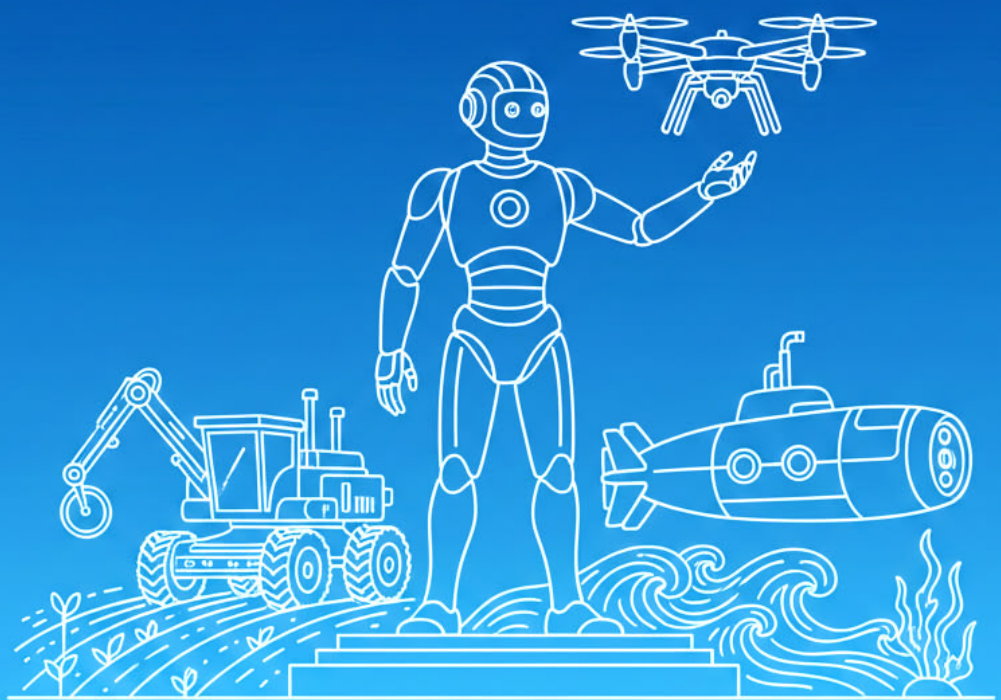
ACADÉMIE
DES TECHNOLOGIES
POUR UN PROGRÈS RAISONNÉ, CHOISI ET PARTAGÉ

Les systèmes autonomes

Rapport de l'Académie



ACADÉMIE
DES TECHNOLOGIES
POUR UN PROGRÈS RAISONNÉ, CHOISI ET PARTAGÉ

LES SYSTÈMES AUTONOMES

ÉTAT DE L'ART, DIVERSITÉ DES APPLICATIONS ET BRIQUES COMMUNES

ÉLÉMENTS POUR UNE STRATÉGIE NATIONALE

Rapport

Juillet 2026

Sommaire

Résumé 9

Abstract 13

Première partie - Les systèmes autonomes

Chapitre 1
Introduction 18
1.1. Contexte et enjeux des systèmes autonomes 18
1.2. Un écosystème mondial qui doit relever des défis 19
1.3. Objectifs et structure du rapport 20
1.4. Limites du rapport 22

Chapitre 2
Les systèmes autonomes cyber-physiques 24
2.1. Définitions et typologies 24
2.2. Vers des « machines logicielles autonomes » ? 27
2.3. Distinctions entre systèmes civils et militaires 32
2.4. Décomposition et chaîne de la valeur 33

Chapitre 3
Systèmes autonomes terrestres 36
3.1. Domaine civil 36
3.2. Domaine militaire 56

Chapitre 4
Systèmes autonomes aériens 59
4.1. Domaine civil 60
4.2. Domaine militaire 65

Chapitre 5
Systèmes maritimes 71
5.1. Domaine civil 72
5.2. Domaine militaire 78

Chapitre 6
Recherche et développement en France 80
6.1. Horizon Europe 80
6.2. Critiques envers le programme Horizon 82
6.3. Le programme de recherche de *France 2030* 85
6.4. R&D : comparaison internationale 89

Chapitre 7
Conclusions 91
7.1. Impact sociétal des systèmes autonomes 91
7.2. Quel futur ? 92
7.3. Définir une stratégie à long terme 94

Chapitre 8
Recommandations 95
8.1. À court terme 95
8.2. À moyen terme 96

Deuxième partie – État de l'art détaillé

Chapitre 9
Milieu terrestre 99
9.1. Mobilité routière 99
9.2. Agriculture 100
9.3. Robotique de service 101
9.4. Dans le domaine militaire 105

Chapitre 10
Milieu aérien 106
10.1. Mobilité aérienne 106
10.2. Drones aériens sans pilotes 107
10.3. Dans le domaine militaire 108

Chapitre 11
Milieu maritime 109
11.1. Navires de surface 109
11.2. Sous-marins 111
11.3. Dans le domaine militaire 112

Chapitre 12
Véhicules autonomes 113
12.1. Aux États-Unis et en Chine 113
12.2. En Europe 115
12.3. Aides à la conduite 118

Chapitre 13
Drones et UAS 125
13.1. En Chine 125
13.2. Aux États-Unis 126
13.3. En Europe 127
13.4. Autres pays 127

Chapitre 14
Robots bipèdes et quadrupèdes 128
14.1. Points forts et faiblesses par région 129
14.2. Chaîne de la valeur 130

Chapitre 15
Maritime/MASS 132

Chapitre 16
Modèles économiques 134
16.1. L'impact de la réglementation sur les modèles économiques 135
16.2. Tendances structurantes 2025 – 2030 135

Chapitre 17
Les différentes briques 137
17.1. Modèles fondamentaux, agents et industrialisation 137
17.2. Capteurs & perception : fusion multi-modalités et SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) robuste 142
17.3. Actionneurs : essor des DEA et intégration mécatronique 143
17.4. Puissance de calcul 144
17.5. Points forts actuels et axes de développement 151
17.6. Compétition internationale 152
17.7. Transversalité des technologies dans les trois milieux et le militaire 154
17.8. Conclusion 159

Bibliographie 160

Annexes 170

A. Liste des abréviations 171

B. Liste des robots bipèdes et quadrupèdes 175

C. Projets français de consolidation du secteur industriel 178
C.1. Appel à projets « Offre de robots et machines intelligentes d'excellence » 178
C.2. Appel à projets « Défi transfert robotique » 178
C.3. Appel à projets générique n° 4 « i-Démo – soutien aux projets structurants de R&D&I » 179
C.4. Lauréats de la 1re vague (2 à 3 M€ par projet) 179
C.5. Lauréats de la 2e vague (1 à 2 M€ par projet) 180

D. Recommandations du GT GICAT-ADIF 183

E. Les sous marins militaires autonomes 189
E.1. États-Unis 189
E.2. Royaume-Uni 190
E.3. France 191
E.4. Japon 194
E.5. Chine 195

F. Personnes auditionnées 197

G. Déclaration de conflits d'intérêts 199

Table des figures

2.1	Décomposition fonctionnelle	34
2.2	Chaîne de la valeur	34
3.1	Station de traite Lely Astronaut	37
3.4	Niveau de maturité des robots industriels	51
3.5	ARU polymorphisme	53
3.6	Scallog	53
3.7	Exotec	53
17.1	Architecture Agentique Massive : Maillage de serveurs MCP et isolation des clusters.	140
B.1	Quelques représentations de robots	174
E.1	ORCA XLUUV	188
E.2	DIVE LD	189
E.3	Excalibur de la Royal Navy	189
E.4	Dessin d'artiste Herne	190
E.5	Éclaté de Herne	190
E.6	Mise à l'eau de Herne	190
E.7	UCUV de Naval Group	191
E.8	Drone de surface Seaquest de Sirehna	192
E.9	UUV japonais	193
E.10	Version longue	194
E.11	UUV type HSU chinois	194
E.12	XLUUV chinois	195
E.13	UUV chinois	195

Liste des tableaux

2.1	Exemples de niveaux d'automatisation en informatique	29
2.2	Tableau croisé des niveaux d'automatisation et des fonctions	31
3.1	Cinq niveaux d'évolution robotique	51
4.1	Catégories des drones	64
4.2	Quelques acteurs des drones en France	65
6.1	Répartition des projets par organisme	82
6.2	Répartition des projets par organisme	84
6.3	Financement indicatif des pays en R&D	90
11.1	Maturité du secteur	111
17.1	Parts de marché mondiales des accélérateurs IA	150
17.2	Taille de marché des accélérateurs IA	151
17.3	Résultats de l'ANA Prize	154
17.4	Coût de transfert inter-domaines et frein réglementaire dominant par famille de composant	158
F.1	Liste des intervenants	196

Résumé

Les systèmes autonomes sont des dispositifs dotés de capacités d'automatisation et d'algorithmes avancés, y compris d'intelligence artificielle, leur permettant de percevoir leur environnement, de sélectionner et d'exécuter des actions sans intervention humaine. Ils représentent une rupture technologique majeure, accélérant une nouvelle révolution industrielle amorcée largement avec la mise en place des metavers industriels basés sur les jumeaux numériques. Leur déploiement transforme les modes de production, les services et les interactions homme-machine, tout en soulevant des défis économiques, réglementaires et sociétaux (emploi, éthique, sécurité).

Ce rapport, qui fait suite au rapport précédent de l'Académie des technologies sur la robotique industrielle [19] et l'élargit, dresse un état des lieux des systèmes autonomes, analyse leur écosystème industriel, évalue les avancées technologiques et propose des recommandations pour positionner la France et l'Europe face à la compétition sino-américaine. La méthodologie combine revues académiques, analyses de marché, entretiens avec des experts publics/privés, et benchmarking international.

Une compétition mondiale asymétrique et accélérée

Elle se traduit d'abord par le niveau des investissements : l'Europe n'investit qu'environ 1,2 Md$ par an alors qu'elle représente 26,7 % du marché mondial, tandis que les États-Unis, qui ne pèsent actuellement que 13,7 % du marché investissent massivement avec 35 Md$ annuels (335 Md$ ont été investis en

IA/robotique sur la période 2013-2023), devant la Chine (une dizaine de Md$ par an via son 14e plan quinquennal) qui représente 47 % du marché mondial[1].

Ces volumes financiers génèrent des positions dominantes dès aujourd'hui et préparent celles de demain : la Chine produit 70 % des drones civils (DJI) et vise 10 000 robots humanoïdes/an d'ici 2027, tandis que les États-Unis mènent la course en modèles d'IA avancés (61 modèles « notables » en 2024 contre 8 pour la France) et en robot-taxis, talonnés voire dépassés par la Chine.

La mise en place des politiques et des cadres réglementaires fait apparaître des divergences : le RAI (Règlement européen sur l'intelligence artificielle) européen (2024) encadre strictement les systèmes autonomes à base d'IA dits à « haut risque », freinant probablement l'innovation, mais garantissant une acceptabilité sociale et une sûreté de fonctionnement plus grandes.

La Chine et les États-Unis privilégient une approche plus permissive et pragmatique entraînée pour le premier par une volonté politique structurée et forte, et pour le second alimentée par les paris industriels des « The Magnificent Seven »[2] accélérant le déploiement applicatif même imparfait des solutions (ex : robots-taxis, drones aériens, remplacement de cols blancs par des agents IA, etc.).

Des avancées technologiques contrastées

Dans les nouvelles briques critiques des systèmes autonomes, l'Europe possède un bon niveau technologique et produit des équipements performants, mais peine à industrialiser les solutions pour des raisons de structure de coût et de débouché, avec des concurrents ayant accès à son marché sans barrière d'entrée. Cette dissymétrie des échanges amène une distorsion de concurrence évidente. Il serait illusoire de prétendre couvrir toute la chaîne de valeur mais sur plusieurs domaines l'Europe peut atteindre un leadership en focalisant ses investissements, notamment sur :

1 fortunebusinessinsights.com

2 Il s'agit de Google, Meta, Amazon, Apple, Microsoft, Nvidia, Tesla

Les modèles multimodaux (VLA (*Vision Language Action*)) et fusion multi-capteurs (LiDAR 4D, radars événementiels) qui progressent, mais des lacunes persistent en robustesse et raisonnement contextuel.

