



**MINISTÈRE
DE L'AGRICULTURE
ET DE LA SOUVERAINETÉ
ALIMENTAIRE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

**CONCOURS D'ACCÈS AU CORPS DE PROFESSEURS DE LYCÉE PROFESSIONNEL
AGRICOLE**

Concours : **EXTERNE & QUATRIÈME CATÉGORIE**

Section : **SCIENCES ET TECHNIQUES DES AGROÉQUIPEMENTS ET DES
ÉQUIPEMENTS DES AMÉNAGEMENTS HYDRAULIQUES**

Option : **AGROÉQUIPEMENTS**

SESSION 2024

ÉPREUVE ÉCRITE D'ADMISSIBILITÉ

(Coefficient : 4 – Durée : 5 heures)

Matériel(s) et documents(s) autorisé(s) : Calculatrice

Ce sujet comporte 49 pages y compris celle-ci.

Vérifiez que l'exemplaire qui vous a été remis est complet. Si ce n'est pas le cas, signalez-le
aussitôt.

Extrait de l'arrêté du 30 septembre 2022 fixant les sections et les modalités d'organisation des
concours d'accès au corps des professeurs de lycée professionnel agricole (annexe III) :

« L'épreuve a pour objectif de vérifier que le candidat est capable de mobiliser l'ensemble de ses
connaissances scientifiques, technologiques et professionnelles, d'exploiter les documents qui lui auront
été éventuellement fournis pour construire un développement structuré, expliquer le fonctionnement et la
constitution de systèmes techniques en s'appuyant sur un raisonnement scientifique, analyser des
situations professionnelles, proposer des solutions pertinentes sur la base d'une argumentation et d'une
évaluation de leur impact. »

Robotisation du semis et du désherbage de la betterave sucrière

La production de sucre en France métropolitaine provient de la betterave sucrière. Cette culture est particulièrement présente dans le Bassin parisien où elle participe à la diversité de l'assolement jusqu'à 20% dans certaines exploitations.

Le désherbage est un point essentiel pour la culture et l'élaboration du rendement (Document n° 1: Les problématiques de la culture de la betterave en Champagne crayeuse, Document n° 2: Cycle de développement de la betterave sucrière et interventions).

La protection de l'environnement, notamment de la ressource en eau conduit à des restrictions des matières actives utilisables et des limitations de leur zone d'emploi 5.

Aussi, des expérimentations (Document n° 3: Expérimentation de réduction d'intrants) pour réduire l'utilisation des produits phytosanitaires ont amené l'émergence de nouvelles technologies et de techniques culturales pour désherber cette culture.

Dans ce contexte, au sein du service technique dans la chambre d'agriculture de la Marne, vous souhaitez analyser les possibilités offertes par un robot autonome de semis et de désherbage des betteraves, le robot FarmDroid FD 20 (Document n° 4: Présentation du robot FarmDroid FD20 par un utilisateur, Document n° 5: Caractéristiques techniques du robot FarmDroid FD20).

L'étude se déroule ainsi :

Ordre de l'étude (ordre des questions)	Domaine d'étude
1	Système de semis du robot
2	Géo-positionnement
3	Autonomie électrique
4	Impact sur le sol
5	Synthèse de l'évaluation

Chaque question est indépendante.

Le sujet s'appuie sur les documents ci-après :

Document n° 1:	Les problématiques de la culture de la betterave en Champagne crayeuse	9
Document n° 2:	Cycle de développement de la betterave sucrière et interventions	11
Document n° 3:	Expérimentation de réduction d'intrants	12
Document n° 4:	Présentation du robot FarmDroïd FD20 par un utilisateur	15
Document n° 5:	Caractéristiques techniques du robot FarmDroïd FD20	19
Document n° 6:	Caractéristiques des semis de betteraves sucrières	21
Document n° 7:	Écran de pilotage Semis en lignes ou en diamant	23
Document n° 8:	Système de semis FarmDroïd FD20	25
Document n° 9:	Système de semis Monosem	29
Document n° 10:	FarmDroïd FD20 équipé d'un pulvérisateur Amazone	31
Document n° 11:	Système de communication du robot FramDroïd FD20	33
Document n° 12:	Principe du géopositionnement	33
Document n° 13:	Choisir une correction GPS	35
Document n° 14:	Descriptif du fonctionnement électrique du FarmDroïd FD20	39
Document n° 15:	Données climatiques pour le département de la Marne	40
Document n° 16:	Rendement des panneaux solaires	40
Document n° 17:	Capture d'écran de l'application sur téléphone du FarmDroïd : signaux d'erreurs et d'arrêts	41
Document n° 18:	Présentation de trois itinéraires techniques de semis et de désherbage des betteraves	43
Document n° 19:	Facteurs déterminant le risque de tassement	45

Les documents reproduisent les éléments d'informations techniques tels qu'ils sont exprimés par leurs auteurs. Toutefois, certains documents ont été modifiés pour les besoins de l'épreuve.

Question 1 - Technologie des matériels de semis monograine

Voir notamment :

- Document n° 6: Caractéristiques des semis de betteraves sucrières
- Document n° 7: Écran de pilotage Semis en lignes ou en diamant
- Document n° 8: Système de semis FarmDroïd FD20
- Document n° 9: Système de semis Monosem
- Document n°10: FarmDroïd FD20 équipé d'un pulvérisateur Amazone

1.1. Présenter les intérêts agronomiques du semis monograine pour la culture de la betterave et les objectifs assignés au semoir qui en découlent.

1.2. Comparer les technologies Monosem et FarmDroïd au regard des objectifs du semis monograine.

1.3. Présenter les nouvelles fonctionnalités permises par les technologies adoptées sur le FarmDroïd FD20. Préciser les intérêts et les limites de leur utilisation dans le contexte du semis de betteraves.

Question 2 - Système RTK de géo positionnement des graines

Voir notamment :

- Document n° 12: Système de communication du robot FarmDroïd FD20
- Document n° 12: Principe du géopositionnement
- Document n° 13: Choisir une correction GPS

2.1. Expliquer les principes de fonctionnement du positionnement grâce au GPS et les solutions adoptées pour améliorer sa précision.

2.2. Analyser la pertinence, dans le cas du semis de la betterave, de la solution technique adoptée pour le robot FarmDroïd FD20.

2.3. Décrire la latitude dont dispose un exploitant dans le choix des outils de géopositionnement selon ses besoins.

Question 3 - Autonomie électrique du robot.

Le constructeur annonce une autonomie suffisante pour un fonctionnement continu du robot 24h/24. Toutefois vous souhaitez vérifier l'autonomie annoncée par le constructeur pour la phase de semis des betteraves au mois d'avril.

L'énergie électrique est fournie par un panneau solaire. Elle est stockée dans des batteries.

Le robot dispose d'une motorisation électrique pour son avancement. La puissance moyenne consommée lors de la phase de semis par le robot est de 500 W.

Le robot s'arrête lorsque la batterie a une charge inférieure à 20% de sa capacité.

Voir notamment :

- Document n°5: Caractéristiques techniques du robot FarmDroïd FD20
- Document n°14: Descriptif du fonctionnement électrique du FarmDroïd FD20
- Document n°15: Données climatiques pour le département de la Marne
- Document n°16: Rendement des panneaux solaires
- Document n°17: Capture d'écran de l'application sur téléphone du FarmDroïd : signaux d'erreurs et d'arrêts

3.1. Décrire votre démarche permettant d'évaluer l'autonomie du robot dans ce contexte
Vous aborderez au minimum les points suivants :

- La production électrique des panneaux solaires ;
- L'énergie stockée dans les batteries ;
- La consommation électrique du robot.

3.2. À partir des données des documents et de votre démarche, **calculer** l'autonomie du robot. **Comparer** le résultat à l'observation de terrain.

3.3. Le constructeur propose en option d'ajouter deux batteries supplémentaires. **Évaluer** la pertinence de cet achat vis-à-vis de vos calculs précédents.

Question 4 - Tassement

Voir notamment :

- Document n° 18: Présentation de trois itinéraires techniques de semis et de désherbage des betteraves.
- Document n° 19: Facteurs déterminant le risque de tassement.

4.1. Établir la liste des facteurs qui influencent le tassement du sol.

4.2. Dans un tableau, **comparer** les trois itinéraires techniques de semis et de désherbage des betteraves du point de vue de leurs conséquences sur le tassement du sol.

4.3. Formuler un avis argumenté sur l'intérêt de l'utilisation du robot FramDroïd FD20 du point de vue du tassement du sol.

Question 5 - Synthèse de l'évaluation

5.1. À partir de l'ensemble des travaux précédents et du document ci-dessous, **recenser** les forces et les faiblesses du robot FarmDroïd FD 20 pour son déploiement dans les exploitations productrices de betteraves de la Marne.

Votre analyse des forces et faiblesses prendra en compte notamment les systèmes de production, les surfaces des exploitations plantées en betteraves, et les dimensions économiques et sociales.

5.2. Présenter votre point de vue sur les perspectives de déploiement du robot à court et moyen terme.

Comparaison des marges entre différents systèmes et modalités de désherbage

Système	Conventionnel	Bio avec robot (Rdt 50 t/ha)	Bio avec robot (Rdt 70 t/ha)	Bio avec herse étrille et bineuse (Rdt 50 t/ha)	Bio avec herse étrille et bineuse (Rdt 70 t/ha)
---------	---------------	---------------------------------	---------------------------------	--	--

Rendement (t/ha à 16°)	100	50	70	50	70
Prix (€/t)	45	90	90	90	90
Produit (€/ha)	4500	4500	6300	4500	6300

Charges opérationnelles					
Engrais (€/ha)	360	360	360	360	360
Semences (€/ha)	350	290	290	290	290
Phytosanitaires (€/ha)	400				
Désherbage manuel (h/ha)		30	60	60	120
Charges désherbage manuel (€/ha)		450	900	900	1800
Total des Charges opérationnelles (€/ha)	1110	1100	1550	1550	2450
Charges mécanisation (€/ha)	800	1290	1290	900	900
Dont robot (€/ha)		800	800		

Marge (€/ha)	2590	2110	3460	2050	2950
---------------------	------	------	------	------	------

Document n° 1: Les problématiques de la culture de la betterave en Champagne crayeuse

La betterave sucrière est une culture importante dans les assolements (entre 15 et 20% de la surface des exploitations). Elle participe à la diversité des cultures avec une culture de printemps et a également des pointes de travaux en décalage avec les céréales.

La betterave sucrière est une plante sarclée semée à grand écartement. Le matériel agricole est donc spécifique pour cette culture notamment le semoir ou la récolteuse. Les rendements moyens sont sur le territoire de 100 t/ha à 16° de sucre.

Historiquement, des quotas pour produire des betteraves étaient fixés pour les exploitations. En 2017, ces quotas ont été supprimés. Cette suppression a troublé partiellement la production (augmentation des surfaces) et la rémunération de la betterave. La marge brute de la betterave était très intéressante avec les quotas avec des prix connus (marge supérieure à 2000€/ha). En 2020, le prix de la tonne de betterave est descendu à 22€/t et on retrouvait une marge brute équivalente à un blé (1200€/ha). Aujourd'hui, le prix du sucre connaît une belle augmentation avec un prix de la betterave à 45€/t. La culture reste donc une culture économiquement intéressante.

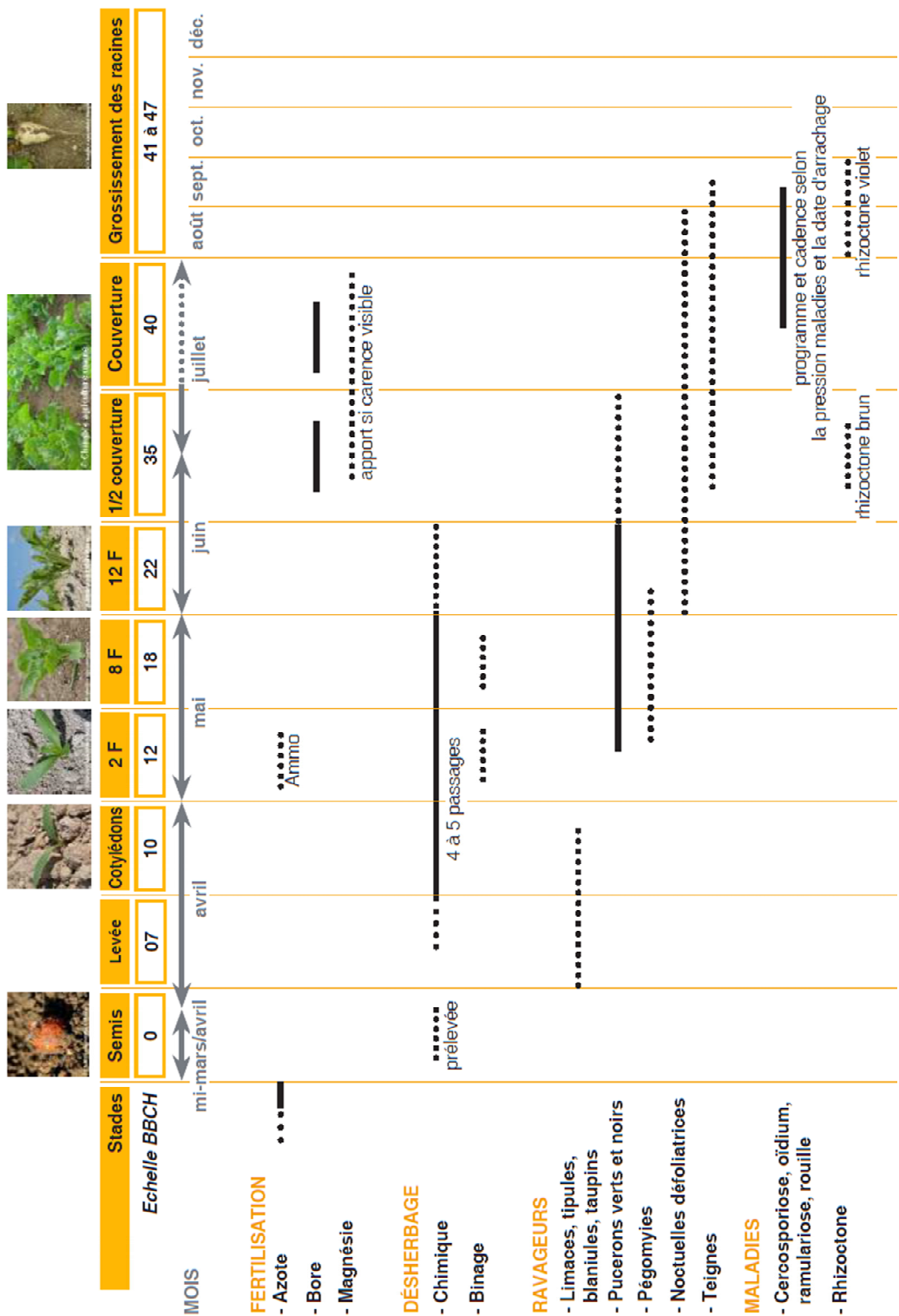
La culture de la betterave connaît également des problématiques agro-environnementales. Des suppressions de matières actives rendent sa production plus aléatoire. La suppression des néonicotinoïdes qui permettaient de lutter contre les pucerons au début du cycle de la culture a entraîné des pertes de production importantes dues au virus de la jaunisse véhiculé par les pucerons (perte pouvant atteindre 50% du rendement historique certaines années à forte pression). On connaît également des problématiques de désherbage avec le retrait d'herbicides dont on retrouve aussi des traces dans l'eau (chloridazon). Ces changements peuvent être parfois brutaux et des impasses techniques pour la culture peuvent apparaître.

Le désherbage est pourtant un point essentiel pour la culture dont le rendement est directement lié au salissement de la parcelle par les adventices. La betterave est une culture très sensible par rapport à la concurrence des adventices avec une croissance lente de la betterave au démarrage.

