



Dialogue compétitif pour la fourniture de

Systemes mécatroniques: Robots modulaires pour des itinéraires agroécologiques de Pixel Farming

Programme Fonctionnel Détaillé (PFD)

**INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE POUR L'AGRICULTURE, L'ALIMENTATION ET
L'ENVIRONNEMENT - INRAE**

Etablissement Public à caractère Scientifique et Technologique

Centre INRAE Clermont-Auvergne-Rhône Alpes
9 Avenue Blaise Pascal, CS 20085 - 63178 Aubière

Le présent document décrit le besoin global de conception et de fourniture de systèmes mécatroniques pour robots agricoles de type manipulateurs mobiles pour une utilisation sur des cultures en Pixel Farming.

Il décrit les différentes parties d'un manipulateur mobile ainsi que les livrables attendus, et intègre le cahier des charges fonctionnel rédigé sous forme de tableaux présentés à la fin du document.

Table des matières

Table des matières

1. CONTEXTE	3
1.1. INRAE	3
1.2. Projets Tirrex et Ninsar	3
2. Description du besoin	5
2.1. Manipulateurs mobiles modulaires pour une culture en pixels	5
2.2. Composition du manipulateur mobile	6
2.3. Description fonctionnelle	7
2.3.1 Se mouvoir sur la parcelle: Plateforme mobile modulaire	7
2.3.2. Se déplacer et se positionner dans une micro parcelle: Manipulateur	10
2.3.3. Effectuer une tâche agricole localisée: Effecteur ou outil	12
2.3.4. Interagir avec un utilisateur et assurer la commande du système: unité de contrôle/communication	13
3. Tâche agricole cible	15
4. Livrables et accompagnement	16
4.1. Livrables	16
4.2. Sécurité du système	17
4.3. Livraison et mise en service	18
4.4. Formation	18
4.5. Maintenance	18
5. Cahier des charges fonctionnel	19

1. CONTEXTE

L'unité de recherche **TSCF**, Technologies et systèmes d'information pour les agro-systèmes d'**INRAE** (Centre Clermont Auvergne-Rhône-Alpes), dans le cadre de sa participation aux projets nationaux **Tirrex** et **Ninsar**, souhaite acquérir des plateformes robotiques originales pour tester et évaluer des itinéraires agroécologiques innovants conduits par des agroéquipements autonomes.

1.1. INRAE

INRAE¹, l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement, est un acteur majeur de la recherche et de l'innovation créé le 1er janvier 2020. Institut de recherche finalisé issu de la fusion entre l'Inra et Irstea, INRAE rassemble une communauté de 12 000 personnes, avec 202 unités de recherche et 42 unités expérimentales implantées dans toute la France. L'institut se positionne parmi les tout premiers leaders mondiaux en sciences agricoles et alimentaires, en sciences du végétal et de l'animal, et se classe 11ème mondial en écologie-environnement. INRAE a pour ambition d'être un acteur clé des transitions nécessaires pour répondre aux grands enjeux mondiaux. Face à l'augmentation de la population, au changement climatique, à la raréfaction des ressources et au déclin de la biodiversité, l'institut construit des solutions pour des agricultures multi-performantes, une alimentation de qualité et une gestion durable des ressources et des écosystèmes.

L'unité de recherche TSCF², Technologies et systèmes d'information pour les agro-systèmes, d'INRAE (Centre Clermont Auvergne-Rhône-Alpes) mène des travaux de recherches, en robotique agricole, en Internet des objets, en analyse et modélisation de l'environnement, en intégration et adoption de nouvelles technologies etc., qui ont comme finalité d'accélérer la transition agroécologique.

1.2. Projets Tirrex et Ninsar

Le projet Tirrex³ (*Technological Infrastructure for Robotics Research of Excellence*) vise à développer de nouvelles plateformes robotiques emblématiques ainsi qu'à mettre en place une coordination nationale de leur accès et de leur développement, tant sur les plans de l'accès physique, de l'accès numérique, des données ouvertes et des logiciels libres.

Le projet NINSAR⁴ (*New ItiNerarieS for Agroecology using cooperative Robots*) est un projet de recherche financé dans le cadre du programme national de recherche PEPR Agroécologie et Numérique. Il vise à concevoir, tester et déployer de nouveaux systèmes agricoles écologiques réalisables par un système autonome composé de plusieurs robots élémentaires associables, agissant à l'échelle de la plante.

¹ <http://www.inrae.fr>

² <https://tscf.clermont.hub.inrae.fr/>

³ <https://tirrex.fr/>

⁴ <https://www.pepr-agroekonum.fr/les-projets-finances/agroequipements/projets-cibles/ninsar>

L'enjeu de NINSAR est double :

- d'une part, accompagner la transition agroécologique en proposant de nouveaux itinéraires agroécologiques et des solutions robotiques capables de les mettre en oeuvre et conduire de manière autonome, sans augmenter la pénibilité du travail ni le besoin de main-d'oeuvre ;
- d'autre part, explorer le potentiel de la robotique, de la coopération et de la coordination multi-robots, de la perception intelligente, etc. afin d'assurer des interventions précises, fréquentes, localisées et respectueuses de l'environnement dans des milieux complexes.

Ce projet, qui implique de nombreuses équipes de recherche de 17 laboratoires (universitaires, INRIA, CNRS, CEA, INRAE, etc.) multidisciplinaires (agronomes, roboticiens, etc.), se structure autour de plusieurs chantiers, allant de la définition de nouveaux itinéraires culturels au développement de robots mobiles élémentaires dotés de capacités de préhension et manipulant de nouveaux outils pour agir sur le sol et la végétation.

Concept de pixel farming

Un des itinéraires culturels innovants proposés et mis en oeuvre dans le cadre du projet NINSAR est le "pixel farming" (ou "pixel cropping"). Il s'agit de repenser l'agencement spatial des cultures en abandonnant les grandes surfaces homogènes au profit d'une mosaïque de petits "pixels" agricoles pouvant accueillir des espèces végétales différentes côte à côte (voir la figure 1).

Une même parcelle pourra, par exemple, être composée d'un enchaînement de petits carrés de blé, de pois, de lin, de chou, de tomate, de basilic, de tagète, etc., chacun mesurant quelques dizaines de centimètres à quelques mètres. Cette diversité spatiale vise à maximiser les interactions bénéfiques entre les espèces, à réduire la propagation des ravageurs et des maladies, et à créer de nouveaux équilibres agronomiques et écologiques.



*Figure 1. Exemples de la répartition spatiale dans le pixel farming*⁵

Toutefois, ce type d'organisation rend difficile, voire impossible, l'utilisation d'agroéquipements classiques, trop grands, peu précis et conçus pour la culture en ligne et la monoculture. C'est là qu'intervient le besoin de plateformes mobiles modulaires pouvant

⁵ Sources des images (de gauche à droite): <https://groundcover.grdc.com.au/innovation/industry-insights/multi-pronged-trials-road-test-intercropping> , <https://pixelfarming.eu/> , <https://www.wur.nl/en/project/pixel-cropping.htm>

s'adapter à différentes répartitions spatiales des cultures et pouvant réaliser des tâches très localisées.

2. Description du besoin

*Ce Dialogue Compétitif vise à trouver un prestataire, ou un groupement de prestataires, ayant les compétences pour concevoir, fabriquer et fournir des **systèmes mécatroniques pour des plateformes robotiques modulaires, de type manipulateurs mobiles.***

2.1. Manipulateurs mobiles modulaires pour une culture en pixels

L'une des missions du projet est de développer une famille de robots élémentaires capables d'intervenir dans le contexte de la culture en pixel, le "pixel farming". Ces robots doivent pouvoir porter et manipuler des outils pouvant agir sur les plantes et le sol pour réaliser des tâches agricoles de précision.

La fonction principale de chaque robot élémentaire est de réaliser des tâches culturales en «pixel cropping», de manière individuelle ou en coopération avec d'autres robots (voir les exigences fonctionnelles dans la figure 2).

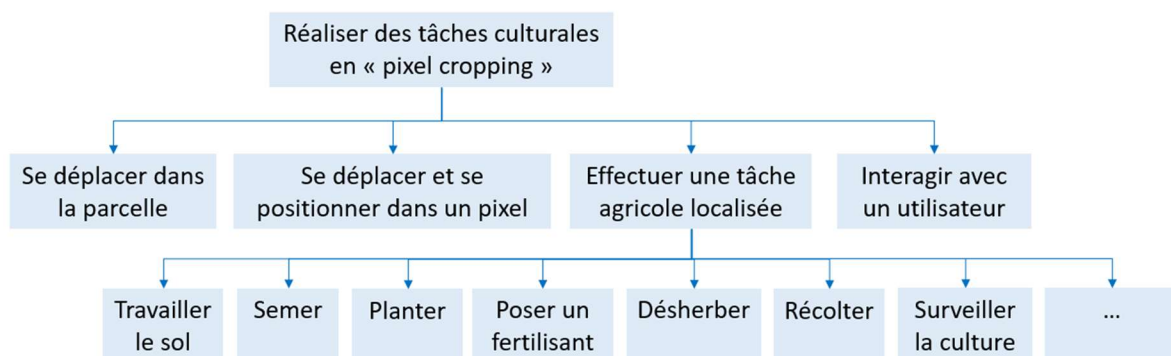


Figure 2. Aperçu de l'arbre fonctionnel du robot à concevoir

Un robot élémentaire, appelé aussi manipulateur mobile, devra pouvoir:

- se déplacer de façon autonome entre les micro-parcelles aux formes et aux espacements variés ;
- enjamber des cultures d'espèces variées, parfois hautes de plus de 1,5 mètre ;
- porter des outils adaptés à des interventions fines (semis, plantation, désherbage, surveillance, etc.) ;
- interagir de manière souple avec le sol et les plantes, parfois en coordination avec d'autres robots ou opérateurs humains.

Un exemple de la configuration d'une parcelle de pixel farming dans lequel le robot doit pouvoir se déplacer et réaliser des tâches culturales est montré dans la figure 3.

