger-Estrade, J., 2015. Gestion du sol et machinisme : Décider d'une stratégie, choisir les outils. Editions France Agricole.
- Erbach, D.C., 1982. Tillage for Continuous Corn and Corn-Soybean Rotation. *Trans. ASAE* 25, 0906–0911. <https://doi.org/10.13031/2013.33638>
- Ford, J.H., Hicks, D.R., 1992. Corn Growth and Yield in Uneven Emerging Stands. *J. Prod. Agric.* 5, 185–188. <https://doi.org/10.2134/jpa1992.0185>
- Griepentrog, H.-W., 1998. Seed Distribution Over The Area. Présenté à International Conference on Agricultural Engineering : AgEng Oslo 98, Oslo, p. 8.
- Hanna, H.M., Steward, B.L., Aldinger, L., 2010. Soil Loading Effects of Planter Depth-Gauge Wheels on Early Corn Growth. *Appl. Eng. Agric.* 26, 551–556.
- International Organization for Standardization, 1984. ISO Standard 7256/1-1984 (E). Sowing equipment--Test Methods: Part 1. Single seed drills (precision drills). ISO, Genève, Switzerland.
- Jasa, P., 2010. Recommendations for Avoiding Sidewall Compaction at Planting [WWW Document]. Univ. Neb.-Linc. Crop. URL <https://cropwatch.unl.edu/unl-cropwatch-april-16-2010-recommendations-avoiding-sidewall-compaction-planting> (accessed 6.7.20).
- Kachman, S.D., Smith, J.A., 1995. Alternative measures of accuracy in plant spacing for planters using single seed metering. *Trans. ASAE* 38, 379–387.
- Karayel, D., Šarauškas, E., 2011. Effect of downforce on the performance of no-till disc furrow openers for clay-loam and loamy soils. *Agric. Eng.* 43, 16–24.
- Kaspar, T.C., Erbach, D.C., Cruse, R.M., 1990. Corn Response to Seed-Row Residue Removal. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54, 1112–1117. <https://doi.org/10.2136/sssaj1990.03615995005400040032x>
- Kostić, M., Rakić, D., Radomirović, D., Savin, L., Dedović, N., Crnojević, V., Ljubičić, N., 2018. Corn seeding process fault cause analysis based on a theoretical and experimental approach. *Comput. Electron. Agric.* 151, 207–218. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.06.014>

- Krall, J.M., Esechie, H.A., Raney, R.J., Clark, S., TenEyck, G., Lundquist, M., Humburg, N.E., Axthelm, L.S., Dayton, A.D., Vanderlip, R.L., 1977. Influence of Within-row Variability in Plant Spacing on Corn Grain Yield 3.
- Lauer, J.G., Rankin, M., 2004. Corn Response to Within Row Plant Spacing Variation. *Agron. J.* 96, 1464–1468. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.1464>
- Lawles, K., Raun, W., Desta, K., Freeman, K., 2012. Effect of delayed emergence on corn grain yields (Master of Science). Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma.
- Liu, W., Tollenaar, M., Stewart, G., Deen, W., 2004a. Response of Corn Grain Yield to Spatial and Temporal Variability in Emergence. *Crop Sci.* 44, 8.
- Liu, W., Tollenaar, M., Stewart, G., Deen, W., 2004b. Within-Row Plant Spacing Variability Does Not Affect Corn Yield. *Agron. J.* 96, 6.
- Liu, W., Tollenaar, M., Stewart, G., Deen, W., 2004c. Impact of Planter Type, Planting Speed, and Tillage on Stand Uniformity and Yield of Corn. *Agron. J.* 96, 1668–1672. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.1668>
- Lund, E., Maxton, C., 2019. Comparing Organic Matter Estimations Using Two Farm Implement Mounted Proximal Sensing Technologies. Présenté à 5th Global Workshop on Proximal Soil Sensing, Columbia, Missouri, USA.
- Makowski, D., Piraux, F., Brun, F., 2018. Analyse des Réseaux Expérimentaux à la Méta-Analyse: Méthodes et Applications Avec le Logiciel R Pour les Sciences Agronomiques et Environnementales. Quae, Place of publication not identified.
- Nafziger, E.D., Carter, P.R., Graham, E.E., 1991. Response of Corn to Uneven Emergence. *Crop Sci.* 31, 811–815. <https://doi.org/10.2135/cropsci1991.0011183X003100030053x>
- Orgiazzi, A., Ballabio, C., Panagos, P., Jones, A., Fernández-Ugalde, O., 2018. LUCAS Soil, the largest expandable soil dataset for Europe: a review. *Eur. J. Soil Sci.* 69, 140–153. <https://doi.org/10.1111/ejss.12499>
- Özmerzi, A., Karayel, D., Topakci, M., 2002. Effect of Sowing Depth on Precision Seeder Uniformity. *Biosyst. Eng.* 82, 227–230. <https://doi.org/10.1006/bioe.2002.0057>
- Pagano, E., Cela, S., Maddonni, G.A., Otegui, M.E., 2007. Intra-specific competition in maize: Ear development, flowering dynamics and kernel set of early-established plant hierarchies. *Field Crops Res.* 102, 198–209. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.03.013>
- Radtke, I., 2018. Seed delivery apparatus. EP3384749A1.
- Raoufat, M.H., Matbooei, A., 2007. Row cleaners enhance reduced tillage planting of corn in Iran. *Soil Tillage Res.* 93, 152–161. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.03.026>
- René-Laforest, F., Adamchuk, V.I., Mastorakos, M., Dhawale, N., Su, Y., 2014. Variable Depth Planting of Corn. Présenté à ASABE and CSBE/SCGAB Annual International Meeting, Montreal, Quebec Canada, p. 9.
- Sauder, D., 2017. Seed meter. US20170311535A1.
- Sauder, D., Stoller, J., Plattner, T., 2019. Systems for agricultural implement trench depth control and soil monitoring. EP3424289A1.
- Sauder, D.A., Hodel, J.J., 2018. Dynamic supplemental downforce control system for planter row units. US20180132414A1.
- Sauder, G.A., Koch, J.L., 2016. Planter monitor system and method. US9481294B2.
- Sauder, G.A., Plantamura, L.G., 2014. Seed tube egress-mounted seed sensor. US8631749B2.
- Sauder, G.A., Sauder, D.A., Koch, J.L., 2013. Load sensing pin. US8561472B2.
- Schneider, E.C., Gupta, S.C., 1985. Corn Emergence as Influenced by Soil Temperature, Matric Potential, and Aggregate Size Distribution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49, 415–422. <https://doi.org/10.2136/sssaj1985.03615995004900020029x>
- Searle, C.L., Kocher, M.F., Smith, J.A., Blankenship, E.E., 2008. Field Slope Effects on Uniformity of Corn Seed Spacing for Three Precision Planter Metering Systems. *Appl. Eng. Agric.* 24, 581–586. <https://doi.org/10.13031/2013.25270>
- Sharda, A., Badua, S., Flippo, D., Griffin, T.W., Ciampitti, I., 2016. Real-time gauge wheel load variability on planter with downforce control during field operation. Présenté à 13th International Conference on Precision Agriculture, St. Louis, Missouri, USA, p. 10.