Le désherbage devient actuellement plus compliqué. L'introduction de méthode de désherbage alternatif, permet à la fois de gagner en efficacité sur les adventices tout en diminuant l'usage des produits phytosanitaires. Ces techniques sont cependant souvent plus gourmandes en main d'œuvre et demandent un matériel spécifique. Le dernier recours pour le désherbage reste le désherbage manuel mais cela pose question en terme de pénibilité et pour trouver cette main d'œuvre.

Document n° 2: Cycle de développement de la betterave sucrière et interventions

Source : Chambre d'Agriculture de la Marne



Document n° 3: Expérimentation de réduction d'intrants

Source : Exploitation agricole du lycée de Somme-Vesle

Une expérimentation Zéro fuite est menée depuis 2019 sur une partie de l'exploitation du lycée agricole de Somme-Vesle (Marne) (8 parcelles de 4ha avec différentes cultures) afin de répondre à des enjeux sur l'eau. Il s'agit de produire de l'eau « propre » sur un bassin d'alimentation de captage qui connaît des problèmes en nitrates et en produits phytosanitaires. Cette expérimentation a donc pour but de tester un système alternatif sans produit phytosanitaire tout en gardant des apports d'engrais de synthèse pour mieux les piloter. Il s'agit donc de mettre en œuvre en grandeur réelle tous les leviers (agronomique, biologique, mécanique) permettant de supprimer les produits phytosanitaires. Cette expérimentation est construite avec des partenaires techniques et le soutien financier de l'Agence de l'eau. Les objectifs sont multiples : construire des itinéraires techniques, mesurer l'impact sur la qualité de l'eau, analyser la dimension sociale et économique du système.

La culture de la betterave a fait partie intégrante de cette expérimentation avec l'enjeu majeur du désherbage. Des évolutions importantes du système et des choix techniques ont été guidés par cette culture. Au démarrage l'essai comportait 2 parcelles de betteraves sur les 8 parcelles. Progressivement, le choix de ne faire qu'une parcelle a été pris face à la difficulté de désherber.

Les itinéraires simplifiés sur le semis et le désherbage des betteraves sont mentionnés ci-dessous avec les changements techniques.

Année	Type de matériel utilisé	Rendement (T/ha)	Niveau de salissement	Difficultés
2019	Semoir de précision Bineuse inter-rang avec passage de moulinets sur le rang	55	Correct mais effet démarrage de l'essai	
	Semoir de précision avec semis au carré (45-45cm : 50 000 plantes/ha) pour biner dans les 2 sens Herse étrille en post semis prélevé Bineuse inter-rang	55	Correct mais effet démarrage de l'essai	Difficulté pour avoir une population permettant d'avoir un rendement acceptable, perte de pieds avec la herse étrille
2020	Semis de précision et désherbage avec différents outils de désherbage mécanique simple (herse étrille, bineuse avec moulinets)	40	Salissement non maîtrisé	Outils de désherbage classiques agressifs (perte de pieds)
2021	Semis classique avec bineuse inter intra-rang avec détection caméra des betteraves. Rattrapage avec outil à pneu	41	Salissement non maîtrisé	Lenteur de la bineuse inter intra-rang, difficulté technique avec la couleur du sol
2022	Test du robot semeur et désherbeur FarmDroïd (50% de la parcelle) comparé au semis classique et binage bineuse caméra (50%)	30	Salissement important sur la partie semis classique	Difficulté pour la bineuse optique qui ne bine pas assez tôt (début 4 feuilles) et adventices déjà implantées
2023	Semis de l'intégralité de la parcelle avec le robot			

Le tableau ci-dessous compare le bilan financier de la campagne 2021 pour le système de référence (conventionnel) à celui du système zéro fuite. Il est représentatif d'une année moyenne.

Système de Réf	Rendement (T/ha)	Prix (€/T)	Chiffre d'Affaire (€/ha)	Ch Op Total (€/ha)	dont Semences (€/ha)	dont ferti (€/ha)	dont PP(€/ha)	Marge Brute (€/ha)	Ch méca + prestation	Ch Salariales (€/ha)	Cotisations MSA (€/ha)	Marge Directe hors aides (€/ha)
Betterave	93,3	27	2520	808	389	166	253	1712	898	121	19	674
Blé	84,0	195	1632	422	113	218	91	1209	336	70	19	785
Orge Printemps	7,9	195	1535	336	114	178	44	1167	288	67	19	825
Pois Printemps	3,6	250	900	285	201	44	41	615	457	91	19	48
Colza	3,1	550	1678	331	35	162	135	1347	343	70	19	915
Moyenne Système Réf			1744					1249				665

Système ZF	Rendement (T/ha)	Prix (€/T)	Chiffre d'Affaire (€/ha)	Ch Op Total (€/ha)	dont Semences (€/ha)	dont ferti (€/ha)	dont PP(€/ha)	Marge Brute (€/ha)	Ch méca + prestation	Ch Salariales (€/ha)	Cotisations MSA (€/ha)	Marge Directe hors aides (€/ha)
Betterave	41,0	27	1107 -56%	406	304	102	0	701 -59%	1159	142	19	-619 -192%
Blé	7,1	195	1391 -15%	214	39	175	0	1178 -3%	478	96	19	584 -26%
Orge Printemps	7,4	195	1434 -7%	393	232	161	0	1041 -11%	344	79	19	599 -27%
Pois Printemps	2,7	250	625 -31%	152	122	31	0	473 -23%	368	82	19	3 -93%
Tournesol	3,5	460	1587 -5%	259	153	106	0	1328 -1%	741	138	19	429 -53%
Moyenne Système ZF			1260 -28%					934 -25%				174 -74%

Abréviations :

- Ch op : charges opérationnelles,
- PP : produits phytosanitaires.

Document n° 4: Présentation du robot FarmDroïd FD20 par un utilisateur

Source : « Le robot FarmDroïd FD20 pallie le manque de main-d'œuvre en betteraves bios », Matthieu Schubnel, Matériel Agricole, Publié le 12/06/2023

Le robot de semis et de désherbage FarmDroïd FD20 que vient d'acquérir l'exploitant bio Damien Blondel, installé dans la Marne, est déjà à l'œuvre dans les parcelles de betteraves. Il lui apporte une solution de substitution face à l'absence de main-d'œuvre saisonnière disponible au niveau local pour désherber manuellement cette culture.



Figure 1: Vue d'ensemble du robot FarmDroïd FD20

« En comptant les passages de semis et de binage au tracteur, j'estime à 180 h/ha l'économie de main d'œuvre générée en privilégiant le robot », indique Damien Blondel, gérant de la SCE des Monts Fournois.

Voilà quelques jours seulement que le premier robot FarmDroïd FD20 commercialisé en France travaille les parcelles de betteraves de la SCE des Monts Fournois, à Ludes (Marne), près de Reims. Damien Blondel gère seul cette exploitation bio de 220 ha de grandes cultures au parcellaire regroupé.

« Je recherchais une solution pour pallier le manque de main-d'œuvre [MO] durant la courte fenêtre d'intervention possible du binage des betteraves, qui n'est que de dix jours, explique l'agriculteur. Au regard des deux années d'expérience dont je dispose en betteraves sucrières bios, les besoins sont très variables : 60 h MO/ha nécessaires la première année sur 10,5 ha, 15 à 150 h MO/ha la deuxième année selon la parcelle, sur 15 ha au total ! Mes annonces sur Leboncoin et auprès de Pôle Emploi n'ont pas été suivies d'effet, les personnes motivées préférant souscrire un contrat saisonnier de trois mois auprès des exploitations viticoles du secteur. J'ai donc été contraint d'employer de la main-d'œuvre étrangère sous contrat français pour désherber manuellement mes betteraves, en complément des faux-semis puis des passages de bineuse dans l'interrang. »

Cette année, l'exploitant a implanté 18 ha de betteraves sur deux parcelles de 6,5 et 11,5 ha. La capacité maximale annoncée du FarmDroïd FD20 est d'environ 20 ha. En mesure d'assurer à la fois le semis et le désherbage mécanique des betteraves sucrières, le robot, de 3 m de largeur de travail, a été livré sur l'exploitation par la société Stecomat, importateur exclusif dans l'Hexagone.

Contrôle à distance

De conception mécanique simple, le robot est doté de deux roues arrière motrices à voie réglable et d'une roue avant folle. Il régule lui-même sa vitesse et change de direction en modifiant l'allure d'une roue arrière par rapport à l'autre. Il est ceinturé par un « fil de survie » relié à un coupe-circuit se déclenchant au moindre obstacle. Sa remise en route nécessite alors une intervention humaine. Au binage, il évolue à l'allure de 950 m/h. Il se dirige au moyen d'un émetteur RTK, installé au siège de l'exploitation et dont la portée atteint 10 km. Ce signal-là ne peut toutefois pas être exploité par les GPS des autres tracteurs de

l'exploitation. Le robot embarque deux antennes distantes d'environ 2,5 m pour améliorer la précision et tenir compte des écarts dans les parcelles en dévers. Le système fournit une position à partir des 15 meilleurs satellites disponibles. La communication entre la base et le robot est assurée par une antenne GSM, par laquelle transitent les interactions avec l'agriculteur, où qu'il soit, mais aussi les mises à jour. Le volume de données consommé avoisine les 5 Go par mois, selon Damien Blondel.

« Pour résoudre un éventuel problème, FarmDroïd peut prendre la main sur le robot, à distance depuis le Danemark », précise l'exploitant.

Stecomat assure la maintenance en partenariat avec le concessionnaire Agriviti, qui détient désormais la carte FarmDroïd dans la Marne et implante cette année une nouvelle base à 2 km de la ferme. D'une masse totale de 800 kg (ajout possible de masses au niveau des roues arrière pour améliorer la motricité dans les fortes pentes), le robot embarque des batteries rechargées exclusivement par quatre panneaux photovoltaïques.

« De jour, il produit jusqu'à trois fois ce qu'il consomme, même par temps couvert, et stocke le surplus dans des batteries, ce qui lui permet de travailler également la nuit. Dans le cas où ses accumulateurs sont déchargés, il s'arrête et reprend son travail de lui-même lorsque le jour se lève. »

Dépourvu de caméras de reconnaissance des plantes, le robot géolocalise chaque graine au semis et bine à l'aveugle au rythme de 6 ha par jour. Il peut ainsi intervenir même avant la levée pour arracher les mauvaises herbes au stade filament. En plus du binage dans l'interrang, un moteur positionne par intermittence deux lames en « V » sur le rang afin d'arracher les adventices entre les betteraves.

Lors du désherbage mécanique, le robot bine dans l'interrang, mais aussi sur le rang grâce à un moteur positionnant par intermittence deux lames en V pour arracher les adventices entre les betteraves. L'écartement minimal entre graines doit cependant atteindre 100 mm.

La planéité du sol et le bon enfouissement des débris végétaux favorisent la bonne qualité du semis et du désherbage.

Machine la plus rentable de l'exploitation ?

Pour gérer l'automate au quotidien, l'agriculteur se sert d'une interface web sur son smartphone.

L'interface web fournit à l'exploitant la localisation précise du robot en temps réel sur une carte, ainsi que différents paramètres comme la vitesse ou l'état d'avancement de la tâche dans la parcelle.

Le robot embarque également une console, verrouillée par un code d'accès personnel, à partir de laquelle l'opérateur règle la densité de semis, consulte les erreurs ou contrôle le moteur de distribution. Ce terminal donne aussi accès aux paramètres du moteur électrique embarqué sur chaque élément semeur, dont la biellette libère automatiquement, dès que nécessaire, la pièce travaillante relevée de toute accumulation de terre ou d'adventices. Il vérifie aussi le bon fonctionnement du GPS ou encore le niveau du pluviomètre embarqué. Au-delà de 0,5 mm de précipitations (valeur réglable), le robot s'arrête de lui-même. L'agriculteur le remet en route dès qu'il juge les conditions de sol à nouveau compatibles avec le travail interrompu. Enfin, l'automate dispose d'un joystick pour son déplacement manuel, si nécessaire.



Figure 2: Console de commande du robot FarmDroïd FD20

À l'arrière de l'automate, l'utilisateur dispose d'une console embarquée grâce auquel il accède, au moyen d'un code, au paramétrage des tâches ou encore au contrôle manuel de l'avancement.

« Le FD20 représente un investissement de 85 000 à 100 000 € HT selon les options, indique Damien Blondel. Les banques ont encore du mal à prêter pour un tel équipement. Mais avec le développement de ce marché, les coûts vont baisser. Je pense que les impasses à venir en désherbage chimique sur betteraves vont aussi dynamiser les ventes. »

Compte tenu de la valeur de son robot, qui travaille seul au champ, l'exploitant a pris soin d'y installer un traqueur GPS. Avec environ 30 000 €/an de charges de désherbage manuel pour 20 ha, le poste MO impacte énormément le coût de production de l'activité betteraves sucrières bios. Damien Blondel évalue à 180 h/ha l'économie de MO grâce au robot, y compris les passages de semis et de binage au tracteur.

« En théorie, il se rentabilise en quelques années, sans compter le temps libéré pour d'autres activités. Je prévois aussi de l'utiliser pour d'autres applications. On verra après deux campagnes... Si c'est effectivement le cas, ce sera l'outil le plus rentable de mon exploitation ! »