Les DEA (*Dielectric Elastomer Actuator*) (actionneurs souples) sont des constituants stratégiques pour la perception haptique dans les applications en robotique collaborative, mais leur endurance et leur coût restent encore des freins pour les applications industrielles ou grand public.

Dans la puissance de calcul, le rachat par l'État français de Bull permet de protéger les savoir-faire critiques et de garantir la souveraineté technologique sur le marché des accélérateurs IA et le HPC.

Le partenariat stratégique établi entre Mistral AI et NVIDIA permet de garantir à cette licorne française d'associer son offre technologique à une capacité de calcul de pointe hébergée en Europe. Cette annonce a contribué à porter la valorisation de Mistral AI à plus de 10 Md$.

Applications sectorielles et modèles économiques émergents

Dans le domaine terrestre, en Europe, l'agriculture est confrontée à des problèmes réglementaires et de coût des solutions. Le développement de solutions technologiques adaptées aux pratiques agricoles doit impérativement être mené en synergie avec les utilisateurs qui doivent être accompagnés afin d'assurer un déploiement progressif contrôlé. La logistique par contre est un domaine d'excellence où les gains de productivité sont déjà là et se mesurent facilement. L'approche système combinant les systèmes autonomes et les infrastructures physiques et logicielles des logisticiens l'emporte sur la performance pure des robots.

Dans le domaine aérien civil, secteur en pointe depuis longtemps on considère ce domaine comme mature mais l'autonomie décisionnelle reste faible, car la sécurité des passagers prime face à des événements non prévisibles et non gérables par des algorithmes. Le domaine militaire progresse rapidement à cause du conflit russo-ukrainien, notamment avec des systèmes autonomes de navigation et de ciblage sophistiqués et un fonctionnement en essaim qui pourrait être transposé dans le domaine civil.

Les modèles économiques évoluent, la location de robots avec des modèles comme Robotics-as-a-Service (34 Md$ projetés en 2026) et la monétisation des données recueillies (cartographie, télémétrie, apprentissage) ouvrent des perspectives mais supposent des investissements importants et posent des problèmes liés à la propriété intellectuelle et au respect de la vie privée. La France et l'Europe disposent d'un système éducatif de haut niveau qui leur permet de tenir leur rang dans le domaine de la robotique et de l'IA applicative avec un cadre éthique bien structuré. L'Europe dispose des compétences industrielles pour produire mais est confrontée à une concurrence sévère de la part de la Chine qui décourage la mise en production européenne des composants de systèmes (excepté pour les machines logicielles).

Cela provoque une dépendance accrue aux fournisseurs asiatiques (50 % du coût d'un robot humanoïde proviennent des moteurs, aujourd'hui importés car 2 à 3 fois moins chers que la production européenne).

En synthèse, les systèmes autonomes dessinent aujourd'hui les équilibres industriels de demain et la compétitivité de l'Europe. Elle dispose de tous les atouts pour faire partie des chefs de file mondiaux, mais sans une stratégie audacieuse et coordonnée allant jusqu'à la mise sur le marché, la France et l'Europe risquent de devenir de simples consommateurs de technologies conçues ailleurs.

Le temps d'agir est maintenant, avant que les choix ne soient faits sans nous.

Abstract

Autonomous systems are devices equipped with automation capabilities and advanced algorithms—including artificial intelligence—that enable them to perceive their environment, select, and execute actions without human intervention. They represent a major technological breakthrough, accelerating a new industrial revolution that has largely begun with the implementation of industrial metaverses based on digital twins. Their deployment is transforming modes of production, services, and human-machine interactions, while raising economic, regulatory, and societal challenges (employment, ethics, safety).

This report follows and expands upon the previous report by the French Academy of Technologies on industrial robotics[19], providing a state-of-the-art overview of autonomous systems, analyzing their industrial ecosystem, assessing technological advancements, and offering recommendations to position France and Europe in the face of Sino-American competition. The methodology combines academic reviews, market analyses, interviews with public and private experts, and international benchmarking.

An Asymmetric and Accelerated Global Competition

This competition is first reflected in investment levels: Europe invests only about $1.2 billion annually, despite accounting for 26.7% of the global market, while the United States—currently representing 13.7% of the market—invests massively with $35 billion per year ($335 billion invested in AI and robotics between 2013 and 2023), ahead of China (around ten billion dollars annually through its 14th Five-Year Plan), which represents 47% of the global market[3].

3 fortunebusinessinsights.com

These financial volumes are already generating dominant positions and preparing those of the future: China produces 70% of civilian drones (DJI) and aims for 10,000 humanoid robots per year by 2027, while the USA leads in advanced AI models (61 "notable" models in 2024 compared to 8 for France) and robotaxis, closely followed or even surpassed by China.

The implementation of policies and regulatory frameworks reveals divergences: the European RAI (2024) strictly governs AI-based autonomous systems classified as "highrisk", likely slowing innovation but ensuring greater social acceptability and operational safety.

China and the USA favor a more permissive and pragmatic approach, driven in the former by a strong and structured political will, and in the latter by the industrial bets of "The Magnificent Seven"[4], accelerating the practical deployment of solutions—even imperfect ones (e.g., robotaxis, aerial drones, replacement of white-collar jobs by AI agents, etc.).

Contrasting Technological Advancements

In critical new components of autonomous systems, Europe boasts a strong technological level and produces high-performance equipment, but struggles to industrialize solutions due to cost structures and market access issues, with competitors entering its market without barriers. This asymmetry in trade leads to clear competitive distortions. It would be unrealistic to claim to cover the entire value chain, but in several areas, Europe can achieve leadership by focusing its investments, particularly in:

Multimodal models (VLA) and multi-sensor fusion (4D LiDAR, event-based radars) are progressing, but gaps remain in robustness and contextual reasoning.

Dielectric Elastomer Actuators (DEAs) are strategic components for haptic perception in collaborative robotics applications, but their durability and cost remain barriers for industrial or consumer applications.

4 This refers to Google, Meta, Amazon, Apple, Microsoft, Nvidia, and Tesla

In computing power, the French state's acquisition of Bull safeguards critical knowhow and ensures technological sovereignty in the AI accelerator and HPC market.

The strategic partnership between Mistral AI and NVIDIA enables this French unicorn to combine its technological offering with cutting-edge computing capacity hosted in Europe. This announcement contributed to Mistral AI's valuation exceeding $10 billion.

Sector-Specific Applications and Emerging Economic Models

In Europe, terrestrial applications—particularly agriculture—face regulatory and cost challenges. The development of technological solutions tailored to farming practices must be carried out in close collaboration with users to ensure controlled, progressive deployment. Logistics, on the other hand, is an area of excellence where productivity gains are already tangible and easily measurable. The system approach, combining autonomous systems with the physical and software infrastructures of logistics providers, outperforms pure robot performance.

In the civil aviation sector, long considered mature, decision-making autonomy remains limited because passenger safety takes precedence over unpredictable and algorithmically unmanageable events. The military domain is advancing rapidly due to the Russo-Ukrainian conflict, particularly with sophisticated autonomous navigation and targeting systems, as well as swarm operations that could be transposed to civilian applications.

Economic models are evolving: robot leasing through models like Robotics-as-a-Service (projected at $34 billion in 2026) and the monetization of collected data (mapping, telemetry, learning) offer promising prospects but require significant investment and raise issues related to intellectual property and privacy.

France and Europe boast a high-quality education system, enabling them to maintain their position in robotics and applied AI within a well-structured ethical framework. Europe has the industrial expertise to produce but faces

fierce competition from China, which discourages the European production of system components (except for software machines).

This leads to increased dependence on Asian suppliers (50% of the cost of a humanoid robot comes from motors, currently imported as they are 2 to 3 times cheaper than European production).

In summary, autonomous systems are today shaping the industrial balances of tomorrow and Europe's competitiveness. Europe has all the assets to become a global leader, but without an audacious and coordinated strategy extending to market deployment,

France and Europe risk becoming mere consumers of technologies designed elsewhere.

The time to act is now, before choices are made without us.

Première partie - Les systèmes autonomes

Chapitre 1

Introduction

1.1. Contexte et enjeux des systèmes autonomes

Les systèmes autonomes sont des dispositifs dotés de capacités d'automatisation et d'algorithmes avancés, y compris d'intelligence artificielle, leur permettant de percevoir leur environnement, de sélectionner et d'exécuter des actions sans intervention humaine. Ils représentent une rupture technologique majeure, accélérant une nouvelle révolution industrielle amorcée largement avec la mise en place des metavers industriels basés sur les jumeaux numériques.

Ces systèmes constituent le résultat d'une évolution continue de l'automatisation mais aussi un facteur potentiel de rupture dans la transformation des sociétés industrielles, accélérant la mutation des modes de production, des services et des interactions entre l'homme et la machine.

La partie visible des systèmes autonomes que sont les véhicules, les drones, les robots industriels ou les navires automatisés incarne déjà cette évolution profonde qui bouscule les paradigmes techniques, économiques et sociaux historiques. La partie invisible et moins connue du grand public que sont les machines logicielles constituent néanmoins le cœur de cet écosystème.

L'intégration de systèmes autonomes dans les transports, la logistique, l'agriculture, la sécurité, la défense, la santé ou encore l'industrie de manière générale, démontre la capacité du secteur à transformer l'ensemble des milieux où l'homme est présent. Ils représentent un enjeu économique majeur pour la compétitivité industrielle actuelle et future : grâce aux progrès

de l'intelligence artificielle (IA), des capteurs avancés, de la robotique, des réseaux de communication, des capacités de calcul et de leur compacité, ils s'imposent aujourd'hui comme l'un des moteurs essentiels de la quatrième révolution industrielle[5].

Cette tendance est accentuée par la pression croissante en faveur de la numérisation qui engendre des gains d'efficacité opérationnelle, de sécurité et de réduction des coûts.

C'est pourquoi les politiques nationales et supranationales de la plupart des acteurs mondiaux encouragent massivement l'innovation dans le domaine des systèmes autonomes, favorisant la constitution d'écosystèmes industriels compétitifs et diversifiés, particulièrement en Asie, aux États-Unis et en Europe.

1.2. Un écosystème mondial qui doit relever des défis

L'émergence rapide des technologies et acteurs du domaine soulève de nombreux défis majeurs : montée en complexité des architectures physiques et logicielles, variabilité des cadres réglementaires, acceptabilité sociale, et impératifs de souveraineté technologique. L'écosystème industriel mondial se structure rapidement autour de géants technologiques, de pôles de compétitivité et de nouveaux entrants, impliquant une compétition accrue entre régions mais aussi la construction progressive de normes *de facto* et de standards internationaux.

Dans cette optique, il est utile d'examiner la situation en Europe, en Asie et aux États-Unis. L'examen de la position de la France dans ce domaine n'en sera que plus instructif. Cette approche permet d'analyser, au-delà de la seule compétition, les différences de politiques publiques, de stratégies industrielles et d'anticiper ou d'imaginer les dynamiques à créer.

5 Voir le document de l'Office européen des brevets de 2020 – https://link.epo.org/web/pat ents_and_the_fourth_industrial_revolution_study_2020_en.pdf.

La question de l'acceptabilité par les usagers ou les citoyens, celle de l'emploi (remplacement, transformation ou création de nouveaux métiers), ou encore de l'évolution des cadres de responsabilité et de gouvernance sont désormais au cœur des préoccupations publiques. Le spectre du transhumanisme, du règne des cyborgs agitent les esprits et fait craindre que l'homme « ne soit réduit à une sous-espèce et à former les chimpanzés du futur[6] ». Si certains anticipent une automatisation massive des tâches à faible valeur ajoutée, d'autres insistent sur la nécessité d'accompagner l'innovation par des mesures de formation, de reconversion et d'encadrement de l'usage des technologies autonomes qui reposeront probablement sur les épaules des États. La perception des risques liés à la sécurité, à la protection des données et à l'éthique algorithmique varie selon les régions, les cultures, et les usages. L'adoption de standards internationaux et l'élaboration d'une gouvernance globale représentent un enjeu central pour limiter les dérives potentielles et garantir un développement harmonieux des systèmes autonomes. L'exemple récent des discussions autour de la réglementation européenne des IA montre combien la maturité des débats varie d'un continent à l'autre et influence la trajectoire industrielle du secteur.