- Siemens, M.C., Darnell, T.J., Hulick, D.E., 2007. Performance of Two Hoe-Type Air Drills Sowing Green Peas in a Conservation Tillage System. *Appl. Eng. Agric.* 23, 23–29. <https://doi.org/10.13031/2013.22326>
- Simon, T., 2020. `tibcdR/PrecisionPlanting2020toCSV`.
- Singh, R.C., Singh, G., Saraswat, D.C., 2005. Optimisation of Design and Operational Parameters of a Pneumatic Seed Metering Device for Planting Cottonseeds. *Biosyst. Eng.* 92, 429–438. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.07.002>
- Staggenborg, S.A., Taylor, R.K., Maddux, L.D., 2004. Effect of planter speed and seed firmers on corn stand establishment. *Appl. Eng. Agric.* 20, 573–580. <https://doi.org/10.13031/2013.17457>
- Thompson, T.A., 2013. Within-row spacing effect on individual corn plant yield (Master of Science). University of Illinois, Urbana-Champaign, Illinois.
- Vameralli, T., Bertocco, M., Sartori, L., 2006. Effects of a new wide-sweep opener for no-till planter on seed zone properties and root establishment in maize (*Zea mays*, L.): A comparison with double-disk opener. *Soil Tillage Res.* 89, 196–209. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.07.011>
- Yazgi, A., 2016. Effect of seed tubes on corn planter performance. *Appl. Eng. Agric.* 32, 783–790.
- Yazgi, A., Degirmencioglu, A., 2014. Measurement of seed spacing uniformity performance of a precision metering unit as function of the number of holes on vacuum plate. *Measurement* 56, 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.06.026>
- Zhai, C., Long, J., Taylor, R., Weckler, P., Wang, N., 2020. Field scale row unit vibration affecting planting quality. *Precis. Agric.* 21, 589–602. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09684-4>