Une géolocalisation des graines au semis

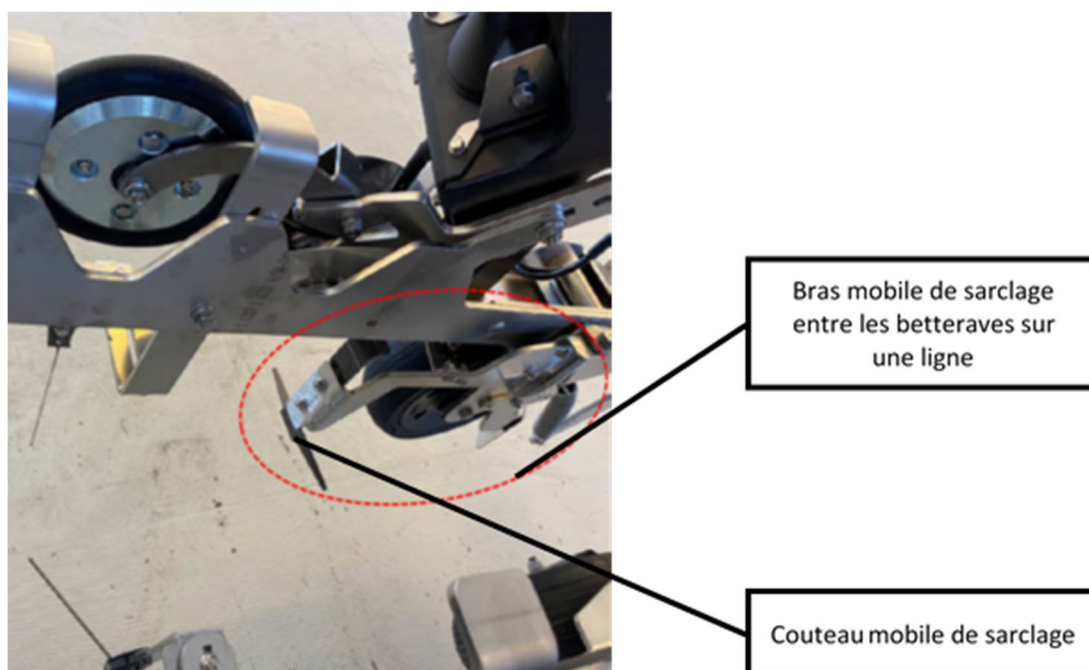
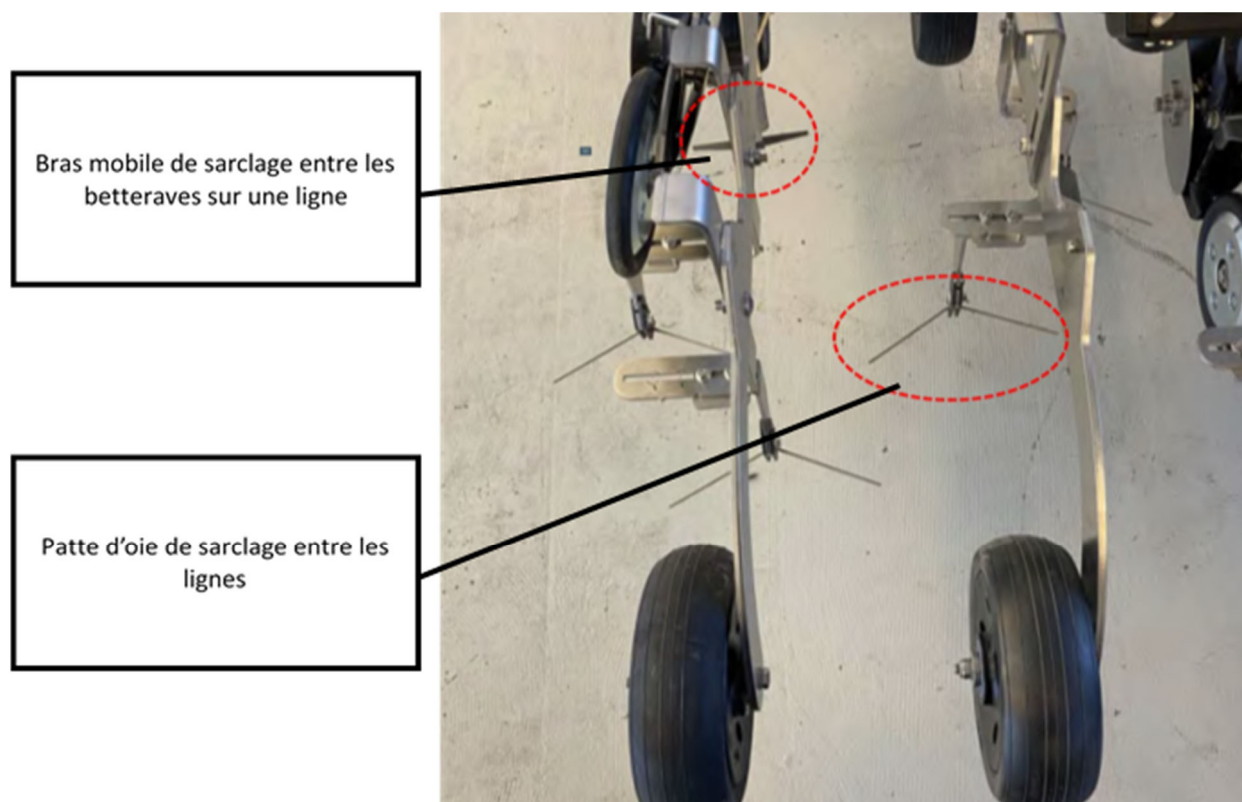
Avant d'entamer le semis d'une parcelle de betteraves, l'agriculteur en fait le tour en vue de sa géolocalisation et de celle d'éventuels obstacles. La vitesse d'avancement de son robot FarmDroid FD20 étant faible, il procède à l'arpentage sur son tracteur, lequel accueille l'automate sur le relevage arrière. L'opération menée une fois pour toutes ne prend pas plus d'une demi-heure. Lors du travail, le robot suivra le contour ainsi défini en laissant une marge de sécurité de 1,2 m. L'agriculteur fixe ensuite le nombre de tours initiaux définissant la largeur des fourrières afin d'anticiper l'espace requis pour les manœuvres de l'arracheuse (six tours dans ce cas). Il paramètre ensuite à 185 mm l'écartement entre graines sur chaque rang. Chaque élément semeur est fixé sur parallélogramme à l'une des deux poutres transversales, de 1,5 m chacune. L'écartement entre les six éléments est fixé à 45 cm, mais la largeur de l'interrang est réglable selon la culture (22,5 cm minimum), le système informatique étant capable de gérer jusqu'à huit éléments. Avec ces paramètres, le robot génère une cartographie géolocalisant l'emplacement de toutes les graines du champ. Lors du semis, la graine est d'abord entraînée par un disque de sélection de petit diamètre en plastique, situé sous la trémie, puis tombe par gravité dans un conduit jusqu'au soc où elle est mise en attente. Libérée ensuite dans le sillon au moment opportun, la semence chute de seulement 2 cm pour un placement avec une précision de l'ordre du millimètre. Au semis, l'automate travaille à 730 m/h pour optimiser la précision du placement des graines.

Les trémies des 6 éléments affichent une autonomie globale de 4 ha. Dès que l'une d'entre elles est vide, le robot s'arrête et prévient l'agriculteur sur son smartphone.

Le robot FarmDroid FD20 a été nommé fin janvier 2021 aux Sima Innovation Awards 2021

La fonction sarclage

Une fois l'ensemencement terminé, des paramétrages doivent être effectués sur le robot pour passer des fonctions Semis aux fonctions Sarclage.



Une diversification possible des espèces cultivées

Le FarmDroïd FR20 peut être utilisé notamment pour les oignons, les épinards, le chou, la valériane, le colza.

Document n° 5: Caractéristiques techniques du robot FarmDroïd FD20

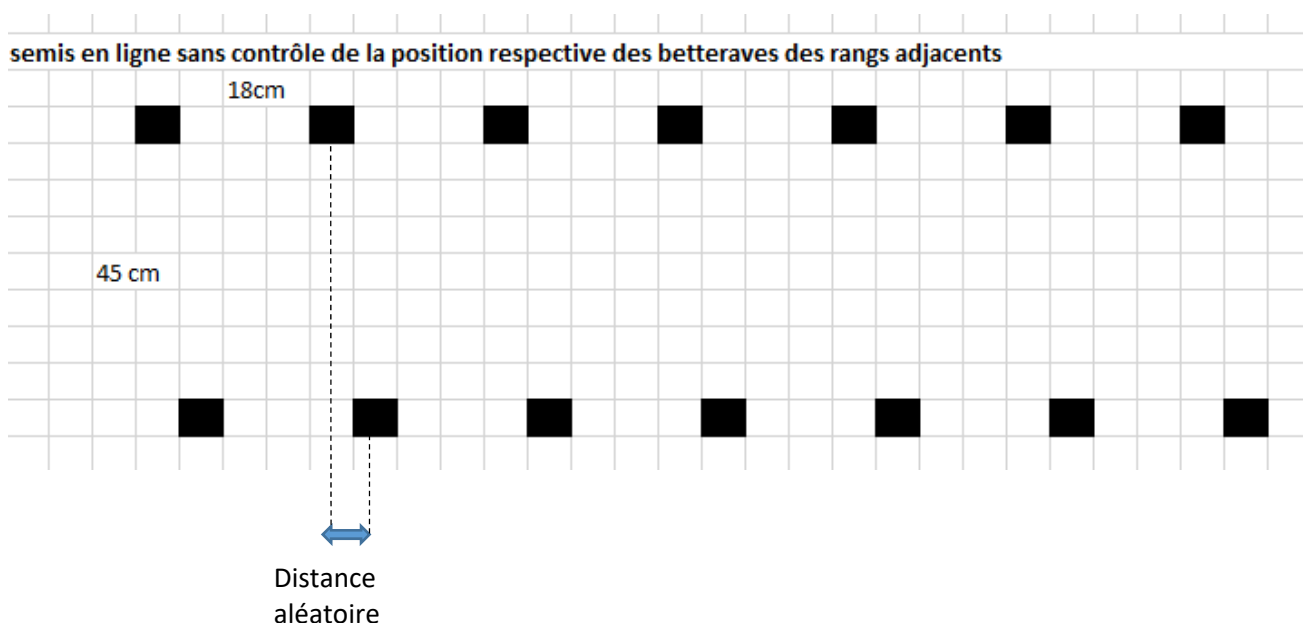
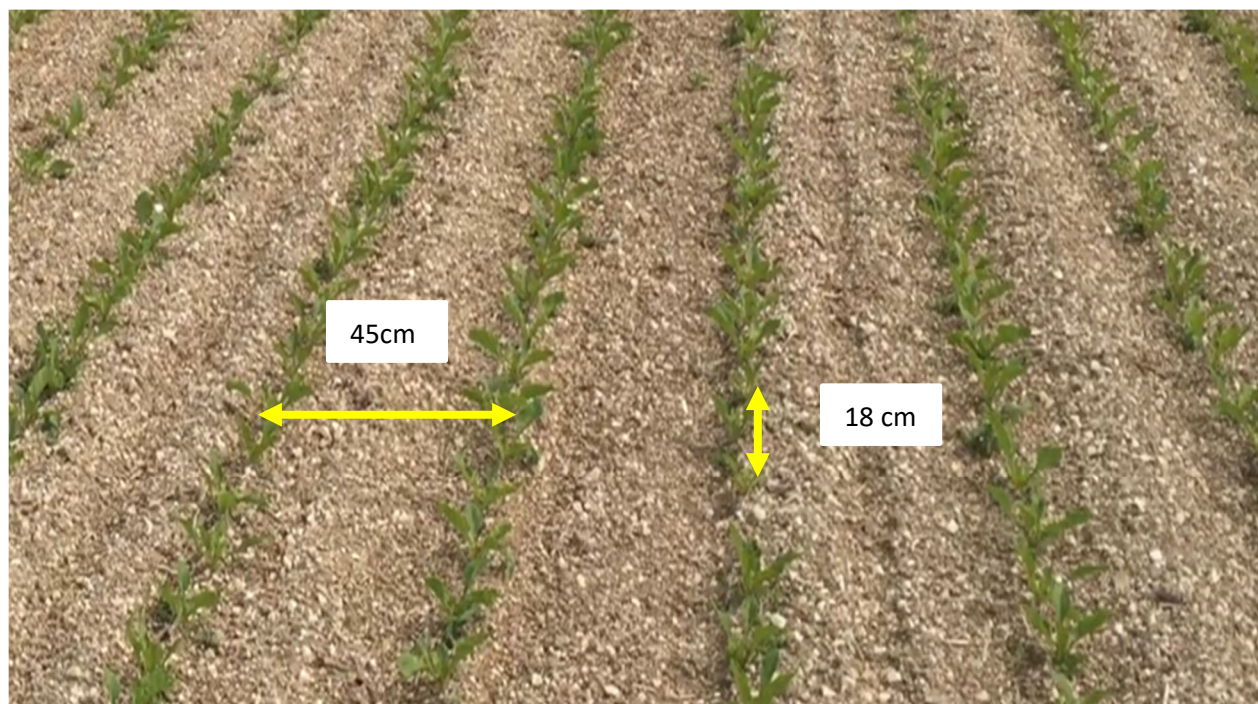
Source : FarmDroïd

Fabricant :	FarmDroïd ApS
Nom du modèle :	FD 20 V2.4
Largeur de travail :	À la demande
Zone maximale couverte recommandée :	20 ha
Vitesse maxi mode Fortement Automatisé :	950 m/h
Vitesse maxi mode manuel :	1100 m/h
Pente maxi de retenue par les freins (statique) :	15 % (selon le type de terre, l'humidité et les caractéristiques générales)
Pente maxi recommandée pour l'exploitation :	8 % (selon le type de terre, l'humidité et les caractéristiques générales)
Inclinaison maxi recommandée pour l'exploitation :	5 % (selon le type de terre, l'humidité et les caractéristiques générales)
Contenance de la trémie à semences :	6 litres par trémie
Distance mini / maxi de la remorque :	225 / 250 mm
Outil :	Configurable avec 0 à 12 rangées actives
Puissance du moteur de propulsion :	2 x 400 W
Puissance panneau solaire :	1560W
Type de batterie :	2 packs de batteries au lithium de 24V 120Ah (LiFePo4)
Poids des batteries :	52 kg (2 x 26 kg)
Poids de base du robot :	900 kg avec les batteries
Poids supplémentaire maxi autorisé du robot :	4 x 35 kg maxi, montés sur le châssis de la roue arrière
Poids supplémentaire maxi autorisé de la remorque :	12 kg maxi au total par rang ; 2 kg par roue plombeuse de semoir + 10 kg par remorque
Poids total maxi du robot	1184 kg
Température d'exploitation :	0 à 40°C
Température de stockage :	-10 à 50 °C
Niveau de bruit :	Inférieur à 70 dB (A)
Durée de vie moyenne attendue :	Plus de 10 ans pour les principaux composants entretenus par un professionnel.
Durée de vie attendue des batteries :	3 à 8 ans (suivant l'utilisation)

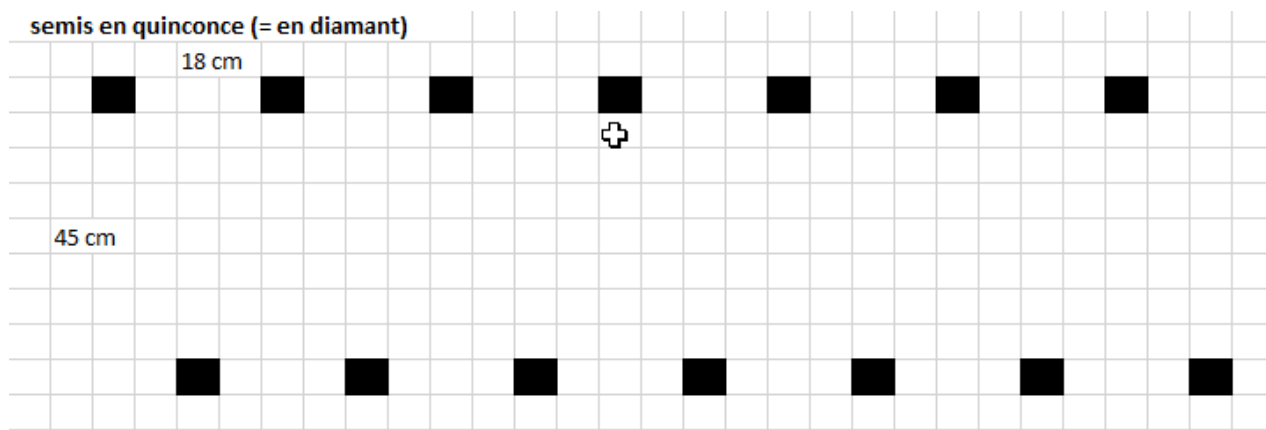
Document n° 6: Caractéristiques des semis de betteraves sucrières

Nombre volumique : 20000 graines par litre

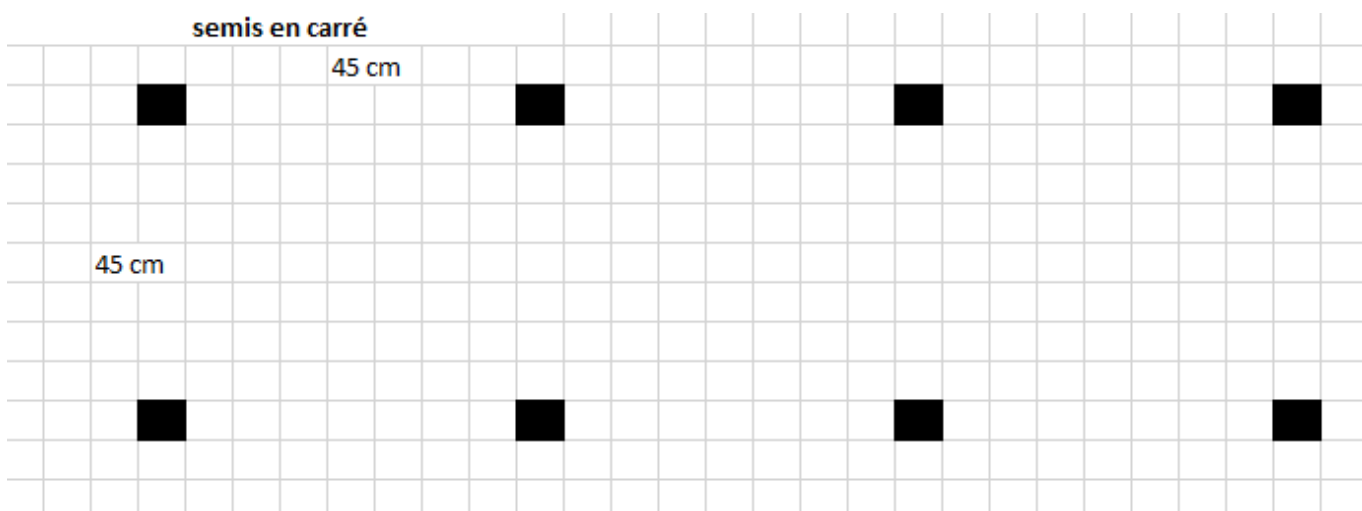
Semis monograine classique : 120 000 graines/ha, inter-rang 45 cm, distance inter-plant 18 cm



semis en quinconce (= en diamant)



