

Robotique agricole et génie électrique : enjeux pour l'agriculture de demain

Culture Sciences
de l'Ingénieur

La Revue
3E.I

Caroline ACANFORA - Mathieu LANOIR
Benoît POUBLAN - Kevin YVEN

Édité le
09/04/2026

école
normale
supérieure
paris-saclay

Caroline Acanfora est Responsable Pôle de Compétence Systèmes Embarqués et Algorithmes Robotiques, Mathieu Lanoir est Ingénieur R&D en Navigation et Systèmes Embarqués, Benoît Pouban est Responsable Produit et Agriculteur, et Kevin Yven est Ingénieur Sécurité Embarquée chez Agreenculture.

Cette ressource fait partie du N° 119 de La Revue 3EI du 2^{ème} trimestre 2026.

Le secteur agricole mondial est confronté à des enjeux complexes : répondre aux impératifs de souveraineté alimentaire tout en faisant face à une pénurie structurelle de main-d'œuvre qui fragilise les exploitations. Pour maintenir une production agricole compétitive, l'automatisation des tâches agricoles par des outils robotisés se présente comme un levier stratégique clé. Elle offre la promesse de libérer l'agriculteur des tâches les plus pénibles, répétitives ou chronophages, lui permettant de se recentrer sur la gestion agronomique et la valeur ajoutée de son exploitation.

Cette transition vers une agriculture de précision ne vise pas seulement l'efficacité quantitative : elle cherche à rationaliser chaque intervention et à optimiser l'usage des intrants, pour construire un modèle de production plus durable.

En agriculture, les systèmes robotisés évoluent dans des environnements ouverts et très variables (sols, cultures, météo, luminosité, ...) qui imposent des contraintes techniques importantes. Les fonctions de détection et de localisation sont au cœur de ces systèmes : elles garantissent la sécurité des personnes et des biens, permettent la précision des interventions et fournissent des données exploitables pour l'analyse et la planification.

L'objectif de cet article est d'aborder en particulier trois sujets : les enjeux de la localisation dans un contexte robotique, ceux de la détection dans un milieu agricole et nous ferons ensuite un focus sur les bus de communication terrain, largement utilisés dans l'agricole.

Cet article a été construit de manière collaborative, avec la participation de plusieurs experts au sein de l'entreprise Agreenculture. Fondée en 2016 et basée à Toulouse, la startup fournit aux constructeurs de machines et de tracteurs des solutions permettant de rendre autonomes des machines travaillant en milieu extérieur et hors-route. Grâce à l'AGCbox, les machines et tracteurs deviennent intelligents, communicants et capables de se déplacer avec précision et sécurité, en conformité avec la réglementation européenne, pour travailler dans une zone délimitée sans nécessiter la présence d'un opérateur sur site.

1 - Localisation en environnement agricole

L'agriculture de précision et la robotisation des exploitations agricoles imposent des exigences croissantes en matière de localisation des engins. Contrairement aux environnements industriels,

le milieu agricole présente des caractéristiques hostiles pour les systèmes de positionnement : vastes étendues non structurées, végétation dense, conditions météorologiques variables et absence d'infrastructure fixe. De plus, les contraintes agronomiques et de rendement pour optimiser le taux de remplissage de la parcelle, par exemple, nécessite que le parcours des machines soit extrêmement précis. Dans ce contexte, la question du positionnement - c'est à dire répondre à la question "Où se trouve la machine ?"- se révèle être un verrou technologique central pour l'autonomie des machines agricoles. Cet article propose un tour d'horizon des besoins, des défis et des solutions liés au positionnement en robotique agricole.

1.1 - À quoi sert le positionnement en robotique agricole ?