Annexe 1 : Résultats complémentaires

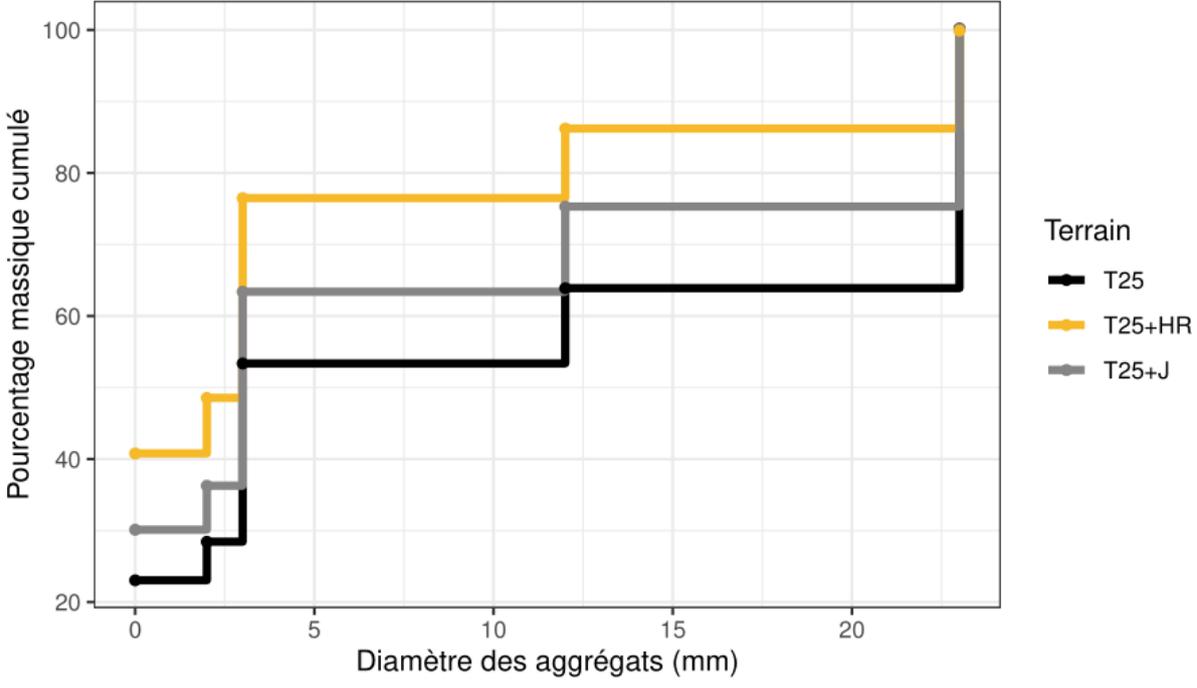


Figure annexe 1 : Caractérisation des préparations de sol

Annexe 2 : Démonstration mathématique du calcul des coordonnées des rangs à partir des coordonnées du barycentre du semoir

Dans toute la suite, on considère le plan P muni d'un repère orthonormé (O, \vec{i}, \vec{j}) . Toutes les coordonnées considérées seront les coordonnées dans ce repère.

On définit l'avancement du tracteur entre les temps t et $t + 1$ par un vecteur entre les barycentres des semoirs : le vecteur $\overrightarrow{O_t O_{t+1}}(x_{t+1} - x_t, y_{t+1} - y_t)$ non nul. Ce vecteur d'avancement est considéré normal au vecteur tracé entre le barycentre O_t et le point E_i représentant l'élément semeur i tel que $i \in (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)$ pour un semoir 8 rangs : le vecteur $\overrightarrow{O_t E_i}(x_{Ei} - x_t, y_{Ei} - y_t)$.

On a donc $\overrightarrow{O_t E_i} \perp \overrightarrow{O_t O_{t+1}}$ d'où le produit scalaire $\langle \overrightarrow{O_t E_i}, \vec{u} \rangle = 0$ soit :

$$\forall (x, y) \in \mathbb{R}^2, (x_{Ei} - x_t) \cdot (x_{t+1} - x_t) + (y_{Ei} - y_t) \cdot (y_{t+1} - y_t) = 0 \quad [1]$$

De plus, la norme $\|\overrightarrow{O_t E_i}\|$ vaut une distance $d_i \neq 0$ défini dans le tableau ci-contre. On définit aussi deux multiplicateurs a et k , tels que :

$$a = \begin{cases} -1, & \text{si } x_{t+1} > x_t \\ 1, & \text{si } x_{t+1} < x_t \end{cases} \text{ et } k = \begin{cases} -1, & \text{si } i \in (1, 2, 3, 4) \\ 1, & \text{si } i \in (5, 6, 7, 8) \end{cases}$$

On a donc, par définition de la norme d'un vecteur :

$$(a \cdot k \cdot (x_{Ei} - x_t))^2 + (a \cdot k \cdot (y_{Ei} - y_t))^2 = d_i^2 \quad [2]$$

Résolution du système d'équations (équations [1] et [2]) à deux inconnues :

- Cas 1 : $x_{t+1} - x_t \neq 0$

Posons maintenant $m = \frac{y_{t+1} - y_t}{x_{t+1} - x_t}$ avec $x_{t+1} - x_t \neq 0$, m est le coefficient

directeur de la droite affine D passant par le barycentre au temps t et le barycentre suivant au temps $t + 1$ telle que $D = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2, y = mx + p\}$.

Par substitution dans [1], on obtient $(x_{Ei} - x_t + m(y_{Ei} - y_t)) \cdot (x_{t+1} - x_t) = 0$, or par définition $x_{t+1} - x_t \neq 0$, d'où $x_{Ei} = x_t - m \cdot (y_{Ei} - y_t)$

D'après [2], $(a \cdot k \cdot m \cdot (y_{Ei} - y_t))^2 + (a \cdot k \cdot (y_{Ei} - y_t))^2 = d_i^2$, soit :

$$y_{Ei} = y_t + \frac{d_i}{a \cdot k \cdot \sqrt{m^2 + 1}} \text{ et } x_{Ei} = x_t - m \cdot \frac{d_i}{a \cdot k \cdot \sqrt{m^2 + 1}}$$

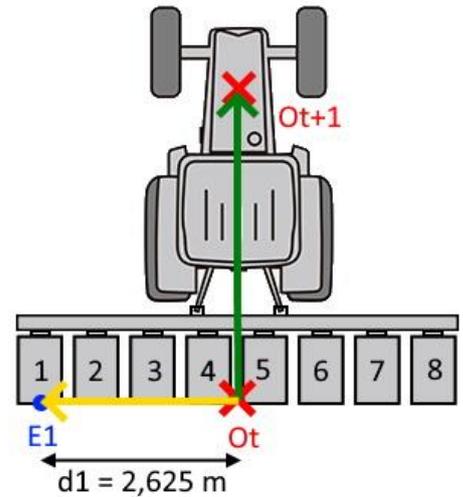
- Cas 2 : $x_{t+1} - x_t = 0$

Si $x_{t+1} - x_t = 0$, alors d'après [1], on a : $(y_{Ei} - y_t) \cdot (y_{t+1} - y_t) = 0$