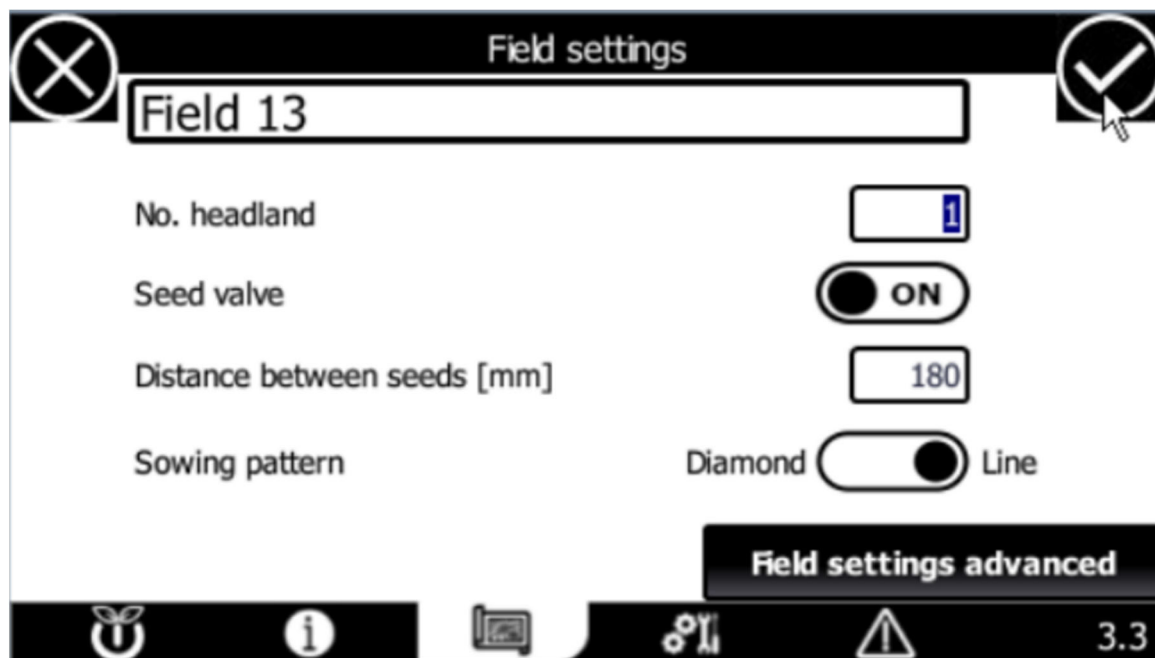
semis en carré



Document n° 7: Écran de pilotage Semis en lignes ou en diamant

Source : § 3.3 Réglages du champ Manuel d'utilisation du robot FarmDroid F20

La configuration du champ est maintenant terminée et doit être soit validée, soit rectifiée par l'utilisateur. Ceci se fait sur la page 3.3 (Field Settings) selon l'illustration ci-dessous.



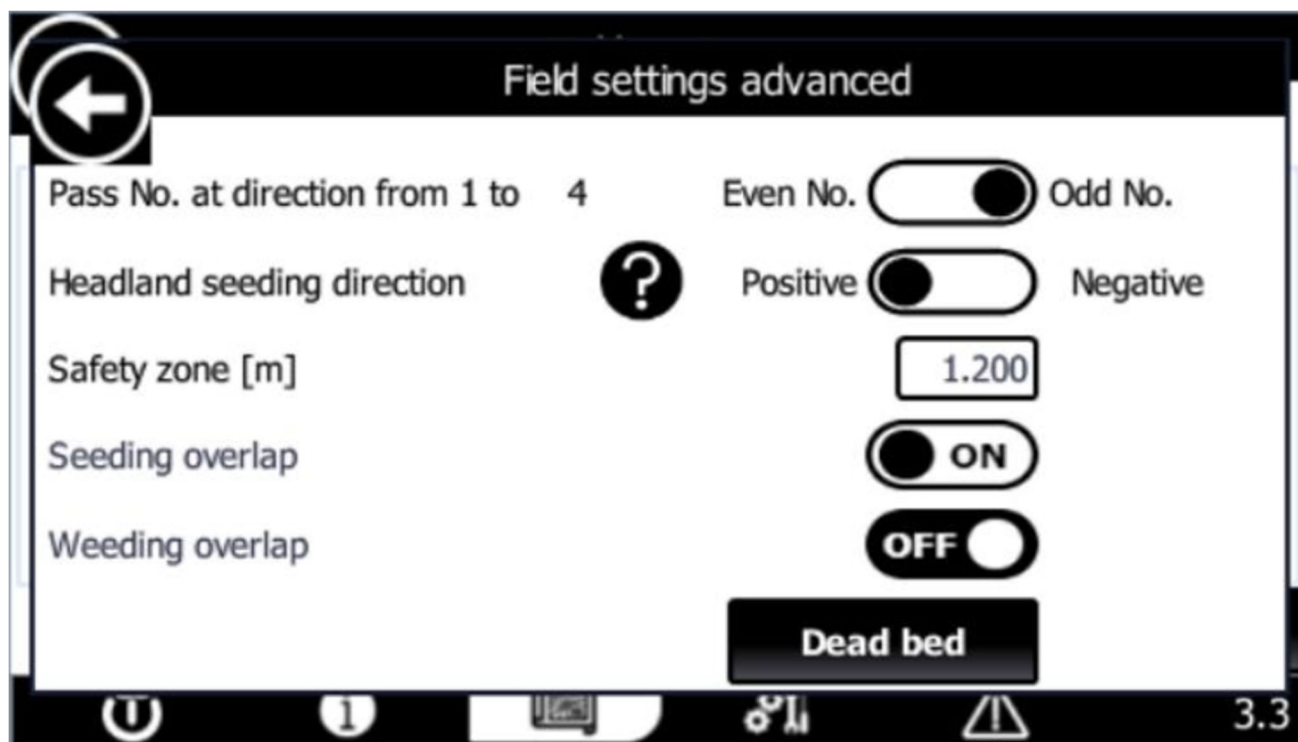
a. No. headland: Choisissez le nombre de tournières que le robot doit effectuer. La largeur de chaque tournière sera équivalente à la largeur de travail du robot. Une largeur de travail du robot de 3m et 3 tournières fera donc une largeur totale de tournière de 9 m.

b. Seed valve: Actionnez cette option si vous souhaitez que le robot sème le champ en portions (de 1 à plusieurs). Laissez l'option sur OFF si le robot doit effectuer le semis en ligne.

c. Distance between seeds (mm): Indiquez la distance en millimètres souhaitée entre chaque graine.

d. Sowing pattern: Sélectionnez le mode d'ensemencement. Vous pouvez choisir entre Line et Diamond.

Lorsque les réglages sont terminés, appuyez sur la coche en haut à droite pour continuer, ou choisissez l'option 'Field settings advanced' si vous souhaitez accéder au menu de paramètres avancés.



a. Pass no. at direction from 1 to 'reference' : Servez-vous de ce réglage pour déterminer si le robot doit faire des passages pair ou impair par rapport à la ligne de référence. Lorsqu'un point de référence a été choisi, celui-ci sera visible sur l'écran ("4" dans l'exemple ci-dessus).

Si l'option Odd No. est sélectionnée, le robot effectuera le semage des rangées 1, 3, 5, 7...en partant du point d'angle 1 vers le point de référence indiqué.

Si l'option Even No. est sélectionnée, le robot effectuera le semage des rangées 2, 4, 6, 8...en partant du point d'angle 1 vers le point de référence indiqué.

b. Headland seeding direction : Mettez le marqueur en position "Positive" si vous voulez que le robot se déplace du point d'angle 1 vers le 2, 3, 4 etc. Choisissez la position "Negative" si vous voulez que le robot se déplace du point d'angle 1 vers le point d'angle final d'abord, puis aux autres en ordre décroissant.

c. Safety zone (m): La valeur est calculée automatiquement en fonction de la largeur de travail du robot. FarmDroïd recommande de ne jamais la changer.

d. Seeding overlap: Lorsque le robot passe du champ à la tournière ou inversement, il y aura, à moins que la section en question soit en perpendiculaire, une partie du surface qui ne sera pas traitée, soit le sera deux fois (selon les réglages de chevauchement). Si l'option ON est sélectionnée, la surface entière sera traitée. Si l'option OFF est sélectionnée, la section en question ne sera pas traitée.

e. Weeding overlap: Pareillement pour la fonction désherbage, si l'option ON est sélectionnée, la surface entière sera traitée. En position OFF, la section en question ne sera pas traitée.