1.3. Objectifs et structure du rapport

Face à ces défis, ce rapport se donne pour objectif de revenir sur les multiples définitions de l'autonomie, d'analyser l'état de l'art technique des systèmes autonomes en France, de cartographier les principales dynamiques industrielles et institutionnelles, et de mener une analyse des difficultés rencontrées – qu'elles soient technologiques ou réglementaires – dans les trois grandes zones : Europe, Asie et États-Unis. La méthodologie adoptée combine :

– une revue des publications académiques et techniques récentes,

6 Pour le cybernéticien anglais Kevin Warwick, « Il y aura des gens implantés, hybrides, et ceux-ci domineront le monde. Les autres, qui ne le seront pas, ne seront pas plus utiles que nos vaches actuelles gardées au pré [...] Ceux qui décideront de rester humains et refuseront de s'améliorer auront un sérieux handicap. Ils constitueront une sous-espèce et formeront les chimpanzés du futur. »

- une analyse des marchés et des acteurs industriels,
- un examen des cadres réglementaires et normatifs,
- des entretiens et des retours d'expérience de personnalités issues d'organismes publics et privés
- une synthèse sur l'état de l'art

Ce rapport sur les systèmes autonomes espère répondre à un triple intérêt ; (i) scientifique, car il interroge les limites actuelles de l'intelligence artificielle, de la robotique et de l'ingénierie système, (ii) économique, car les systèmes autonomes constituent un levier de compétitivité pour de nombreux secteurs industriels stratégiques, (iii) sociétal, enfin, car le déploiement massif de ces systèmes, questionne la capacité des gouvernements à mettre en place des politiques publiques qui vont transformer durablement les modes de vie, la définition du travail mais aussi les équilibres commerciaux.

Le rapport est structuré en deux parties : la première traite de la situation en France et la deuxième constitue un panorama de l'état de l'art.

La première partie dans son introduction situe le sujet dans son contexte global. Elle expose les raisons pour lesquelles les systèmes autonomes représentent un tournant technologique, économique et sociétal. Les objectifs de l'étude y sont clairement énoncés, tout comme la méthodologie adoptée pour mener cette analyse. Enfin, elle formule la problématique centrale qui servira de fil conducteur à l'ensemble de la réflexion.

Le chapitre consacré aux définitions et typologies des systèmes autonomes, établit les bases conceptuelles indispensables. Il précise ce que recouvre la notion d'autonomie, en distinguant les différentes catégories de systèmes existants, depuis les robots industriels jusqu'aux véhicules autonomes. Des exemples concrets illustrent ces distinctions, permettant au lecteur de saisir les nuances entre les technologies et leurs applications.

Les chapitres 3 à 5 proposent une analyse spécifique du positionnement national dans le domaine des systèmes autonomes terrestres, aériens et

maritimes en abordant le domaine civil et militaire et le chapitre 6 traite du financement de la R&D.

Les chapitres 7 et 8 ouvrent des pistes pour l'avenir. Ils s'appuient sur les constats précédents pour formuler des propositions concrètes à destination des industriels, des pouvoirs publics et des chercheurs.

Dans une deuxième partie, les problématiques inhérentes aux trois différents milieux élargissent la perspective au-delà des aspects purement techniques et démontrent à quel point l'environnement dans lequel ils évoluent est structurant pour les systèmes et leur modèle économique.

L'écosystème industriel des systèmes autonomes, offre une présentation des principaux acteurs et des dynamiques qui structurent ce secteur. Il identifie les intervenants, qu'il s'agisse de start-ups, de grands groupes ou de laboratoires de recherche, et décrit les collaborations et compétitions qui animent ce domaine.

L'état de l'art technique dresse un panorama succinct des avancées technologiques récentes. Il met en lumière les innovations majeures en matière de capteurs, d'intelligence artificielle et d'architectures logicielles, tout en soulignant les défis techniques qui subsistent, comme la fiabilité ou la sécurité des systèmes.

Une comparaison internationale du financement de la R&D permet de situer les approches françaises par rapport à celles d'autres pays leaders dans le domaine.

1.4. Limites du rapport

Ce rapport s'est concentré sur les domaines et les systèmes les plus significatifs en volume et en investissements. Il n'évoque donc pas certains secteurs de robotisation augmentée par l'IA tels que la santé (chirurgie), les environnements contaminés (nucléaire ou pollution aux hydrocarbures), la surveillance de site, etc.

De même les risques systémiques liés à de multiples systèmes en opération dotés d'une autonomie ne seront pas évoqués, car ils ne sont pas à ce jour étudiés suffisamment, notamment lorsque des systèmes situés dans différents milieux interagissent. Il faudra probablement imaginer un niveau d'architecture supérieur qui organise ces interactions.

De même le choix a été fait de ne pas évoquer les problèmes de cyber-sécurité et sûreté qui devraient faire l'objet d'une autre étude à part entière. Le lecteur intéressé pourra consulter le site[7] de l'ANSSI (Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information) qui dispose d'une documentation appropriée sur le domaine cyber-sécurité.

Enfin le domaine militaire a été abordé uniquement dans la mesure de son rôle dans le milieu concerné (stratégie et projets) et parce qu'il draine pour certaines applications la majorité des financements.

7 https://cyber.gouv.fr/ et plus particulièrement https://messervices.cyber.gouv.fr/catalogue#%20guides

Chapitre 2

Les systèmes autonomes cyber-physiques

2.1. Définitions et typologies

Le terme système autonome (SA) est employé dans différentes verticales métiers ou technologiques (transport, robotique, défense, énergie) et plusieurs traditions académiques et normalisatrices en proposent la définition suivante :

> *Un système autonome est un système cyber-physique capable de percevoir son environnement, de se fixer des objectifs intermédiaires et d'exécuter des actions de manière indépendante, avec peu ou pas de supervision humaine sur des périodes significatives.*

Un article académique récent [8] définit ainsi à son tour le SA : « des systèmes impliquant logiciels, machines et personnes, capables d'agir avec peu ou pas de supervision humaine » et pointe la nécessité d'un cadre d'évaluation de la confiance (*trustworthiness*) couvrant sécurité, fiabilité, explicabilité et coûts/latences de décision. En effet, un élément clé pour l'adoption de ces technologies est le degré de confiance que l'on peut accorder à un système autonome, dans la mesure où la supervision humaine n'intervient plus que ponctuellement. Un cadre d'évaluation de la confiance de ces systèmes a été défini en Europe via le programme « confiance.ai » lancé par le SGPI en 2021 et relayé aujourd'hui par l'*European trustworthy AI association*[8].

8 https://www.trustworthy-ai-association.eu/

Selon Koopman et Wagner [32], un système autonome se caractérise par :

- L'autonomie décisionnelle, c'est-à-dire la capacité à analyser son environnement et à adapter ses actions en temps réel.
- L'autonomie énergétique qui doit permettre la gestion indépendante de ses ressources (batteries, carburant, etc.).
- L'autonomie opérationnelle qui consiste à exécuter des missions sans supervision continue et sans sortir du cadre fixé.

Ils soulignent que l'autonomie ne signifie pas une absence totale d'interaction humaine, mais une réduction significative de la dépendance à une intervention externe, grâce à des boucles de rétroaction avancées et des modèles prédictifs.

Dans l'ingénierie des systèmes, Beernaert *et al.* [5] proposent de quantifier l'autonomie comme une fonction de l'indépendance du système et de la complexité de la tâche : l'autonomie n'est ni binaire ni abstraite, elle se mesure pour un système donné appliqué à une tâche donnée, et peut évoluer dans le temps au fil des mises à jour et de l'apprentissage.

La littérature sur les niveaux d'automatisation (LoA (*Level of Automation*)) fournit un cadre opérationnel pour situer l'autonomie. Le modèle classique de Parasuraman [47], Sheridan & Verplank [57] distingue quatre classes de fonctions (acquisition d'information, analyse, sélection de décision/action, exécution) et, pour chacune, un continuum de niveaux allant du « manuel » au « tout automatique ». La « bonne » allocation de fonctions est contextuelle, dépend des conséquences des erreurs, de la fiabilité et de la charge cognitive.

Dans une perspective plus générale de systèmes autonomes industriels, Müller *et al.* [43]. distinguent quatre caractéristiques essentielles : exécution systématique du processus, adaptabilité, auto-gouvernance et isolation (*self-containedness*).

Les critiques récentes des taxonomies de LoA rappellent toutefois les confusions fréquentes entre automatisation (exécution selon des règles prédéfinies) et autonomie (capacité d'adaptation dans un environnement ouvert), et recommandent de clarifier concepts et méthodes d'évaluation [50].

Sifakis [58] [59] souligne que l'autonomie va bien au-delà de l'automatisation : elle implique une capacité à comprendre, s'adapter et agir de manière éthique dans des environnements ouverts. Pour y parvenir, il propose de :

- Développer des architectures hybrides (réintroduire l'IA symbolique + données).
- Intégrer des connaissances explicites (ontologies, règles).
- Créer des méthodes de validation rigoureuses pour les propriétés cognitives.
- Encadrer l'innovation par des standards techniques et éthiques.

La vraie rupture viendra lorsque les systèmes autonomes pourront rivaliser avec l'intelligence humaine dans sa capacité à lier raisonnement symbolique et adaptation contextuelle.

Dans des domaines plus spécifiques, on utilise des définitions plus resserrées :

Robotique : la norme ISO (*International Organization for Standardization*) 8373 définit l'autonomie comme la capacité d'exécuter des tâches prévues à partir de l'état courant et des détections, sans intervention humaine, pour une application particulière, le degré d'autonomie peut être évalué conformément à la qualité de la prise de décision et l'indépendance vis-à-vis d'un humain.

Véhicules routiers : le document SAE (*Society of Automotive Engineers*) J3016 [51] définit six niveaux (L0 à L5) selon la part de tâche dynamique de conduite (*dynamic driving task* DDT) assurée par le système, la surveillance de l'environnement (humaine *vs* système) et la gestion du repli (*fallback*). Ce référentiel, descriptif plutôt que normatif, est devenu le cadre *de facto* pour les régulateurs et les industriels. Les niveaux 1 à 3 nécessitent une surveillance continue du conducteur qui doit être capable de reprendre la main. Seuls les niveaux 4 (*Operating Design Domains* (ODD) définis) et 5 (tous ODD, peu réaliste à moyen terme) peuvent être qualifiés d'autonomes.

Aéronefs sans équipage : au plan européen, l'EASA (*European Union Aviation Safety Agency*) le définit comme tout aéronef conçu pour fonctionner de manière autonome ou être piloté à distance, et le terme UAS (*Unmanned*

Aircraft System) couvre l'aéronef, la station de pilotage et les liaisons C2 (*Command and Control*). Elle distingue le système télépiloté (RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*)) du système UAS pleinement autonome.

Navires de surface autonomes : l'OMI (Organisation maritime internationale) [42] dans son exercice de cadrage réglementaire, définit la MASS (*Maritime Autonomous Surface Ship*) comme « un navire qui, à des degrés variables, peut opérer indépendamment de l'intervention humaine », et catégorise quatre degrés (processus automatisés, contrôle à distance avec/sans équipage, autonomie complète).

Enfin, depuis 2024, le RAI européen installe un cadre horizontal basé sur les risques pour les systèmes d'IA, y compris ceux embarqués dans des produits autonomes : interdictions (risque inacceptable), obligations pour les systèmes à haut risque, et règles spécifiques pour les modèles d'IA d'usage général.