A. Guidage et contrôle de la machine

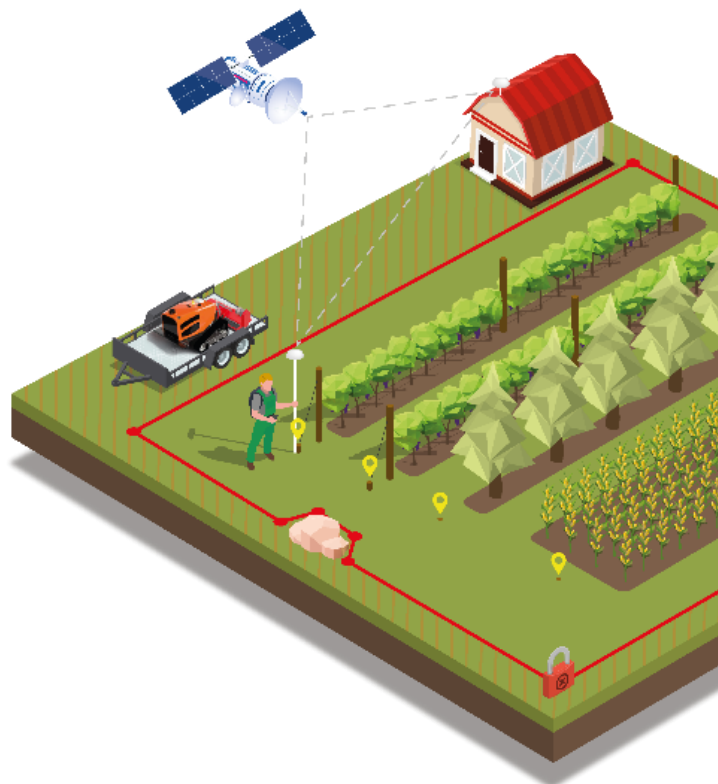


Figure 1 : Arpentage par Agreenculture

Dans le domaine agricole on utilise majoritairement de la géolocalisation ce qui veut dire que l'on connaît les positions GNSS de la machine et la position GNSS des cultures ou obstacles. Il faut passer par une phase de numérisation de la parcelle, que l'on nomme arpentage, qui nous donnera les coordonnées des éléments clés que la machine devra reconnaître.

La première fonction du positionnement est le guidage de la machine dans la parcelle. Selon le type d'engin (tracteur, chenillard, enjambeur) et le type de culture (rangées de cultures pérennes, grandes cultures, cultures maraîchères en buttes), les contraintes de trajectoire varient sensiblement. En grande culture, le guidage par GNSS-RTK (Real-Time Kinematic) permet d'assurer un suivi de ligne avec une précision centimétrique, réduisant les chevauchements et optimisant la consommation d'intrants. En arboriculture ou viticulture, la navigation inter-rangées peut nécessiter en complément du GNSS-RTK, une perception locale (LiDAR, vision) pour s'adapter à la géométrie variable des rangées.

Au-delà du guidage, la connaissance de la position permet de piloter précisément les outils : déclenchement des semoirs section par section, modulation de dose d'épandage selon les zones,

activation des buses de pulvérisation. Ces fonctions, regroupées sous le terme d'agriculture de précision, reposent entièrement sur la qualité du positionnement instantané de la machine.

B. Suivi agronomique et cartographie

Le positionnement est également la clé de voûte du suivi agronomique. En associant une coordonnée géographique à chaque observation terrain - indice de végétation, détection de maladie, rendement mesuré depuis la machine - il est possible de construire des cartes de parcelles qui serviront à moduler les interventions futures. Ces cartes constituent la mémoire numérique de l'exploitation.

Des solutions commerciales comme les plateformes de télédétection par drone reposent sur cette logique : la valeur agronomique de la donnée est nulle sans une géolocalisation fiable. Les variations temporelles importantes entre stades culturaux (sol nu, levée, couverture complète) rendent l'interprétation d'autant plus délicate si le géoréférencement est imprécis.

C. Sécurité et traçabilité

Une troisième dimension, concerne la sécurité opérationnelle. Pour qu'une machine autonome puisse opérer sans nécessiter la présence humaine permanente, il est nécessaire de garantir qu'elle ne sortira pas de sa zone de travail, et n'écrasera personne. Pour le premier point il est primordial de définir des périmètres de sécurité (les barrières peuvent être physiques ou virtuelles) pour garantir que la machine reste en permanence dans les zones autorisées et n'aille pas sur une route. Cette zone virtuelle est appelée géofencing, zone d'opération géoréférencée. Cela implique non seulement de connaître la position, mais aussi d'en certifier la validité à tout instant. La définition de cette zone lors de l'arpentage doit être au moins aussi précise, fiable et intègre que le positionnement en temps réel.

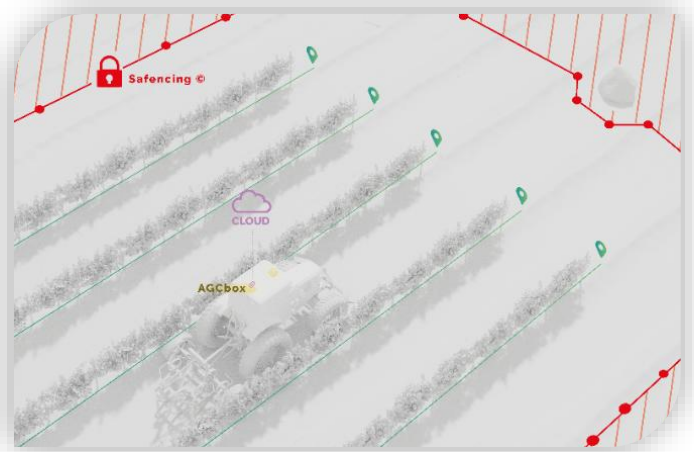


Figure 2 : Geofencing certifié - Safencing® par Agreenculture



Figure 3 : Schéma explication différence entre précision et intégrité - Agreenculture

C'est ici qu'intervient la notion d'intégrité : il ne suffit pas de fournir une position, il faut garantir, avec un niveau de confiance quantifié, que la position délivrée est juste à une incertitude connue près. Cette exigence, héritée de l'aviation (concept de RAIM - Receiver Autonomous Integrity Monitoring), commence à s'imposer dans le domaine agricole, notamment pour les applications à risque élevé (épandage de produits phytosanitaires près de zones protégées ou dangereuses).