Document n° 8: Système de semis FarmDroïd FD20



Figure 1: Vue d'ensemble d'un élément semeur



Figure 2: Principaux composants d'un élément semeur

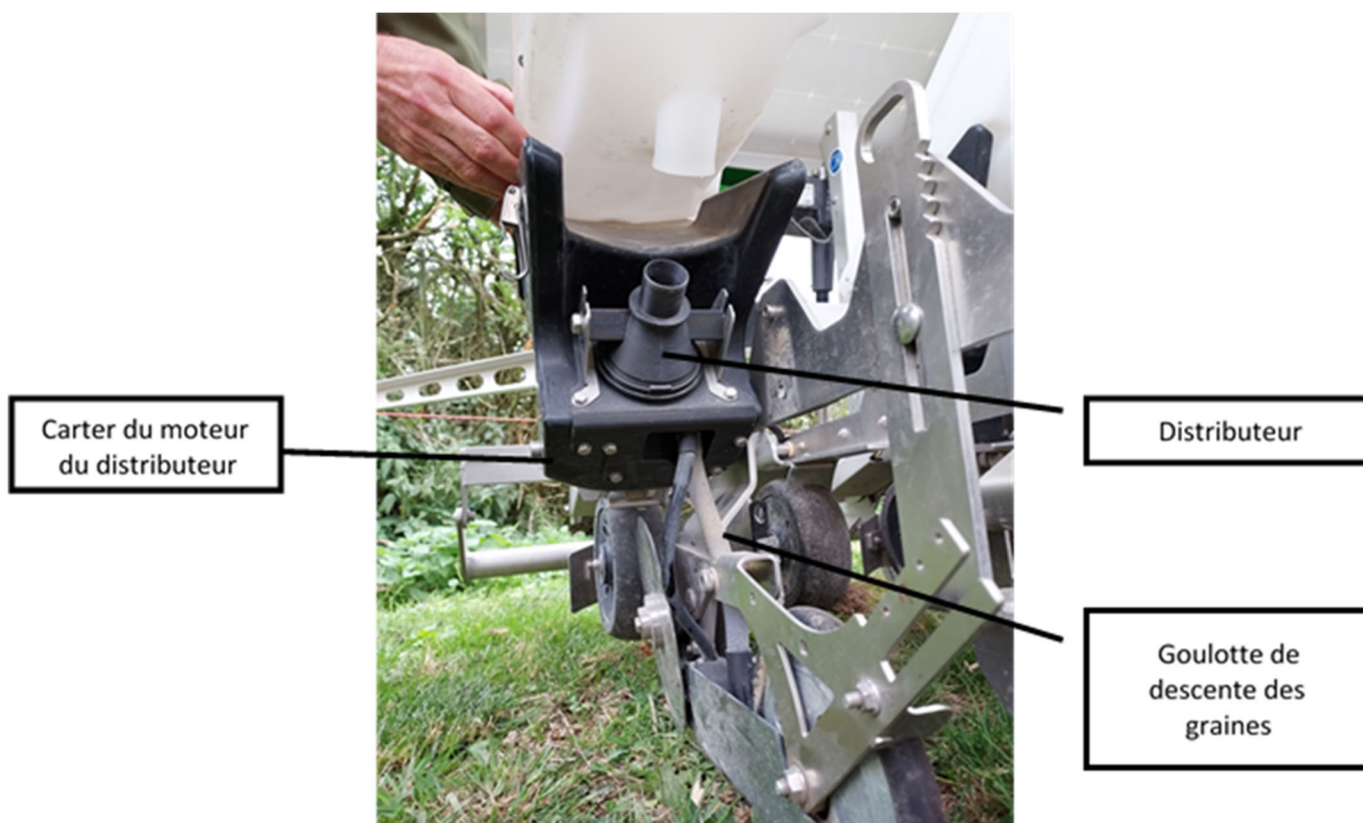


Figure 3: Position du distributeur

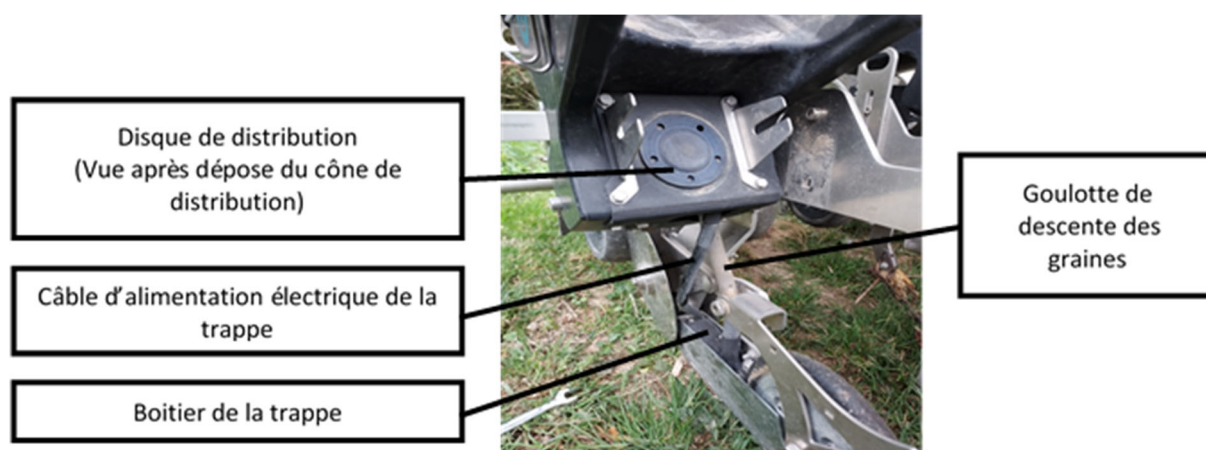


Figure 4: Vue du disque de distribution

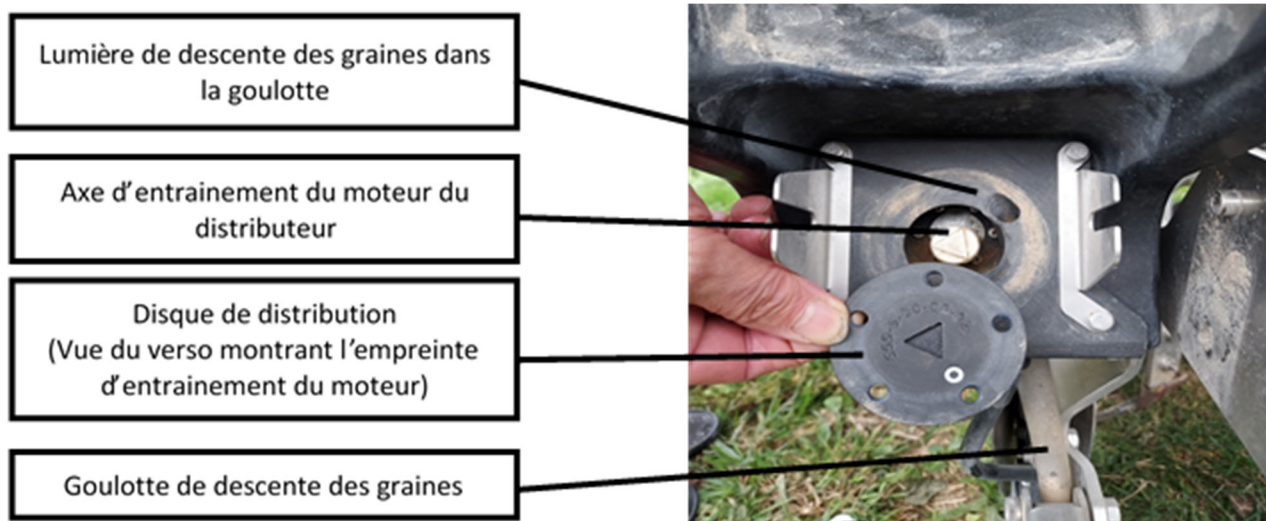


Figure 5: Vue de l'entraînement du disque de distribution

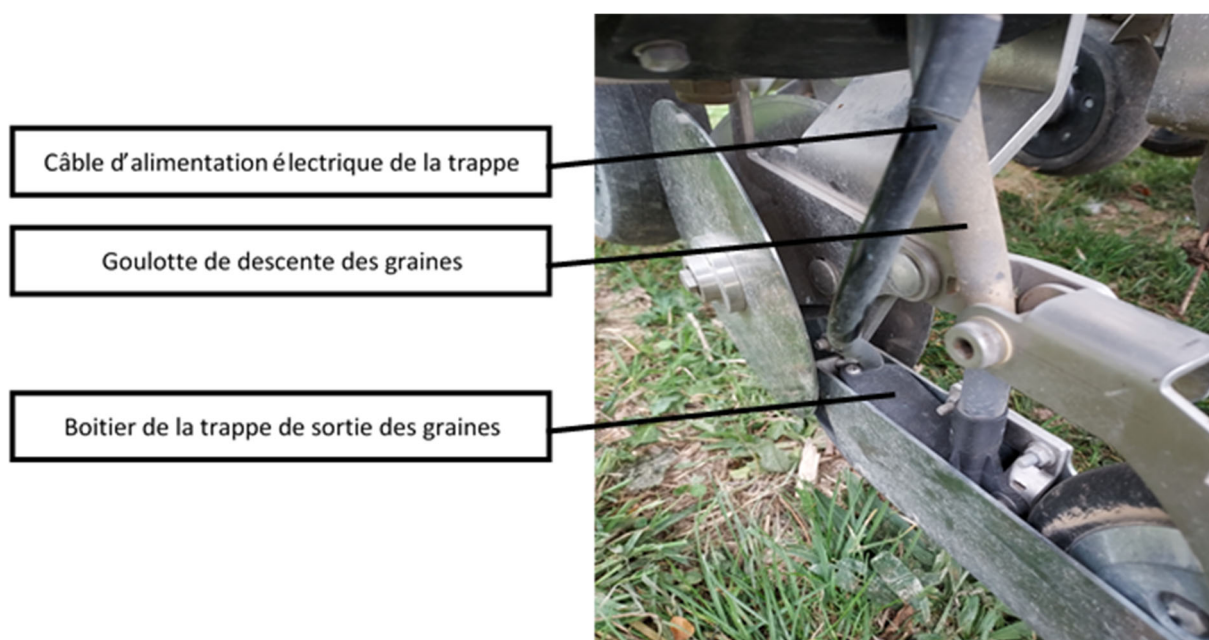


Figure 6: Emplacement de la trappe de sortie des graines

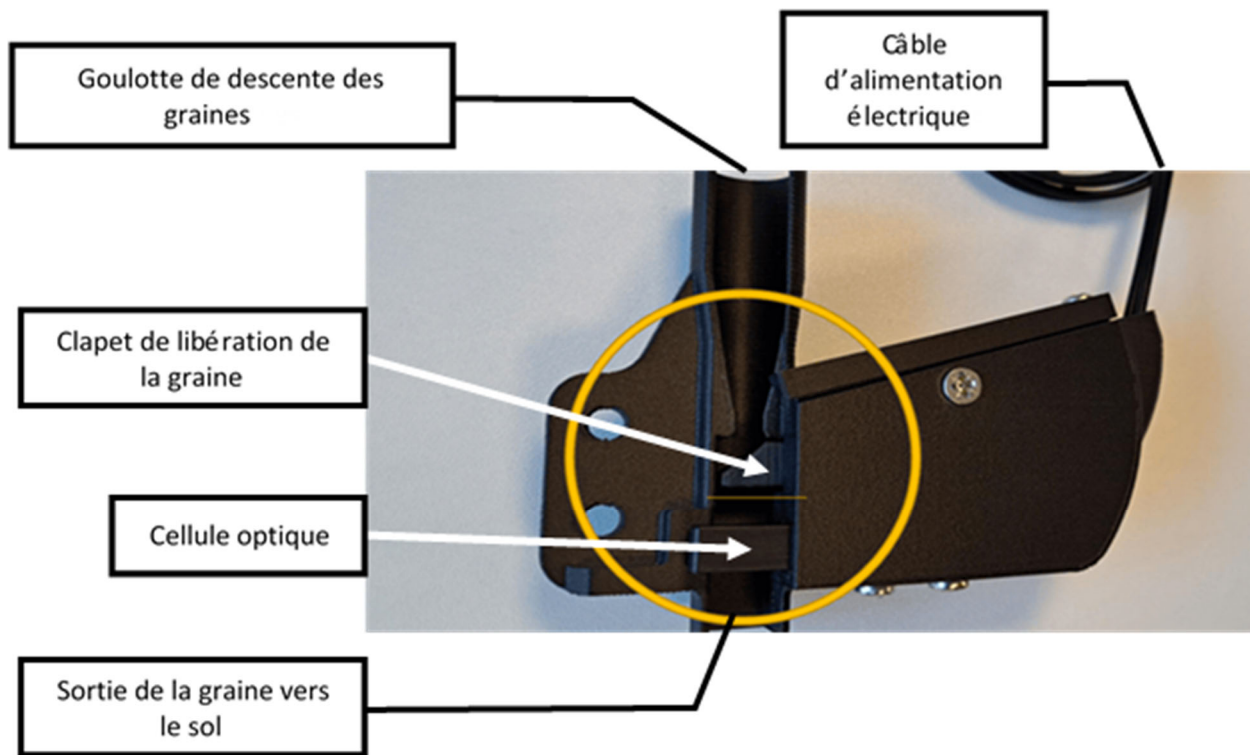


Figure 7: Vue en coupe de la trappe de sortie des graines

Document n° 9: Système de semis Monosem

Source : <https://www.monosem.fr/valoterra-ultimate/> consulté le 17/10/23



Active Seed Guidance (ASG)

La meilleure émergence à toute la vitesse ! Ce nouveau dispositif d'accompagnement de graines **ASG** est développé sur un concept de **gravité zéro** !

Les semoirs de précision à haute vitesse peuvent faire face à des contraintes de débit de fertiliseur, de polyvalence culturale et de performance à basse et moyenne vitesse !

Avec **ValoTerra Ultimate** affranchissez-vous des contraintes de la vitesse pour le meilleur de l'émergence :

- **PERFORMANCE A BASSE, MOYENNE ET HAUTE VITESSE** : Le système ASG permet des semis de 02 à 18 km/h !
- **POLYVALENCE CULTURALE** : Passage de l'ASG à la goulotte pour semer un grand nombre de cultures.
- **HAUT DEBIT DE FERTILISATION** : Le doseur FertiSmart apporte jusqu'à 450 kg/ha !

AU COEUR DE L'INNOVATION ASG

Le système d'accompagnement de graines qui s'adapte à vos vitesses de semis...

- **1- BOITIER DE SELECTION A DEPRESSION** :

Le système de sélection de la graine par dépression, est garant de la précision et de la polyvalence des semis.

Les disques lisses, l'insert breveté et l'entraînement électrique du boitier, permettent une précision accrue à plus haute vitesse.

- **2- ROUE DE CHARGEMENT À ALVÉOLES** (Brevet Monosem) :

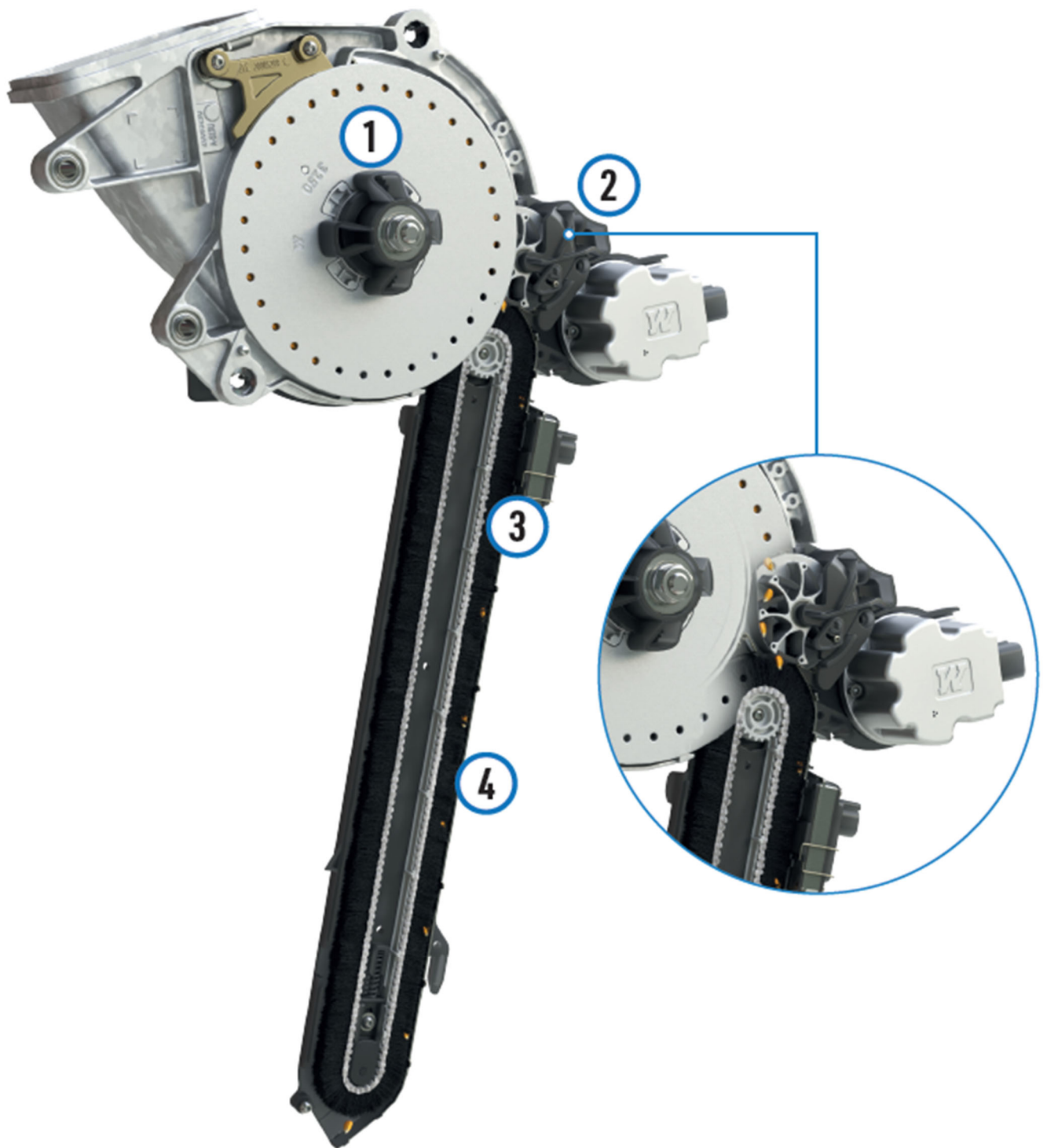
La roue de chargement alvéolaire permet d'accueillir la semence, avant de l'insérer dans la brosse, via un système de biellettes accompagnatrices.

- **3- COURROIE A ENTRAINEMENT POSITIF (Brevet Monosem) :**

L'intégration de cannelures sur la courroie brosse, permet un alignement optimisé, une rotation sans défaut ainsi qu'une usure minimisée.

- **4- LE CONVOYEUR À BROSSE :**

La brosse en rotation accompagne la semence jusque dans le sillon avec une vitesse d'avancement proportionnelle à celle du tracteur. Les rebonds et vibrations sont ainsi supprimés



Document n° 10: FarmDroïd FD20 équipé d'un pulvérisateur Amazone

D'après <https://FarmDroïd.dk/fr/sudzucker-amazone-et-FarmDroïd-testent-une-solution-innovante-pour-le-controle-des-mauvaises-herbes/> Consulté le 17/10/23



Figure 3: FarmDroïd FD20 équipé d'un pulvérisateur de précision Amazone

Südzucker, Amazone et FarmDroïd testent une solution innovante pour l'application précise de produits de protection destinée à la culture de la betterave sucrière.

Comment protéger au mieux les betteraves sucrières contre les mauvaises herbes et les ravageurs sans avoir à pulvériser des pesticides sur l'ensemble de la surface ? Telle est la question à laquelle s'efforcent de répondre les trois acteurs de ce projet pilote, à savoir Südzucker AG, le constructeur de matériels agricoles innovants Amazone, et le fabricant danois de robots pour l'agriculture FarmDroïd.

L'objectif est de réduire l'utilisation d'herbicides et d'insecticides au strict minimum grâce au robot de semis et de désherbage FarmDroïd FD20. C'est sur ce dernier, fonctionnant à l'énergie solaire et complètement autonome, que sera ajouté un mécanisme précis de pulvérisation ponctuelle. Les premiers essais sont actuellement en cours au sein de la ferme expérimentale de Südzucker AG, située à Kirschgartshausen, près de Mannheim en Allemagne.

Le robot FarmDroïd FD20 est déjà utilisé au sein d'exploitations en agriculture biologique pour le semis et le désherbage mécanique de betteraves sucrières et d'autres cultures. Après avoir calculé un maillage précis à l'aide de son système GPS de haute précision, le robot effectue un premier travail de semis. Le robot connaît alors la position exacte des betteraves sucrières et peut biner autour de celles-ci, aussi bien entre les rangs que sur le rang. Cependant, à proximité immédiate de la plante, il est difficile d'éliminer toutes les adventices sans toucher la plante. C'est donc à partir du savoir-faire unique de géolocalisation des plants de FarmDroïd qu'Amazone a développé un système de pulvérisation ponctuelle innovant et précis. Il est ainsi possible d'appliquer l'herbicide avec précision sur ou à côté de la betterave, permettant une utilisation minimale de produits phytosanitaires.

Südzucker teste actuellement ce nouveau développement, unique à ce jour, sur une parcelle d'essai d'environ un hectare. Dr. Peter Risser, responsable de la ferme expérimentale de Kirschgartshausen : « Nos premiers essais sont prometteurs et démontrent de manière impressionnante le potentiel de réduction des produits phytosanitaires lorsqu'ils sont appliqués avec une grande précision. La suite des essais devra ensuite montrer si les résultats obtenus peuvent être comparables sur une plus longue période face à un traitement standard.

Cette technologie est aussi intéressante dans le cadre de la lutte contre les parasites ou pour une fertilisation foliaire. Il s'agit donc d'une technologie passionnante, innovante, et tournée vers l'avenir pour l'agriculture biologique également ».



Figure 4:AMAZONE utilise pour les applications ciblées, une carte d'application enregistrant le positionnement GPS des graines de betteraves lors du semis

Document n° 11: Système de communication du robot FramDroïd FD20

Source : §2.2 et 4.1 manuel utilisateur

2.2 Informatique et sécurité de la communication

Le robot est équipé d'une passerelle Internet pour transmettre les messages de et vers l'opérateur, les signaux de positionnement RTK et les fonctions d'assistance en ligne.

Toutes les communications entre le robot et un serveur basé sur un nuage sont réalisées selon un protocole de communication TLS (bit AES256) et donc protégées contre les attaques « man in the middle » (piratage).

...