Or $\overrightarrow{O_t O_{t+1}}$ est non nul donc $y_{Ei} = y_t$

D'après [2], on a donc :

$$y_{Ei} = y_t \text{ et } x_{Ei} = x_t + \frac{d_i}{a \cdot k}$$



Rang	Distance (m)
1	2,625
2	1,875
3	1,125
4	0,375
5	0,375
6	1,125
7	1,875
8	2,625

Annexe 3 : Modélisation de quelques propriétés des sols de la base de données LUCAS à partir de bandes spectrales

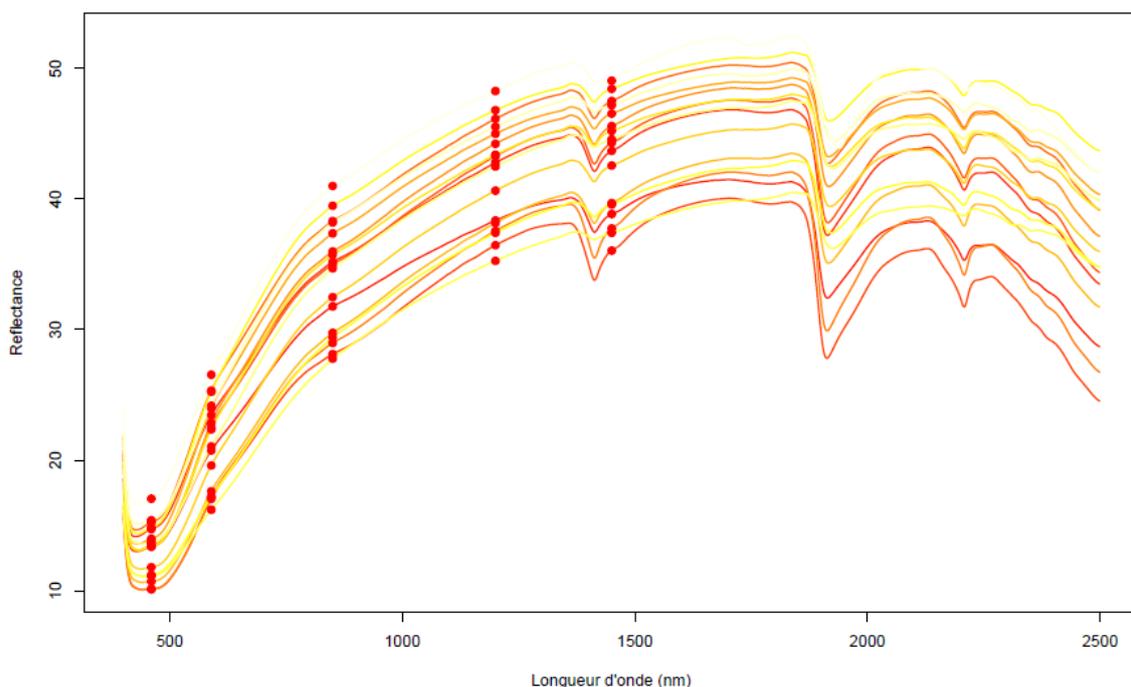
L'objectif de l'étude est d'établir des modèles pour prédire plusieurs propriétés du sol à partir de données multispectrales visible-proche-infrarouge (vPIR). Les potentiels de la modélisation de la texture du sol (teneurs en limons, argiles et sables), de la teneur en carbone organique, du phosphore, du potassium et enfin de la capacité d'échange cationique avec des bandes spectrales sont étudiés

Ces modèles, appliqués sur des données multispectrales SmartFirmer, pourraient ensuite être utilisés pour cartographier les sols et ainsi évaluer la variabilité spatiale des propriétés du sol au sein d'une parcelle. Comme les données sont acquises lors du semis (capteur on-the-go) cela ne génère pas de coût supplémentaire. Les cartes générées ont une très haute résolution : plus de 2 mesures par mètre carré (pour une vitesse d'avancement de 11 km.h⁻¹). Ces cartes pourraient être très utiles pour l'agriculture de précision qui peut être définie comme un mode de production prenant en compte la variabilité spatiale et temporelle dans la gestion des systèmes culturaux. La modulation intra parcellaire des intrants, en fonction de la variabilité spatiale des propriétés du sol, est courante en l'agriculture de précision. Par exemple, la densité de semis peut varier en fonction de la texture du sol (modulation de semis). Il est aussi envisageable de moduler une application de fongicides ou une opération d'épandage de matières organiques en fonction de la teneur en matière organique du sol. La modulation du chaulage en fonction de la CEC pourrait aussi être envisagée.