1.2 - Les difficultés spécifiques du milieu agricole

A. Des exigences élevées en précision, disponibilité et intégrité

La performance d'un système de positionnement agricole s'évalue selon trois critères fondamentaux :

- **La précision** : selon l'application, les exigences vont du décimètre (suivi de rang) au centimètre (semis de précision, contrôle d'outil). Une erreur de positionnement peut se traduire par une perte de rendement ou une détérioration de la culture.
- **La disponibilité** : la machine ne doit pas être contrainte d'interrompre son travail faute de signal de positionnement. Le débit de chantier est un critère économique majeur pour l'agriculteur.
- **L'intégrité** : la capacité du système à détecter et signaler une défaillance dans les délais impartis est essentielle pour la sécurité (aspects légaux) mais aussi pour protéger l'intégrité physique de la culture et de son environnement.

La combinaison de ces trois exigences est particulièrement contraignante et constitue l'un des principaux défis de l'ingénierie du positionnement agricole.

B. Un environnement peu structuré et perturbateur

Le milieu agricole est complexe pour les systèmes de navigation. En grandes cultures, l'absence de références visuelles stables rend difficile toute localisation basée uniquement sur la perception : le sol nu au printemps, les rangs de blé en été et la terre travaillée en automne constituent des environnements visuellement très différents pour un même capteur.

En arboriculture ou dans les exploitations avec des haies et des bosquets, les obstacles végétaux constituent des sources de masquage et de multi-trajets pour les signaux GNSS. Les arbres en bord de parcelle, les structures métalliques (serres, silos) peuvent dégrader significativement la qualité du signal reçu. Ces dégradations peuvent se traduire par des sauts de position ou une perte temporaire du positionnement RTK, avec des conséquences directes sur le guidage.

Par ailleurs, les conditions d'humidité, de poussière et de vibrations mécaniques intenses (liées aux outils) sont des facteurs de vieillissement accéléré pour les capteurs embarqués, et doivent être prises en compte dès la conception du système.

Ces critères sont d'autant plus importants que la qualité perçue du système de localisation conditionne directement l'acceptabilité de la solution par les utilisateurs.

1.3 - Les solutions technologiques mises en œuvre

A. Les technologies de positionnement disponibles

1. GNSS-RTK

Le GNSS-RTK (Real-Time Kinematic) est aujourd'hui la technologie de référence pour le positionnement centimétrique en agriculture. Son principe repose sur la correction différentielle en temps réel : une station de base fixe, dont la position est connue avec précision, transmet des corrections à la machine mobile, qui les applique sur sa mesure de phase de porteuse pour atteindre une précision de l'ordre du centimètre dans un rayon de 10 à 15 km. Des réseaux de stations virtuelles (type NTRIP) permettent d'étendre cette couverture à l'échelle nationale.

Ses principales limites sont sa sensibilité aux perturbations du signal (masquage, multi-trajets) et sa faible fréquence de mise à jour (typiquement 10 Hz), insuffisante pour le contrôle en temps réel de systèmes dynamiques rapides.

2. Centrale inertielle (IMU / AHRS)

Les centrales inertielles (*Inertial Measurement Unit* ou *IMU*) combinent accéléromètres et gyroscopes pour estimer la vitesse angulaire et l'accélération de la machine. Elles fonctionnent à haute fréquence (typiquement 100 à 500 Hz) et ne dépendent d'aucune infrastructure externe. Associées à un filtre d'attitude (AHRS), elles permettent d'estimer les angles d'Euler (roulis, tangage, cap) de la machine, ce qui est particulièrement utile sur terrain vallonné pour corriger les effets de la pente et de dévers sur le guidage et le positionnement.

Leur principale limitation est la dérive temporelle inhérente à l'intégration numérique des mesures inertielles : sans recalage régulier par une source de mesures de position (GNSS), l'erreur de position croît rapidement. Leur utilisation en autonomie est donc limitée à des durées courtes, en complément d'autres capteurs. Rappelons que les IMU/AHRS ne mesurent pas de position mais "seulement" des déplacements. Même une centrale de grade militaire a besoin par principe d'un calage initial.

Contrairement à d'autres applications, l'utilisation d'un magnétomètre dans l'agricole est peu fréquente car l'environnement d'une machine agricole peut localement perturber le champ magnétique de celui-ci.

3. Odométrie

L'odométrie exploite les codeurs de roues ou de chenilles pour estimer le déplacement de la machine à partir de son modèle cinématique. Sa fréquence de mise à jour est intermédiaire (5 à 20 Hz). Son principal défaut en contexte agricole est la sensibilité au glissement des roues sur terrain meuble ou humide, phénomène fréquent qui peut introduire des erreurs significatives dans l'estimation de la trajectoire.

4. Perception extéroceptive (Caméra, LiDAR)

Les capteurs de perception, caméras monoculaires ou stéréo, LiDARs 2D ou 3D, permettent d'exploiter des amers naturels (rangs de culture, bords de parcelle, structures végétales) pour localiser la machine par rapport à son environnement immédiat. Ils sont particulièrement utiles pour le suivi de rang en viticulture ou arboriculture, où la structure répétitive de la végétation constitue un repère naturel fiable.

