

Rapport : IoT et Robotique Mobile

Table des matières

Introduction	2
1) Capteurs et communication	2
a. Capteurs clés pour la perception et la localisation.....	2
b. Protocoles et réseaux de communications (IoT) utilisés	3
2) Enjeux de connectivité	3
a) Latence : piloter des robots en « temps réel ».....	3
b) Fiabilité : continuité de service et tolérance aux pannes.....	4
c) Cybersécurité : protéger les robots, les données et le réseau.....	4
3) Applications concrètes de l'IoT pour les robots mobiles.....	5
a) Logistique : entrepôts, inventaire et livraison	5
b) Santé : robots infirmiers/logistiques et drones médicaux	6
c) Agriculture : « smart farming », drones et robots de plein champ	6
4) Les limites et contraintes actuelles	7
a) Autonomie énergétique et contraintes matérielles.....	7
b) Réseau : couverture, latence réelle et continuité de service	7
c) Coût et complexité d'intégration.....	8
Annexe	9

Introduction

On croise de plus en plus de robots qui se déplacent et agissent autour de nous, des drones qui inspectent des toits ou livrent des colis, des chariots autonomes (AGV/AMR) qui filent entre les rayonnages d'un entrepôt, ou encore des robots d'assurances médicale. Ils ont tous un point commun, ils ne travaillent plus « seuls ». Grâce à l'Internet des objets (IoT), ils perçoivent mieux leur environnement, échangent des informations en continu et prennent de meilleures décisions, plus vite et en sécurité.

Pour faire simple, l'IoT, c'est un ensemble de capteurs (LiDAR, caméras, GPS, IMU...) et de moyens de communications (Wi-Fi, 5G, réseaux basse consommation) reliés par des protocoles légers comme MQTT. Le robot voit, se localise, partage sa position et son état, et peut s'appuyer sur des ressources de calcul proches (edge) ou dans le cloud quand il en a besoin. Résultat ? Des flottes coordonnées en temps réel, une navigation plus fiable, et des usages très concrets qui gagnent en efficacité en logistique optimisée, assistance aux soignants, agriculture de précision, et bien plus.

Evidemment, tout cela amène à des défis. Pour qu'un robot réagisse au bon moment, la latence doit être faible et la connexion fiable. Il faut aussi sécuriser les échanges pour éviter les intrusions. Sans oublier les contraintes très terre à terre, c'est-à-dire, autonomie énergétique, couverture réseau (parfois inégale), coûts d'infrastructure et interopérabilité entre systèmes.

Dans ce rapport, je vais vous : présenter les capteurs et les mécanismes de communication qui rendent ces robots plus intelligents, expliquer les enjeux de connectivité (latence, fiabilité, cybersécurité), illustrer ces apports par des applications concrètes en logistique, santé et agriculture, et pour terminer, discuter des limites actuelles et des pistes d'amélioration. L'objectif est simple, comprendre comment concevoir et déployer des robots mobiles réellement utiles, sûrs et capables de passer à l'échelle.

1) Capteurs et communication

a. Capteurs clés pour la perception et la localisation

Dans cette première partie, on va lister et expliquer chaque capteur, protocoles et réseaux de communication utilisés en commençant par les capteurs.

LiDAR : Les télémétries LiDAR (2D/3D) fournissent des nuages de points denses pour détecter des obstacles afin d'estimer les distances et alimenter les algorithmes de SLAM/cartographie. Ils sont particulièrement solides contre les variations d'éclairage et

très utilisés sur des drones et AGV (Automatic Guided Vehicle) pour la navigation autonome et le mapping de précision. Des articles détaillent leurs usages et innovations aux niveaux des balayage multi-échos, fusions multi-capteurs, réduction du coût matériel (Lien n°1 annexe).

IMU (accéléromètres/gyroscope) et fusion visuo-inertielle. L'IMU stabilise la perception (compense le flou de mouvement et comble les trous visuels), combinée à la vision, améliore la précision de la navigation (VINS) de manière significative.

Caméras (mono/stéréo/RGB-D). La vision embarquée permet la reconnaissance de scènes et la localisation (VO/V-SLAM). Les caméras stéréo facilitent l'estimation de profondeur, alors que les capteurs RGB-D accélèrent la reconstruction d'environnements intérieurs.

GNSS/RTK pour l'outdoor. La géolocalisation GNSS multi-constellations peut être portée au centimètre près avec RTK/NRTK, ce qui est important pour des trajectoires sûres et précises pour les drones logistiques, les robots agricoles).

b. Protocoles et réseaux de communications (IoT) utilisés

Messagerie légère (MQTT). Pour transporter la télémétrie/commandes entre robots et services, MQTT est un protocole de messagerie basé sur la publication-abonnement très léger, et est standardisé par OASIS (MQTT v5), avec QoS et gestion des connexions intermittentes. Elle est conçue pour les appareils qui possèdent peu de ressources et les réseaux à faible bande passante ainsi que pour les latences hautes.