Bien que le RAI ne définisse pas l'autonomie au sens robotique, il précise les obligations des fabricants et des offreurs de service et interagit avec les réglementations sectorielles (automobile, aérien, ferroviaire, maritime).

2.2. Vers des « machines logicielles autonomes » ?

2.2.1. Automatisation versus Autonomie

L'automatisation consiste en l'exécution d'actions prédéfinies selon des règles ou des conditions, sans capacité d'adaptation hors du scénario prévu.

L'autonomie, par contre, suppose une capacité à percevoir, raisonner, prendre des décisions et s'adapter à un environnement ouvert, avec un certain degré d'indépendance vis-à-vis d'un opérateur humain.

D'ores et déjà les outils de type orchestrateurs exécutent des processus selon des conditions définies (*if/else, triggers*), mais ne modifient pas leurs règles sans intervention humaine et ne planifient pas de nouveaux objectifs par eux-mêmes.

Cela les place dans la catégorie des automates avec un domaine de fonctionnement contraint, mais pas dans celle des systèmes autonomes au sens que nous voulons leur donner.

Cependant, si ces systèmes intègrent une perception dynamique (ex. analyse de contexte en temps réel) adaptée à leur mission, une planification adaptative (ex. réorganisation du flux de travail (*workflow*) sans intervention humaine) et une capacité d'apprentissage (ex. optimisation des règles via IA), alors on peut parler d'un degré d'autonomie (souvent appelé niveau 1 ou 2 dans les modèles de LoA. On commence par ailleurs à voir apparaître le LoA 3 voire 4 mais l'humain décide *in fine*. Cette zone « grise » entre automatisme et degré d'autonomie entretient parfois quelques fantasmes.

2.2.2. Exemples appliqués à l'IT et à la cyber-sécurité.

Le tableau ci-dessous permet dans le domaine opérationnel considéré de concrétiser ces degrés d'autonomie.

Table 2.1 : Exemples de niveaux d'automatisation en informatique

LoA	Définition opérationnelle	Exemples logiciels (agents d'IA)
0	Manuel pur : perception, décision et action humaines.	Un analyste humain rédige rapports et requêtes sans assistance.
1	Aide à la perception : agrégation/affichage des données.	Agent synthétise les logs au sein d'un SIEM sans proposer d'actions.
2	Assistance analytique : détection/analyse, décision.	Agent détecte des anomalies et propose des hypothèses quant à la cause (s'enrichit des expériences passées) en explicitant si possible ses sources.
3	Suggestion d'options : le système propose, humain choisit.	Playbooks pour *Infrastructure as a Service* ou plans de migration multi-étapes à valider.
4	Recommandation priorisée + justification.	Agent « Planner LLM » propose un plan unique argumenté. (basé sur multi-génération puis optimisation). L'humain décide.
5	Action si activité approuvée : *human-in-the-loop*.	Runbook de remédiation exécuté après validation.
6	Action sauf veto : *human-on-the-loop*.	Agent FinOps réalloue ressources (kill-switch).
7	Action autonome avec information *a posteriori*.	EDR : isolation automatique d'endpoint puis notification.
8	Autonomie complète dans des domaines bornés (ODD).	Datacenter : prévision, planification, autoscaling, repli.
9	Autonomie générale (toutes conditions) sous fortes contraintes.	Orchestrateur multi-agents optimisant coûts/qualité/risque.

Les agents d'IA facilitent donc la montée en niveau d'autonomie grâce à :

- Une perception multi-modale et une mémoire de travail,
- Une planification hiérarchique et usage d'outils,

Les développements en cours s'orientent vers l'utilisation :

- De boucles fermées « Perception–Planification–Action » et re-planification ce qui implique des LoA de niveau 6/7/8 (actions proactives, *fallback*, apprentissage sous garde-fous).
- D'une orchestration multi-agents et optimisation multi-objectifs ce qui implique des LoA de niveau 8/9, sous contraintes fortes réglementaires en Europe (RAI, sécurité, DIH (Droit international humanitaire)).

Un système de régulation de transport comme celui de la ligne 14 du métro parisien basé sur la norme CBTC (*Communications Based Train Control*) représente dans le domaine opérationnel défini, un système autonome logiciel capable de gérer des capteurs multiples répartis entre 7 sous-systèmes, avec l'homme dans un rôle de superviseur.

De même à bord d'un navire militaire moderne, le système de combat est un système complexe où l'automatisation et, dans certains cas, l'autonomie décisionnelle jouent un rôle central. Dès qu'une menace surgit – qu'il s'agisse d'un missile anti-navire à Mach 3, d'une torpille ou d'un drone hostile approchant à basse altitude – chaque seconde compte. Les capteurs, radars ou sonars, collectent en permanence des données, tandis que des algorithmes les analysent en temps quasi-réel pour identifier et classer les menaces. Ces systèmes ne se contentent pas de détecter : ils anticipent, calculent des trajectoires, et proposent – voire déclenchent – des réponses avant même que l'équipage n'ait eu le temps de les valider. Pour les menaces les plus imminentes, comme un missile en phase terminale, des systèmes comme le RapidFire[9] de Thalès/Nexter ou le Phalanx de Raytheon agissent en mode « human out of the loop » : ils ouvrent le feu sans attendre une validation humaine, car une hésitation de quelques secondes pourrait être fatale. À l'inverse, pour des décisions, comme le choix d'engager un adversaire à longue portée ou de modifier la posture défensive du navire, l'humain reste « in/on the loop », validant ou ajustant les propositions du système.

Les codes logiciels qui gèrent ces multiples agents sont critiques, car ils doivent garantir que le système reste dans le domaine opérationnel souhaité et surtout que la sécurité des opérations qu'ils contrôlent soit assurée. Cela suppose des équipes compétentes notamment pour apprendre au système à gérer les situations inconnues lors de son apprentissage. La plupart des systèmes que nous allons évoquer par la suite sont dépendants de ces technologies logicielles quant à leur performance et leur domaine fonctionnel et ne seront plus évoqués dans la suite du document.

9 https://www.opex360.com/2022/10/19/thales-et-nexter-ont-devoile-la-version-definitive-du-nouveau-systeme-darme-rapproche-de-la-marine-nationale/

Il semble que la tendance aille vers l'utilisation d'agents intelligents spécialisés sur des fonctions très limitées dont on peut garantir la fiabilité avec une certaine assurance et combinées entre eux par des orchestrateurs hybrides associant IA symbolique et créativité des GenIA. Pour conclure sur les définitions, on s'aperçoit que la notion d'autonomie est très variable pour chaque type de système et que la combinatoire (voir tableau ci-dessous) est élevée.

Le choix se fait dans le cadre de la mission assignée au système, de son environnement d'exécution, du niveau de performance souhaité ou atteint par les capteurs, logiciels et calculateurs associés et du degré de sécurité et de confiance que l'on souhaite.

Table 2.2 : Tableau croisé des niveaux d'automatisation et des fonctions

Fonction & Niveau	Acquisition	Analyse	Décision & sélection	Exécution
1	L'humain collecte tout	Analyse humaine	Décision humaine	Action humaine
2	Machine aide à collecter	Suggestions simples	Humain choisit	Exécution manuelle
3	Acquisition semi-auto	Classement d'options	Humain choisit	Exécution assistée
4	Acquisition proactive	Recommandation	Humain valide	Exécution assistée
5	Acquisition auto	Analyse complète	Machine propose, humain approuve	Exécution auto après go
6	Acquisition auto	Analyse + seuils	Machine décide sauf veto	Exécution auto, stoppable
7	Acquisition fermée	Analyse adaptative	Machine décide, informe	Exécution auto, journalisée
8	Acquisition autonome	Analyse prédictive	Décision autonome	Exécution bout-en-bout
9	Gestion active capteurs	Raisonnement multi-hypothèses	Décision anticipative	Exécution adaptative
10	Auto-gouvernance perception	Auto-modélisation	Définition sous-objectifs	Exécution auto-managée

2.3. Distinctions entre systèmes civils et militaires

Sur le plan technique, de nombreux sous-ensembles (capteurs, actionneurs, planification, perception multimodale, IA) sont communs aux systèmes civils et militaires même si les capteurs militaires sont prévus pour des plages de performances et de résistances supérieures (mais pas toujours) à leurs homologues dédiés à des applications civiles. Le facteur coût est d'ailleurs souvent l'obstacle principal à un usage dual.

Ce qui les différencie, ce sont :

le cadre d'emploi ; c'est-à-dire des opérations en environnements dégradés/contestés (GNSS (*Global Navigation Satellite System*) *spoofing/jamming*, guerre électronique), des considérations sur le fait qu'ils peuvent être perdus ou pas, des contraintes d'interopérabilité et surtout,

les règles d'engagement ; l'OTAN et la France soulignent que l'autonomie est un « élément clef du futur espace de bataille », tout en imposant des principes d'usage responsable alignés sur le droit international et ses *Principes d'Utilisation Responsable* (PUR) de l'IA (légalité, responsabilité, redevabilité, explicabilité, traçabilité, fiabilité, gouvernabilité, atténuation des biais).

En droit des conflits armés (DIH), la discussion se focalise sur les SALA (Systèmes d'armes létaux autonomes). Il n'existe pas encore de définition universelle contraignante, mais la littérature (UNIDIR (*United Nations Institute for Disarmament Research*) [63], revues juridiques) et les organisations humanitaires convergent sur le fait que les principes de distinction, proportionnalité et précaution s'appliquent pleinement aux systèmes autonomes, et que la capacité contextuelle actuelle des algorithmes pose des défis à une application fiable de ces principes.

Le CICR (Comité international de la Croix-Rouge) [30] plaide pour un instrument international combinant interdictions (p.ex. systèmes imprévisibles ou visant des civils) et restrictions (exigences de contrôle humain significatif, limitations contextuelles), en réaffirmant les obligations d'examen juridique des armes.

La dynamique diplomatique s'est accélérée : en 2025, l'Assemblée générale de l'ONU a publié un document[10] faisant le point des problématiques sur les nouvelles technologies et notamment « les avancées numériques actuelles, en particulier l'IA » et leurs applications dans les systèmes d'armes. Les politiques nationales illustrent la spécificité militaire. En France [9] [11], et aux États-Unis [62], on exige que les systèmes d'armes dotés de fonctions autonomes permettent aux commandants/opérateurs d'exercer un niveau approprié de jugement humain sur l'emploi de la force, ce qui impose des revues techniques renforcées sur les systèmes et oblige à aligner le développement sur les principes d'IA responsable.

Le projet *PenDragon* de l'armée de terre française va aborder de manière concrète cette problématique de transposition d'un ordre de combat de niveau section à un ensemble de robots terrestres et aériens dans un espace-temps donné, coopérant avec des entités humaines de même niveau au sein d'une compagnie et cela sans créer une complexité accrue.

Il faudra veiller au transfert des enseignements appris au sein du projet Pendragon vers les applications civiles pour accélérer la convergence capacitaire entre domaine civil et militaire.

2.4. Décomposition et chaîne de la valeur

Les deux graphiques ci-après [3] montrent à la fois la complexité des systèmes mais aussi les briques élémentaires pour lesquelles des choix doivent être faits en termes de recherche, de production ou de chaîne d'approvisionnement pour garantir la compétitivité des fabricants, la viabilité des fournisseurs de second rang ainsi que le niveau de résilience souhaité.