Leurs limites sont leur sensibilité aux conditions d'éclairage (caméras) et aux obstructions (poussière, feuilles), ainsi qu'une fréquence de traitement parfois faible selon la charge de calcul embarqué. Ils constituent néanmoins un complément précieux pour pallier les déficiences du GNSS en zones masquées.

B. La fusion de capteurs : vers une localisation robuste

Aucune des technologies présentées ci-dessus n'est suffisante isolément pour répondre aux exigences de précision, disponibilité et intégrité en toutes conditions. La solution opérationnelle réside dans la fusion de capteurs, qui consiste à combiner de manière optimale les informations issues de sources complémentaires.

1. Fusion pour le guidage haute fréquence

La combinaison IMU / Odométrie / GNSS RTK (éventuellement complétée par LiDAR) constitue l'architecture la plus répandue. Elle repose généralement sur un filtre de Kalman étendu (EKF) ou un filtre particulière, qui maintient une estimation probabiliste de l'état de la machine (position, vitesse, orientation). Le GNSS fournit la référence absolue à faible fréquence, tandis que l'IMU et l'odométrie assurent la propagation de l'état entre deux mesures GNSS, garantissant ainsi une **haute fréquence de commande** pour le guidage (> 50 Hz) et une continuité de service lors des coupures GNSS.

2. Intégrité et monitoring pour la sécurité

Le GNSS S-RTK reste la technologie la mieux maîtrisée pour la certification de la précision, il offre des indicateurs de qualité normalisés (HDOP, nombre de satellites...). Pour les applications de sécurité, plusieurs mécanismes complémentaires sont mis en œuvre inspirés de concepts utilisés en navigation aéronautique :

- Redondance : utilisation de deux antennes GNSS espacées sur la machine, permettant de vérifier la cohérence de la position et d'estimer le cap sans mouvement.
- Le monitoring continu de l'intégrité des données dès la phase d'arpentage de la parcelle, avec analyse des points de contrôle.
- La vérification de cohérence en temps réel entre les différentes sources (GNSS, IMU, odométrie) pour détecter toute anomalie avant qu'elle n'affecte le guidage.

Tableau 1 - Comparaison des technologies de positionnement agricole

Technologie	Précision	Fréquence	Disponibilité
GNSS- Safe RTK	-1 cm	-10 Hz	Moyenne (masquage)
IMU / AHRS	~ 100 mètres/min	> 100 Hz	Excellente
Odométrie	~5 cm (glissement)	~10 Hz	Excellente
LiDAR / Caméra	Contextuelle	5-30 Hz	Variable
Fusion IMU+GNSS+ODO	~2 cm (fusionné)	> 50 Hz ;	Très bonne

En conclusion, le positionnement en robotique agricole est un domaine à la croisée de la géodésie, de la navigation inertielle, de la perception robotique et de la théorie de l'estimation. L'architecture de fusion GNSS-RTK / IMU / odométrie, complétée par des capteurs de perception pour les environnements dégradés, s'impose aujourd'hui comme la solution de référence pour les systèmes autonomes embarqués sur engins agricoles.

Les défis actuels portent notamment sur l'extension de l'intégrité au niveau système (au-delà du seul GNSS), l'adaptation des algorithmes de fusion à la diversité des modèles cinématiques des machines agricoles, et la robustesse aux conditions extrêmes du terrain.

2 - Détection et sécurité

Nous avons vu dans le chapitre précédent que l'une des conditions à remplir pour pouvoir laisser une machine autonome agricole est qu'elle n'entraîne pas de collision. Une fonction nécessaire à la robotique agricole est donc la détection. Dès lors qu'un engin opère sans conducteur, la capacité à détecter un obstacle inattendu et à y réagir de manière appropriée devient une exigence de

sécurité fondamentale, à la fois pour protéger les personnes présentes dans l'environnement de la machine, préserver les cultures et les biens, et satisfaire aux obligations réglementaires croissantes du secteur.

La détection d'obstacles en milieu agricole est cependant un problème bien plus difficile qu'il n'y paraît. Contrairement à un entrepôt logistique ou une route balisée, un champ est par nature un environnement non structuré, dynamique et fortement variable selon les saisons, les cultures et les conditions météorologiques. Les solutions développées pour d'autres secteurs comme l'automobile, l'industrie, la robotique indoor, ne se transposent pas directement. Elles doivent être repensées, combinées et validées dans des conditions d'utilisation qui n'ont pas d'équivalent ailleurs.

De plus en robotique agricole, le porteur (tracteur, robot) n'est pas le seul élément que nous devons sécuriser. Les outils (hermes, semoir, outils de travail du sol, pulvérisateurs, etc.) ne doivent pas entrer en collision ou comporter de risques pour leurs environnements.

2.1 - Que cherche-t-on à détecter, et pourquoi est-ce difficile ?