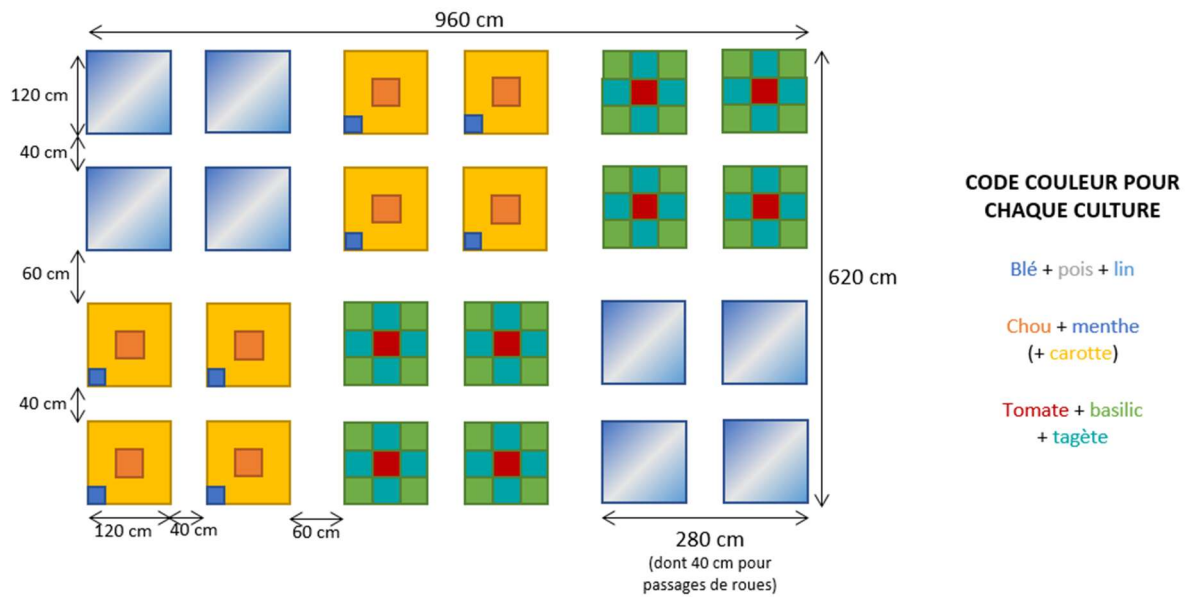


Figure 3. Exemple de répartition spatiale des cultures dans une parcelle de pixel farming

2.2. Composition du manipulateur mobile

Chaque robot élémentaire se compose d'une plateforme mobile modulaire pouvant porter un manipulateur, lequel porte à son tour un effecteur. Un robot se compose donc de trois parties fonctionnelles principales (voir la figure 4):

1- **Plateforme mobile modulaire** responsable de la **mobilité sur la parcelle** de pixel farming et entre la parcelle et le lieu de stockage.

2- **Manipulateur** porté par la plateforme mobile, responsable de la **mobilité sur un pixel**, donc du déplacement et du positionnement d'un outil à l'intérieur d'un pixel.

3- **Effecteur** (ou **outil**) porté par le manipulateur et pouvant entrer en contact avec les plantes et le sol pour **effectuer une tâche agricole** de préparation du sol, de semis, de plantation, de désherbage, de pose de fertilisant, de récolte, de préhension, etc.

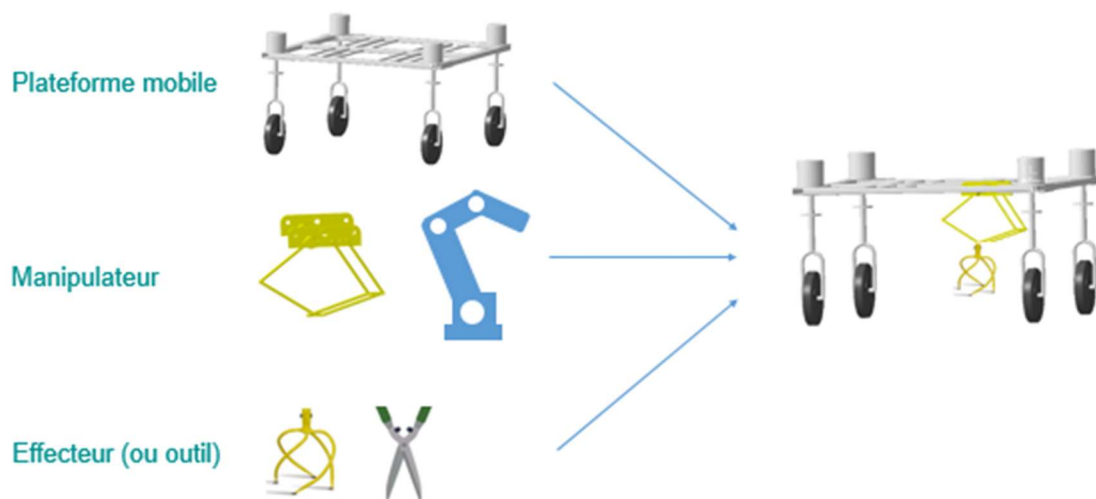


Figure 4. Les parties principales du robot

L'Inrae vise à acquérir, via ce dialogue compétitif les systèmes mécatroniques suivants :

- 3 plateformes mobiles : une plateforme en tranche ferme et 2 plateformes, identiques à la première, en tranches optionnelles. Ces plateformes devront être conçues et fabriquées conformément aux exigences et au cahier des charges détaillés dans la suite de ce document.
- 2 bras manipulateurs : chaque bras équipera une plateforme mobile. Les deux manipulateurs ne sont pas forcément identiques (ils peuvent avoir pour l'un une architecture parallèle et pour l'autre une architecture sérielle).
- 5-4 outils/effecteurs: 2 effecteurs en tranche ferme permettant de réaliser, de manière autonome ou coopérative, une tâche de plantation et 3-2 effecteurs en tranches optionnelles permettant de réaliser des tâches agricoles de préparation du sol, de semis, de désherbage, etc.

2.3. Description fonctionnelle

Cette partie du Programme Fonctionnel (PFD) décrit les principaux besoins et les exigences fonctionnelles que chaque partie du robot doit remplir. L'ensemble des exigences fonctionnelles et leurs caractéristiques sont détaillées dans le cahier des charges (partie 5.)

2.3.1 Se mouvoir sur la parcelle: Plateforme mobile modulaire

La plateforme mobile est le socle roulant du robot. Elle doit garantir une navigation stable, précise et sécurisée sur des terrains agricoles irréguliers et parfois pentus. La plateforme mobile doit pouvoir évoluer dans un contexte de pixel cropping mais aussi dans d'autres contextes de culture non conventionnelle (permaculture, ...).

Le déplacement dans des parcelles de pixel farming où les espèces cultivées et leur répartition spatiale peut varier d'une saison à l'autre ou bien dans des parcelles où des répartitions spatiales originales (en cercle, en couronnes, etc.) peuvent être mise en place entraîne des nombreuses contraintes en particulier:

- La plateforme doit pouvoir se déplacer entre un pixel et les pixels voisins, qu'ils soient situés à l'avant, à droite, à gauche ou à l'arrière, avec facilité et sans endommager les plantes d'intérêt (voir les trajectoires représentées dans la figure 5). Pour réaliser ces trajectoires, la plateforme doit disposer **4 roues directrices**. L'**angle de braquage** des roues doit disposer d'un débattement d'au moins **180°**.

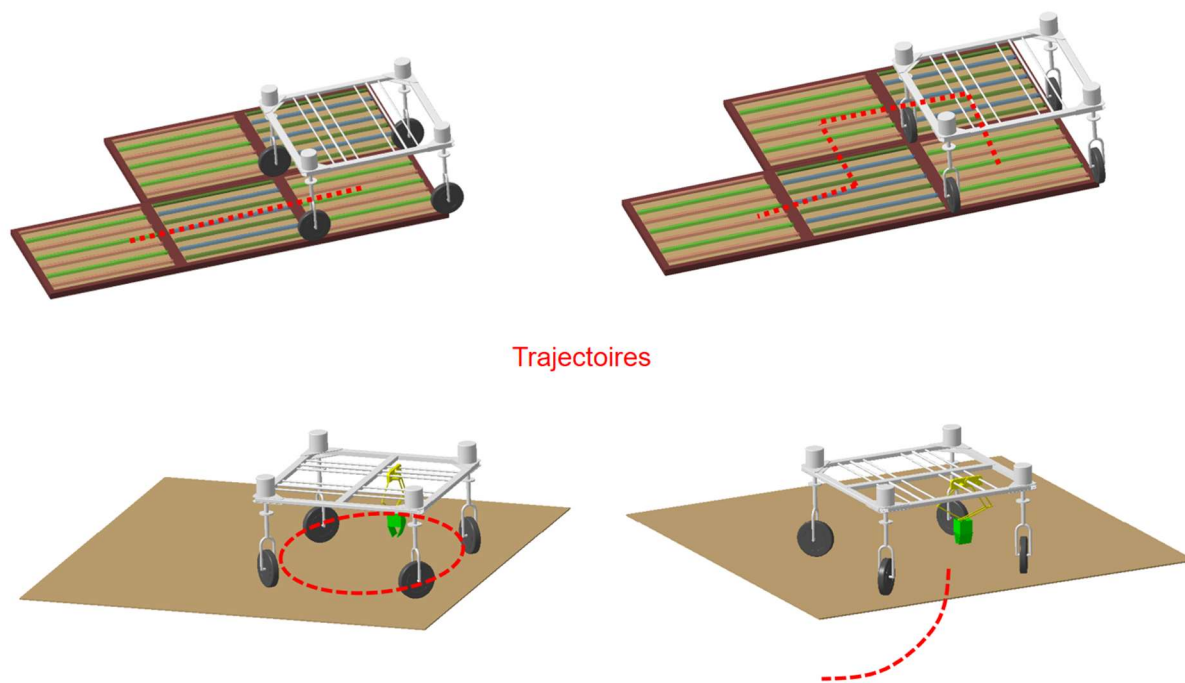


Figure 5. Exemples de trajectoires que la plateforme mobile doit pouvoir réaliser

- **La voie et l'empattement** de la plateforme mobile doivent être **réglables** afin de s'adapter à toute variation de la répartition spatiale de la culture comme la variation de la taille des pixels et la largeur des espaces entre eux. Une taille de pixels de 1.2m x 1.2m et un espacement de 0.4 m entre deux pixels voisins sont les valeurs moyennes à prendre en compte. La plateforme doit pouvoir enjamber des cultures d'une hauteur maximale 1.5 m.

Pour répondre à tout type de réglage géométrique nécessaire, **la plateforme doit être modulaire**. La **modularité** de la plateforme permet de varier ses paramètres par assemblage.