LAN/site – WI-FI 6 (802.11ax). Dans les usines et entrepôts, le WI-FI 6 apporte ce qu'on appelle OFDMA et MU-MIMO pour mieux servir de multiples robots simultanément et réduire la contention radio.

Cellulaire – 5G (URLLC) pour latence/fiabilité. Pour la commande et le retour vidéo ou en mobilité étendue, la 5G introduit l'URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communication) dans l'objectif d'atteindre une très faible latence avec une fiabilité très élevée. En 3GPP Rel-16, la duplication de paquets sur des chemins disjoints renforce la fiabilité, utile pour des robots.

2) Enjeux de connectivité

a) Latence : piloter des robots en « temps réel »

Je vais vous expliquer pourquoi c'est important d'avoir un temps de latence quasiment en temps réel. Les AGV/AMR et les drones doivent réagir vite (par exemple : évitement d'obstacles, arrêt d'urgence, asservissement de trajectoire). Les chaînes de contrôle

tolèrent mal la gigue et les pertes. Des études NIST (Lien n°2 annexe) sur WI-FI 6 / 802.11ax (OFDMA) montrent que, selon la configuration et le trafic, le comportement peut dégrader une application de contrôle en temps réel.

On peut abaisser la latence avec l'edge. ETSI MEC rapproche les traitements (perception, fusion de données, anticollision inter-robots) des robots pour réduire les allers-retours cloud ce qui baisse la latence et donne une meilleure prévisibilité.

La 5G introduit des profils URLLC pour une latence très faible avec une fiabilité élevée. En release 16, la duplication de paquets sur deux chemins disjoints améliore la tenue en temps et la solidité des liaisons critiques.

b) Fiabilité : continuité de service et tolérance aux pannes

Au niveau de la fiabilité on va voir trois points :

- En 5G, la duplication de paquets (Rel-16) et les mécanismes de double connectivité limitent l'impact d'une rupture de lien.
- Au sujet du multipath sur les transports, le MPTCP (RFC 8684) permet d'exploiter plusieurs interfaces et liaisons (par exemple : Wi-Fi + 5G) simultanément pour gagner en disponibilité (mais aussi en débit), c'est utile pour la télémétrie ainsi que le télé-pilotage.
- Dans la communications industrielles modernes, la convergence 5G + TSN (Time-Sensitive Networking) permet d'approcher des comportements déterministes pour la commande de mouvement et la synchronisation.

c) Cybersécurité : protéger les robots, les données et le réseau

Les robots (AGV/AMR, drones) montrent une surface d'attaque élargie (interfaces radio, brokers, edge/MEC, API). L'objectif est de garantir confidentialité, intégrité, disponibilité, etc... sans dégrader la sûreté (safety) ni les performances temps réel.

Principes : Zero-Trust, moindre privilège, segmentation zones/conduits (esprit IEC 62443), chiffrement de bout en bout, défense en profondeur.

Les contrôles recommandés sont :

- L'accès aux réseaux
- Les communications et protocoles
- Robots et OS
- Mise à jour et secrets
- Edge/MEC et plateformes
- Supervision et réponse
- Gouvernance

Pour synthétiser, pour la latence il faudrait rapprocher les traitements via MEC, dimensionner avec le Wi-Fi 6 et garder les boucles dures sur site.

Pour la fiabilité, l'important est de combiner les redondances radio (duplication 5G, double connectivité), transport (MPTCP), et « dégradation gracieuse ».

Au niveau de la sécurité, appliquer IEC 62443 comme mentionné dans les principes en OT, chiffrer et authentifier la messagerie (MQTT v5/TLS), et adopter une approche Zero Trust.

3) Applications concrètes de l'IoT pour les robots mobiles

a) Logistique : entrepôts, inventaire et livraison

Dans un entrepôt moderne, des flottes d'AGV/AMR échangent en continu avec le WMS (Warehouse Management System) et le MES (Manufacturing Execution System). Ils passent par des bus IoT — le plus souvent MQTT — pour remonter la télémétrie, recevoir les missions et assurer la traçabilité. La littérature décrit des architectures IoT “temps réel” éprouvées (découpage du site en domaines, capteurs/actuateurs, collecte en continu) qui améliorent l'ordonnancement et la visibilité des opérations.

Côté terrain, ça se voit vite : chez Normagrup, une flotte d'AMR OMRON dialogue directement avec l'ERP/WMS via MQTT pour l'acheminement interne, avec une traçabilité en temps réel. Dans l'e-commerce et le retail, des retours d'expérience font état de gains marqués de productivité, parfois jusqu'au double, après déploiement de flottes multi-AMR. (annexe lien n°3 et n°4)

Les drones autonomes d'inventaire s'imposent progressivement dans la logistique. IKEA a déjà industrialisé la démarche avec plus de 250 drones déployés sur 73 sites dans 9 pays, en partenariat avec Verity. Leur rôle : compter les stocks, détecter les erreurs de localisation et réaliser des inventaires en continu, 24/7, sans perturber l'activité.