A. Une grande diversité d'obstacles

La première difficulté tient à l'hétérogénéité des obstacles susceptibles d'être rencontrés dans un contexte agricole. On peut les regrouper en quatre catégories principales :

- **Personnes** : promeneurs, riverains, travailleurs intervenant dans la parcelle, enfants. C'est la catégorie la plus critique sur le plan de la sécurité, et celle qui exige le niveau de fiabilité de détection le plus élevé. La complexité vient du fait qu'un humain peut être partiellement dissimulé dans les rangs d'une culture haute (maïs, tournesol) ou encore en mouvement rapide.
- **Animaux** : chevreuils, sangliers, lièvres, mais aussi animaux d'élevage en cas de clôture défaillante. Leur comportement imprévisible ou leur camouflage dans l'environnement en font des cibles particulièrement délicates pour les capteurs.
- **Objets et débris** : pierres émergentes, voitures garées, outils oubliés, palettes, souches, câbles d'irrigation. Ces obstacles statiques sont souvent de petite taille ou partiellement enfouis, ce qui limite leur détectabilité par les capteurs à distance.
- **Végétation** : branches basses, haies en limite de parcelle, cultures elles-mêmes. Cette catégorie est la source principale de faux positifs, car la végétation est omniprésente, en mouvement constant sous l'effet du vent, et évolue morphologiquement tout au long de la saison.

B. Le défi de la disponibilité opérationnelle

Au-delà de la diversité des cibles, la contrainte opérationnelle la plus structurante est celle de la disponibilité : un système de détection qui arrête la machine à chaque rafale de vent dans les feuilles, à chaque motte projetée par l'outil, ou à chaque oiseau traversant le champ est inutilisable en conditions réelles. L'agriculteur, dont l'activité est soumise à des fenêtres météorologiques étroites et à des impératifs de débit de chantier, n'aura pas l'utilité d'un système qui dégrade la productivité de manière significative.

On touche ici à un arbitrage fondamental en ingénierie de la sécurité : la tension entre **sensibilité** (ne rien laisser passer) et **spécificité** (ne pas générer de fausses alarmes). En agriculture, la densité d'éléments végétaux, de variations de sol et de conditions changeantes est telle que même un taux

de faux positifs faible en apparence peut conduire à plusieurs dizaines d'arrêts intempestifs par heure de travail.

La réponse à cette contrainte passe par des architectures de détection intelligentes, capables de contextualiser les alarmes et de distinguer un obstacle réel d'un artefact environnemental.

C. Stratégies de sécurisation

Face à cette double contrainte de fiabilité maximale sur les cibles critiques et tolérance aux éléments non dangereux, deux grands principes architecturaux structurent les systèmes de détection agricoles :

- **Redondance des capteurs** : plusieurs capteurs de technologies différentes couvrent simultanément la même zone de surveillance. Une alarme n'est déclenchée que si plusieurs capteurs convergent vers la même conclusion. Cette approche réduit drastiquement les faux positifs sans sacrifier la sensibilité sur les vraies détections.
- **Réactions automatiques graduées** : plutôt qu'un simple arrêt d'urgence, les systèmes modernes implémentent une chaîne de réactions proportionnelles au niveau de certitude. Une détection incertaine déclenche un ralentissement préventif ; une détection confirmée d'un obstacle critique provoque l'arrêt complet. Cette graduation préserve la disponibilité opérationnelle tout en garantissant la sécurité.

2.2 - Les technologies de capteurs pour la détection d'obstacles

Plusieurs technologies de capteurs ressortent dans le cadre de la détection pour la sécurité. Nous allons en détailler les principales.

A. LiDAR

Principes et atouts

Le LiDAR (Light Detection And Ranging) émet des impulsions laser et mesure le temps de retour pour reconstituer un nuage de points 3D de l'environnement. C'est aujourd'hui la technologie de référence pour la détection d'obstacles en robotique mobile extérieure, et son adoption dans le machinisme agricole s'accélère.

Ses principaux atouts dans un contexte agricole sont :

- Nuage de points haute résolution : la densité du nuage permet de restituer fidèlement la géométrie des obstacles, même de faible dimension (un être humain assis au sol, une pierre de 20 cm).
- Champ de vision très large : les LiDARs rotatifs couvrent jusqu'à 360° en azimut, offrant une surveillance périmétrique complète autour de la machine sans zone aveugle latérale.
- Robustesse aux conditions climatiques : contrairement aux caméras, le LiDAR n'est pas sensible aux variations d'éclairage (travail de nuit possible) et résiste bien à la pluie légère et à la poussière.
- Détection polyvalente : quelle que soit la nature de l'obstacle (humain, animal, objet métallique ou organique) le LiDAR détecte tout ce qui réfléchit le signal laser à la distance et à l'angle d'incidence appropriés. Seules les surfaces fortement spéculaires (vitres, miroirs, surfaces chromées) posent des difficultés de réflexion, cas peu fréquents en milieu agricole.

Limites

Il existe cependant des limites à son usage, tel que l'occlusion, qui correspond à un obstacle masqué par un autre, par exemple, un enfant derrière un rang de maïs dense. Il est invisible pour le LiDAR, qui ne voit que la première surface réfléchissante. Cette limite est inhérente à la physique du capteur.

Aussi, la classification des objets détectés est difficile. En effet, le nuage de points LiDAR permet de détecter et localiser un obstacle, mais l'identifier comme un être humain, un animal ou un objet inerte est une tâche complexe. Les algorithmes de segmentation et de classification sur nuage de points existent, mais leur robustesse en environnement agricole reste un sujet de recherche actif.