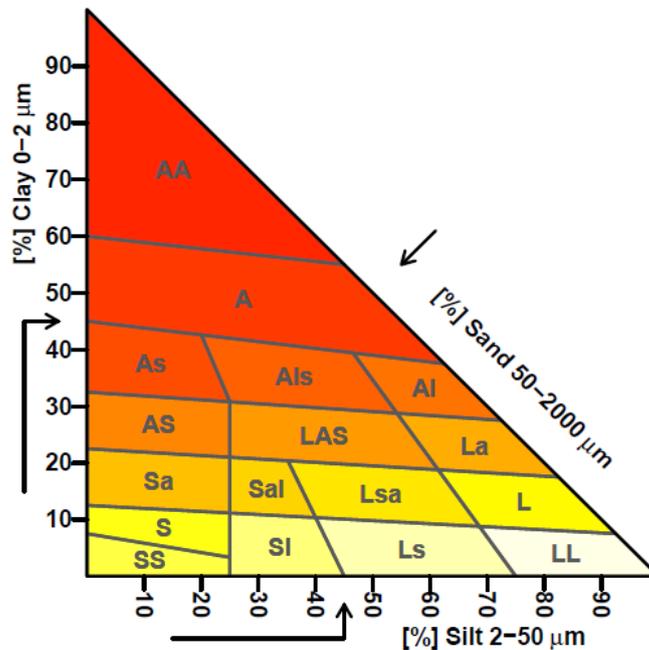
Afin de modéliser ces propriétés du sol, le jeu de données LUCAS Topsoil Survey est utilisé. C'est un jeu de données à l'échelle du continent européen, qui contient plus de 19000 observations. Chaque observation est un échantillon de sol associé à certaines de ses propriétés (% éléments grossiers, % argiles, % limons, % sables, pH CaCl₂, pH.H₂O, % Carbone Organique, CaCO₃, N, P, K, CEC) et à un spectre d'absorbance (400 à 2500nm).

La figure suivante montre le spectre de réflectance moyen de chaque classe texturale du système GEPPA français. Les points sont la réflectance moyenne de chaque bande. Il semble envisageable de différencier la classe de texture du sol en fonction de bandes multispectrales.

Représentation graphique des spectres moyens de chaque classe texturale du système GEPPA



Le triangle GEPPA suivant fait office de légende de la figure citée précédemment.



Matériels et Méthodes :

- Calcul des bandes à partir des spectres de la base de données LUCAS

Les valeurs des bandes sont calculées par la moyenne des valeurs de réflectance sur une largeur de 20 nm. Aucune méthode de prétraitement (par exemple filtre de Savitzky-Golay) n'a été appliquée sur les spectres avant le calcul des bandes.

- Tri des données

Suppression des échantillons extrêmes. De plus, seuls les sols aux caractéristiques communes aux sols rencontrés dans le Grand Ouest sont gardés.

- Caractéristiques du jeu de données

Le jeu de données complet compte 3353 observations, 80% de ce jeu de données est utilisé pour l'entraînement du modèle (n=2842) et 20% pour la validation (n=711). Les individus sont répartis aléatoirement.

- Modélisation

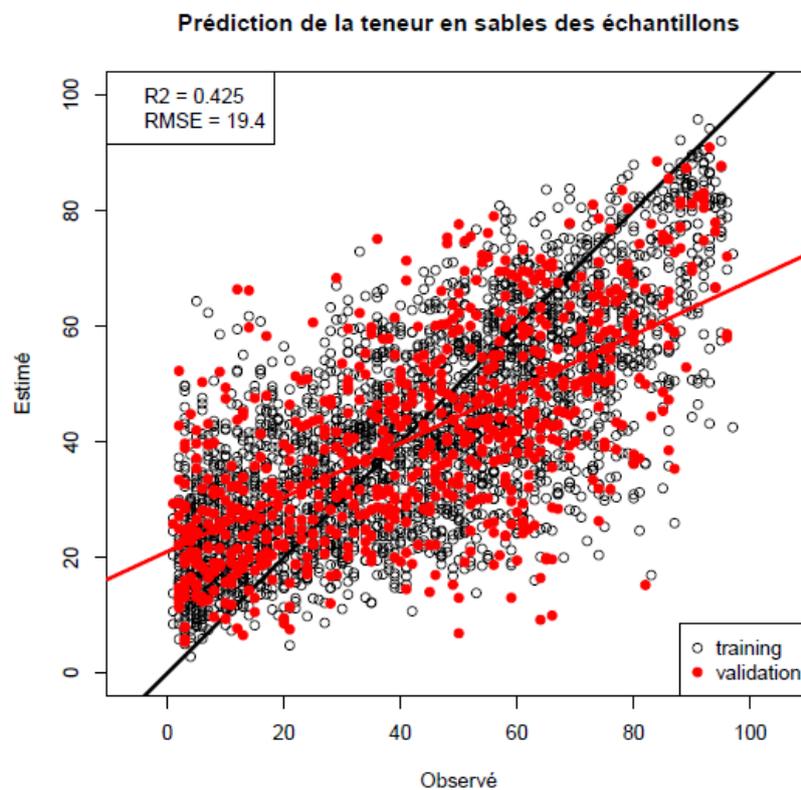
Chaque propriété du sol est modélisée avec un modèle d'apprentissage automatique (*Machine Learning*) CUBIST dans R à l'aide du package *caret*. Les paramètres de réglage sont fixés à 100 comités et 9 voisins. Chaque modèle est entraîné par validation croisée (k = 10) sur le jeu de données d'entraînement puis validé sur le jeu de données laissé de côté (validation croisée *Leave-One-Out*).