Les bénéfices ne se limitent pas à la précision : ces solutions réduisent aussi la pénibilité, notamment en évitant aux opérateurs de monter en hauteur pour contrôler les palettes. D'autres grands acteurs comme DSV ou HALEON partagent les mêmes retours : coûts d'audit divisés par deux et taux d'exactitude atteignant 100 % sur certaines opérations. (annexe lien n°5)

Au-delà de l'entrepôt, les drones trouvent leur place dans de nouveaux usages. Connectés en vidéo, télémétrie et géolocalisation, ils servent désormais à l'inspection d'actifs des bâtiments, toitures, sites industriels mais aussi à des projets de livraison du dernier kilomètre dans des environnements maîtrisés.

b) Santé : robots infirmiers/logistiques et drones médicaux

Dans les hôpitaux, de nouveaux « coursiers » autonomes, comme Moxi, prennent en charge la livraison de médicaments, d'échantillons ou de consommables. Reliés au système d'information via Wi-Fi ou 5G privée et des API IoT légères, leur rôle est clair : libérer du temps infirmier et alléger la charge mentale des soignants.

Un article publié en 2024 confirme l'essor de ces cobots : logistique, prise de constantes, assistance ponctuelle... tout en rappelant le besoin de mieux mesurer l'impact sur la charge réelle de travail. Sur le terrain, les résultats parlent d'eux-mêmes : des délais de livraison inférieurs à 30 minutes et des milliers de courses déléguées au robot, dans des pilotes menés avec Moxi. La presse économique recense déjà plus de 30 hôpitaux équipés aux États-Unis, dans un contexte marqué par la pénurie de personnel soignant. (annexe lien n°6)

À l'échelle territoriale, des réseaux de drones connectés, équipés de télémétrie, suivi de vol et capteurs de température, assurent des livraisons médicales urgentes. Les études montrent des délais raccourcis et moins de pertes liées à la péremption.

Des initiatives pionnières comme Zipline au Rwanda et au Ghana ont déjà prouvé leur valeur : des établissements éloignés mieux approvisionnés, malgré le relief ou l'isolement, et une adoption massive en routine par les systèmes de santé locaux.

En milieu hospitalier, la cybersécurité IoT est un enjeu majeur. Plusieurs vulnérabilités documentées sur des robots logistiques rappellent l'importance de mesures strictes : chiffrement systématique des communications, mises à jour OTA signées et segmentation réseau pour isoler les flux sensibles.

c) Agriculture : « smart farming », drones et robots de plein champ

Les drones aériens, couplés à l'IoT et à l'IA, permettent de détecter précocement les maladies ou le stress hydrique, d'affiner les estimations de rendement et d'optimiser l'irrigation et les apports. Des articles montrent que des résultats sont visibles sur la vigne, les grandes cultures ou encore les vergers, tout en rappelant les obstacles réglementaires et les limites liées à la connectivité en zone rurale. (annexe lien n°7)

Les UGV de désherbage utilisent la vision et le positionnement RTK, et publient leur télémétrie vers des plateformes IoT pour le suivi et l'optimisation des passages. Les synthèses récentes (2024–2025) mettent en avant les progrès en perception, en navigation et en performance opérationnelle, tandis que des études plus anciennes décrivent déjà des outils électrifiés pour le désherbage intra-rang en vergers et vignobles. (annexe lien n°8)

4) Les limites et contraintes actuelles

a) Autonomie énergétique et contraintes matérielles

L'endurance des drones reste limitée par la capacité des batteries, les multicopters étant contraints par la densité énergétique actuelle. L'autonomie et l'emport constituent les principaux verrous, ce qui impose le recours à des relais de recharge, au remplacement rapide de batteries ou à l'optimisation des trajectoires pour économiser l'énergie.

Pour les AGV et AMR, les cycles de charge conditionnent directement la disponibilité et la productivité des flottes. La planification des recharges devient donc critique, ce qui explique les recherches académiques sur les stratégies de charge, l'ordonnancement et le positionnement des bornes, qu'il s'agisse de recharge opportuniste, partielle ou par induction. Les travaux récents montrent que l'optimisation conjointe entre missions et recharge est nécessaire pour stabiliser les performances globales.