La communication de données est nécessaire pour que le robot échange des informations avec la Station de base et le serveur, ce qui est une condition préalable pour le fonctionnement. Ces données nécessaires au fonctionnement sont la propriété de FarmDroid, cependant l'acquisition de données est limitée aux données spécifiques du robot et de la Station de base, c.-à-d. qu'elle ne couvre pas les informations personnelles gérées par le RGPD (Règlement général sur la Protection des données).

....

4.1 Essai de la performance Internet

Pour s'assurer que la puissance de la communication entre le robot et la station de base RTK est suffisante, l'opérateur doit effectuer les essais initiaux de la connexion Internet. Les tests doivent être effectués à la fois dans le champ dans lequel le robot va fonctionner et à l'emplacement souhaité de la station de base.

Document n° 12: Principe du géopositionnement

Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_de_positionnement_par_satellites; https://fr.wikipedia.org/wiki/GPS_diff%C3%A9rentiel, consultés le 20 octobre 2023

Un système de positionnement par satellites également désigné sous le sigle GNSS (pour Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites) est un ensemble de composants reposant sur une constellation de satellites artificiels permettant de fournir à un utilisateur par l'intermédiaire d'un récepteur portable de petite taille sa position 3D, sa vitesse 3D et l'heure. Cette catégorie de système de géopositionnement se caractérise par une précision métrique, sa couverture mondiale et la compacité des terminaux, mais également par sa sensibilité aux obstacles présents entre le terminal récepteur et les satellites. Certains systèmes d'augmentation et de fiabilisation de portée régionale ou mondiale, gratuits ou payants, permettent de fiabiliser le système et d'améliorer les performances (DGPS, EGNOS, Assisted GPS (A-GNSS), etc.).

...

Les informations sont calculées à partir des mesures de distance à un instant donné entre le récepteur de l'utilisateur et plusieurs satellites artificiels spécialisés (les satellites de navigation) dont les positions dans l'espace sont connues avec précision :

- Chaque satellite émet en permanence un signal qui peut être reçu par tout récepteur situé dans le cône de visibilité du satellite.
- Chaque satellite inclut dans son signal les informations donnant sa position précise dans l'espace et la date/heure de l'émission du message.
- Pour optimiser le système, les satellites de navigation circulent sur une orbite moyenne à une altitude d'environ 20000 kilomètres. Compte tenu de cette donnée et de la nécessité que le récepteur puisse en permanence avoir quatre satellites visibles au-dessus de l'horizon, un système de navigation (GPS, Galileo, Beidou, Glonass) doit comporter environ 25 satellites de navigation opérationnels pour fournir une position, quelle que soit la position de l'utilisateur à la surface de la Terre.

En combinant la mesure simultanée de la distance d'au moins quatre satellites, le récepteur est capable par multilatération de fournir la position et l'altitude avec une précision de l'ordre du mètre¹, la vitesse avec une précision de quelques cm/s et le temps avec une précision de l'ordre de la nanoseconde.

¹ Trois satellites sont nécessaires pour la position et un quatrième pour l'altitude.

Le GPS différentiel (en anglais Differential Global Positioning System : DGPS) est une amélioration du GPS permettant d'améliorer la précision du positionnement.

Le principe du DGPS est basé sur le fait qu'en des points voisins, les effets des erreurs de mesure, comme d'ailleurs les effets des erreurs ajoutées volontairement, sont très semblables : il suffit donc d'observer en un point connu les fluctuations des mesures, et de les transmettre à un récepteur observant les mêmes satellites, pour permettre à celui-ci de corriger une grande partie des erreurs de mesure, qu'elles soient liées au satellite (horloge), aux conditions de propagation (effets troposphériques...) ou à des fluctuations volontaires du signal émis. On peut ainsi passer d'une précision de l'ordre de 10 à 20 mètres à une précision de 5 à 3 mètres sur une grande zone (plusieurs centaines de kilomètres). Le DGPS est basé sur un ensemble de stations fixes, dont la position est connue exactement ; elles reçoivent les signaux des mêmes satellites que les terminaux mobiles présents dans leur zone d'action, et elles estiment en permanence l'erreur locale de positionnement du GPS en comparant la position calculée avec leur position réelle. Cette information est transmise par radio ou par satellite (Inmarsat ou autre).

...
La Cinématique temps réel (Real Time Kinematic, en anglais ou RTK) est une modalité du géopositionnement présenté précédemment qui est caractérisée par son mode de calcul de la position à partir des signaux satellitaires² et de leur correction par les données de stations fixes.

² Les satellites émettent des signaux binaires portés par une onde. Le géopositionnement courant traite les signaux binaires alors que le RTK utilise la phase de l'onde porteuse.

Document n° 13: Choisir une correction GPS

Source : Extraits de « Choisir une correction GPS », Sylvain DESEAU, Chambre d'Agriculture du Loiret, Version : Décembre 2016

Les critères de choix d'une correction

Sa précision

■ Comment est mesurée la précision ?

La précision dite « relative » est exprimée en cm. Elle se mesure entre deux passages successifs du tracteur (temps écoulé entre le passage aller et le retour), avec un intervalle temps court.

Cet intervalle temps est important à prendre en compte pour guider le choix d'une correction. Il est en général de 15-20 mn. Mais une correction peu précise à 20 mn peut s'avérer suffisante à 5 mn.

C'est le cas d'EGNOS :

- Précision à 20 mn : ± 60 cm. Peu précis
- Précision à 5 mn : ± 30 cm. Suffisant pour des travaux d'épandage et de pulvérisation.

La précision dite « absolue » traduit la capacité de la correction à fournir une position répétable dans le temps. Elle est exprimée en centimètre. Certaines corrections sont annoncées comme « permettant la répétabilité » mais ne le permettent pas avec précision en réalité.

À savoir : Les fournisseurs expriment la précision de leur correction à 50% du temps. Les résultats obtenus sont plus flatteurs que lorsque les tests sont réalisés à 95% du temps ce qui est le cas des tests Arvalis.

La précision d'une correction s'entend à l'antenne du tracteur, pas au niveau de l'outil. Elle est exprimée en $\pm$. Elle peut de ce fait générer, pour un aller/retour un écart ou un recouvrement.

La précision d'une position dépend de la correction mais également de tout un ensemble de facteurs comme la qualité du matériel utilisé (antenne, récepteur GPS, modem, asservissement, ...).

■ Une précision pour quel usage ?

Métrique : pas d'application en guidage machine.

Décimétrique :

- > 10 cm : modulation intra parcellaire, guidage épandage d'engrais et pulvé, coupure de tronçons épandeur d'engrais et pulvé, travail du sol large et rapide.
- 10 à 15 cm : semis de céréales, travail du sol

Centimétrique :

- 5 à 10 : récolte de céréales, semis de précision
- 2 à 4 : binage, buttage pomme de terre, strip till

Précision répétable : semis de précision, binage, butage, strip till.

Son temps de convergence

Appelé aussi temps de chauffe, c'est le temps d'attente nécessaire pour que la correction soit opérationnelle après la mise en route de la console. Toutes les corrections ne sont pas concernées.

Ce temps d'attente peut aller jusqu'à 25 minutes.

Sa couverture

Certaines corrections, particulièrement celles issues de réseaux (RTK radio et RTK GSM), ne couvrent pas tous les secteurs géographiques de France.

A l'échelle de l'exploitation, il faut vérifier que l'ensemble du parcellaire est couvert.

Sa compatibilité

- Avec les caractéristiques de la console : votre console est-elle capable de gérer la correction ?
- Avec l'antenne : l'antenne est-elle capable de capter la correction ?
- Avec la marque de la console. Exemple : Les corrections John Deere et Trimble sont compatibles uniquement avec les consoles de leur marque.
- Avec le système GNSS : toutes les corrections sont compatibles avec le réseau GPS. Elles peuvent l'être également avec le réseau Glonass. L'intérêt d'une double compatibilité est de limiter le risque de coupure du réseau satellites.

Son coût

- L'abonnement

L'accès aux corrections payantes passe par un système d'abonnement. La durée de celui-ci peut être variable : à l'année, pour une période de l'année seulement, pour plusieurs années (souvent 5 ans pour les abonnements aux réseaux RTK radio).

- La carte SIM

Les corrections RTK GSM nécessitent de souscrire un abonnement téléphonique. Le manque de couverture GSM peut nécessiter, afin de limiter le risque de coupures, de faire le choix d'une carte SIM multi opérateurs.

- Le déblocage de console

Les corrections centimétriques et RTK nécessitent souvent un déverrouillage de console pour être actives. Le coût de cette « clé informatique » peut parfois être élevé.

Le SAV

Dans quel délai le prestataire auprès de qui vous avez souscrit la correction s'engage à rétablir le signal lorsqu'il y a une coupure ?

Les bonnes questions à se poser

- La correction choisie me permet-elle de revenir au même endroit ?
 - Est-ce que la correction couvre l'ensemble de mon parcellaire ?
 - Corrections payantes : Est-il possible de souscrire un abonnement sur six mois ou trois mois au lieu d'un an ?
-

Les corrections avec répétabilité

Elles sont plus connues sous l'appellation « RTK ». Leur utilisation se justifie pleinement pour les travaux de binage, de butage. Sa valorisation au quotidien consiste à enregistrer les lignes de référence de chaque bordure de parcelles afin de s'y recalculer avec précision lors de n'importe quel type d'intervention. Cela facilite par exemple la gestion des fourrières.

Leur précision est également plus élevée. Ceci est liée au fait que les balises sont implantées à proximité du tracteur (< 100 km) ou, dans certains cas, que l'on multiplie le nombre de balises de référence.

Dans cette famille de correction, on distingue :

- Le RTK radio

La correction est calculée par une balise mobile ou fixe. Le message de correction est transmis par un signal radio d'où la nécessité qu'elle se situe à proximité du tracteur (<15 km). Celui-ci est équipé d'une antenne radio en plus de l'antenne GPS. Cette transmission du signal peut être perturbée par des obstacles (bois) ou le vallonnement du terrain. La précision de la correction est de l'ordre de 1cm au pied de l'antenne + 1 mm/kilomètre d'éloignement.

On distingue :

- ✓ Le RTK radio avec une antenne mobile : Cette balise mobile, de faible portée (2 km), est déplacée de parcelle en parcelle. Pour obtenir la répétabilité de la position, elle doit toujours être repositionnée au même endroit, d'où la nécessité de faire des repères fixes (plot en béton) dans les parcelles.

- ✓ Le RTK radio avec une antenne fixe : les antennes sont fixées sur des points hauts (hangar, silo) et ont une portée de 10 à 15 km. Elles sont soit achetées et utilisées individuellement, soit installées en réseau par des concessionnaires, des coopératives ou des CUMA. Le signal est dans ce cas mis à disposition via un abonnement.

Les répéteurs : À ne pas confondre avec les antennes. Les répéteurs ont pour objectif de contourner un obstacle. Ils n'augmentent pas la portée des balises.

L'utilisation des ondes radio nécessite de s'acquitter d'une redevance ARCEP de 650 €/an.

Atouts	Contraintes
Fiabilité du signal radio. Réception stable. Peu de risque de coupures. Abonnement aux réseaux coop et concessionnaire bon marché. 1 abonnement permet le guidage de plusieurs tracteurs.	Limite de portée des balises radio. Contrainte des obstacles. Nécessite une vue directe entre la base et l'antenne. Redevance ARCEP 650 €/an si balise individuelle. Compatibilité indispensable entre la marque de la balise et la marque du récepteur Si panne de la base → coupure

- § Le RTK « GPRS » ou RTK « GSM » ou RTK « téléphone » (*)

Elle se distingue du RTK radio par le fait que la correction est transmise au tracteur par le réseau de téléphonie mobile (GPRS). Celui-ci est équipé d'une antenne GSM et d'un modem qui reçoit une carte SIM mono ou multi opérateur. La solution multi opérateur permet de s'affranchir des zones non couvertes par certains opérateurs.

(*) GSM : transmission de la parole. GPRS : transmission des données

Atouts	Contraintes
Pas de limite de portée comparé au RTK radio. Peu sensible aux obstacles topographiques. Compatible avec toutes les marques de console (sauf Trimble VRS Tec).	1 abonnement/antenne Zone non couverte par aucun opérateur de téléphonie mobile. Transmission des données GPRS non prioritaire sur la téléphonie

La correction est calculée à partir de balises de référence reliées à un serveur informatique. C'est lui qui assure la liaison avec le tracteur par GSM. La particularité de ce système est que le calcul peut être fait par une ou plusieurs balises et que celles-ci peuvent être plus ou moins distantes selon les prestataires.

- Le RTK GPRS « multibases » ou GPRS « réseau » :

La correction est calculée par plusieurs balises de référence intégrées dans un réseau.

Des réseaux de balises ont été créés par des prestataires pour répondre aux besoins d'autres corps de métier (exemple : réseau des géomètres). Leur utilisation a été étendue au domaine agricole. Les balises peuvent être distantes de 60 à 100 km l'une de l'autre. Plus les balises sont éloignées du tracteur, plus il faut multiplier leur nombre pour conserver la précision de la correction (*).

(*) Compte tenu du rayon de courbure de la terre, au-delà de 30 km d'éloignement entre le tracteur et la balise de référence, la vision des satellites par le tracteur ou la balise change. La correction est donc moins précise.

- Le RTK GPRS monobase

La correction est calculée par une seule balise. Ces balises peuvent être implantées de façon local ou faire partie d'un réseau (dont des réseaux de GPRS multibase). Il faut donc s'assurer que votre secteur géographique est couvert. La précision de la correction dépend de la distance d'éloignement entre les balises.

Ce type de correction est moins complexe à mettre en œuvre que le GPRS multibase. Le service est donc vendu moins cher au client final.

Résultats de tests Arvalis 2014

	Décimétrique			Centimétrique				radio	RTK			
	Egnos	SF1	RTX Range Point	SF2	HP	G2	RTX Center Point		téléphone			
									Orphéon	Sat-Info	Teria	VRS-Tec
Société	ESA	John Deere	Trimble	John Deere	OmniSTAR	OmniSTAR	Trimble	tous les constructeurs	géodata Diffusion	Sat-Info	Exagone	Trimble
Compatibilité récepteur	tous	John Deere	Trimble	John Deere	tous	tous	Trimble	la même marque que la base RTK	tous	tous	tous	Trimble
Constellation satellites utilisables	GPS	GPS + Glonass	GPS + Glonass	GPS + Glonass	GPS	GPS + Glonass	GPS + Glonass	GPS + Glonass sous condition que les bases RTK qui permettent le calcul de la correction soient également GPS et Glonass				
Précision en cm à 20 minutes (95 % temps)	± 60	± 24	± 18	± 5	± 8	± 8	± 6	± 4	± 4	± 4	± 4	± 4 selon distance à la base
Répétabilité en cm (95 % temps)	non			± 13	± 15	± 15	± 9.5	oui				
Temps de convergence en mn (moyen)	aucun			23	19	22	21	aucun				
Déblocage du récepteur	niveau de base du récepteur			déblocage informatique du récepteur (supplément de 2000-5000 euros par rapport à la précision décimétrique)				déblocage informatique du récepteur (supplément de 2000-5000 euros par rapport à la précision centimétrique)				
Tarif (€/an) à titre indicatif	gratuit	gratuit	250	600	1250	1250	1400	650 pour l'attribution de la fréquence	900-1200 pour une zone géographique illimitée, varie selon les options			
Interventions culturales	Interventions rapides, grandes largeurs telles que la pulvérisation, l'épandage ou le travail du sol			Interventions plus lentes comme les semis de précision mais qui n'exigent pas de retour au même endroit				Interventions qui demandent un retour exactement au même endroit comme le binage				
Applications: - barre de guidage	Le plus courant dans cette gamme			Non utilisable car il serait très difficile de suivre des diodes ou un écran avec une telle précision								
- autoguidage	Un autoguidage limite l'erreur liée à la lecture de l'écran par rapport à une barre de guidage			Un asservissement de type « moteur électrique » peut être suffisant même si un hydraulique valorise mieux la précision				Un asservissement sur l'hydraulique est indispensable pour les interventions très précises avec un retour au même endroit de type binage. Dans les autres cas, un « moteur électrique » peut être suffisant				

Tableau : Caractéristiques des différents types de correction.