Résultats et discussion :

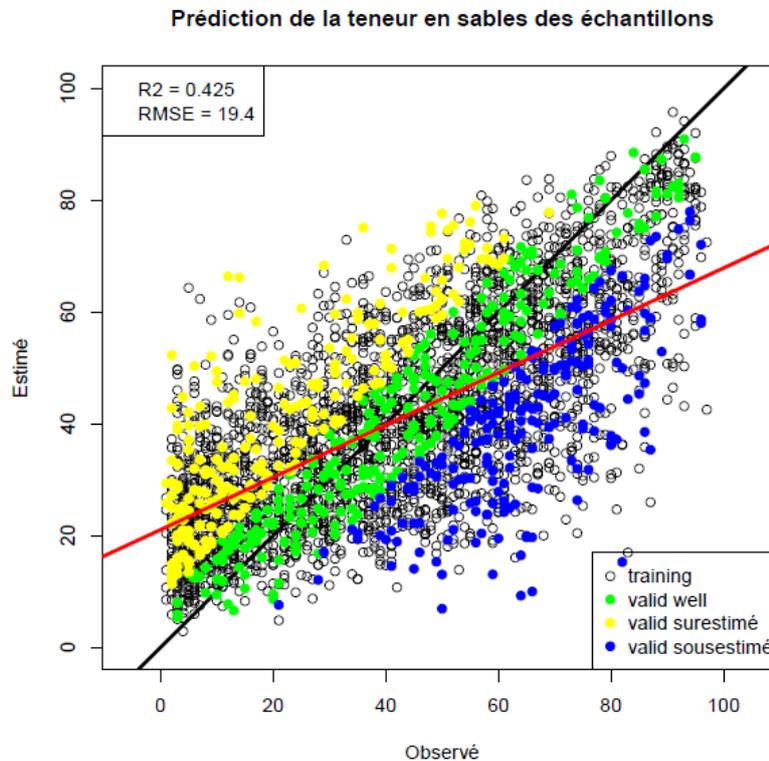
- **Résumé des prédictions**

Response variable	R2CV	RMSECV	R2V	RMSEV
% sand	0,4	19,94	0,43	19,4
% silt	0,41	15,67	0,43	15,42
% clay	0,28	8,31	0,32	7,72
Organic Carbon	0,12	8,02	0,13	8,17
Phosphorous	0,03	24,21	0,05	24,58
Potassium	0,07	83,39	0,06	84,54
CEC	0,16	5,25	0,17	5,23

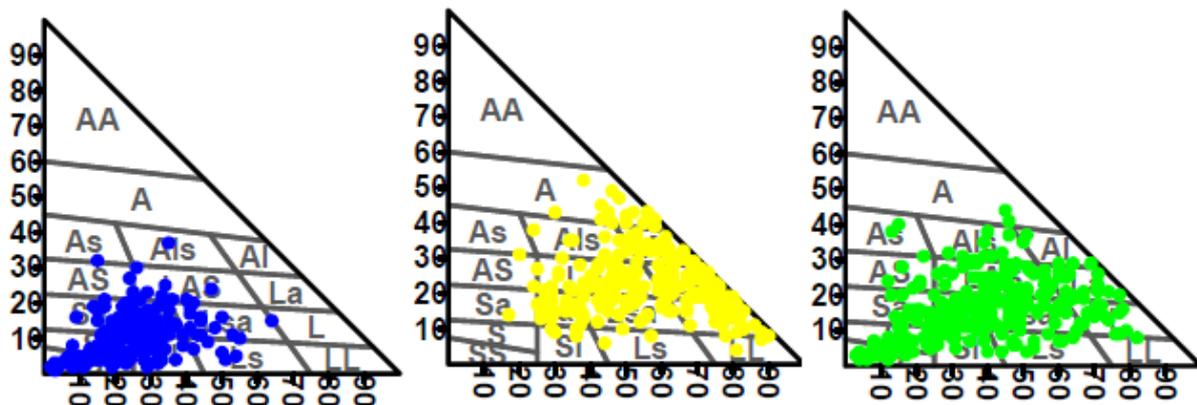
- **Cas particulier de la teneur en sables**