B. Radar

Principes et atouts

Le radar émet des ondes électromagnétiques (typiquement dans la bande 24 GHz ou 77 GHz pour les applications embarquées) et analyse les échos reçus pour détecter des cibles en mouvement ou statiques. Sa physique propre lui confère des propriétés complémentaires au LiDAR.

Sa robustesse climatique extrême est un véritable atout, les ondes radar traversent la pluie, le brouillard et la poussière sans atténuation significative, y compris dans des conditions où le LiDAR ou les caméras seraient fortement dégradés.

Chaque écho radar est caractérisé par une **Surface Équivalente Radar** (SER ou RCS : Radar Cross Section), qui dépend à la fois de la taille et du type de matériau réfléchissant. Cette information constitue une signature physique partielle de l'obstacle, exploitable pour discriminer certaines catégories de cibles. Une feuille isolée, une branche fine ou un épi de céréale présente une RCS très faible et génère peu ou pas d'écho radar, ce qui réduit naturellement le taux de faux positifs liés à la végétation légère, contrairement au LiDAR qui détectera toute surface réfléchissante.

Limites

- Sa résolution spatiale est inférieure au LiDAR : la longueur d'onde plus grande du radar se traduit par une résolution angulaire moins fine, rendant difficile la localisation précise d'un obstacle de petite taille.
- Classification limitée : comme le LiDAR, le radar seul ne permet pas d'identifier la nature d'un obstacle avec une fiabilité suffisante pour des applications de sécurité.

C. Détection par intelligence artificielle et vision

Un changement de paradigme

L'introduction de l'intelligence artificielle et plus précisément des réseaux de neurones convolutifs (CNN) appliqués à l'analyse d'images, représente un changement de paradigme dans l'approche de la détection d'obstacles. Les systèmes classiques (LiDAR, radar) filtrent des obstacles selon des critères géométriques ou physiques : taille, distance, réflectivité. L'IA, elle, filtre par catégorie sémantique.

Les avantages spécifiques à l'application agricole sont significatifs, en effet il est possible de faire de la :

- **Détection par catégorie** : le système ne cherche plus un "objet de taille supérieure à X cm" mais un "être humain", un "animal", un "véhicule". Cette approche est bien plus robuste face à la diversité des objets présents en champ.
- **Détection partielle et postures atypiques** : un réseau de neurones entraîné sur des données suffisamment variées peut détecter un être humain partiellement dissimulé dans les rangs d'une culture, couché au sol, ou dans une posture inhabituelle, cas qui mettent en échec les détecteurs géométriques classiques.

Enfin les coûts *hardware* sont accessibles, une caméra RGB (Red Green Blue) industrielle est significativement moins coûteuse qu'un LiDAR de haute précision. La valeur ajoutée réside dans l'algorithme d'inférence et le calculateur embarqué, dont les performances progressent rapidement (GPU embarqués, accélérateurs neuromorphiques).

Limites

- **Absence d'information de distance** : une caméra monoculaire ne fournit aucune information de profondeur. Savoir qu'un humain est détecté dans l'image ne suffit pas, il faut également connaître sa distance pour adapter la réaction de la machine. Cette limite impose soit une fusion avec un capteur de distance (LiDAR, radar), soit le recours à une caméra stéréo ou Time-of-Flight.
- **Sensibilité aux conditions d'éclairage et de saleté** : contrairement au LiDAR ou au radar, une caméra est fortement affectée par une forte lumière rasante, une ombre dense, de la poussière sur l'optique ou une lentille souillée par la boue.
- **Dépendance aux données d'entraînement** : la performance d'un modèle IA est intrinsèquement liée à la représentativité de son jeu de données d'entraînement. Un modèle peu exposé à des cas agricoles spécifiques (rangs denses, terrains boueux, lumière rasante) présentera des lacunes de détection dans ces conditions.

D. La fusion de capteurs : vers une détection robuste

Aucune technologie prise isolément ne répond à l'ensemble des exigences de la détection agricole. La voie incontournable est celle de la fusion de capteurs, qui consiste à combiner les informations complémentaires issues de modalités différentes pour produire une décision plus fiable qu'aucun capteur seul ne pourrait fournir.

L'exemple le plus abouti aujourd'hui est la fusion **caméra 3D + IA**. Une caméra stéréo ou Time-of-Flight (ToF) fournit une carte de profondeur dense de la scène, tandis qu'un réseau de neurones analyse simultanément l'image RGB (couleur) pour identifier les catégories d'obstacles. La combinaison permet d'obtenir à la fois la localisation précise de l'obstacle dans l'espace 3D et son identification sémantique. Des architectures similaires associent LiDAR et caméra (LiDAR pour la géométrie, IA pour la classification), ou radar et vision (radar pour la robustesse climatique, IA pour la discrimination des catégories).