Application : - barre de guidage	Le plus courant dans cette gamme	Non utilisable car il serait très difficile de suivre des diodes ou un écran avec une telle précision	
-autoguidage	Un autoguidage limite l'erreur liée à la lecture de l'écran par rapport à une barre de guidage	Un asservissement de type « moteur électrique » peut être suffisant même si un hydraulique valorise mieux la précision	Un asservissement sur l'hydraulique est indispensable pour les interventions très précises avec un retour au même endroit de type binage. Dans les autres cas, un « moteur électrique » peut être suffisant

Document n° 14: Descriptif du fonctionnement électrique du FarmDroïd FD20

(source FarmDroïd)

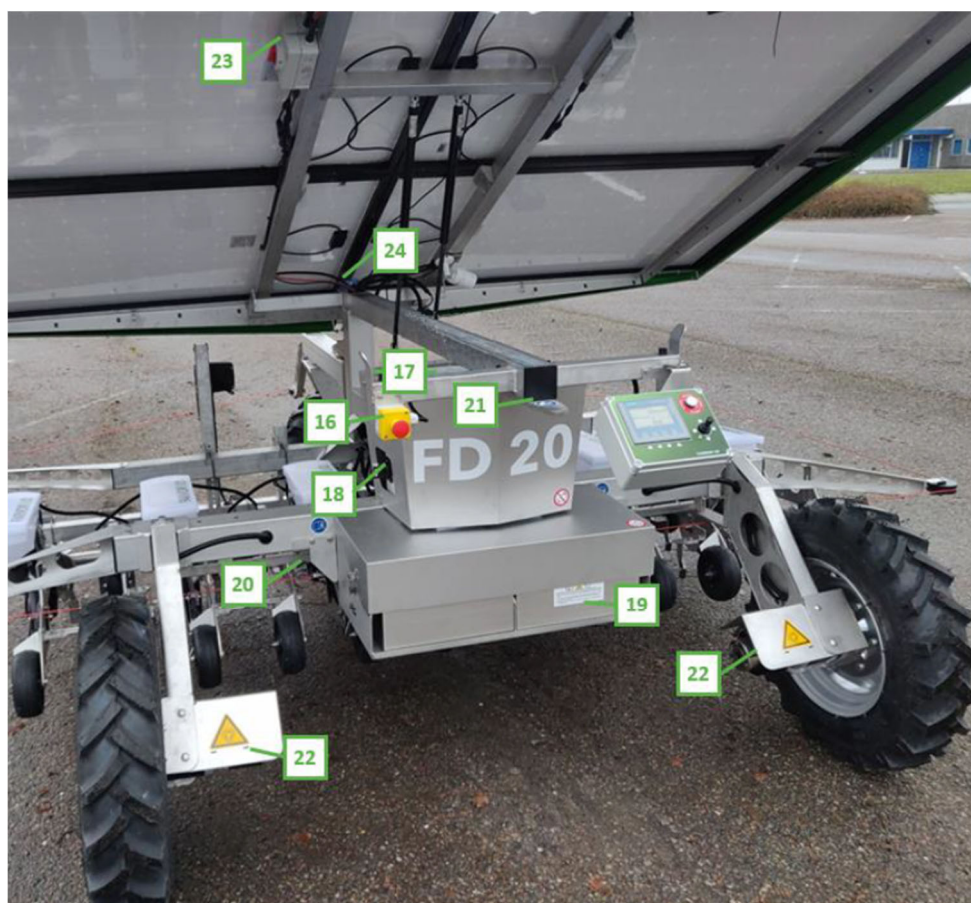
Le robot fonctionne avec des batteries chargées par des panneaux solaires. La machine peut être commandée à l'aide du panneau de commande à l'arrière du robot ou avec l'application FarmDroïd. Le robot se déplace lentement et fonctionne quand les batteries sont suffisamment chargées. Selon les conditions météorologiques, le robot peut fonctionner 24 heures sur 24 pendant les périodes ensoleillées. À d'autres moments, le robot s'arrête quand les batteries sont vides et redémarre automatiquement quand les panneaux solaires fournissent à nouveau de l'énergie, s'il est resté en mode Fortement Automatisé. Avant de redémarrer automatiquement, le robot émettra un signal d'avertissement pour avertir les gens aux alentours.

Le haut des panneaux solaires peut être incliné, et ils sont maintenus par deux ressorts à gaz. Ceci facilite le chargement de la machine avec les semences, ainsi que les travaux d'entretien et de maintenance.



Les panneaux solaires doivent toujours être fermés (à l'horizontale) pendant l'exploitation.

La figure ci-dessous présentent les pièces utiles avec des références à leur nom et leur fonction.



16	Interrupteur d'arrêt d'urgence	17	Chargeur du panneau solaire	18	Interrupteur principal
19	Batteries	20	Points de levage	21	Point supérieur d'attelage
22	Moteur de propulsion, embrayage et frein	23	Interrupteur du panneau solaire	24	Capteur d'inclinaison

Document n° 15: Données climatiques pour le département de la Marne

(Source : fr.climate-data.org)

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sep- tembre	Octobre	No- vembre	Décembre
Température moyenne (°C)	3.4	3.8	6.8	10.3	14.1	17.6	19.6	19.3	15.9	12.1	7.3	4.1
Température minimale moyenne (°C)	1	0.7	2.6	5.5	9.4	12.7	15	14.6	11.7	8.7	4.7	1.8
Température maximale (°C)	5.9	7.2	11	14.8	18.4	21.9	23.9	23.7	20.3	15.7	10	6.6
Précipitations (mm)	68	60	59	61	74	64	64	67	60	70	72	85
Humidité(%)	84%	81%	76%	71%	72%	69%	66%	67%	72%	79%	86%	86%
Jours de pluie (jrée)	9	8	9	9	9	8	8	8	7	8	9	10
Heures de soleil (h)	2.9	4.0	5.9	8.4	9.0	10.1	10.4	9.3	7.2	5.2	3.3	2.9

Data: 1991 - 2021 Température minimale moyenne (°C), Température maximale (°C), Précipitations (mm), Humidité, Jours de pluie. Data: 1999 - 2019: Heures de soleil

Document n° 16: Rendement des panneaux solaires

(Source : myshop-solaire.com)

ORIENTATION ET INCLINAISON DU SYSTÈME

En France, les panneaux solaires doivent être exposés **plein sud** et être inclinés à **45° degrés par rapport à l'horizontal** pour produire un maximum d'énergie sur l'année.

Cependant des écarts de plus ou moins 45° par rapport au sud (c'est-à-dire de sud-est à sud-ouest) et une inclinaison de 20 à 60° par rapport à l'horizontal sont acceptables et n'engendrent pas de baisse de production importante.

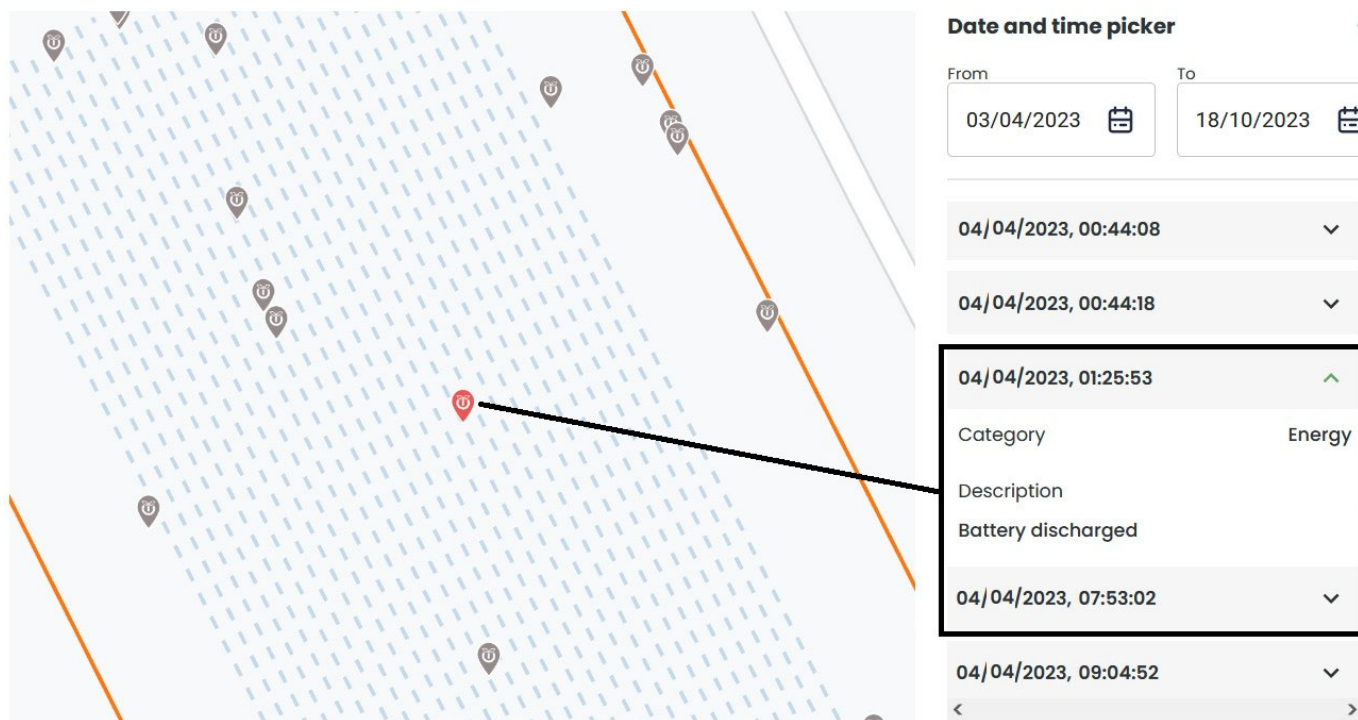
Le tableau ci-dessous donne **le facteur de correction à appliquer à la production attendue** du kit solaire en fonction de son orientation et de son inclinaison.

FACTEURS DE CORRECTION POUR UNE INCLINAISON ET UNE ORIENTATION DONNÉES				
ORIENTATION \ INCLINAISON				
	0°	30°	60°	90°
Est	0,93	0,90	0,78	0,55
Sud-Est	0,93	0,96	0,88	0,66
Sud	0,93	1,00	0,91	0,68
Sud-Ouest	0,93	0,96	0,88	0,66
Ouest	0,93	0,90	0,78	0,55

Pour maximiser la productivité de vos kits photovoltaïques, il est nécessaire d'éviter les positions grisées si elles ne sont pas imposées par une intégration architecturale

Document n° 17: Capture d'écran de l'application sur téléphone du FarmDroid : signaux d'erreurs et d'arrêts

(Source : exploitation agricole du LEGTA de Somme Vesle)



Document n° 18: Présentation de trois itinéraires techniques de semis et de désherbage des betteraves

1 : Itinéraire classique conventionnel

Semis avec semoir monograine : 1 passage : tracteur et semoir de précision

Désherbage chimique : 4 passages : tracteur et pulvérisateur trainé

2 : Itinéraire réduit en produits phytosanitaires

Semis avec semoir monograine : 1 passage : tracteur et semoir de précision

Désherbage chimique : 4 passages : tracteur et rampe de traitement localisé

Binage de l'inter-rang : 4 passages : tracteur et bineuse

3 : Itinéraire FarmDroïd

Semis avec le robot : 1 passage

Binage avec le robot : 8 passages

Tableau du matériel utilisé

Matériel	Masse	Vitesse de travail	Largeur	Pneumatique	Pression de gonflage
Tracteur	7 t 2			AV 230/95 R36 AR 270/95 R48	3 bar
Semoir de précision	900 kg	6 km/h	5 m 40	150/95 R15	1,5 bar
Pulvérisateur	3 t 5 + cuve de 4000L	10 km/h	36 m	270/95 R48	3 bar
Rampe traitement localisé	2t + cuve arrière 1300 L	10 km/h	16 m 20	/	
Bineuse	1 t 500	De 5 à 12 km/h suivant le stade de culture	5 m 40	/	
Robot FarmDroïd	900 kg	0,7 km/h	2 m 70	6.5 - 16	0,9 bar



Figure 1: Semoir de précision Kverneland



Figure 2: Bineuse inter-rang avec option moulinet Agronomic



Figure 3: Vue de détail de la bineuse inter-rang avec option moulinet Agronomic



Figure 4: Rampe de traitement localisé Sopema



Figure 5: Pulvérisateur John Deere

Document n° 19: Facteurs déterminant le risque de tassement

La structure du sol correspond au mode d'assemblage des particules du sol en agrégats. Le volume d'un sol bien structuré est formé à 50 % environ de pores, occupés par de l'air et/ou de l'eau.

Le tassement du sol correspond à une diminution de la porosité suite à l'application d'une pression sur le sol.

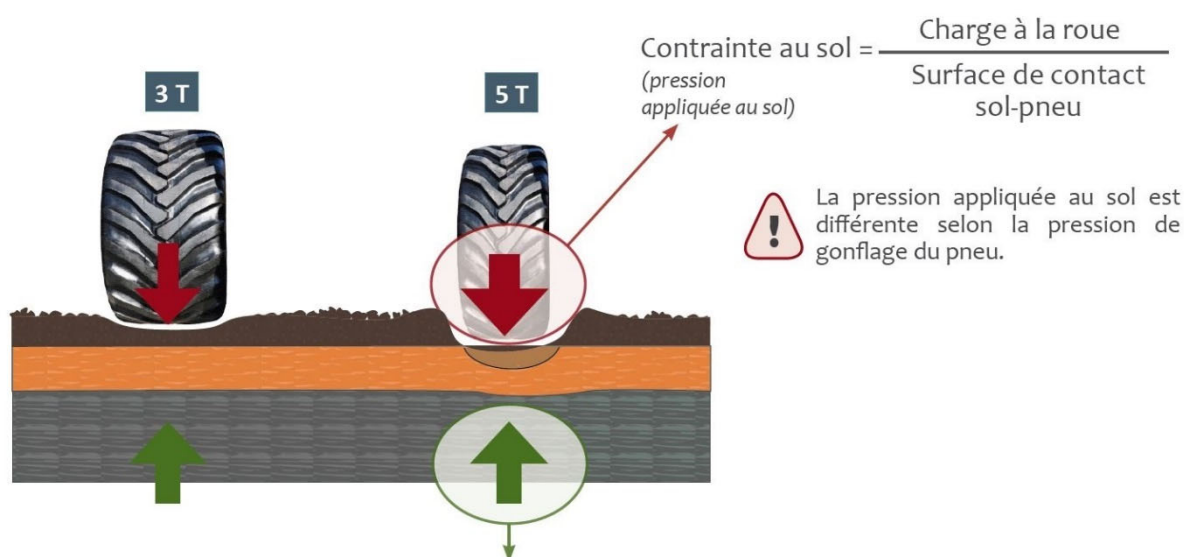
La préservation de la fertilité physique des sols est un enjeu majeur pour réduire la dépendance des systèmes aux intrants (notamment, fertilisants chimiques et eau d'irrigation), tout en maintenant un niveau de productivité élevé et en réduisant les impacts environnementaux.

Or, les tassements des sols aboutissent à une dégradation de la qualité des sols :

- la résistance à la pénétration plus élevée, limite l'enracinement des cultures ;
- la vitesse d'infiltration de l'eau est réduite ;
- le stockage de l'eau est moindre lorsque le tassement est très sévère ;
- l'activité biologique du sol est perturbée.