L'une des solutions de modularité possibles (voir la figure 6) consiste à disposer d'une plateforme mobile constituée de **4 modules-roue**, presque identiques, permettant des possibilités d'assemblage variées grâce à des liens mécaniques démontables et interchangeables.

Chaque **module-roue** comporte:

- les moteurs nécessaires pour assurer la rotation et le braquage de la roue
- les batteries pour alimenter les deux moteurs avec un module de gestion
- les composants électroniques nécessaires pour commander les actionneurs

- des prises de connexion CAN et/ou Ethernet pour assurer la communication avec un PC embarqué via une unité de contrôle/communication
- des boutons de mise sous tension et d'arrêt d'urgence (qui arrêtent les moteurs sans la partie commande)

Chaque module-roue doit pouvoir exécuter les consignes de braquage, de vitesse de rotation ou de couple du moteur de la roue qui lui sont communiquées. Un PC embarqué et un module de commande/communication assurent la coordination de l'ensemble des quatre modules-roue.

La plateforme doit pouvoir accueillir le PC embarqué et permettre sa connexion à une unité de contrôle/communication intégré à la plateforme mobile.

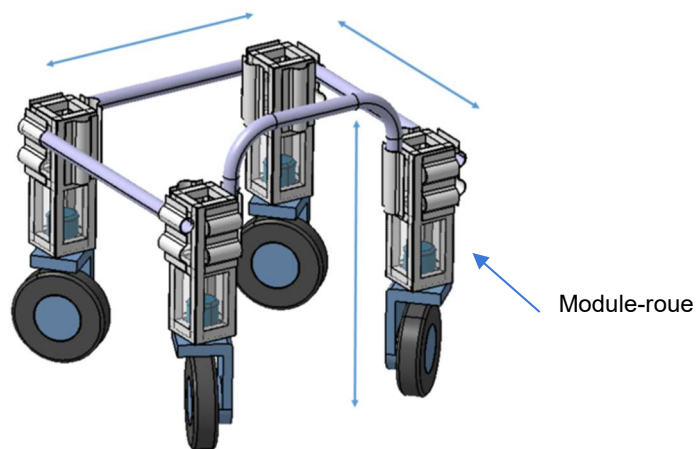


Figure 6. Concept d'une plateforme à voie, empattement et garde au sol variables

L'unité de contrôle/communication assure le fonctionnement en temps réel et permet d'effectuer une mise en marche et un arrêt d'urgence centralisés. Lors du démarrage, elle informe le PC embarqué de la fin de la phase d'initialisation des modules.

L'unité de contrôle/communication est connectée à l'ensemble des modules par des liens filaires (CAN, Ethernet, etc.). La solution de câblage reliant les modules à l'unité de contrôle doit pouvoir s'adapter à la variation de la configuration de la plateforme.

En cas de modification de la configuration de la plateforme mobile, par exemple en cas de variation de la voie ou de l'empattement, les nouveaux paramètres dimensionnels de la plateforme doivent pouvoir être facilement déduits (grâce à des marquages sur les liens rigides entre les modules, par exemple).

La plateforme mobile modulaire doit intégrer des interfaces de fixation pour supports de capteurs (GPS, LiDAR, etc.), dont les emplacements doivent permettre de faire varier la position des capteurs.

La plateforme mobile modulaire doit également pouvoir accueillir le manipulateur avec son unité de commande et son alimentation, ainsi que disposer d'interfaces de fixation pour des outils agricoles portés ou traînés (petit vibroculteur, réservoirs, etc.).

La vitesse de déplacement maximale de la plateforme sera de 12 km/h. L'ensemble des exigences auxquelles la plateforme doit répondre est donné dans le cahier des charges (voir partie 5).

Remarque:

Les caractéristiques décrites ci-dessus sont déjà présentes sur des plateformes robotiques existantes (voir le tableau 1 pour des exemples):

- Le Robot One de Pixel-Farming Robotics dispose de capacités de braquage qui lui permettent de se déplacer dans une parcelle de Pixel Farming;
- Les robots Amiga de Farm-ng, Thorvald de Sagas Robotics et Tripard 350 de Digital Workbench sont modulaires.

Robot One (PixelFarming Robotics)	pixelfarmingrobotics.com https://youtu.be/D3fVdvA0cAs https://pixelfarmingrobotics.com/wp-content/uploads/2025/01/tire-sizes.mp4
Amiga (Farm-ng)	https://farm-ng.com/ https://youtu.be/DU8MGAb1VM https://youtu.be/EtNXcjlmhxs
Thorvald (Sagas Robotics)	https://sagarobotics.com/ https://www.nmbu.no/en/research/thorvald-agricultural-robot
Tripard 350 (Digital Workbench)	https://digital-workbench.de/en/home/ https://youtu.be/D6tWraSjG9I

Tableau 1. Exemples de robots agricoles modulaires ou capables de se déplacer en pixel farming

2.3.2. Se déplacer et se positionner dans une micro parcelle:

Manipulateur

Le **manipulateur** est chargé de **déplacer** et de **positionner, avec précision**, un outil dans une micro parcelle (un pixel).

Il doit offrir une mobilité suffisante pour couvrir toute la zone cultivée tout en **préservant l'intégrité des plantes voisines** lors des déplacements.

Il doit aussi pouvoir se **replier** en dehors des phases de travail, pour ne pas gêner les déplacements sur la parcelle.

Il doit également pouvoir **porter une grande diversité d'effecteurs** et avoir une interface de fixation compatible avec ces effecteurs.

En termes de charge utile, le manipulateur doit pouvoir porter la masse des effecteurs et fournir les efforts nécessaires pour permettre à l'outil d'interagir avec l'environnement, comme, par exemple, pouvoir faire pénétrer une canne de plantation dans le sol.

L'espace de travail de chaque manipulateur doit inclure la surface d'un carré de culture de 1.2mx1.2m (c'est la taille moyenne d'un pixel dans notre cas). Les déplacements du manipulateur doivent inclure la possibilité de translations dans l'espace: la possibilité de translations sans rotation selon 3 axes perpendiculaires.

Le manipulateur, avec son unité de commande et son alimentation, sera porté par la plateforme mobile. Il devra donc disposer de l'interface nécessaire pour pouvoir être fixé de manière simple et précise sur cette plateforme.

La masse du manipulateur, de son alimentation et de son unité de commande doit être compatible avec la charge utile de la plateforme mobile. Ni la masse du manipulateur ni ses déplacements ne doivent altérer la stabilité de la plateforme.

Le manipulateur doit pouvoir communiquer avec le PC embarqué qui coordonne l'ensemble des modules. Des prises de connexion de type Ethernet, CAN, ou autre, doivent être disponibles sur le manipulateur pour le connecter à l'unité de contrôle/communication de la plateforme, elle-même reliée au PC.

Comme les autres modules actifs de la plateforme, le manipulateur doit disposer de boutons de mise sous tension et d'arrêt d'urgence, ainsi que d'un système de gestion de ses batteries.

L'offre doit inclure deux manipulateurs, par exemple, un **manipulateur en série et un manipulateur parallèle** vérifiant les exigences précédentes, pour équiper deux plateformes mobiles.

Les autres exigences relatives aux manipulateurs sont indiquées dans le cahier des charges (voir la partie 5).

Remarque:

De nombreux modèles de manipulateurs sont commercialisés (voir quelques exemples dans le tableau 2, ces exemples ne répondent pas nécessairement à notre cahier des charges). L'adoption d'un manipulateur existant nécessitera une adaptation pour permettre son intégration à la plateforme mobile.

Exemples de manipulateurs à architecture parallèle	
MPP3H (Yaskawa)	https://www.yaskawa.com/products/robotics/robots-with-iec/delta-robots

Quattro (Omron Industrial Automation)	https://automation.omron.com/fr/ca/products/family/quattro
Exemples de manipulateurs à architecture sérielle	
i4H (Omron Industrial Automation)	https://industrial.omron.fr/fr/products/i4h
UR10 (Universal Robots)	https://www.universal-robots.com/fr/produits/ur10e/
LRT-XYZ (zaber)	https://www.zaber.com/products/xy-xyz-gantry-stages/LRT-GANTRIES/configurator/XYZ-LRT-GANTRY?XTRAVEL=1000&YTRAVEL=1000&ZTRAVEL=100&XYPITCH=BH&ZPITCH=A&RISERS=none&ZCABLEGUIDE=no&JOY=no&ESTOP=no

Tableau 2. Exemple de manipulateurs à architectures parallèle et sérielle

2.3.3. Effectuer une tâche agricole localisée: Effecteur ou outil

L'**effecteur** est l'outil terminal porté par le bras manipulateur. Il permet d'effectuer l'action agricole proprement dite : **insérer une graine ou un plant dans le sol, arracher une adventice, pulvériser un liquide, prélever un échantillon, couper une plante**, etc.

L'outil peut intégrer un actionneur qui motorise un degré de liberté, par exemple pour l'ouverture et la fermeture d'une pince ou pour actionner la rotation de l'outil lui-même. L'alimentation et la commande de l'actionneur de l'effecteur devra être assurée par la même source d'énergie et système de commande que le manipulateur.

L'outil doit, donc, être compatible avec :

- les systèmes d'alimentation disponibles sur la plateforme (énergie électrique du manipulateur, réservoir de liquide);
- un support de fixation standard permettant de le fixer de manière simple sur le manipulateur et de le démonter;
- une interface de commande de son actionneur. Cette interface de commande peut varier selon le manipulateur choisi, mais les effecteurs doivent pouvoir s'adapter aux deux manipulateurs.

L'effecteur doit être facilement **remplaçable ou configurable**, pour permettre le changement de tâche (par exemple, passer du semis à la fertilisation).

Le choix des 5-4 effecteurs et de leurs caractéristiques précises n'est pas figé dans cette offre. Pour les deux effecteurs du tranche ferme, l'objectif à atteindre est de pouvoir réaliser la tâche agricole cible de plantation (partie 3).

Pour réaliser la tâche de plantation, les effecteurs doivent pouvoir (voir la partie 3):

- Creuser le sol pour préparer des emplacements pour les plants;
- Tenir et/ou transporter des objets fragiles pour pouvoir ramener un plant d'un emplacement donné à l'emplacement creusé dans le sol.