Ces architectures multimodales sont aujourd'hui au cœur des travaux de R&D dans le domaine de la sécurité des machines agricoles autonomes, et constituent la base des solutions commerciales émergentes les plus avancées. Elles s'accompagnent de couches logicielles de fusion, filtres de Kalman, réseaux bayésiens, algorithmes d'association de pistes, dont la conception est elle-même un sujet de recherche à part entière.

Tableau 2 - Comparaison des technologies de détection d'obstacles en contexte agricole

Critère	LiDAR	Radar	Caméra + IA	Ultrasons	Fusion multi-capteurs
Précision spatiale	Très haute	Moyenne	Haute (2D)	Faible	Très haute
Robustesse météo	Bonne	Excellente	Faible	Bonne	Excellente
Classification sémantique	Difficile	Difficile	Excellente	Absente	Excellente
Info de distance	Oui	Oui	Non (mono)	Oui (proche)	Oui
Faux positifs végétation	Élevés	Moyen	Faible	Élevés	Faibles
Coût relatif	Élevé	Moyen	Faible-Moyen	Faible	Variable

2.3 - Les défis d'intégration et d'homologation

A. Les contraintes d'intégration physique sur la machine

Au-delà des contraintes algorithmiques, l'intégration physique des capteurs sur les engins agricoles soulève des défis d'ingénierie spécifiques, souvent négligés dans les approches purement académiques.

La première contrainte concerne la modularité, combinée aux contraintes de fiabilité, de robustesse et de coût. Pour cela, la solution doit être :

- Adaptable pour des outils variés avec des dimensions variables ;
- Fiable : Avoir un niveau de performance garanti suffisant pour fonctionner en autonomie ;
- Robuste aux conditions des champs ;
- Coût : concevoir un système de détection suffisamment flexible sans embarquer d'intelligence ou de capteurs coûteux dans chaque outil.

La deuxième contrainte tient à l'impossibilité de **modifier profondément la structure du véhicule porteur**. Contrairement à un véhicule autonome conçu *from scratch*, un tracteur agricole est une machine existante dont l'architecture mécanique est figée. Il n'est pas possible d'y intégrer un pare-chocs instrumenté comme sur une voiture, ni de percer le châssis pour y loger des capteurs. Les solutions de détection doivent donc être conçues comme des systèmes add-on, montés sur des supports standardisés (barre de toit, arceau de protection, montants de cabine) sans modification irréversible du véhicule.

Cette contrainte d'intégration non invasive a des conséquences directes sur la couverture de détection : les zones mortes, notamment dans le plan horizontal proche de la machine et dans l'axe de l'outil porté, sont difficiles à éliminer sans un positionnement soigné des capteurs et une fusion intelligente des champs de vue.

B. L'acceptabilité et l'homologation

Pour que ces systèmes atteignent le terrain, deux conditions sont nécessaires au-delà de la performance technique : l'acceptabilité par les agriculteurs et la conformité réglementaire.

L'acceptabilité passe avant tout par la robustesse opérationnelle. Un système qui fonctionne bien en démonstration mais génère des arrêts intempestifs dans les conditions réelles de l'exploitation sera rapidement désactivé par l'utilisateur – annulant tout bénéfice de sécurité. Les constructeurs

et développeurs doivent donc investir massivement dans la validation en conditions réelles, sur une diversité de cultures, de saisons et de régions. La co-construction avec des agriculteurs pilotes est une pratique indispensable pour identifier les cas limites non anticipés.

Sur le plan réglementaire, plusieurs normes encadrent la sécurité des machines agricoles. La directive européenne Machines (2006/42/CE, en cours de révision) impose une analyse des risques et la mise en place de mesures de réduction proportionnelles. Des normes spécifiques aux tracteurs et machines automotrices (ISO 18497 – Agricultural machinery and tractors – Safety of highly automated agricultural machines) définissent des exigences fonctionnelles pour les systèmes de détection embarqués. Ces cadres normatifs influencent directement les choix architecturaux des systèmes de détection, notamment en termes de redondance, de modes de défaillance sûrs et de traçabilité des décisions.

La détection d'obstacles et la sécurisation des machines agricoles autonomes constituent un domaine à la croisée de la robotique, du traitement du signal, de l'intelligence artificielle et de l'ingénierie mécanique. La diversité des obstacles à détecter, la variabilité de l'environnement agricole et les contraintes d'intégration physique sur des machines existantes rendent ce problème considérablement plus difficile que ses équivalents dans d'autres secteurs.

3 - Architecture électronique et communication

L'essor de l'agriculture de précision, l'automatisation et l'autonomie ont entraîné une montée en puissance rapide de l'électronique dans les machines agricoles. Ces technologies apportent de nouvelles fonctionnalités, un meilleur confort d'utilisation et une meilleure efficacité. Elles suscitent toutefois des inquiétudes légitimes chez les exploitants : plus un système contient de composants électroniques, plus il semble exposé aux risques de panne.

Dans un contexte où les fenêtres d'intervention se resserrent et où la disponibilité des machines est cruciale, l'immobilisation d'un outil ou d'un tracteur représente un coût bien supérieur à la seule facture de réparation. La fiabilité devient donc un critère fondamental dans la décision d'investissement. Les constructeurs doivent répondre à ces attentes avec des architectures électroniques robustes, standardisées et faciles à diagnostiquer.