A. Définition du risque de tassement



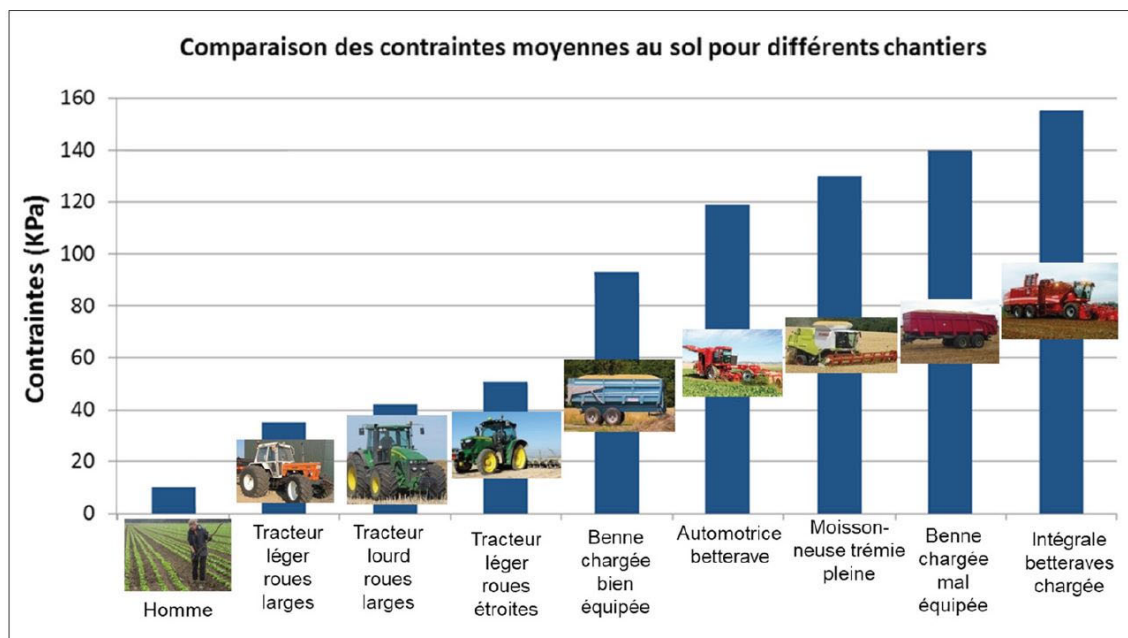
Résultante de l'équipement du matériel

Le pneumatique est l'interface qui répartit la pression au sol générée par le poids d'un engin. Le tassement du sol correspond à une déformation et à une perte de porosité plus ou moins réversible du matériau qui le constitue sous l'effet d'une contrainte (pression sous les roues d'un engin) supérieure à sa résistance mécanique.

La résistance du sol dépend principalement de son humidité, sa texture et de sa résistance mécanique (type de porosité et stabilité structurale).

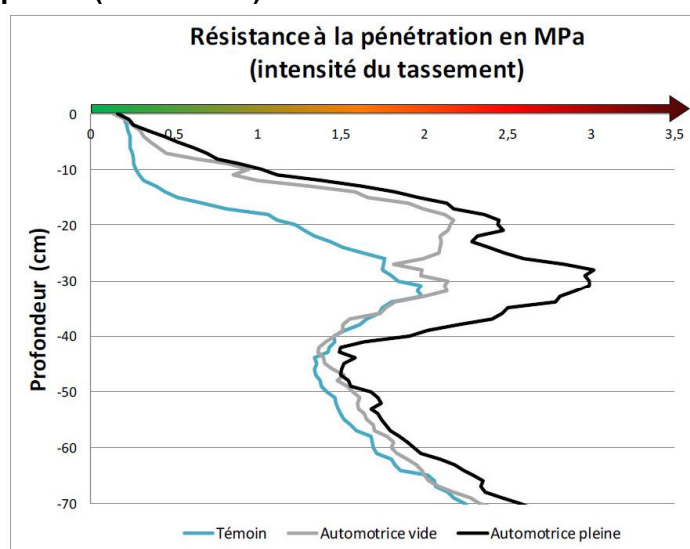
L'intensité du tassement dépend des contraintes appliquées et de la sensibilité du sol.

En parcelle agricole, les contraintes les plus élevées concernent les chantiers de récolte et le transport.



B. Effet de la charge par essieu

Illustration : Essai Sol-D'Phy, octobre 2015, sur sol limoneux humide en profondeur – arracheuse automotrice à pommes de terre - comparaison trémie vide (17 t/essieu) et trémie pleine (24 t/essieu)



A propos de la courbe :

Mesures pénétrométriques réalisées sur le passage de la roue arrière de l'automotrice, après arrachage.

Chaque courbe est la moyenne de 24 points de mesure.

L'intensité du tassement peut être évaluée selon la valeur pénétrométrique : plus elle est élevée, plus le sol est résistant à la pénétration et risque de limiter l'enracinement des cultures.

La profondeur atteinte par le tassement a été définie en fonction de l'allure des courbes pénétrométriques entre le témoin non roulé et le passage de roue : profondeur à laquelle les courbes se rejoignent.

A vide (17 t/essieu), le tassement engendré par le passage de l'automotrice atteint 25 à 30 cm de profondeur, alors que lorsque la trémie est pleine (24 t/essieu), le tassement atteint 40 cm de profondeur. La semelle de labour préexistante a été accentuée par le passage de l'automotrice trémie pleine.

Profondeur atteinte par le tassement selon la charge par essieu dans 8 situations dont l'humidité du sol est proche

Site	Sensibilité du milieu		Caractéristiques des chantiers		Profondeur atteinte par le tassement
	Type de sol	Humidité du sol en profondeur lors de l'intervention	Modalité	Charge par essieu	
1	Limon	21,5 % d'humidité (proche de la capacité au champ)	Passage de la benne pleine	10 t	25 cm
2		22,5 % d'humidité (Capacité au champ)	Passage Intégrale à betterave de 12 m3 pleine	14 t	20 cm
3		21,5 % d'humidité (proche de la capacité au champ)	1 passage de roue automotrice PdT vide (roue arrière)	17 t	25 cm
4		21,3 % d'humidité (proche de la capacité au champ)	1 passage de roue automotrice PdT vide (roue arrière)	17 t	28 cm
5		22,5 % d'humidité (Capacité au champ)	Passage de roue débardeuse à betterave de 22 m3 pleine	19,5 t	35 cm
6		21,5 % d'humidité (proche de la capacité au champ)	1 passage de roue automotrice PdT pleine (roue arrière)	24 t	35 cm
7		21,3 % d'humidité (proche de la capacité au champ)	1 passage de roue automotrice PdT pleine (roue arrière)	24 t	40 cm
8		22,8 % d'humidité (proche de la capacité au champ)	1 passage de roue intégrale à betterave pleine (roue arrière)	27 t	45 cm

Sur les sites en sols de limons, étudiés dans le projet Sol-D'Phy dont l'humidité du sol en profondeur était proche de la capacité au champ (sol humide mais ressuyé), l'augmentation de la charge par essieu augmente la profondeur atteinte par le tassement, en modifiant les propriétés physiques mesurées (résistance à la pénétration et densité apparente principalement).

Ne pas dépasser 17 t/essieu en cas d'intervention sur des sols limoneux et humides, pour éviter les tassements profonds, au-delà de 30 cm.

L'augmentation de la charge par essieu augmente la profondeur atteinte par le tassement lorsque le sol est humide.

C. Effet des pneumatiques

Dimension des pneumatiques

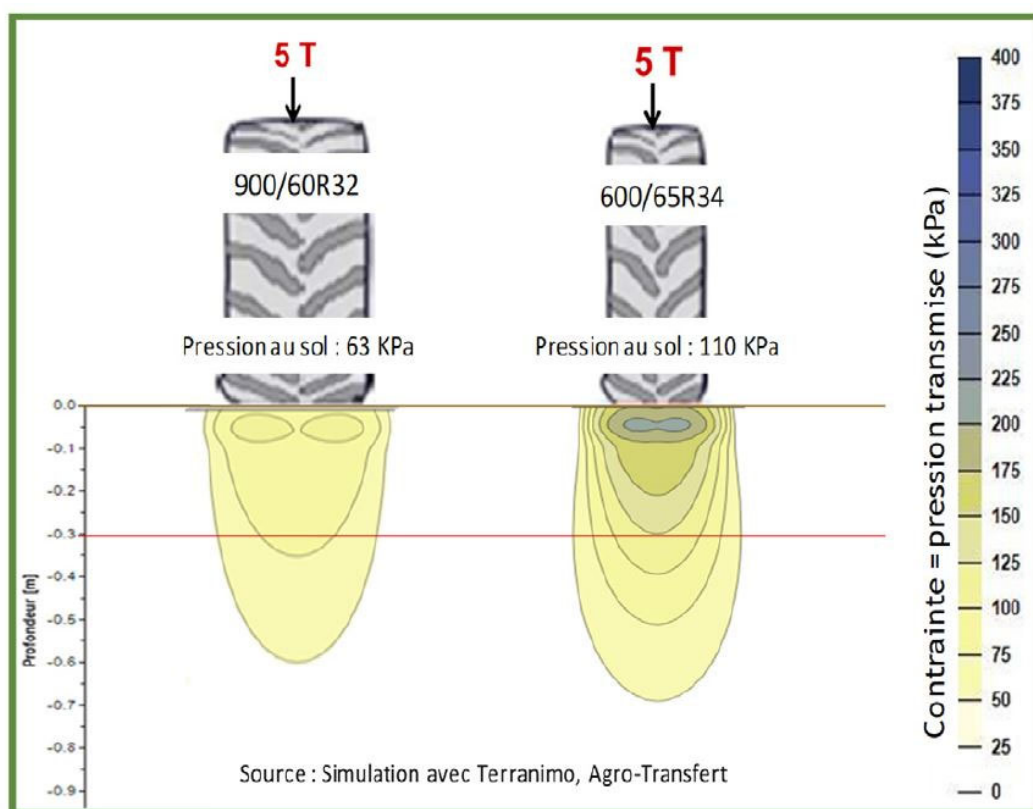


Figure 5: Impact du type de pneumatique sur les propagations des contraintes dans le sol

Impact du type de pneumatique

- Il détermine la pression au sol et l'intensité du tassement en surface. Ainsi, un pneumatique à grand volume d'air permet de diminuer la contrainte en surface via l'augmentation de la surface d'empreinte au sol.
- Il influence peu la propagation des contraintes en profondeur.

Pression de gonflage

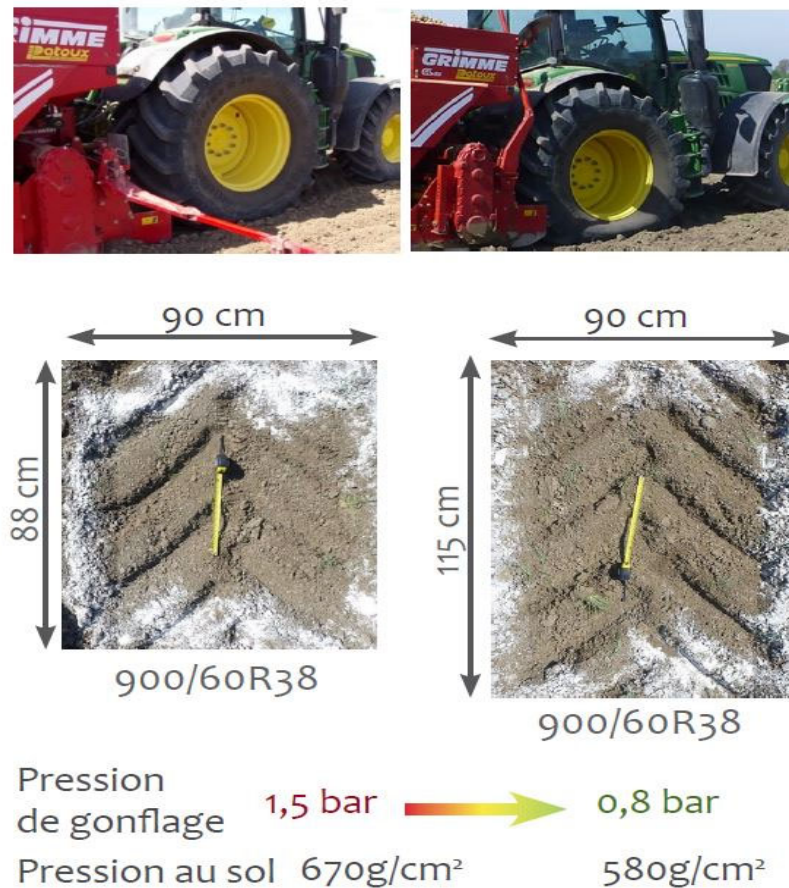
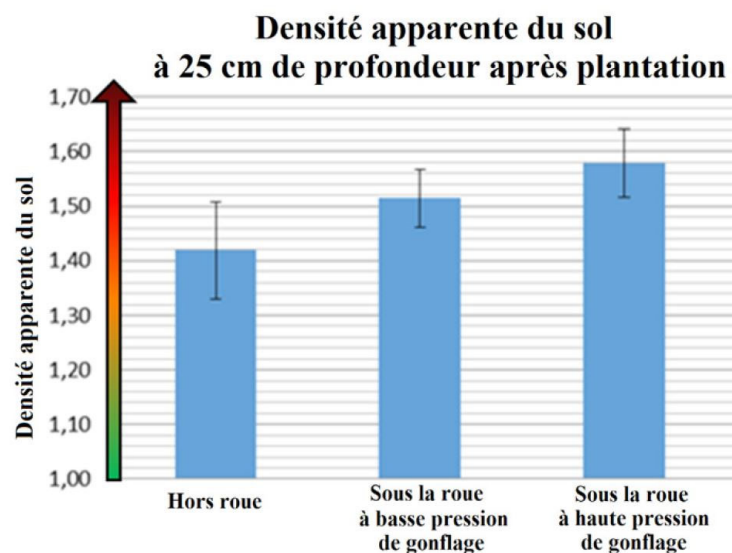


Figure 6: Impact de la pression de gonflage sur la surface d'empreinte et le tassement du sol - Essai Sol-D'Phy, mai 2016

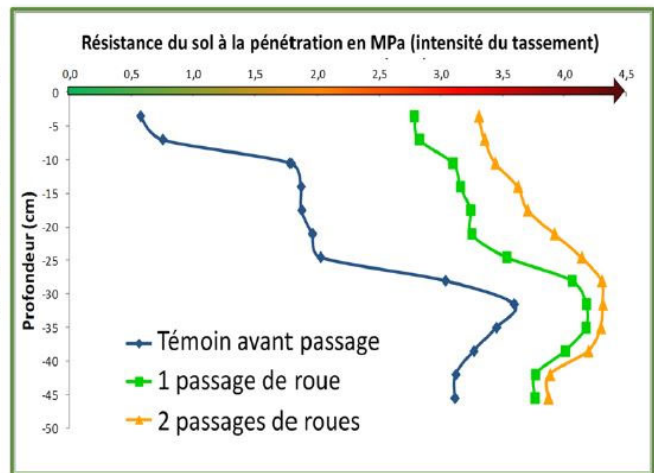


La diminution de la pression de gonflage augmente la surface d'empreinte du fait de l'écrasement du pneumatique. Pour un pneumatique donné, c'est alors principalement la longueur de l'empreinte qui varie. L'augmentation de la surface d'empreinte se traduit par une diminution de la pression exercée sur le sol et par une diminution du risque de tassement dans les 25 premiers cm du sol.

La combinaison type de pneumatique x pression de gonflage détermine la surface d'empreinte. Elle influence donc directement la contrainte au sol et détermine en grande partie le risque de tassement en surface.

D. Effet du nombre de passage

Illustration de l'impact d'un
ou de deux passages de roues
d'une arracheuse intégrale à
betterave
Essai Sol-D'Phy, novembre
2014, sur sol limoneux humide
en profondeur



Les passages de roues successifs sur une même surface de sol augmentent l'intensité du tassement, principalement en surface, sans augmenter la profondeur atteinte par les tassements sévères.

Le 1er passage est celui qui a le plus d'impact sur la structure du sol.

Les passages répétés de roues accentuent l'intensité du tassement créé par les passages précédents les plus lourds sans augmenter la profondeur de compactage atteinte sous le passage de roue comportant la charge par essieu la plus élevée. Cependant, ils n'affectent pas la profondeur atteinte par le tassement.