Remarque:

Pour certaines tâches, des outils de jardinage simples peuvent être adaptés en tant qu'effecteur du robot. Il existe de nombreux outils portatifs actifs et passifs conçus pour réaliser des actions culturales localisées. La plupart de ces outils sont prévus pour être manipulés par un opérateur humain. Les **concepts** adoptés dans ces outils peuvent être adaptés à des effecteurs robotisés. Quelques exemples sont listés dans le tableau 3.

Préparation du sol et désherbage mécanique	Bioculteur électrique Bineuse portatif électrique Désherbeur portatif électrique Transplantoir pneumatique Désherbeur thermique électrique Tarière électrique portatif ...
Semis et plantation	Semoir à pousser manuel Semoir pneumatique Canne à planter ...
Récolte	Mini batteuse sécateur électrique ...
Autre (effecteurs robotiques)	Pince flexible Pince à doigts souples Préhenseur souple Préhenseur à vide Effecteur double ...

Tableau 3. Exemples d'outils agricoles portatifs et d'effecteurs robotiques

2.3.4. Interagir avec un utilisateur et assurer la commande du système: unité de contrôle/communication

Le calcul des consignes (angle de braquage, vitesse de rotation des roues ou couple moteur) à transmettre à chaque module de la plateforme mobile, ainsi que les consignes à transmettre au manipulateur et à l'effecteur pour assurer la réalisation d'une mission est à la charge du PC embarqué et d'une unité de contrôle/communication.

En cas de variation de la configuration du robot, l'acquisition des nouveaux paramètres géométriques s'effectue via une interface présente sur le PC embarqué.

Chaque module reçoit les consignes de commande qui le concernent et envoie des informations sur son état (angles, vitesses de rotation, etc. mesurés par ces capteurs) et sur son niveau de charge.

L'unité de contrôle/communication (figure 7) fait le lien entre le PC embarqué et l'ensemble des modules du robot. Son rôle principal est de centraliser la mise en marche et l'arrêt de l'ensemble de modules. Elle communique avec les modules pour connaître leur état de fonctionnement (en service, en défaut ou déchargé, etc.) et reconnaître les modules connectés après chaque changement de configuration. En phase de démarrage, elle informe le PC de la fin des processus d'initialisation des modules.

La mise en arrêt d'urgence, ou la décharge, d'un module doit être communiquée et doit impliquer l'arrêt de l'ensemble des modules. C'est l'un des rôles de l'unité de contrôle/communication.

L'unité de contrôle/communication doit avoir une solution de type "watchdog" permettant de détecter les problèmes de perte de communication avec un module. Cette unité doit pouvoir arrêter l'ensemble des modules en cas de détection de perte de communication avec l'un d'entre eux.

L'unité de contrôle/communication doit être adaptée à un **système évolutif** pouvant avoir des configurations variées (elle doit par exemple pouvoir être utilisée sur une plateforme à 6 modules-roue ou sur une plateforme portant plusieurs manipulateurs).

Chaque module devra être équipé d'un bouton d'arrêt d'urgence qui permet d'arrêter ses actionneurs sans interrompre la partie logique. Une manette d'arrêt d'urgence doit permettre d'arrêter l'ensemble des modules à distance.

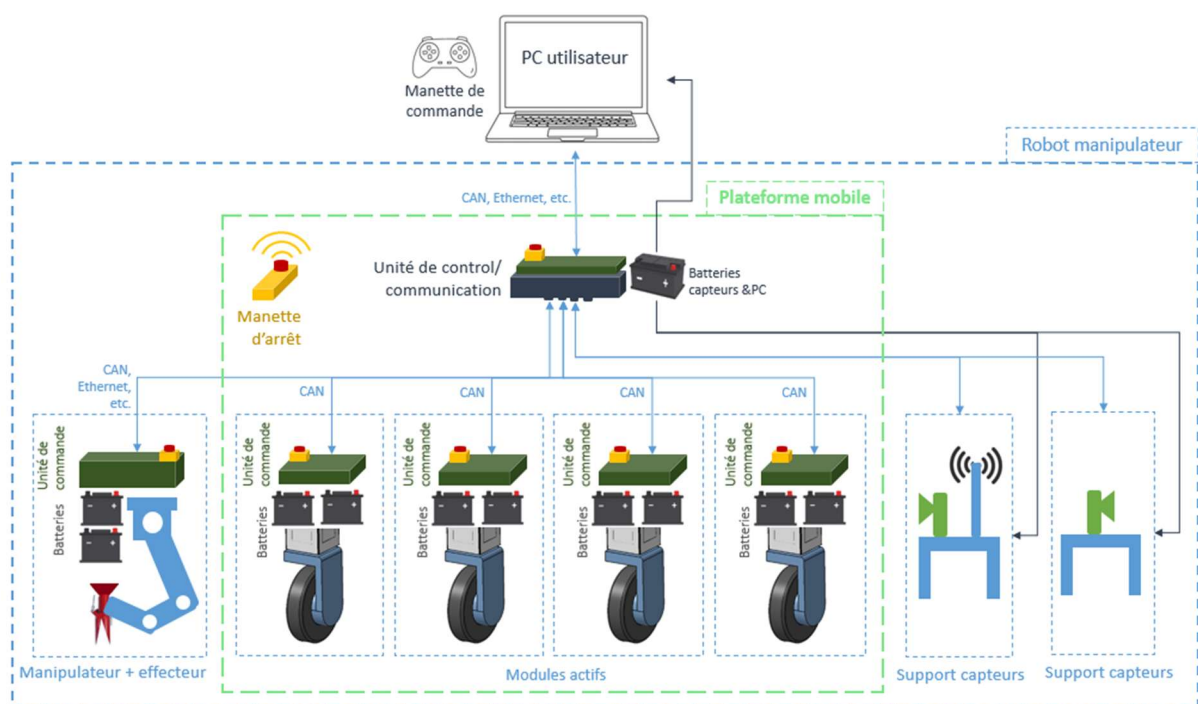


Figure 7. Architecture de communication

3. Tâche agricole cible

La première tâche agricole que les robots doivent pouvoir réaliser est la tâche de plantation de plants en godets (tomate, menthe et basilic).

Cette tâche peut être réalisée par un seul robot ou par deux robots travaillant en coopération. Les fonctions à assurer par les robots pour réaliser cette tâche sont les suivantes (voir la figure 8):

- Porter les plants (avoir un magasin de plants)
- Creuser le sol
- Retirer un plant du magasin
- Transporter le plant vers le sol
- Placer le plant dans la zone creusée du sol
- Vérifier/ajuster la mise en terre

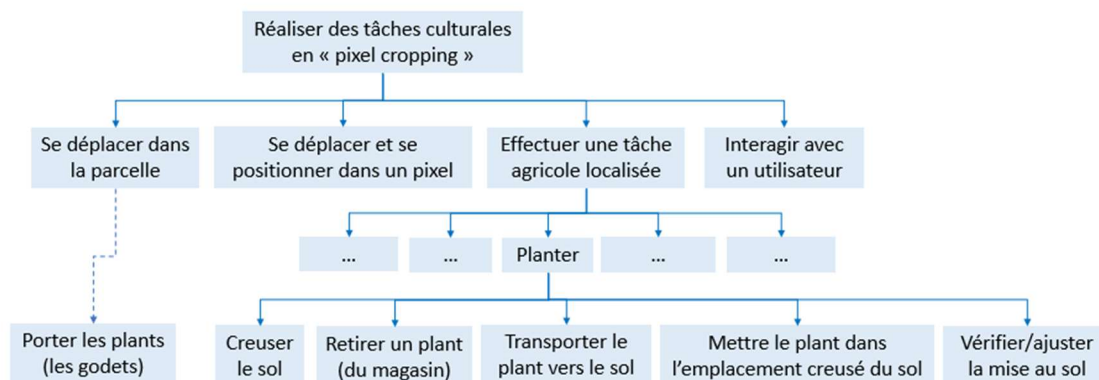


Figure 8. Arbre des exigences fonctionnelles pour une tâche de plantation

Plusieurs scénarios peuvent être envisagés pour réaliser la tâche de plantation ou pour la répartir, en sous-tâches, entre deux robots, par exemple:

Scénario 1

Plantation réalisée par deux robots qui se suivent ou qui travaillent côte à côte et qui se répartissent les tâches de la façon suivante:

- Robot 1 porte les plants sur un support, retire un plant après l'autre du support, place le plant à l'entrée d'une canne à planter (ou d'une conduite) portée par le deuxième robot
- Robot 2 a un effecteur de type canne à planter, c.à.d. une simple conduite qui se termine par une pince en forme conique pouvant facilement pénétrer dans le sol et créer un creux en s'ouvrant. Ce robot reçoit le plant à l'entrée de la conduite de la canne, pose la canne dans le sol, ouvre la pince de la canne pour permettre au plant de descendre et de se positionner dans l'emplacement creusé par la pince.

Scénario 2

Plantation réalisée par un seul robot muni d'un effecteur double permettant, d'un côté, de creuser des trous dans le sol et, de l'autre, de tenir des objets. Le robot porte les plants (les godets) sur un support, creuse le sol, retire un plant du support, le ramène

vers le sol pour le mettre dans la zone creusée. Cette dernière action peut être réalisée grâce aux déplacements du manipulateur ou par un mécanisme relié à l'effecteur (par exemple, un parcours dans une conduite).

Ces scénarios montrent que les zones de manœuvre des manipulateurs se situent sous la plateforme, au niveau du sol, ainsi qu'au niveau de la plateforme où se trouve le chargement (ici les godets).

Dans les deux scénarios présentés, deux fonctions principales sont attribuées aux effecteurs:

1- Creuser le sol, cette fonction peut être réalisée par pénétration et ouverture d'une pince conique (ou en forme de bec) ou par la rotation d'un élément tournant (tarière).

2- Tenir et/ou transporter des objets fragiles, cette fonction peut se réaliser par pincement, aspiration ou gravité à travers une conduite.

4. Livrables et accompagnement

4.1. Livrables

Dans le cadre de ce dialogue compétitif et comme précisé dans la partie 2.2, l'INRAE vise à acquérir des systèmes mécatroniques pour robots manipulateurs. Chaque robot est composé d'une plateforme mobile modulaire, d'un bras manipulateur et d'un ou de plusieurs outils. Le nombre de ces composants sera:

- 3 plateformes mobiles modulaire: 1 en tranche ferme et 2 en tranche optionnelle;
- 2 bras manipulateurs;
- ~~5~~4 effecteurs: 2 en tranche ferme et ~~3~~2 en tranche optionnelle.