Enfin, au-delà de l'autonomie individuelle, il faut considérer les effets systémiques et l'empreinte environnementale des équipements et des réseaux. L'ADEME et l'Arcep rappellent que le numérique représente une part croissante des impacts nationaux, ce qui invite à intégrer la sobriété énergétique dès la conception, par exemple en dimensionnant mieux les infrastructures, en ajustant la fréquence de transmission et en prolongeant la durée de vie des équipements. (annexe lien n°9 et n°10)

b) Réseau : couverture, latence réelle et continuité de service

La couverture 5G en France reste contrastée selon les bandes et les territoires. La majorité des déploiements repose sur la bande 3,4–3,8 GHz, dite « cœur », qui offre un bon équilibre entre débit et couverture, mais dont la portée est plus réduite que celle des basses fréquences. En pratique, la qualité de connexion varie donc selon l'emplacement ville dense ou campagne mais aussi selon la charge du réseau et les fréquences disponibles localement.

Les données de l'Arcep et de l'ANFR montrent que le nombre de sites 5G ouverts au public continue de croître régulièrement, même si les écarts régionaux demeurent marqués. Ces différences peuvent devenir critiques pour des usages sensibles comme la robotique agricole ou des opérations menées en dehors des sites industriels.

Pour garantir une latence faible et un meilleur isolement, on voit aussi émerger des réseaux mobiles privés en 4G ou 5G, notamment dans la bande 3,8–4,2 GHz. Ils ouvrent de nouvelles perspectives, mais nécessitent des fréquences dédiées, des compétences pointues en radio et en IT-OT, ainsi qu'une intégration soignée avec l'infrastructure existante, ce qui entraîne des coûts et des délais. En France, le cadre réglementaire s'est renforcé avec de nouvelles consultations publiques et un guichet

d'expérimentation prolongé et élargi en 2025, mais l'adoption de ces réseaux privés reste progressive. (annexe lien n°11 et n°12)

c) Coût et complexité d'intégration

Le coût total de possession (TCO) des solutions IoT et robotiques dépasse largement le prix d'achat des robots eux-mêmes. Il faut aussi compter les capteurs avancés, l'infrastructure réseau en Wi-Fi ou en 5G privée, les serveurs edge ou MEC, les briques de cybersécurité comme la PKI ou la gestion des mises à jour OTA, sans oublier les outils de supervision et d'interopérabilité. Les retours d'expérience montrent qu'un réseau 5G privé n'a réellement de sens que s'il est adossé à des cas d'usage critiques en matière de latence ou de fiabilité, et qu'il repose sur une gouvernance claire, avec des mécanismes de slicing, de QoS et des SLA internes bien définis.

La mise en place d'un réseau mobile local dans la bande 3,8–4,2 GHz suppose en outre des autorisations spécifiques, incluant l'ingénierie des fréquences, la coexistence avec d'autres usages et le dimensionnement du backhaul, comme le soulignent les documents de l'Arcep publiés en 2025. Ces choix techniques se traduisent par des coûts de conception et d'exploitation supplémentaires, ainsi que par la nécessité de développer de nouvelles compétences, à l'interface entre l'OT et l'IT. (annexe lien n°13)

Annexe

A Review of Sensing Technologies for Indoor Autonomous Mobile Robots:

<https://www.mdpi.com/1424-8220/24/4/1222>

Etude NIST: Latency-Sensitive Networked Control Using 802.11ax OFDMA Triggering

<https://www.nist.gov/publications/latency-sensitive-networked-control-using-80211ax-ofdma-triggering>

Inside Normagrup's Shift to Automated Handling Using AMRs with Custom Conveyors

<https://robotics.omron.com/case-studies/automated-mobile-robots-normagrup-case-study>

Autonomous Mobile Robots | Case Study: Fulfillment

<https://www.sclogistics.com/resource-center/case-studies/autonomous-mobile-robots-case-study-fulfillment>

Ikea installs AI-powered drones in warehouses

<https://www.iotm2mcouncil.org/iot-library/news/smart-logistics-news/ikea-installs-ai-powered-drones-in-warehouses>

A systematic review of collaborative robots for nurses: where are we now, and where is the evidence?

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11186321>

Drones in agriculture: A review and bibliometric analysis

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169922003349>

Advances in ground robotic technologies for site-specific weed management in precision agriculture: A review

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169924007543>

Evaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective

<https://librairie.ademe.fr/consommer-autrement/5226-evaluation-de-l-impact-environnemental-du-numerique-en-france-et-analyse-prospective.html>

L'empreinte environnementale du numérique

<https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-thematiques-transverses/lempreinte-environnementale-du-numerique.html>

La 5G

<https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-reseaux-mobiles/la-5g.html>

Observatoire mensuel

<https://www.anfr.fr/gestion-des-frequences-sites/lobservatoire>

Projet de modalités d'attribution des fréquences de la bande 3,8 – 4,2 GHz pour les réseaux mobiles à très haut débit pour des besoins professionnels

https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/consultation-projet-modalites-attribution-38-42-GHz_juin2025.pdf