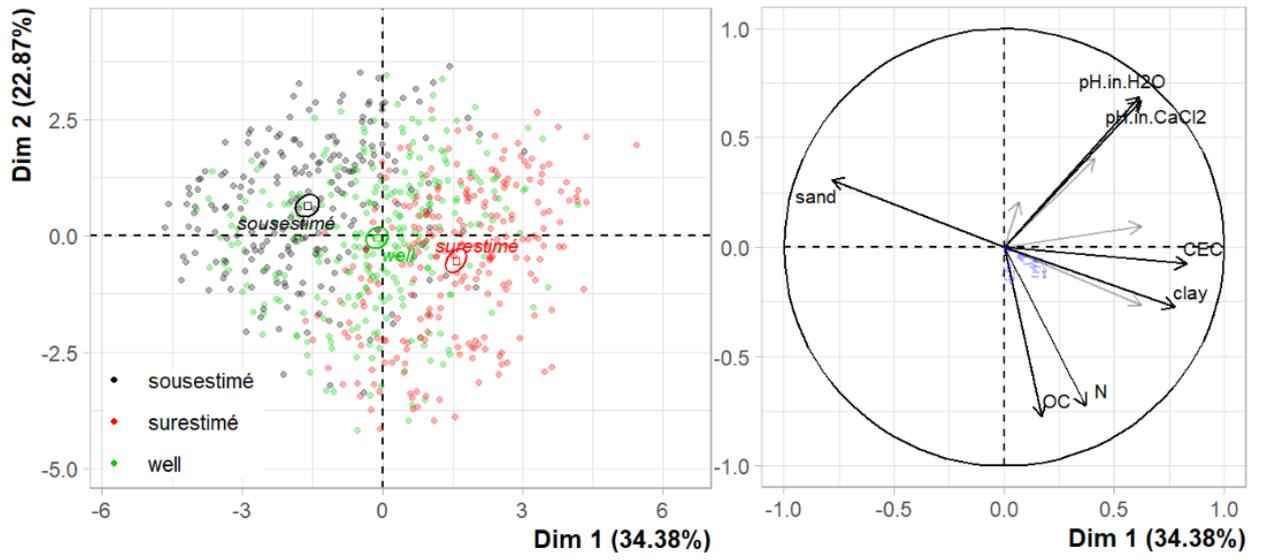
Quelles sont les caractéristiques des échantillons bien prédits ? Sélection des échantillons du jeu de données de validation les mieux prédits (colorés en vert sur la figure précédente), c'est-à-dire, les échantillons avec un écart de plus ou moins 10 points de texture *ie* les échantillons i tels que $|\varepsilon_i| \leq 10$ avec ε_i tel que $\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i$. Ainsi les points avec un résidu inférieur à -10% sont surestimés (points jaunes sur la figure suivante) et les points avec un résidu supérieur à 10% sont sous-estimés (points bleus sur la figure suivante).



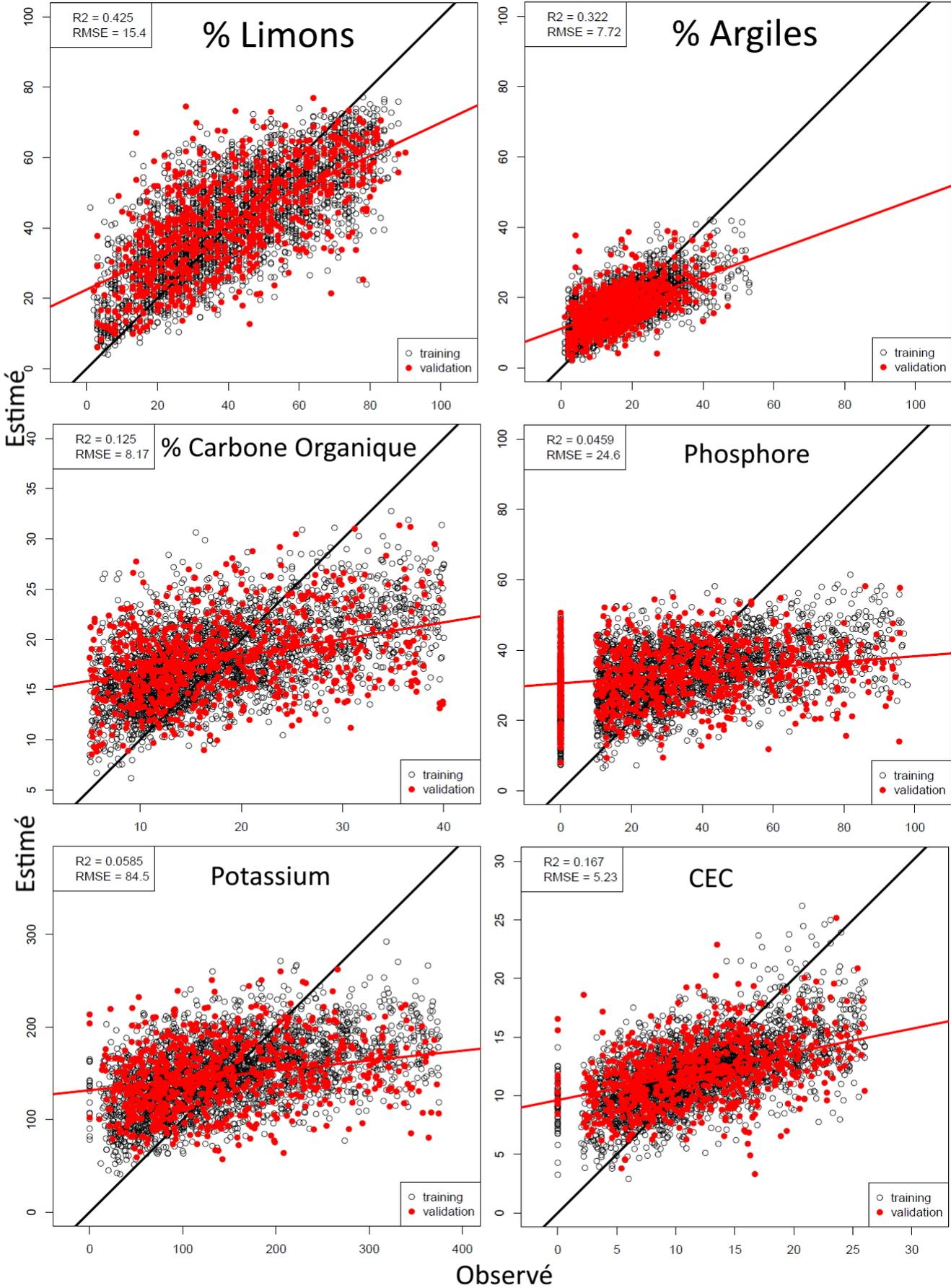
A partir de cette classification on peut déterminer quels sont les types de sols les mieux prédits. La figure suivante révèle que les sols à teneur en sable élevée sont sous-estimés.