Les composants commandés en option devront être confirmés dans un délai prédéfini.

Les systèmes attendus formeront des robots modulaires dans lesquels chaque module (modules de la plateforme mobile, manipulateur et effecteur) peut fonctionner de manière autonome, mais doit également être capable de communiquer avec les autres modules par le biais de messages et/ou de liens filaires afin de coordonner les actions et d'exécuter un scénario commun. La figure 9 montre les différentes tranches optionnelles. La tranche ferme inclut uniquement la partie matérielle du module de commande/communication et du PC embarqué, tandis que la partie logicielle forme une tranche optionnelle.

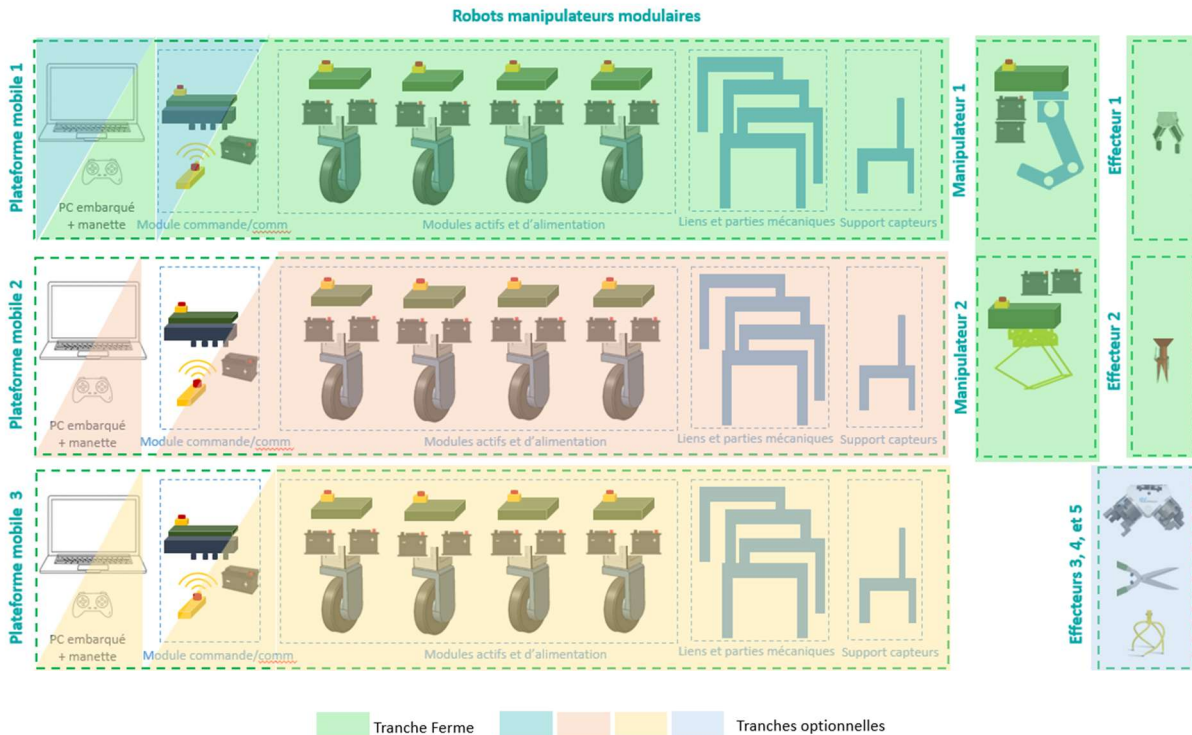


Figure 9. Livrables par tranches

4.2. Sécurité du système

Les robots et leurs modules doivent respecter les normes de sécurité (risques électriques, mécaniques, etc.). Une analyse des risques et/ou une AMDEC devra être réalisée sur l'ensemble des modules afin d'assurer la sécurité des utilisateurs lors des différentes phases d'utilisation:

- sécuriser la phase de mise en service;
- sécuriser la phase de chargement des batteries:
 - des prises de chargement facilement accessibles à l'utilisateur
 - des prises de chargement protégées et adaptées au travail en extérieur
 - etc.
- sécuriser la phase de modification de la configuration du robot, cette phase peut nécessiter le démontage, le déplacement et le remontage de modules. Le changement de configuration du robot se fera sur un sol stabilisé, dans un atelier équipé. Il doit pouvoir être réalisé par deux opérateurs au maximum en moins de deux heures. L'ensemble des opérations de cette phase doit être sécurisé:
 - L'opérateur doit être guidé dans la réalisation de ces tâches (guide utilisateur);
 - L'accès aux interfaces de fixation des modules doit être ergonomique et sécurisé;
 - Pendant la phase de changement de configuration, la structure de la plateforme, et chacun de ses modules, doivent rester stables, ou être stabilisés par des moyens à fournir;
 - Les modules doivent pouvoir être facilement déplacés par les opérateurs pour mettre en place la configuration souhaitée. Les

- moyens spécifiques nécessaires pour sécuriser ces déplacements (par exemple, support à roulettes) doivent être fournis;
 - Le démontage et le remontage des modules doivent être réalisés à l'aide d'un outillage standardisé ou spécifique fourni;
 - etc.
- sécuriser la phase de stockage des modules;
- sécuriser les phases de test d'une nouvelle configuration;
- sécuriser les phases de travail et de déplacement du robot:
 - L'assemblage des modules ne doit pas perdre en rigidité pendant le travail (par exemple à cause des vibrations);
 - Chaque module actif (comportant des actionneurs) doit être équipé d'un bouton d'arrêt d'urgence;
 - La plateforme mobile doit être équipée par un bouton d'arrêt d'urgence permettant d'arrêter l'ensemble des modules actifs (modules de la plateforme, manipulateur et effecteur);
 - Une manette d'arrêt d'urgence à distance doit permettre l'arrêter l'ensemble des modules;
 - etc.

4.3. Livraison et mise en service

La livraison des robots sur le site d'INRAE à Aubière (Clermont-Ferrand) sera assurée par le fournisseur. Le fournisseur doit effectuer des tests de validation et des démonstrations du bon fonctionnement des différents modules et du robot manipulateur dans sa totalité sur site.

Le fournisseur devra mettre à disposition l'ensemble des documents techniques relatifs aux différentes parties du robot.

4.4. Formation

Le fournisseur prendra en charge la formation du personnel d'INRAE à l'utilisation des robots modulaires. Des supports techniques de formation sont demandés.

4.5. Maintenance

Le fournisseur devra présenter les compétences et les moyens dont il dispose pour assurer un support technique permettant une bonne utilisation des systèmes, ainsi que pour résoudre les difficultés techniques et les éventuelles pannes. Les éléments suivants devront être mentionnés :

- L'organisation et la proximité des services de support;
- Disponibilité et maîtrise technique des opérations de maintenance par le fournisseur ou le groupement de fournisseurs, sans avoir à faire appel à une prestation externe;
- Disponibilité des fournitures et des pièces détachées;
- Délais de prise en charge;

- Coût horaire des différentes actions de maintenance;
- Coût de déplacement.

5. Cahier des charges fonctionnel

Cette partie a pour but de décrire précisément les exigences fonctionnelles liées aux systèmes mécatroniques constituant les robots manipulateurs: dimensions, mobilité, interfaces, alimentation, communication, sécurité, évolutivité, etc.

Dans le tableau suivant, les valeurs de la flexibilité des exigences correspondent à:

- 0 : exigence impérative;
- 1 : exigence peu négociable;
- 2 : exigence négociable;
- 3 : exigence très négociable.

F1. Se déplacer dans une parcelle de pixel-cropping (Plateforme mobile autonome)

La plateforme mobile assure la mobilité du système et supporte les autres sous-systèmes (manipulateur, outils, réservoirs, etc.). Elle doit pouvoir se déplacer efficacement sur le terrain agricole tout en s'adaptant aux contraintes physiques de l'environnement et aux besoins des outils embarqués. Elle constitue le socle du système, devant assurer la stabilité, les interfaces mécaniques et la sécurité nécessaires.

F1.1 S'adapter aux contraintes dimensionnelles et physiques du terrain

La plateforme doit respecter des contraintes géométriques et de masse pour pouvoir évoluer entre les cultures de pixel-cropping sans les endommager, et garantir sa stabilité sur sol irrégulier.

	Critère	Caractéristiques techniques exigées	Pour informations	Flexibilité
F1.1.1 Respecter le terrain et ses contraintes géométriques	Architecture	4 roues motrices et directrices	pour une adaptabilité à un espace cultivé formé de carrés de culture ("pixels" carrés)	0
	Voie	[1 m, 2 m (ou plus)] Réglable manuellement	Pour s'adapter à différentes tailles de "pixels" (espacement des zones de culture)	0
	Empattement	[1 m, 2 m (ou plus)] Réglable manuellement	Pour s'adapter à différentes tailles de "pixels" et permettre des déplacements longitudinaux et latéraux sans endommager la culture	0
	Garde au sol	jusqu'à 1,5 m	Permet de franchir des cultures hautes (jusqu'à 1.5 m) sans les endommager et d'accueillir un manipulateur sous la plateforme; la garde au sol peut être réglable; le centre de gravité du véhicule doit rester très bas.	2
	Forme rectangulaire	voie avant = voie arrière	Géométrie due aux principes même de pixel-farming	0
	Poids maximal	Masse totale < 700 kg (plateforme mobile nue, sans manipulateur et sans charge)	Limite pour minimiser la compaction du sol et faciliter le transport ; poids réduit également pour la sécurité en cas de pente.	1
	Encombrement maximal	Dimensions hors tout pour voie et empattement maximaux ≤ 2,4 m (longueur) × 2,4 m (largeur) × 2,5 m (hauteur)	Doit pouvoir manœuvrer dans des parcelles étroites et être transporté sur remorque routière standard (largeur ≤ 2,5 m)	2

	Largeur des roues	< 0,30 m	Permettre la circulation entre des carrés ("pixels") de culture espacés de 30 cm tout en limitant le contact avec les plantes	1
	Modularité et Reconfigurabilité	Architecture modulaire Configuration variable et évolutive Changement de la voie et de l'empattement	Plateforme constituée de modules indépendants Indépendance des réglages (de la voie, de l'empattement et de la garde au sol) pour permettre de réaliser des assemblages variés, adaptés à un environnement évolutif. Changement de configuration en moins de 2h. Ouverture à la possibilité de réaliser/tester des configurations originales (par exemple, une plateforme à 6 roues) Adaptabilité à plusieurs tailles de roues (2 tailles)	1

F1.2 Assurer la mobilité tout-terrain et la manœuvrabilité

La plateforme doit être capable de se déplacer sur des terrains agricoles variés (sol meuble, obstacles) en toute stabilité et avec une bonne manœuvrabilité.