C'est précisément ce besoin qui a favorisé l'adoption massive du bus CAN (Controller Area Network) dans le secteur agricole. Conçu par Bosch dans les années 80 pour simplifier les architectures électriques dans l'automobile, il s'est aujourd'hui également imposé dans le secteur agricole. Tous les tracteurs, outils et équipements modernes s'appuient dessus pour fonctionner ensemble de manière standardisée. Il apporte une solution pour se débarrasser des connexions points à points au profit d'un réseau partagé, réduisant considérablement la quantité de câblage et, par conséquent, des sources potentielles de défaillance.

Par sa conception, le CAN offre une communication fiable même dans un environnement électrique perturbé. Sa structure différenciée torsadée limite les interférences, tandis que ses mécanismes intégrés – détection d'erreurs, retransmission automatique, arbitrage non destructif – garantissent l'intégrité de l'information, même en présence de bruit électromagnétique ou de collisions de messages.

Le bus CAN s'appuie aujourd'hui sur plusieurs standards complémentaires :

- **ISO 11898** : définit la couche physique et la couche liaison du CAN ;
- **SAE J1939** : très utilisé sur les motorisations pour structurer les messages applicatifs (vitesse, charge moteur, diagnostic...) ;

- **ISOBUS (ISO 11783)** : standard spécifique au secteur agricole, basé sur CAN mais étendant ses couches applicatives pour permettre la communication unifiée entre tracteurs, outils, consoles et systèmes de gestion de l'exploitation.

Ces standards renforcent l'interopérabilité et simplifient le développement, tout en offrant à l'utilisateur final une expérience plus fluide.

L'objectif principal de l'ISOBUS est simple : connecter n'importe quel outil à n'importe quel tracteur via une interface commune, en particulier le terminal en cabine (UT - Universal Terminal). Cela évite de multiplier les consoles propriétaires ou les faisceaux complexes, tout en facilitant l'installation, l'utilisation et la maintenance des équipements.

- Pour les constructeurs, l'ISOBUS fournit un cadre technique clair permettant de développer des solutions dans un environnement standardisé, sans réinventer la pyramide protocolaire pour chaque machine ou outil.
- Pour les distributeurs et le SAV, il constitue un socle idéal pour déployer des solutions de télémétrie, d'autodiagnostic et de maintenance prédictive. Les messages CAN et J1939 sont déjà largement structurés pour transporter des informations d'état, de température, de pression, de défauts ou de performances. Cela facilite grandement la détection des pannes et réduit les immobilisations des machines.

Le bus de terrain CAN est devenu un incontournable du monde agricole et par extension de la robotique agricole que ce soit sur les machines, les capteurs ou les actionneurs on le retrouve partout et il répond parfaitement aux besoins de l'agricole.

4 - Conclusion

La robotique agricole est, par nature, une discipline de synthèse. Comme l'illustrent les trois parties de cet article, aucun des verrous technologiques rencontrés – qu'il s'agisse de localiser une machine avec précision, de détecter un obstacle au milieu d'un champ ou de faire communiquer des équipements de marques différentes – ne se résout par une technologie isolée. C'est toujours la combinaison qui prime : fusion de capteurs pour le positionnement, redondance multimodale pour la sécurité ou protocoles normalisés pour l'interopérabilité.

Le fil conducteur commun à ces trois thématiques est la contrainte du terrain. La motte de terre qui génère un faux positif, l'arbre en bordure qui masque le signal GNSS, la pluie qui brouille une caméra au moment critique du chantier : c'est cette friction permanente entre la performance théorique des systèmes et la réalité du champ qui définit les vrais défis de l'ingénierie embarquée agricole. Elle impose des choix robustes, validés en conditions réelles, et acceptés par des utilisateurs dont la tolérance à la défaillance est, à juste titre, très faible.

L'électronique, quant à elle, fait partie intégrante de la robotique. Que ce soit dans le domaine du signal, du capteur, des calculateurs ou encore de la communication, toutes les disciplines sont représentées et challengées dans le cas de la robotique agricole. Pour les ingénieurs et chercheurs qui s'y aventurent, ce domaine offre un terrain d'innovation rare : des problèmes ouverts, des environnements non maîtrisés, et l'obligation de confronter ses modèles à la réalité. Le champ, au sens propre comme au sens figuré, est ouvert.

5 - Références

- Règlement (UE) 2023/1230 dit "Règlement Machines"

- Directive 2006/42/CE du Parlement Européen Relative aux Machines.
- ISO 13482:2014 - Robots and Robotic Devices
- ISO 18497:2018 - Agricultural machinery and tractors - Safety of highly automated agricultural machines
- ISO 11898-1:2024 - Road vehicles – Controller area network (CAN)
- SAE J1939® Enhanced DBC - Streaming Processes for Heavy-duty Vehicles
- ISO 11783-1:2017 - Tracteurs et matériels agricoles et forestiers – Réseaux de commande et de communication de données en série
- GNSS RTK - principes et applications
- Robagri - Tracteur autonome : réglementation, sécurité et avenir de l'agriculture de précision