10 https://documents.un.org/doc/undoc/gen/g25/104/23/pdf/g2510423.pdf

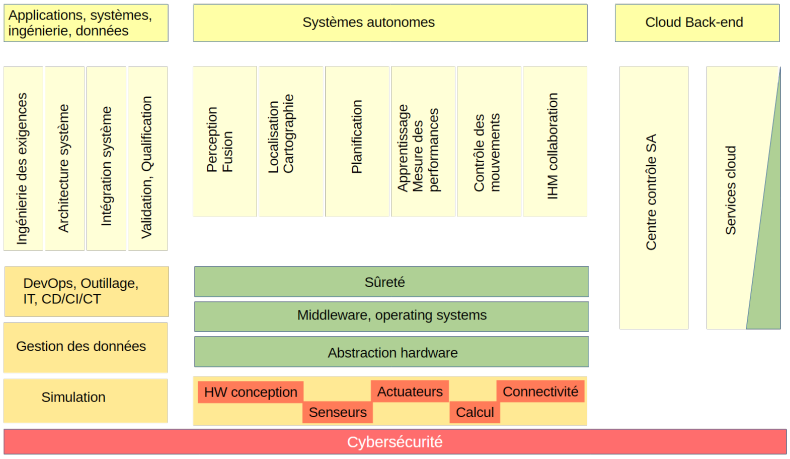


Figure 2.1: Décomposition fonctionnelle

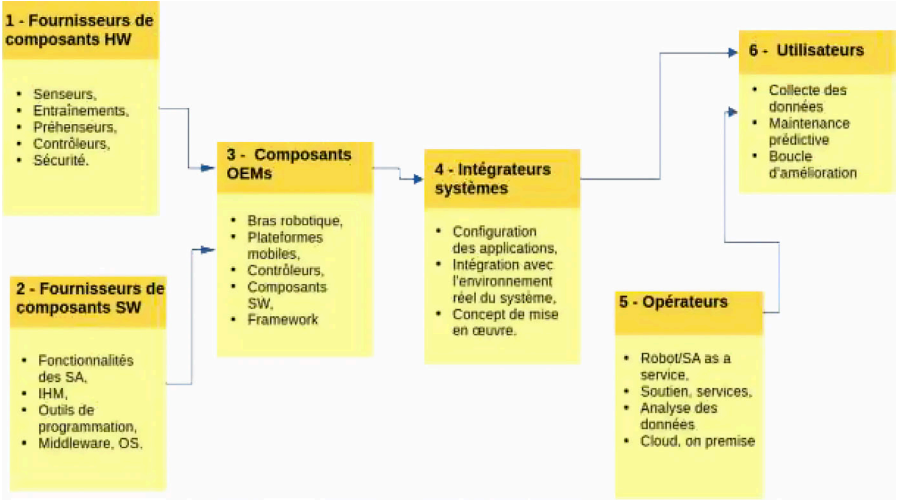


Figure 2.2: Chaîne de la valeur

Comme le recommande l'étude du GICAT-ADIF (Association de Drone de l'Industrie Française) [20] (voir page 183) il faut continuer à analyser les dépendances et les élargir aux applications civiles pour vérifier le recouvrement de la recherche et de l'industrie dans les différents axes de la chaîne de valeur, détecter les opportunités et corriger les lacunes.

2.4.1. Architecture générale de la chaîne de valeur

La chaîne de valeur des systèmes autonomes et robotiques comprend cinq niveaux principaux, dont la rentabilité et la captation de valeur varient considérablement selon la maturité du marché et le degré d'intégration verticale des acteurs.

Niveau	Rôle	Marge typique
Fournisseurs HW	Composants : actionneurs, capteurs, puces	10–25 % (volume)
Fournisseurs SW	OS robotique, IA, simulation	30–60 % (SaaS)
OEM	Robot / véhicule complet	5–20 %
Intégrateurs systèmes	Déploiement, customisation	10–20 %
Opérateurs	Service final (ride, logistique)	Variable, souvent négatif au début

La logique économique commune aux trois secteurs montre que la valeur migre vers le logiciel et l'opérateur, mais le matériel reste le goulot d'étranglement à court terme favorisant les fournisseurs de hardware. Deux décompositions de cette chaîne de la valeur sont fournies pour la robotique logistique (voir 9.3.2, page 102), les véhicules autonomes (voir 12.3.3, page 122) et la robotique humanoïde (voir 14.2, page 130).

Chapitre 3

Systèmes autonomes terrestres

Nous allons évoquer les principaux secteurs d'applications des systèmes autonomes en France à savoir : l'agriculture, la robotique humanoïde, la logistique et enfin nous aborderons brièvement le domaine militaire de la robotique autonome terrestre.

3.1. Domaine civil

3.1.1. Le secteur de l'agriculture

Élevage

Nous évoquerons tout d'abord les systèmes autonomes robotisés dédiés à l'élevage qui sont un des succès de cette filière puisqu'à divers degrés, tous les élevages en France et en Europe en sont équipés.

Il s'agit principalement des :

- robots de traite[11],
- robots d'alimentation,
- robots de nettoyage et de repousse fourrage.

11 Voir par exemple : https://www.lely.com/fr/solutions/traite/astronaut/#vido

Figure 3.1 : Station de traite Lely Astronaut

Les facteurs de succès sont basés sur l'introduction du concept « *Circulation libre des vaches* » : celles-ci décident quand elles mangent, boivent, se couchent ou se font traire. Ce concept nécessite la modification des infrastructures pour s'adapter aux robots, l'introduction de systèmes de détection des trayons performants (sans intervention humaine) s'adaptant à chaque vache (caméras, laser, etc.) ainsi que la mise en place d'une analyse comportementale des animaux. L'évaluation préventive de leur état de santé par analyse en temps réel des données laitières ainsi que le déploiement d'un système d'information convivial à la main de l'agriculteur, favorisent grandement son adoption.

Mais les différentes études montrent que :

- Les robots doivent faire plus que réaliser une action automatisée, ils doivent aussi s'intégrer dans un dispositif complet d'élevage de précision (alimentation de précision par exemple),

- S'ils permettent clairement de gagner du temps et du confort, le retour sur investissement est encore délicat (durée de 12 à 15 ans),

- Les robots ne dégradent pas forcément la relation homme-animal. Ils peuvent aussi aider les éleveurs à mieux connaître leurs animaux et passer plus de temps auprès d'eux.

Autres secteurs agricoles

En 2003, Renault Agriculture a été rachetée par le groupe allemand Claas, marquant la fin de l'ère française dans le secteur des tracteurs agricoles. Aujourd'hui il existe malgré tout une capacité de production et de sous-traitance, non négligeable sur le sol français[12] [12].

Cette disparition de constructeurs français a des conséquences importantes sur la R&D et l'implication des acteurs industriels traditionnels du domaine. Il reste cependant un centre R&D chez Claas, basé à Velizy, un autre chez Massey Ferguson à Beauvais et Kubota a ouvert un centre R&D Europe près de Senlis. Mais ils ne semblent pas y consacrer des ressources sur les technologies avancées (robotique, architecture électronique)

Il ne reste plus que des équipementiers (fournisseurs d'outils plus ou moins intelligents pour les machines) qui essayent de s'adapter au marché mais n'ont pas une surface financière capable de supporter les investissements nécessaires à des projets de robotique (plusieurs dizaines de M€ en moyenne).

En outre il existe une grande diversité de conditions économiques, fonction du secteur, qu'il soit élevage, laitier, maraîcher, céréalier, arboriculteur, plein champ ou sous serre pour ne citer que les plus importants.

Le secteur agricole qui fait face à des réglementations de plus en plus restrictives et un changement climatique rapide est certainement celui qui a le plus besoin des progrès que permet la robotique. L'impact de ces réglementations peut être une opportunité pour faire adopter des solutions technologiques en rupture.

Il s'agit cependant de l'environnement le plus complexe, combinant la difficulté de la mobilité autonome, d'un paysage en perpétuelle évolution, d'une interaction avec le sol unique et des boucles de validation d'expérience qui se chiffrent en années.

12 https://www.engin-tp-agricole.com/marque-francaise-de-tracteur-agricole-informations-et-parts-de-marche/

Contrairement à l'industrie, l'élevage en intérieur, ou la culture sous serre, où le processus de production a été configuré pour faciliter le déploiement de la robotisation, le travail aux champs entraîne le besoin d'adaptation, en continu, à l'environnement extérieur (lumière, climat, sol, relief…) y compris à l'intérieur de la parcelle. La reconfiguration de cet environnement pour optimiser le processus de production n'est pas évoquée pour les opérations en environnement extérieur (forme des champs, largeur des fourrières, regroupement de parcelles, type de rotation…) et les enjeux de sécurité compliquent le déploiement des robots.

Les facteurs d'adoption

Capacité financière : L'appartenance à un secteur détermine **la capacité financière** des entreprises agricoles à se procurer des machines autonomes, donc l'objectif est de libérer du temps ou remplacer un ouvrier agricole. Le producteur de Champagne ou de Bourgogne a plus de capacité d'investissement que le producteur de céréales ou le maraîcher.

Taille d'exploitation : Le coût d'un robot varie de 30 à 250 K€ et doit travailler 1000 à 1500 heures par an pour être rentable, donc cela implique une **taille d'exploitation**[13] qui dépasse largement la taille moyenne des exploitations en France. Contrairement à élevage ou culture sous serres, la saisonnalité des usages ainsi que la gestion des cultures de la rotation rendent la maitrise technique et l'amortissement plus difficile. Cependant il y a une maîtrise supplémentaire pour le déploiement de solutions autonomes en raison des difficulté à garder des opérateurs motivés, opérationnels et financièrement accessibles en activité saisonnière. Une grande partie du travail de planification/programmation des opérations peut être préparée hors saison ce qui permet de valoriser les compétences du superviseur de robot, hors des périodes de travail au champ, sous réserve que l'exploitation puisse justifier un emploi permanent (voir faisabilité/rentabilité du partage équipement et superviseur avec la distance entre parcelle d'exploitations partageant la ressource) Il reste l'enjeu travail à la campagne pour attirer et

13 La taille moyenne est passée de 55 ha en 2010 à 69 ha en 2020 (voir https://www.insee.fr/fr/statistiques/7728861?sommaire=7728903).

retenir des superviseurs robots expérimentés (contraintes famille et accès aux services).

Cela devrait favoriser la mise en place des robots à proximité d'espaces urbains, qui à contrario compliquent les déplacements entre parcelles.

Mobilité : L'autre facteur est **réglementaire**, aujourd'hui un robot autonome ne peut pas franchir un chemin ou une route de manière autonome et doit être mis sur une remorque. Ce facteur limitatif **majeur** fait perdre beaucoup d'intérêt sur les parcelles de taille moyenne (quelques hectares) qui existent en France et plus généralement en Europe, réduisant ainsi la taille du marché. Autre facteur limitatif, la **vitesse de travail** qui nécessite plusieurs robots pour remplacer un tracteur et implique un fonctionnement en essaim qui renchérit les coûts et qui n'est pas complètement maîtrisé techniquement aujourd'hui.

Effet start-up : Autre facteur négatif, beaucoup de start-ups sont essentiellement au départ des développeurs de logiciel capables d'intégrer des capteurs mais peu connaissent les lois de la physique lorsqu'il s'agit de faire pénétrer des outils dans les sols qui présentent des variabilités importantes intraparcellaire (dureté, humidité, relief) et en fonction des cultures (tassement, résidus) et de prendre en compte les forces de rappel s'exerçant sur les châssis, ce qui limite la précision des positionnements de ces outils, pourtant nécessaire pour garantir la qualité de leur travail. De plus les objectifs de réduction de taille de robots travaillant plus longtemps sont confrontés à la sensibilité accrue de ces équipements aux instabilités induites par le déplacement sur des surfaces irrégulières. Il y a là aussi le besoin de contrôler, en continu, l'état opérationnel des outils et d'adapter, de façon automatique les outils travaillant aux conditions variables (sol, état de surface, résidus, humidité) afin de garantir le résultat souhaité. Concernant la configuration de ces équipements il y aura arbitrage entre solutions dédiées et autonomisation de véhicules pouvant exécuter des travaux variés.

Amortissement : Autre facteur économique défavorable, les **amortissements**, les CAPEX sont amortissables mais pas les OPEX (ils sont cependant déductibles du bénéfice agricole) ce qui veut dire que la location de machines pour les petites surfaces est plus intéressante pour un agriculteur, ce qui là encore n'encourage pas les achats de robots autonomes et réduit

la taille du marché. Même si les 10 700 CUMA (Coopérative d'Utilisation de Matériel Agricole) possèdent un parc de 255 000 machines (mais seulement 6 700 tracteurs), aucune indication n'apparaît dans leur bilan 2024 sur la possession de robots autonomes[14].