	Critère	Caractéristiques techniques exigées	Pour informations	Flexibilité
F1.2.1 Évoluer sur terrain agricole irrégulier en garantissant son intégrité	Démarrage en pente	≥ 10 % (en montée)	Pouvoir monter, avec plateforme chargée, des pentes agricoles.	0
	Dévers minimal admissible	> 10 % (inclinaison latérale)	Conserver la stabilité en pente latérale (champ en dévers) sans risque de basculement même avec plateforme chargée et manipulateur en actionnement.	0
	Franchissement de marche	Obstacle vertical de 15 cm minimum	Capacité à passer des rochers ou sillons de labour d'environ 15 cm de haut.	2
	Franchissement d'ornière	Fosse/creux de 20 cm de profondeur et 20 cm de largeur	Ne pas se retrouver bloqué dans des trous ou fossés modestes ; garde au sol et suspensions adaptées.	2
	Contact roue/sol	Suspension pour chaque roue (ressort-amortisseur)	Assure un contact roue/sol des 4 roues et minimise les vibrations	2

	Freinage	Système de freinage pour chaque roue	Permettre l'arrêt de la plateforme en cas de besoin; freinage des roues en cas de coupure de l'alimentation électrique.	1
	prévention des collisions	Pars-choc tactiles (bumpers) reliés à l'Arrêt d'Urgence	Détecte les contacts physiques avec des obstacles et s'arrête en cas de contact	2
F1.2.2 Opérer efficacement sur le terrain de pixel-cropping	Rayon de braquage minimal	0 m Plateforme omnidirectionnelle (changement de direction et rotation sur place)	Permet des manœuvres omnidirectionnelles au sein d'un champ en pixel-cropping ainsi que des demi-tours et virages à 90°.	0
	Capacité de mouvement latéral	Angle de braquage de chaque roue $\approx 180^\circ$ Déplacement possible en X et Y indépendamment	Permet tous les déplacements nécessaires à l'intérieur d'un champ de pixel-cropping	0
	Vitesse maximale	jusqu'à 12 km/h	Pour les déplacements sur chemins, routes ou inter-parcelles.	2
	Vitesse de travail	jusqu'à 8 km/h	<i>Vitesse pendant les opérations culturales ; doit être modulable en fonction des tâches (avancer lentement pour travailler précisément).</i>	1
	Temps de réponse maximal aux commandes	400 ms temps de réponse d'une roue à un échelon de direction de 10° et à un échelon de vitesse de 1.5 rd/s	Réactivité dans l'exécution des consignes de commande de la vitesse et de la direction.	1
	Précision de l'asservissement	$\pm 0.2^\circ$ Précision de l'asservissement de direction $\pm 10\%$ Précision de l'asservissement de la vitesse	Précision de l'exécution des consignes de commande de la vitesse et de la direction.	1

F1.3 Assurer l'alimentation en énergie et l'autonomie

La plateforme fournit l'énergie nécessaire à son déplacement et porte l'alimentation nécessaire aux sous-systèmes embarqués (manipulateur, capteurs, actionneurs d'outils). Elle doit disposer d'une autonomie suffisante pour une journée de travail partielle et de capacités de recharge compatibles avec les cycles d'exploitation agricoles.

	<i>Critère</i>	<i>Caractéristiques techniques exigées</i>	<i>Pour informations</i>	<i>Flexibilité</i>
F1.3.1 Embarquer une source d'énergie adéquate et assurer une autonomie satisfaisante	Actionnement	Chaque roue doit posséder son propre système de motorisation pour la rotation et le braquage	Quatre roues motrices et directrices	0
	Type d'énergie	Motorisation électrique des roues et des équipements (batteries rechargeables)	Évite les nuisances (bruit, émission) et facilite la compatibilité avec les capteurs/électronique ; hybrides ou autres énergies possibles mais l'électrique est privilégié.	1
	Energie décentralisée	Chaque module actif de la plateforme ou embarqué (en particulier, les modules-roue et les manipulateurs) doit posséder sa source d'énergie et son module de gestion pour gérer la consommation de l'ensemble de ses batteries Une source d'énergie additionnelle doit être disponible sur la plateforme pour les besoins des capteurs, du PC embarqué, de l'unité de contrôle/communication, etc.	Energie décentralisée pour plus de flexibilité et de reconfigurabilité.	0
	Ports d'alimentation	Disponibilité sur la plateforme de ports d'alimentation standard (12-24 V DC) pour les capteurs, caméras, PC, etc., avec une énergie disponible suffisante (1 kWh).	Permet d'alimenter les capteurs et les systèmes embarqués non motorisés	0
	Autonomie de fonctionnement	≥ 8 heures en usage nominal (sur batteries pleines)	Doit pouvoir réaliser une demi-journée de travail de champs sans recharge.	0
	Temps de recharge	≤ 8 h pour une recharge complète	une charge rapide (≈1h) serait un plus.	1

	Modalité de recharge	recharge de l'ensemble des modules en parallèle via une prise de charge unique	Possibilité d'alimenter et de recharger électriquement les modules de la plateforme sur une prise secteur (220VAC), fourniture du chargeur externe si nécessaire	2
	Alimentation du manipulateur et de l'effecteur	Sources d'énergie (ex. batteries) embarquées	Chaque manipulateur aura sa source d'énergie (batteries) comme pour chaque module à actionneurs.	1
	Gestion de l'énergie	Les informations relatives au niveau de la batterie de chaque module doivent pouvoir être communiquées au PC embarqué	Pour surveiller la consommation en temps réel, éviter les coupures et optimiser la longévité des batteries (coupure automatique si batterie faible).	1

F1.4 Assurer un interfaçage modulaire pour les systèmes embarqués

La plateforme doit pouvoir embarquer et supporter différents équipements et charges utiles liés aux missions (par ex. le bras manipulateur, des outils, un réservoir, un magasin de plants, etc.), en garantissant la compatibilité mécanique et le bon fonctionnement d'ensemble.

		Critère	Caractéristiques techniques exigées	Pour informations	Flexibilité
F1.4.1 Permettre de porter les équipements et charges nécessaires aux opérations		Charge utile maximale	≥ 200 kg d'équipements/chargement embarqué	Capacité à supporter le manipulateur, son effecteur, et autres accessoires sans dégradation des performances.	1
		Répartition des masses	Points d'attache multiples pour l'équilibrage des charges (disposition symétrique des charges) Interface de fixation centrale pour charge importante	Garantit la stabilité quelle que soit la configuration (ex: manipulateur déployé d'un côté, réservoir de l'autre).	1
		Manipulateur embarqué	Capacité à accueillir un manipulateur (structure + alimentation)	L'interface mécanique (bridage, trous de fixation ou platine) et la rigidité du châssis doivent permettre d'installer les manipulateurs.	1

	Interface modulaire de fixation	Interfaces mécaniques universelles pour installer différents types de contenants (réservoirs, caisses, trémies...) sur la plateforme.	Des rails, platines, ou attaches standard doivent permettre de fixer et sécuriser les différents modules de manière réversible, pour passer rapidement d'un usage à l'autre.	2
	Support capteurs de vision	Support amovible pour mise de capteurs en hauteur	Par exemple, un mât ou un arceau pour monter un GPS, une caméra ou un LIDAR à ≈2 m de haut.	2
	Accessibilité par le manipulateur	Les emplacements des zones de stockage et ceux des interfaces de fixation du manipulateur doivent permettre une configuration dans laquelle ces zones sont dans le champ d'action du manipulateur	Pour que le bras puisse attraper les plants, déclencher la distribution d'un engrais, saisir un matériau sec. Les positions doivent donc être pensées en lien avec les points de fixation du manipulateur et son espace de travail.	2
	Espace dédié pour charge utile modulaire	Prévoir une ou plusieurs zones d'accueil pour des réservoirs, magasins ou trémies, avec un volume utile ≥ 25 L ou capacité ≥ 75 unités (ex. godets).	Ces volumes peuvent être utilisés pour : des plants, des liquides (fertilisant), des granulés (engrais sec), du paillage, etc. L'espace doit permettre de fixer solidement ces accessoires, et d'y accéder via l'effecteur selon la tâche à accomplir.	3

F1.5 Être adapté au travail en milieu agricole

La plateforme doit être adaptée à son environnement d'utilisation extérieur et ne pas nécessiter de conditions spéciales. Elle doit également être conçue de manière robuste pour résister aux aléas climatiques et pour faciliter l'entretien.

	Critère	Caractéristiques techniques exigées	Pour informations	Flexibilité
F1.5.1 Pouvoir fonctionner en extérieur dans des conditions variées	Plage de température	Fonctionnement garanti de -5°C à 40°C (températures ambiantes).	Couvre les conditions printanières et estivales de plantation ; le système doit survivre à de faibles gelées.	0
	Nettoyage et entretien	Surfaces et composants lavables à l'eau (sous pression modérée) ; accès facile aux pièces pour maintenance.	L'équipement devra être nettoyé de la boue et des résidus végétaux régulièrement. Conception prévoyant des carters de protection amovibles, des points de graissage accessibles, etc.	1

	Robustesse et durabilité	Durée de vie cible > 8 ans dans des conditions normales d'utilisation.	Matériaux résistants à la corrosion (structure en acier/alu traité), composants mécaniques dimensionnés pour des cycles répétés (tests en fatigue) ; fiabilité exigée.	2
	Résistance aux projections de débris	Structure fermée ou protégée (coques, capots, pare-boue) contre poussière, graviers, cailloux	En milieu agricole, les outils et le roulage génèrent des projections. Les capteurs et interfaces doivent être protégés.	1
	Résistance aux vibrations	Suspensions (type ressort/amortisseur) pour chaque roue + Absorbeur de vibration sur les zones sensibles	Les vibrations peuvent nuire à la précision du manipulateur et endommager les circuits ou fixations.	2
	Résistance aux UV / chaleur	Composants exposés certifiés UV (ISO 4892), peinture résistante, composants électroniques ventilés ou blindés $\geq 60^{\circ}\text{C}$	L'exposition solaire permanente dans les champs impose une résistance thermique et un vieillissement maîtrisé.	2
	Indice de protection minimal	IP 65	Protéger contre poussière, humidité, éclaboussures ; condition impérative pour fiabilité.	1

F2. Se déplacer et se positionner dans un pixel (Manipulateur)

Le manipulateur est chargé de déplacer et de positionner l'effecteur dans une zone limitée de la parcelle (un pixel). Il s'agit d'un sous-système interchangeable, pouvant être de type série (bras articulé) ou parallèle (Delta, etc.) selon les besoins. Le manipulateur (ou ensemble de manipulateurs) doit pouvoir atteindre les zones de travail requises, opérer avec précision, et permettre l'intégration de différents outils (effecteur) en bout de manipulateur pour diverses fonctions et tâches culturales (pose de plant, désherbage, taille, etc.).