D'autres analyses peuvent être menées pour comprendre quelles sont les caractéristiques des sols les mieux prédits, comme une Analyse en Composantes Principales ou une description des catégories avec la fonction *catdes* du package *FactoMineR*. Ce cadre de travail pourrait ainsi permettre de dégager des critères de validité d'un modèle et de mieux comprendre le fonctionnement des modèles de *Machine Learning*. Ci-dessous, les résultats d'une ACP : les individus avec une teneur en sables élevée sont bien les individus les plus sous-estimés.



Les figures suivantes présentent les résultats pour les autres grandeurs modélisées.



 	Diplôme : Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage Spécialité : Ingénieur Agronome Spécialisation / option : Sciences et Ingénierie du Végétal. Agrosystèmes : conception et évaluation Enseignant référent : CAROF Matthieu
Auteur(s) : SIMON Thibaut Date de naissance* : 15/03/1997	Organisme d'accueil : Réseau Cléo Adresse : 43 Tessiac, 56380, GUER
Nb pages :25 Annexes : 8 pages	Maître de stage : BELIARD Anthony
Année de soutenance : 2020	
Evaluation et apports de la technologie de semis Precision Planting pour la culture du maïs dans une démarche d'agriculture de précision	
Assessment of Precision Planting's seeding technology of corn and the potential of this technology for precision agriculture	
<p>Résumé : Les innovations proposées par les machinistes sur les semoirs monograines sont nombreuses. Parmi les systèmes les plus complexes, Precision Planting (PP) permet de modifier un semoir déjà existant avec différents éléments et promet ainsi d'améliorer la qualité de semis et donc le rendement du maïs. Plusieurs essais ont été mis en place en Bretagne pour évaluer la qualité de semis apportée par les technologies PP dans différents contextes techniques et pédoclimatiques. Différents réglages du semoir ont été testés pour déterminer les réglages optimaux pour chaque contexte. La qualité de semis PP a aussi été positionnée par rapport à d'autres semoirs, pour quantifier la valeur ajoutée par PP. La qualité de semis a été évaluée sur la distribution spatiale et temporelle : espacement entre pieds, profondeur de semis et rapidité et uniformité d'émergence. Le potentiel de ces technologies pour l'agriculture de précision a aussi été étudié, notamment la prédiction de la teneur en matière organique des sols.</p>	
<p>Les résultats montrent que les semoirs PP sèment à une qualité correcte dans tous les contextes étudiés. La régulation de la pression de terrage en continue apparaît comme nécessaire à l'augmentation de la vitesse d'avancement. En effet, sans ce système la distribution spatiale est dégradée à haute vitesse : l'indicateur de multiple passe en effet de 1% à 8 km/h à 7% à 14 km/h. La comparaison avec un semoir concurrent a permis de mettre en évidence une augmentation de la vitesse d'émergence et un nombre de pieds par hectare plus élevé de 4% pour le semoir PP. La prédiction de la teneur en matière organique n'a pas été jugée satisfaisante et nécessite un étalonnage du capteur. Des méthodes d'analyse de la cinétique d'émergence des pieds et d'extraction de données de semis ont finalement été proposées. Enfin nous suggérons que d'autres recherches sont nécessaires pour valoriser les cartes de semis.</p>	
<p>Abstract: Innovative planter technology is a growing business for machinist. Among the most complex planter system, Precision Planting (PP) provides elements to tune planter already existing and promise to increase corn yield by improving the quality of seeding operation. Several field trials were conducted in Brittany, France to assess the seeding quality of PP technologies under different soil-climate and technical context. Different settings were set on the planter and tested in order to find which setting is the best suitable depending of the context. We also compared with the seeding quality of other corn planter to quantify the value added by PP technologies. Planters studied performance were assessed on both spatial and temporal distribution: spacing between corn stalk, seeding depth and speed and uniformity in emergence. The potential for precision agriculture which is brought by PP technologies was also investigated, especially soil organic matter prediction using ground truthing method.</p>	
<p>Results show that PP corn planter performs well in every circumstances. Moreover, downforce control system appears to be necessary to keep high seeding quality while increasing forward speed, with no downforce control system, the spatial distribution is negatively affected at high speed planting with for instance a miss index of 1% at 8 km/h to 7% at 14 km/h. When compared to another planter, PP planter performs best in speed of stand establishment and led to 4% of more plant by unit of area. Regarding soil organic matter prediction, we found that soil organic matter fraction was sometimes underestimated. We concluded that the prediction was not accurate enough and the model needed calibration laboratory measured soil sample. Methods to investigate the dynamic of emergence and as-planted PP's data were proposed. Further research should concentrate on as-planted data valorization.</p>	
<p>Mots-clés : régulation pression de terrage, distribution spatiale, émergence, matière organique, prédiction, ADAPT, CP3</p>	
<p>Key Words: downforce control, spatial distribution, emergence, soil organic matter, prediction, ADAPT framework, CP3</p>	