Aspect culturel : Un aspect majeur de la mise en place des robots est la formalisation préalable des actions pour en anticiper les interactions. Ce mode opératoire représente une rupture forte par rapport aux modes de fonctionnement de la grande majorité des agriculteurs qui ont des processus de décision élaborés mais rarement formalisés.

Instabilité réglementaire : La mise en œuvre prochaine de la réglementation européenne 2023/1230 sur les machines agricoles introduit de nouvelles normes de sécurité et de cyber-sécurité et va accroître les coûts et générer un attentisme chez les fabricants[15] et les utilisateurs.

Les fabricants traditionnels

Un certain nombre d'agro-équipementiers se lance dans la fabrication de robots autonomes. Mais on estime en France le parc de robots autonomes à 800–1 000 machines.

En tenant compte des capacités d'investissement des agriculteurs ou des CUMA, et des surfaces nécessaires pour amortir l'achat, on s'aperçoit que le nombre d'unités à produire est réduit et ne permet pas de rentabiliser sur un

14 Le taux de service varie entre 60 et 80 % : Cela implique un parc de 2,5 à 5 robots pour justifier le salaire du support technique maitrisant la technologie.

15 Ce qui a conduit le constructeur Kuhn a reporter la mise sur le marché de son robot Karl, https://www.futurefarming.com/tech-in-focus/autonomous-semiauto-steering/autonomous-tractor-karl-on-hold/.

seul marché, les investissements (de quelques centaines de machines[16] à un millier) production potentielle à comparer aux plusieurs milliers de tracteurs produits. Il est donc indispensable d'étudier des solutions adaptées à plusieurs secteurs agricoles pour bénéficier de l'effet d'échelle en mutualisant les secteurs.

Sur des marchés de niche comme la viticulture Vitibot[17] se fait racheter par l'équipementier italien SAME Deutz Fahr (SDF Group) (qui a déjà racheté la société française Grégoire fabricant de machines à vendanger), démontrant l'absence d'industriel français capable de s'intéresser à ce secteur pourtant traditionnel en France.

Il est intéressant de constater que par exemple Moët & Chandon a préféré développer un robot viticole avec le groupe japonais Yanmar plutôt qu'un acteur français ou européen. Moët & Chandon a investi depuis 2016, 1,6 M€ de robots autonomes dans ses 6 000 ha de vignobles dans le monde ! Un chiffre assez faible !

Action de l'État

Il n'existe pas de stratégie globale sur l'introduction de systèmes autonomes dans l'agriculture au niveau de l'État et les actions sont dispersées au sein de plusieurs entités.

Est-ce que l'absence de fabricants français a entraîné les autorités à avoir des approches uniquement orientées start-up qui ignorent le tissu industriel existant ?

16 En 2024, 23 976 tracteurs ont été immatriculés. **John Deere** atteint une part de marché de 22,8 %. Le grand perdant est **New Holland**, redescendu d'une marche avec la troisième meilleure part de marché, de 13,6 %, contre 15 % l'année précédente. **Fendt** est remonté ainsi avec 15,6 % des tracteurs standards immatriculés. **Massey Ferguson** affiche une belle année 2024, avec 10,8 % de part de marché, pour la quatrième place, au détriment de **Claas** (10,7 %). Viennent ensuite **Case IH** (8,5 %), **Valtra** (6,7 %), **Deutz-Fahr** (4,5 %) et **Kubota** (4,2 %), fermant la marche des constructeurs réalisant plus de 1 % de part de marché dans cette catégorie.

17 https://vitibot.fr/lentreprise/

Difficile de le savoir mais en tous les cas ce désintérêt ne favorise pas l'émergence de solutions pérennes (voir la faillite de Naïo[18] qui a brûlé 60 M€ de cash), c'est un parti pris qui fait fi de l'expérience des acteurs du secteur.

La certification n'est pas en avance et les acteurs sont en attente des niveaux de performance à atteindre pour pouvoir déplacer entre les parcelles et la ferme leur engin autonome.

Le grand défi robotique pour le volet agriculture est très largement sous-dimensionné (3 M€) par rapport aux enjeux et aux ambitions et a été confié à des organismes de recherche qui manquent de la dimension industrielle pour mener des campagnes de tests intensifs et intégrer l'ensemble des problématiques ci-dessus évoqué.

Technologies

D'un point de vue technologique les systèmes robotiques autonomes pour l'agriculture, font un usage intensif de l'IA au niveau des capteurs métier (détection des adventices, des insectes, des maladies, etc.).

Par contre l'apprentissage de la mobilité n'est pas aujourd'hui une option, car chaque parcelle est un cas particulier qui nécessiterait un apprentissage qui semble difficile à généraliser.

On constate que sur ce secteur de la robotique autonome pour l'agriculture, la technologie n'est pas un frein. Par contre la complexité de la filière et l'**absence de vision long terme** construite entre les acteurs de la recherche (CEA, Inria, CNRS), le ministère de l'agriculture, des finances, les syndicats agricoles et les distributeurs dont les intérêts rendent l'établissement d'un cadre clair et stable pour investir particulièrement ardu. La situation actuelle n'est pas favorable à l'éclosion d'ETI pérennes à vocation *a minima* européenne alors que le secteur est porteur.

18 https://www.agtechmarket.net/news/naiolastnews

Conclusions pour le secteur de l'agriculture

Il nous semble nécessaire de construire une vision partagée et une stratégie des moyens avec tous les acteurs concernés qui inclut le soutien réglementaire, l'intégration technologique et la préparation du marché pour garantir que les innovations soient pratiques et bénéfiques pour les agriculteurs.

Dans le cadre des évolutions structurelles et réglementaires de la filière, le désherbage automatique, par des robots autonomes, constitue une voie acceptée à condition que les conditions économiques et réglementaires soient rassemblées.

Pour en optimiser l'impact économique il conviendra, sans doute, de réserver la robotisation au travail lent sur le rang tout en assurant le désherbage interrangs avec des solutions conventionnelles[19].

Il va falloir adapter les programmes de R&D du grand défi robotique (projet STAIRS) dans son volet agriculture à cet objectif en augmentant massivement les volumes financiers et en subventionnant des fermes pilotes destinées à tester intensivement les solutions, notamment la reconnaissance de l'environnement et la discrimination des espèces végétales pour des tâches comme le désherbage.

Tester, pour valider les parcours de certification, les problèmes de sécurité et de sûreté de fonctionnement des robots en milieu naturel les points suivants :

a) Configuration des parcelles pour réduire la variabilité et faciliter le déploiement des robots.

19 Remarques :
a) De nombreuses startups ayant démarré avec un véhicule autonome ont abandonné la solution robotisée pour se concentrer sur le développement de leur technique de désherbage sur le rang, entrainée par un tracteur conventionnel.
b) Les constructeurs leaders qui proposent l'autonomisation de leurs tracteurs se concentrent pour le moment, sur des applications simples qui sont peu sensibles aux variations fines de la trajectoire (déchaumage, travail du sol, pulvérisation, fauchage…) mais pas encore sur les applications exigeantes (semis, désherbage…).

b) Identifier les modifications dans la conduite des cultures et l'organisation des rotations, pour faciliter le déploiement des robots. (à l'image du développement des vendangeuses qui ont favorisé la conduite des vignes palissées au lieu de gobelets).

c) Identifier les modifications dans l'agencement du territoire permettant de faciliter le déploiement de la robotique.

d) Clarifier les conditions opérationnelles et économiques en fonction des cultures (à l'échelle de chaque culture et à l'échelle des rotations au niveau de l'exploitation) pour prioriser les déploiements, en s'appuyant sur des données objectives afin de limiter les déconvenues.

Il faut également modifier le cadre réglementaire pour rendre économiquement viable l'utilisation des robots autonomes (déplacement autonome sur route en introduisant peut-être un équipement du réseau routier dans les zones les plus compliquées).

Enfin il faut favoriser la R&D au sein des groupes industriels existants et binômer les start-ups avec les grands du domaine pour assurer la pérennité et la diversité des solutions tout en favorisant les kits d'autonomisation[20] des machines existantes (marché à l'avenir certain). L'accent devrait être mis sur l'amélioration incrémentale des machines existantes avec des fonctionnalités autonomes plutôt que sur le développement de nouvelles solutions robotiques, qui ne sont actuellement pas économiquement viables pour la plupart des agriculteurs.

3.1.2. Robotique humanoïde

Ce secteur est peu développé en France mais représente un potentiel énorme pour faire face aux problèmes de recrutement causés par la pénibilité des tâches (emploi dit rouge défini par les chartes de sécurité au travail dans les entreprises), le peu d'intérêt pour les tâches répétitives ou des coûts de main

20 Cette solution permet à l'agriculteur de débrayer les kits en cas de problème et constitue une économie de coût.

d'œuvre trop élevés. « Les analyses concordent : la robotique humanoïde devrait connaître une croissance exponentielle. Le marché mondial, estimé à 240 milliards de dollars en 2035, pourrait atteindre 5 trillions de dollars d'ici 2050[21] ».

Deux entreprises françaises sont présentes dans ce domaine avec des produits :

- **Enchanted Tools** pour les robots sociaux et d'accueil,
- **Wandercraft** pour les robots en milieu industriel[22].

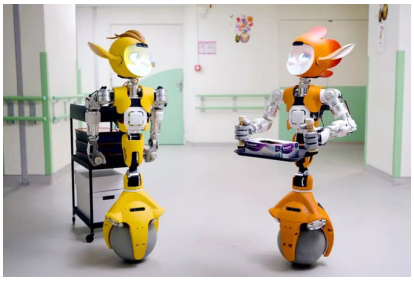


Figure 3.2 : Enchanted Tools

Figure 3.3 : Wandercraft

Une start-up, avec une équipe dirigeante au profil international et expérimenté vient de se créer fin 2025 à Paris ; il s'agit d'UMA[23].

UMA[24] développe deux catégories de robots complémentaires, destinées à adresser la majorité des besoins dans l'industrie et les services.

1. Un robot mobile industriel à deux bras : ce premier modèle vise les environnements logistiques, d'assemblage et de production. Ses applications

21 https://www.pei-france.com/article/uma-intelligence-robotique-europe-universal-mechanical-assistant/

22 Renault va déployer 350 robots dans ses usines d'ici mi 2027. https://robohorizon.eu/fr/news/2026/03/renault-robots-humanoides-usines/

23 https://uma.bot/

24 https://www.pei-france.com/article/uma-intelligence-robotique-europe-universal-mechanical-assistant/

incluent : préparation de commandes, manipulation d'objets variés, assistance en chaîne d'assemblage, opérations nécessitant précision, répétabilité et endurance. Son architecture est pensée pour automatiser des tâches qui restent encore largement manuelles, en particulier dans les entrepôts et centres de distribution.

2. Un humanoïde polyvalent pour environnements humains : le deuxième modèle est un robot humanoïde capable de se déplacer dans des espaces conçus pour les humains. Sa mission : assister les travailleurs et accompagner les personnes dans des environnements mixtes, qu'il s'agisse de laboratoires, d'hôpitaux, d'établissements d'enseignement, de commerces ou d'espaces publics.

Les briques technologiques

Les capteurs et effecteurs. Ils existent tous et sont sourcés beaucoup en Chine pour des raisons de coût (facteur 3 en moyenne par rapport à l'Europe).

Un effort est à faire sur l'autonomie des batteries mais le robot peut être éduqué pour changer lui-même sa batterie ou aller se recharger.

Les LLM et les VLM (Vision Language Model). Il faut encore améliorer les apprentissages et leur capacité à reconnaître les environnements structurés ou non dans lesquels ils opèrent. Cela passe dans le milieu industriel et santé, probablement par une combinaison d'aides extérieures (balises permettant au robot de se repérer comme des tags RFID, matériel adapté à la préhension du robot) et d'autonomie interne pour diminuer la complexité et le coût des robots.