F2.1 Atteindre l'intégralité de la zone de travail

La plateforme doit respecter des contraintes géométriques et de masse pour pouvoir évoluer entre les cultures de pixel-cropping sans les endommager, et garantir sa stabilité sur sol irrégulier.

		Critère	Caractéristiques techniques exigées	Pour informations	Flexibilité
F2.1.1 Permettre de positionner l'effecteur sur		Mobilité	Au moins 3 degrés de liberté pour déplacer l'outil en X, Y, Z (translation)	Le type de manipulateur n'est pas figé : un bras série 6 ddl ou un Delta à 4 ddl peuvent convenir. L'important est de pouvoir positionner l'effecteur librement dans l'espace de travail.	0

l'ensemble de la zone de travail requise sous la plateforme	Déplacement horizontale	> 1.2 m x 1.2 m Espace de travail couvrant, au minimum, la surface d'un pixel de 1.2 m x 1.2 m	Permet d'atteindre les points sur toute la surface du pixel sous la plateforme mobile.	1
	Amplitude de déplacement verticale (manipulateur 1)	> 0.3 m sur une surface de 1.2 m x 1.2 m	Déplacement vertical lors de la réalisation d'une tâche avec l'effecteur; l'amplitude de déplacement doit être adapté au besoin de déplacement des effecteurs	1
	Amplitude de déplacement verticale (manipulateur 2)	Du niveau de la plateforme (≈ 1,5 m de haut) jusqu'au sol (0 m).	Doit par exemple pouvoir attraper un plant sur le support de la plateforme et le déposer au fond d'un trou de plantation. Inclut une marge pour éventuellement enfoncer légèrement le plant dans le sol.	1
	Espaces de manœuvre	Sous la plateforme mobile (manipulateur parallèle ou série fixé en bas de la plateforme) Sur, et sous, la plateforme mobile (manipulateur série fixé au-dessus de la plateforme ou sur un côté de celle-ci)	Permet à l'effecteur d'atteindre les plantes et le sol du pixel se trouvant sous la plateforme mobile pour effectuer du désherbage localisé, poser un fertilisant, etc.; Permet à un effecteur d'attraper un plant sur le support de la plateforme et de le poser dans une canne à planter mise au sol.	1

F2.2 Porter des effecteurs/outils variés (polyvalence et modularité)

Le manipulateur doit pouvoir accepter différents effecteurs en bout de bras, en fonction des tâches à réaliser. Cela inclut par exemple un outil de préhension pour saisir les jeunes plants, un outil de creusement/plantoir, un sécateur pour la taille, etc. La conception doit donc être modulaire au niveau de l'effecteur.

		Critère	Caractéristiques techniques exigées	Pour informations	Flexibilité
F2.2.1 Permettre de porter divers outils et effecteurs en bout de bras	Charge utile maximale (du manipulateur 2)	>10 kg		Masse à déplacer qui peut correspondre à celle de l'effecteur avec un objet saisi par ce dernier.	1
	Force d'action (du manipulateur 1)	>300N		permet de faire pénétrer un effecteur (une plantoir, une canne à planter ou à semer) dans le sol.	2

	Interface d'outil standard	Montage de l'outil via une interface de fixation universelle (par ex. norme ISO robotique ou conception propriétaire fournie).	Facilite l'intégration d'outils variés sans modifications lourdes. Une interface mécanique et électrique standard permet de changer d'outil (plantoir, pince, sécateur) selon la mission.	1
	Changement d'outil rapide	Système de fixation rapide (du type attache rapide) pour changement d'outil en < 2 minutes.	Pour passer d'une tâche à une autre (ex: de la plantation à la pulvérisation) sans immobiliser le système trop longtemps. Peut nécessiter un kit d'outils pré-montés sur platines interchangeables.	3

F2.3 Réaliser des déplacements performants et précis

Le manipulateur doit permettre d'accomplir les gestes culturaux avec la précision et la rapidité nécessaires pour correctement assurer la tâche effectuée sans ralentir excessivement le cycle de travail. Cela implique une bonne répétabilité des mouvements, un contrôle précis de la position/force, et un temps de cycle optimisé.

		Critère	Caractéristiques techniques exigées	Pour informations	Flexibilité
F2.3.1 Déplacer et positionner un effecteur avec précision et efficacité dans la zone de culture	Précision de positionnement de l'effecteur	Erreur $\leq \pm 1$ mm au point cible (X, Y, Z)	Garantit la justesse d'action de l'outil (dépose, prélèvement, application...). Cette précision est nécessaire même sans vision embarquée.	1	
	Répétabilité des mouvements	Écart-type $\leq 0,5$ mm sur les cycles répétés	Gage de fiabilité pour les actions répétitives (épandage localisé, piquage, brossage...).	0	
	Contrôle de l'effort	Limiteur de force/couple actif ou passif (capteur, retour moteur, compliance)	Prévient les dommages sur les végétaux, les outils ou le sol en cas d'obstacle ou d'erreur.	2	
	Cadence d'opération	≥ 15 cycles complets par minute (selon action : dépose, aspersion, prélèvement...)	Correspond à une vitesse de travail importante par rapport au geste humain, ajustable selon la tâche et la charge.	1	
	Coordination avec la plateforme	Permettre des actions simultanées du manipulateur et de la plateforme	Pour un débit de chantier optimal, le bras peut opérer pendant que le système avance	1	

F2.4 Être adapté au porteur mobile et au travail en extérieur

Le manipulateur doit être adapté au porteur mobile en termes d'encombrement, de masse, d'interface de fixation, etc. Il doit aussi être adapté au travail en extérieur, à des variations des températures et des taux d'humidité et avoir un niveau de protection adapté pour permettre son nettoyage après les opérations en extérieur.

		Critère	Caractéristiques techniques exigées	Pour informations	Flexibilité
F2.4.1 Respecter les contraintes imposées par la plateforme mobile et le milieu extérieur et agricole		Encombrement global du manipulateur	Ne dépassant pas les dimensions de la plateforme mobile dans sa configuration étroite et Respectant la garde au sol	Permet de respecter les dimensions (hors tout) de la plateforme et de ne pas endommager les plantes hautes (jusqu'à 1.5 m) sur le trajet du robot.	1
		Masse du manipulateur	< 100 kg pour un manipulateur centré par rapport à la plateforme mobile <30 kg pour montage non centré	En plus du bras articulé, le manipulateur intègre une baie de commande et une solution d'alimentation (batteries). La masse de l'ensemble du manipulateur et sa répartition doivent être compatibles avec la charge admissible par la plateforme mobile et ne pas la déséquilibrer.	1
		Dynamique du manipulateur	La variation de la position du centre de masse de l'ensemble « plateforme + manipulateur » et les mouvements de ce dernier ne doivent pas altérer la stabilité de la plateforme	Permet d'assurer la stabilité du robot pour toutes les configurations du manipulateur et en lien avec la dynamique de ses mouvements.	1
		Alimentation	Source d'énergie (ex. batteries) dédiée au manipulateur et à l'effecteur Bouton de mise sous tension propre	Le manipulateur (avec l'effecteur) doit avoir sa propre source d'énergie et ne pas dépendre de la plateforme mobile.	1
		Interfaces de fixation	Interface de fixation standard, compatible avec celles présentes sur la plateforme mobile	Les deux manipulateurs doivent avoir la même interface pour une meilleure interchangeabilité.	0
		Interfaces de communication	Avoir des prises CAN ou Ethernet	Les connectiques nécessaires pour communiquer avec le PC embarqué (via une unité de communication): recevoir les consignes de commande; renseigner son état et l'état de ses batteries.	0

	Niveau de protection minimal	IP65	Permet une protection contre la poussière, l'humidité, les éclaboussures et permet un nettoyage à l'eau après des opérations salissantes	1
--	-------------------------------------	------	--	---

F3. Effectuer une tâche agricole localisée (effecteurs)

Les effecteurs interagissent avec l'environnement (le sol et les plantes) pour effectuer des tâches agricoles localisées. Les effecteurs sont portés par le manipulateur qui permet leur déplacement et positionnement. Un effecteur (comme une tête de binage rotative, une buse avec électrovanne, une canne à semer avec manette d'actionnement, etc.) nécessite, dans la majorité des cas, d'être actionné et a besoin, dans certain cas, d'être alimenté par une matière (un entrant, des graines, etc.).