Dans ce domaine, la capacité d'apprentissage **rapide** du robot pour l'insérer dans un nouvel environnement sera déterminante ainsi que son indépendance à des infrastructures cloud. Cela suppose que les constructeurs puissent constituer une base de connaissances suffisamment large pour couvrir un large spectre d'applications.

Les préhenseurs. Dans le cadre d'une approche graduelle, il semble plus judicieux d'adapter l'environnement aux capacités du robot plutôt que

d'essayer de reproduire la main humaine. Il faut donc adapter l'environnement aux missions que l'on souhaite faire exécuter.

La certification

Le marché est en attente et les acteurs français considèrent, compte tenu de leur approche éthique, qu'elle doit leur permettre de se développer. La sécurité de la gestuelle du robot est primordiale et il est urgent de définir, là aussi, quelques étapes claires du niveau de sécurité que l'on souhaite avoir pour faciliter une échelle dont les premiers niveaux sont atteignables à très court terme. (par exemple, le robot Mirokai de type pendule inversé ne peut pas monter ou descendre des escaliers structurellement, et est doté d'une solution de barrière virtuelle limitant son déplacement.)

Taille du marché

Le marché de la robotique autonome et humanoïde en Europe et dans le monde était estimé à 4,16 milliards de dollars en 2023 et devrait croître à un TCAC[25] de plus de 37 % jusqu'en 2032. La région Asie-Pacifique domine ce marché avec une part de plus de 53 % en 2023, grâce à des avancées technologiques rapides et à des investissements importants dans la robotique.

Robots sociaux

Ils ont pour mission d'accueillir le public, de le renseigner, d'amuser les patients ou d'interagir avec les personnes âgées pour maintenir une activité cérébrale, de jouer aux échecs, de transporter des médicaments ou des plateaux repas d'un point A à un point B, etc.

Leur coût est accessible (de l'ordre de 30 à 50 k€) avec un coût horaire de quelques euros. L'acceptabilité viendra de l'interaction fluide (temps de réponse) des LLM et des VLM avec les humains et leur environnement.

25 Taux de croissance annuel composé en anglais CAGR.

Robots industriels

On estime qu'à partir de 2035, si les développements actuels se poursuivent, l'insertion de ces robots multitâches viendra remplacer les humains dans les fonctions les moins complexes. La difficulté sera de trouver l'équilibre entre remplacement du travailleur et travail collaboratif.

L'approche de **Wandercraft**, de s'associer avec un industriel de l'automobile (Renault), est une voie intéressante pour introduire la robustesse dans les phases de pré-industrialisation et de production, si les séries sont au rendez-vous.

Conclusions pour la robotique humanoïde

Le volume du marché en France est actuellement limité, mais les perspectives de croissance attractives nécessitent un soutien pour permettre à des acteurs d'atteindre la taille critique.

Le robot humanoïde devrait devenir compétitif après 2035, c'est-à-dire demain. Il faut donc se poser la question du rôle que l'on souhaite accorder dans la société et les entreprises à ce nouvel outil afin de préparer une stratégie qui nous assure si possible un certain niveau d'indépendance.

Il faut donc favoriser[26] les commandes de robots sociaux par l'État via les hôpitaux et les cliniques et financer la charge de travail supplémentaire pour réaliser les tests grandeur nature à grande échelle afin de créer le marché (une centaine de robots, 4 à 5 M€) et doter les fabricants des bases de cas d'usage robustes. Il faut construire, là aussi une vision pour :

- décider quelle capacité l'on souhaite avoir en France au-delà de la R&D,
- décider si l'on veut construire un acteur de taille européenne voire mondiale dans ce secteur où des places sont encore libres,

26 ou bien adopter une approche comme celle des plateformes 5G pour démontrer aux acteurs industriels les avantages de cette technologie.

- démystifier l'autonomie des robots humanoïdes en introduisant par les standards et la certification une approche progressive et réaliste de l'autonomie.

Les annonces du constructeur automobile chinois Xpeng dissipent les doutes sur l'arrivée de la robotique humanoïde dans les usines. En effet ce constructeur a développé Iron un robot à la démarche très proche d'un humain qui sera déployé d'abord dans le service à la personne avant qu'une version plus robuste ne le soit dans les usines.

D'autre part UBTECH un fabricant de robots a entrainé ses robots en 2025 à travailler en essaim comme le montre cette vidéo[27].

Au-delà des présentations très « marketing » le *Boston Consulting Group*[28] nous rappelle très justement les limites actuelles des progrès réalisés.

27 https://www.ubtrobot.com/en/about/company-profile

28 https://www.linkedin.com/pulse/robotic-revolution-5-steps-towards-physical-dr-tilman-buchner-xyzaf

Table 3.1: Cinq niveaux d'évolution robotique

Niveau	Nom	Caractéristiques	Exemples d'utilisation
1	Programmation explicite	Les robots exécutent des séquences de mouvement fixes définies dans des langages spécifiques.	Soudage, collage, ébavurage, tâches simples de prise et dépose.
2	Perception visuelle	Introduction de modèles de vision par ordinateur permettant une estimation de la pose 6D des objets.	Tri adaptatif, manipulation flexible de pièces.
3	Manipulation habile	Capacité à manipuler des objets déformables grâce à des modèles Vision-Langage-Action (VLA).	Plier un t-shirt, gérer des faisceaux de câbles.
4	Planification des flux de travail	Les robots comprennent l'intention humaine et planifient de manière autonome les flux de travail.	Exécution de tâches dans des environnements inconnus.
5	Raisonnement	Capacité à raisonner sur les actions grâce à une représentation abstraite du monde.	Aide personnelle polyvalente, assistant robotique hospitalier.

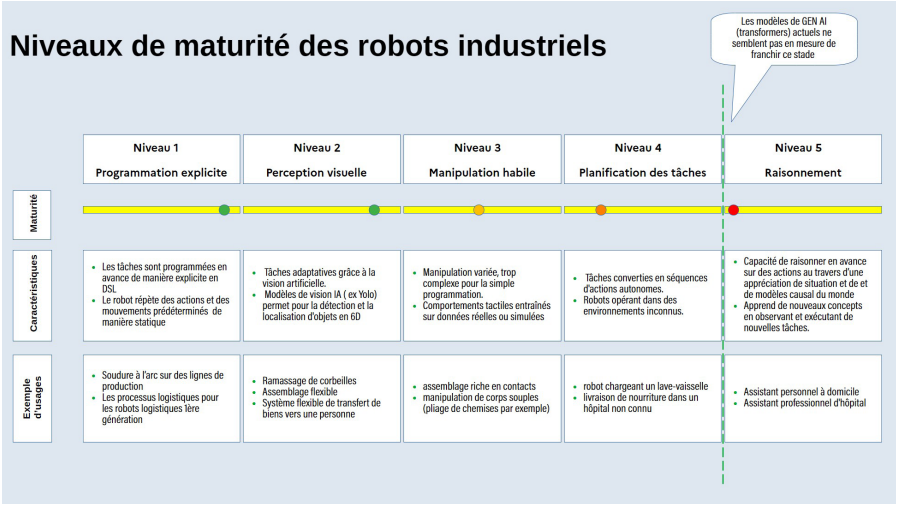


Figure 3.4: Niveau de maturité des robots industriels

« Les systèmes de niveau 4 s'appuient sur des modèles génératifs basés sur des décodeurs, capables de produire des réponses contextuelles et des séquences d'actions plausibles. Cependant, ces explications, aussi cohérentes qu'elles paraissent, n'émergent pas d'un véritable raisonnement. Ce sont des reconstructions statistiques qui imitent la structure de la pensée sans en effectuer le travail causal sous-jacent.

« À l'avenir, il est peu probable qu'un seul paradigme de raisonnement – qu'il s'agisse de la Chaîne de Pensée (*Chain of Thought*, CoT), de l'Arbre de Pensée (*Tree of Thoughts*, ToT), des algorithmes de planification ou des modèles de monde – domine à lui seul. Au lieu de cela, l'intelligence robotique la plus capable émergera d'une convergence de méthodes complémentaires, chacune apportant une force différente à la pile cognitive. »

Conclusion

En résumé, il reste encore beaucoup à faire pour atteindre le niveau 5. Cependant, le chemin vers des niveaux d'intelligence plus élevés déverrouille déjà un potentiel d'automatisation significatif : les capacités de niveau 2 et 3 permettent de nouvelles catégories d'applications industrielles. Longtemps avant que les humanoïdes ne rangent nos maisons, nous verrons probablement des systèmes robotiques à double bras effectuer des tâches d'assemblage complexes sur les chaînes de production.

3.1.3. Robot d'inspection

La start-up toulousaine Nio Robotics[29] produit un robot d'inspection original, polymorphe se déplaçant comme un serpent ou un véhicule, capable de monter les escaliers, de se déformer et de se glisser dans des endroits très peu accessibles. Le domaine applicatif est large et peut être étendu au domaine militaire.

29 https://www.nio-robotics.com/

Figure 3.5 : ARU polymorphisme

3.1.4. Logistique

Principaux acteurs français (siège social en France)

Ils ont au nombre de deux : Exotec et Scallog.

Le premier, basé à Lille, conçoit des systèmes de robots autonomes pour les entrepôts, notamment pour l'e-commerce et la logistique. Il est l'un des acteurs les plus dynamiques dans le domaine de l'automatisation d'entrepôts, avec son système Skypod désormais déployé sur plus de 200 sites clients à travers le monde.

Le deuxième, basé à Nanterre, est spécialisé dans les solutions d'étagères mobiles et robots pour la logistique et le *picking* en entrepôt. La société compte une quarantaine de clients industriels, illustrant une forte croissance et une adoption croissante de ses AMR (Autonomous Mobile Robot) en Europe.

Figure 3.6 : Scallog

Figure 3.7 : Exotec

Le marché en chiffres

Les données précises par entreprise ne sont pas toujours publiées, mais des acteurs comme Scallog ou Exotec affichent des croissances annuelles à deux chiffres, portées par la demande en automatisation logistique et industrielle.

La France représente une part modeste mais croissante du marché européen des AMR, dominé par des acteurs allemands, japonais et américains. Les entreprises françaises se distinguent par leur agilité et leur spécialisation dans des niches (logistique, e-commerce, défense).

Le marché des AMR en Europe est en forte expansion, avec une adoption accrue dans les entrepôts et les usines. Les fabricants français misent sur l'innovation, la R&D (5 à 20 % du chiffre d'affaires réinvesti) et l'internationalisation pour gagner des parts de marché.

Dynamique du secteur

La dynamique du secteur de la logistique connaît une expansion remarquable, marquée par une croissance soutenue et des évolutions technologiques majeures. Marché AMR[30]:

- Aux États-Unis, le segment du marché des robots autonomes (AMR) a engendré un revenu de plus de 14 milliards de $ en 2024 et devrait atteindre 31 milliards en 2030, avec un taux de croissance de 14,2 %.

- La zone Asie Pacifique génèrera le taux de croissance le plus important dans le monde de 2025 à 2030.

30 https://www.grandviewresearch.com/horizon/statistics/professional-services-robotics-market-outlook/type/autonomous-mobile-robots-amrs/global

Le marché de la logistique en Europe :

- En Europe, le segment de la robotique pour la logistique a généré un revenu de 3,7 milliards de $ en 2024, avec une prévision de taux de croissance annuel de 15,4 % de 2025 à 2030.

- Les composants matériels ont généré la plus grande partie des revenus en 2024. Toutefois, les services et logiciels demeurent les plus lucratifs et devraient connaître une croissance importante dans les années 2025 à 2030.

En Europe, les ventes d'AMR devraient dépasser celles des AGV (*Automated Guided Vehicle* – véhicules à guidage automatique) en 2025, avec une adoption particulièrement forte dans la logistique et la fabrication.

L'innovation technologique (navigation autonome, IA, modularité) est un pilier du succès, mais elle doit être couplée à une stratégie commerciale adaptée (portefeuille clients, modèle économique, partenariats).

La différenciation[31] ne repose pas seulement sur le robot lui-même, mais sur l'**intégration logicielle**, le **service client** et la **capacité à répondre à des besoins spécifiques**.