F3.1 permettre une intégration au manipulateur mobile

Un effecteur doit être adapté au manipulateur en termes de masse, d'encombrement et d'interface de fixation. Il doit être alimenté en énergie par la batterie du manipulateur et pouvoir recevoir la matière nécessaire des réservoirs portés sur la plateforme

		Critère	Caractéristiques techniques exigées	Pour informations	Flexibilité
F3.1.1 S'adapter au manipulateur et à la plateforme mobile	Masse de l'effecteur	<5 kg		Compatible avec la charge utile du manipulateur	0
	Forme et encombrement de l'effecteur	Compatibles avec les déplacements du manipulateur		Les dimensions de l'effecteur, sa géométrie et l'emplacement de son interface de fixation doivent respecter et laisser libre l'espace nécessaire pour les déplacements du manipulateur	0
	Alimentation de l'effecteur	Même source d'énergie que le manipulateur Ligne d'alimentation électrique dédiée le long du bras (12 V, 24 V ou 48 V) Alimentation/compresseur hydraulique/pneumatique si requis.		Permet de fournir énergie et contrôle aux outils actifs (ex: un plantoir motorisé, un sécateur électrique). La présence de conduites pneumatiques ou hydrauliques est optionnelle, selon les outils envisagés.	2

	Interface d'acheminement indirect	Si l'accès direct est impossible, prévoir une interface technique (ex : tuyau, flexible, goulotte) reliant les zones de stockage à l'effecteur.	Par exemple, pour un liquide non accessible physiquement, un tuyau peut relier le réservoir porté par la plateforme mobile à l'effecteur (une buse portée par le manipulateur). L'interface doit être sécurisée, étanche, démontable, et synchronisable avec les commandes du système.	3

F3.2 Réaliser une tâche localisée de plantation

La tâche de plantation peut être réalisée par un seul robot ou par la coopération de deux robots. Pour réaliser cette tâche 2 fonctions, au moins, doivent être assurées par les effecteurs: creuser le sol et permettre la préhension et le transport d'un objet

		Critère	Caractéristiques techniques exigées	Pour informations	Flexibilité
F3.2.1 Creuser le sol	Dimension du creux	Diamètre <0.1 m Profondeur <0.1 m		Compatible pour la mise d'un godet	1
	Type du sol	Argileux		Sol dense et compact	2
F3.2.2 Permettre la préhension d'un objet fragile et déformable	Dimension de l'objet	<0.1 m x 0.1 m		Compatible avec la taille d'un godet	1
	Masse de l'objet à saisir	<1kg		permet de tenir un plant en godet ou en motte	1

	effort maximal de maintien	>20N variable en fonction de la masse, de la rigidité de l'objet et du coefficient de frottement (objet/préhenseur)	permet de tenir un godet	2
--	-----------------------------------	--	--------------------------	---

F4. Interagir avec un utilisateur et assurer la commande du robot

Un PC embarqué assure la commande du robot, la coordination de l'ensemble (plateforme + manipulateur + effecteur(s) + capteurs) et permet à l'opérateur de superviser ou de prendre la main si besoin. Chaque module actif du robot doit avoir son propre système de commande. La centralisation de la mise en marche et de l'arrêt de l'ensemble doit être possible. La réactivité en temps réel est cruciale pour un fonctionnement fiable.

F4.1 Communiquer et permettre le pilotage des modules

Le robot doit disposer de modes de pilotage manuels et automatiques, et d'une interface de communication pour échanger avec le poste de contrôle utilisateur.

		Critère	Caractéristiques techniques exigées	Pour informations	Flexibilité
F4.1.1 Pouvoir être contrôlé soit manuellement à distance, soit de façon autonome et offrir des interfaces de contrôle normalisées		Mode autonome	Pilotage automatique via un PC embarqué	Le robot exécute un plan de mission de manière autonome. Le PC embarqué calcule les consignes à communiquer à chaque module de la plateforme mobile pour assurer les déplacements souhaités.	0
		Mode manuel	Manette de contrôle déportée sans fil qui communique avec le PC embarqué	Communique avec le PC embarqué; Permet à un opérateur de diriger le robot (avancer, reculer, tourner, action du bras) en cas de besoin ou pour les phases d'approche délicates.	0
		Interface utilisateur	Le PC embarqué communique avec une unité de contrôle/communication L'unité de contrôle/communication communique avec l'ensemble des modules	L'unité de contrôle/communication permet de centraliser la communication entre, d'une part, le PC embarqué de l'utilisateur et, d'autre part, l'ensemble des modules (modules-roue, manipulateur, effecteur, capteurs, outils embarqués, etc.)	1

	Données communiquées	<p>Du PC embarqué vers les modules: angles de braquage; vitesses de rotation des roues; sens de rotation; couples moteurs (si disponible); position de l'effecteur; vitesse du manipulateur; action/arrêt de l'effecteur</p> <p>Des modules vers le PC (via l'unité de contrôle/communication): Angles de braquage des roues; vitesses angulaires des roues; sens de rotation; couples moteurs des roues; niveaux de charge des modules; l'état de marche (en service, en défaut, en arrêt d'urgence, etc.); état de fonctionnement de l'effecteur (rotation/arrêt ou pince ouverte/fermée); position de l'effecteur; couples moteurs du manipulateur; données des capteurs de perception (Lidar, Camera, etc.); données GPS</p> <p>De l'unité de contrôle/communication (sans le PC) vers les modules : mise en arrêt, mise en marche</p>	<p>Permet la commande des modules en communiquant les consignes de commande et en recevant les retours sur leur réponse</p> <p>Permet la supervision de bon fonctionnement du système, de l'état de charge des batteries, des défaillances et la mise en arrêt en cas de problème</p> <p>Permet le pilotage, la navigation et la réalisation d'une mission globale</p>	1
	Protocoles de communication	<p>Bus CAN et Ethernet pour les communications entre les modules, unité de contrôle/communication et PC embarqué</p> <p>Bus CAN et Ethernet disponibles pour les communications avec les actionneurs et capteurs au sein de chaque module.</p>	<p>Permet de commander moteurs, vérins, etc., via CANOpen ou autres protocoles de terrain, et d'intégrer des capteurs intelligents. Ethernet sert pour les flux de données importants (caméras, LIDAR).</p> <p>Liens physiques compatibles avec la variation de la configuration de la plateforme mobile et avec la diversité des points d'ancrage du manipulateur et des outils embarqués.</p>	1

		Temps réel et synchronisation	Réactivité temps réel suffisante pour la commande (≤ 400 ms temps de réponse des roues à un échelon de direction de 10° ou à un échelon de vitesse de rotation de 1.5 rd/s)	Les délais d'exécution des commandes (direction, vitesse, actionneurs) doivent être compatibles avec une application robotique temps réel. Un système de contrôle embarqué temps réel est nécessaire, il fait partie de l'unité de contrôle/communication.	1

F4.2 Assurer la sécurité et l'intégrité du système et des opérateurs

Le système de commande doit intégrer des fonctions de sécurité logicielle et matérielle pour prévenir les accidents ou les dommages en cas de défaillance. Cela comprend les arrêts d'urgence, la surveillance des communications, et l'exécution de plans de repli en cas de problème (fail-safe).

		Critère	Caractéristiques techniques exigées	Pour informations	Flexibilité
F4.2.1 Assurer la sécurité des opérateurs et de l'environnement lors des opérations de commande		Mise en marche	Interrupteur de mise sous tension disponible sur chaque module	Chaque module actif disposant d'une source d'énergie propre doit avoir son propre interrupteur de mise sous tension	1
		Arrêts d'urgence physiques	Bouton poussoir d'arrêt d'urgence sur chaque module motorisé de la machine Bouton poussoir d'arrêt d'urgence pouvant arrêter l'ensemble de modules doit être présent sur la plateforme mobile Manette d'arrêt d'urgence sans fil doit permettre d'arrêter l'ensemble de modules du robot	En cas de danger, l'opérateur ou un observateur doit pouvoir arrêter immédiatement le robot. L'arrêt d'un module de la plateforme mobile doit être communiqué et doit entraîner l'arrêt de l'ensemble des modules. Une radiocommande d'arrêt à distance, portée ≥ 100 m, permet d'intervenir même si on est éloigné.	0
		Vérification d'état	Auto-diagnostics continus au sein de chaque module actif (batteries, températures moteurs, etc.) Auto-diagnostics continus de l'ensemble des modules (batteries, connectivité, etc.)	Par exemple, si la batterie d'un module est quasi vide, un moteur surchauffe ou la communication avec un module n'est plus possible, le système doit se mettre en pause ou s'éteindre de manière sécurisée pour éviter des dommages.	1

		Arrêt sécurisé en cas de dépassement de seuils critiques.		
	Conformité & normes	Respect des normes de sécurité machines (marquage CE, ISO 3691-4 pour AGV, etc.).	Même si prototype, le design doit intégrer les principes des normes (par ex: performance level d pour les circuits d'arrêt d'urgence). Une évaluation des risques doit être menée et les solutions validées pour la sécurité fonctionnelle.	0
	Normes de sécurité et réglementation	Respect de normes de sécurité concernant l'utilisation d'outils de travail en milieux naturels Analyse de risques pour toutes les phases d'utilisation du système	Respect des normes de sécurité (risques électriques, mécaniques, etc.) Respect du règlement 2023/1230 concernant la sécurité des machines	0

F5. Travailler en coopération en fonctionnement multi-robots

Le projet vise à faire fonctionner plusieurs robots ensemble de manière coopérative pour accomplir des tâches complémentaires (par ex. l'un transporte les plants, l'autre distribue les plants). Le système doit donc être pensé pour collaborer avec d'autres unités, ce qui implique communication, compatibilité physique et coordination des actions.

F5.1 Communiquer entre robots

Le robot planteur doit pouvoir coordonner ses actions avec un robot partenaire (ex: robot approvisionneur de plants) sans interférence.

		Critère	Caractéristiques techniques exigées	Pour informations	Flexibilité
F5.1.1 Etre capable de fonctionner en tandem avec un autre robot de manière synchronisée		Compatibilité physique	Interfaces mécaniques compatibles entre robots pour le transfert de matériel.	Si un robot transporte les plants, il doit pouvoir les fournir physiquement au robot planteur. Par exemple, hauteur standardisée du bac de plants pour que le bras du planteur puisse y accéder, ou un système de dépôt des plants au sol que le planteur peut prendre. Ces aspects doivent être anticipés (dimensions correspondantes, position relative lors du travail).	2

	Communication inter-robots	Lien de communication direct (radio, Wi-Fi ad hoc) entre robots pour échange de données*	Par exemple, le robot planteur et le robot logisticien partagent en temps réel leurs positions, vitesses et état des stocks de plants. Ceci permet d'ajuster le rythme : le planteur peut demander à l'autre d'avancer ou de s'arrêter.	0
	Synchronisation des actions	Stratégie de coordination établie : le robot planteur peut envoyer des signaux du type "Plant inséré, suivant" au robot porteur, etc.*	Les rôles doivent être définis (qui lead, qui follow). Par ex, le robot porteur s'avance et dépose un plant à intervalles réguliers, le robot planteur suit et plante. Le système doit permettre cette logique (possiblement gérée par un programme central ou par négociation entre robots).	1
	Travail en zone partagée	Possibilité pour les deux robots d'évoluer dans la même parcelle sans collision, grâce à un partage de la zone de travail*	Ex: le robot porteur précède le planteur d'un rang, ou se positionne en bordure pour alimenter le planteur. Les robots doivent pouvoir se détecter mutuellement (via leurs capteurs ou communication) et éviter toute collision.	0

* Les exigences en couleur grise ne sont pas à la charge du fournisseur.