Conclusion pour le secteur de la logistique

Les sociétés doivent acquérir une taille suffisante pour financer leur croissance et il faut donc les aider à acquérir des parts de marché en Europe et en Afrique pour favoriser la montée en cadence des productions locales et soutenir la R&D de ce secteur en bonne santé.

31 https://www.voxlog.fr/actualite/9431/entretien-avec-stephanie-foucart-ingenieure-a-la-tete-des-equipes-rampd-logicielle-chez-exotec

3.2. Domaine militaire

La France se positionne comme un acteur clé dans le domaine de la robotique militaire, avec des entreprises et des partenariats stratégiques qui façonnent l'innovation et l'intégration opérationnelle.

3.2.1. Les principaux acteurs français

KNDS France Robotics[32]: Leader européen de la défense terrestre, KNDS conçoit, développe et produit des robots militaires terrestres, notamment via sa filiale KNDS France Robotics. Leurs produits incluent des robots modulaires pour la reconnaissance, le déminage, la surveillance et le soutien logistique, comme les gammes CENTURIO, NERVA et OPTIO. KNDS est aussi partenaire du programme DROIDE avec Safran, visant à développer des robots de combat autonomes pour l'armée française d'ici 2030–2035.

Exail[33]: Spécialiste historique des robots de déminage et de reconnaissance, présent sur le marché depuis plusieurs décennies avec des véhicules comme Cameleon et Iguana.

Autres acteurs et partenariats :

Safran Electronics & Defense: Partenaire clé de KNDS dans le programme DROIDE, Safran apporte son expertise en électronique, optronique et intelligence artificielle pour les robots terrestres.

Thales, Dassault Systèmes, Airbus Defense and Space: Ces groupes investissent surtout dans l'intégration de ces systèmes dans les chaînes de commandement et dans les boucles d'observation et de décision.

GICAT (Groupement des Industriels français de la Défense et de la sécurité terrestres et AéroTerrestres): Fédère l'écosystème industriel

32 https://knds.com/fr/filiales/knds-france-robotics

33 https://www.exail.com/product-range/unmanned-ground-vehicles

français autour de la robotique militaire, en organisant des challenges comme CoHoMa pour stimuler l'innovation.

L'armée française accélère l'intégration de robots terrestres pour réduire l'exposition des soldats et améliorer l'efficacité opérationnelle. Ils couvrent un large spectre : déminage, génie, logistique, reconnaissance et combat armé. Avec un budget prévisionnel de 5 milliards d'euros alloué aux drones et robots dans la LPM (Loi de Programmation Militaire) 2024–2030, on devrait voir arriver à la fin de la LPM des outils opérationnels.

Conclusion

Cette rapide étude montre que la France possède les compétences technologiques à même de mener à bien les projets de type systèmes autonomes dans le milieu terrestre. Les prochaines années verront :

- l'essor des systèmes réellement autonomes de niveau 4 (véhicules, robots de service),
- l'utilisation généralisée des algorithmes d'IA dans l'industrie pour améliorer la productivité et accélérer les cycles de développement,
- l'intégration poussée de l'IA générative pour un dialogue naturel et adaptatif,
- la convergence avec la 5G/6G pour la connectivité temps réel,
- le développement de robots compagnons à domicile et en santé.

Ce qui manque dans les deux cas étudiés, c'est une **vision holistique** et une **stratégie proactive** de l'État et du tissu industriel qui viennent compenser :

- la faiblesse du marché,
- la désindustrialisation croissante du pays,
- l'absence de leadership industriel,

– la frilosité des potentiels utilisateurs.

Des choix clairs permettraient de concentrer les financements privés et publics pour permettre de franchir les quelques verrous technologiques qu'il reste à résoudre et se focaliser sur les objectifs en recherchant des approches plus à l'écoute des besoins réels des clients finaux.

Par ailleurs, les avancées importantes attendues dans le domaine militaire suite à la dernière LPM devraient développer des composants clés pour la robotique autonome qui devraient bénéficier aux secteurs civils par dualité. Nous recommandons la constitution de groupes de travail transverses (industriels du secteur de la défense et civils, académiques, financeurs) pour étudier les retombées potentielles des développements prévus dans la LPM pouvant satisfaire aux objectifs des « feuilles de route » civiles.

Chapitre 4

Systèmes autonomes aériens

Le secteur du drone aérien a connu une forte croissance depuis le début de la guerre en Ukraine et la révolution technico-opérationnelle que représente son emploi sur le champ de bataille bouscule les habitudes et la base industrielle classique. Partant de produits à bas coût destinés au marché de loisirs et aux applications civiles de surveillance, les drones à vocation militaire constituent en France et en Europe fin 2025, 80 % du chiffre d'affaires des principaux fabricants.

Le chiffre global d'affaires de la filière en France est estimé à 150 M€, réparti très inégalement entre 2 acteurs majeurs DELAIR et PARROT qui font la majorité du chiffre d'affaires en France et des micro-acteurs dont le chiffre d'affaires ne dépasse pas le million d'euros, voire la centaine de milliers d'euros.

Le GICAT[34] et l'ADIF ont produit un rapport mi 2024 [20] qui étudie le domaine des drones aériens pour le combat aéroterrestre et qui contient 20 recommandations pertinentes dont la mise en œuvre tarde. Nous invitons le lecteur à les découvrir dans l'annexe D (page 183).

34 Fondé en 1978, il compte 480 adhérents et 70 start-ups.

4.1. Domaine civil

Deux associations représentent la filière, l'ADIF[35] pour les fabricants de drones et de composants et la FPDC (Fédération Professionnelle du Drone Civil) pour les entreprises vendant des services utilisant ces technologies.

4.1.1. État des lieux du marché des drones civils

Le marché des drones civils en France se caractérise par une diversification croissante de ses applications, reflétant à la fois les besoins des acteurs économiques et les avancées technologiques. Plusieurs secteurs émergent comme des leviers de croissance significatifs.

Dans le domaine du BTP et de l'immobilier, les drones sont désormais largement utilisés pour la cartographie, le suivi de chantiers, l'inspection d'ouvrages ou encore la thermographie, tandis que leur potentiel commercial dans la promotion immobilière est de plus en plus exploité.

Le secteur de la sécurité, qu'elle soit civile, privée ou publique, recourt également à ces outils pour la surveillance d'événements, la gestion de crises ou la protection de sites sensibles, avec une adoption notable par les forces de l'ordre.

L'agriculture, bien que confrontée à des contraintes réglementaires (trop) strictes, notamment en matière d'épandage, tire parti des drones pour la surveillance des cultures et la gestion des vignobles en pente. Les collectivités territoriales, quant à elles, intègrent progressivement ces technologies pour des missions de promotion territoriale, de gestion des espaces naturels ou de comptage d'espèces.

35 55 sociétés (constructeurs, fournisseurs de capteurs, intégrateurs). Extension récente du périmètre à la robotique terrestre, maritime et sous-marine. Elle représente 1000 emplois et 150 millions d'euros de chiffre d'affaires (2024).

Enfin, l'industrie et le secteur de l'énergie font appel aux drones pour l'inspection de lignes à haute tension et la maintenance d'infrastructures critiques, illustrant ainsi leur polyvalence opérationnelle.

Sur le plan quantitatif, le parc de drones en France compte plusieurs dizaines de milliers d'appareils déclarés [14], dont plus de 10 000 sont utilisés à des fins professionnelles.

La structure du marché reste marquée par une prédominance de petites entreprises, disposant de 1 à 5 appareils, représentant 80 % des exploitants, avec seulement quelques prestataires atteignant une taille significative, autour de 50 salariés.

La dépendance quasi exclusive aux drones chinois, principalement ceux de la marque DJI, qui équipe 95 % des utilisateurs, malgré la présence de constructeurs français tels que Parrot et Delair soulève des questions quant à la souveraineté technologique et à la compétitivité des acteurs locaux.

Par ailleurs, le chiffre d'affaires global de la filière reste difficile à évaluer avec précision, dans la mesure où les drones sont souvent intégrés dans des activités plus larges, comme le BTP ou l'agriculture, ce qui rend leur contribution économique indirecte et difficile à cerner. Entre 2023 et 2024, plus de 67 000 nouveaux drones de plus de 800 grammes ont été mis en service en France, ce qui, avec un prix moyen de 300 euros représente un marché de 200 M€ qui échappe aux constructeurs français et européens.

4.1.2. Enjeux et freins au développement du secteur

Les défis auxquels est confronté le marché des drones civils en France sont multiples et interdépendants.

La réglementation européenne, mise en place en 2019, est perçue comme excessivement complexe, avec une segmentation des opérations en catégories (open, spécifique, certifié) qui impose aux exploitants de disposer de plusieurs types de drones pour répondre à l'ensemble de leurs besoins et qui fragilise l'équilibre économique des petites structures. La DGAC (Direction

Générale de l'Aviation Civile) ne semble plus jouer un rôle moteur et transmet les dossiers vers l'EASA.

L'obligation de maintenir un contact visuel direct avec l'appareil (*line of sight*) limite par ailleurs l'automatisation des vols et, par conséquent, l'efficacité opérationnelle. Dans le domaine agricole, les restrictions concernant l'épandage par drone sont particulièrement contraignantes en France, comparativement à d'autres pays européens comme la Suisse, stérilisant le marché.

Cette complexité réglementaire est aggravée par un manque de coordination entre les différents ministères concernés (DGAC, Agriculture, Intérieur, Défense), ainsi que par l'absence d'une stratégie nationale claire et unifiée comparable à celle produite par l'Allemagne[36].

Les constructeurs français, bien que présents sur des niches spécialisées ou militaires, peinent à rivaliser avec DJI en termes de performance et de prix sur le marché civil. Le transfert des innovations développées dans le secteur militaire vers le civil reste par ailleurs insuffisamment exploité, alors même que les armées disposent de technologies avancées en matière d'autonomie et de résistance aux brouillages GPS.

D'un point de vue économique, le marché souffre d'un manque de volume, ce qui décourage les investissements en recherche et développement et perpétue un cercle vicieux : une faible demande locale entraîne une offre moins compétitive, qui à son tour limite l'adoption des solutions françaises.

Deux modèles économiques coexistent actuellement : d'une part, des prestataires proposant des services globaux, incluant la captation et l'analyse des données, et d'autre part, des pilotes spécialisés sous-traitant uniquement la phase de captation. Un retard technologique persistant renforcera la dépendance aux drones chinois, tandis que la concurrence européenne, notamment, menace de marginaliser les fabricants français si aucune action forte n'est engagée.

36 https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/aktionsplan-drohnen-englisch.pdf?__blob=publicationFile

Pour surmonter ces obstacles, plusieurs pistes d'action ont été identifiées. Il apparaît essentiel de :

- Créer un cadre interministériel permettant d'aligner la réglementation, la formation et le soutien aux industriels. À cet égard, l'Allemagne, qui a publié une stratégie drone nationale, pourrait servir de modèle pour la France. Une approche transversale, impliquant l'ensemble des secteurs utilisateurs (BTP, agriculture, sécurité) ainsi que les constructeurs, serait nécessaire pour harmoniser les efforts et maximiser l'impact des politiques publiques.

- Sur le plan réglementaire, une simplification des procédures s'impose, notamment pour faciliter l'innovation dans des domaines tels que les vols automatisés ou l'épandage agricole. Une harmonisation des règles au niveau européen permettrait également d'éviter les distorsions de concurrence entre les États membres.

- Parallèlement, un soutien accru aux constructeurs français et européens, via des investissements publics ciblés dans la R&D, pourrait contribuer à renforcer leur compétitivité. La création d'un marché local, incitant les collectivités et les entreprises à privilégier les solutions européennes, serait un levier complémentaire pour dynamiser la filière.

- La formation et la sensibilisation des utilisateurs constituent un autre axe prioritaire. Les banques des territoires, les collectivités et les entreprises doivent être mieux informées des applications potentielles des drones, tandis que de nouveaux métiers, tels que ceux de pilote, d'analyste de données ou d'expert en maintenance, devront être développés pour accompagner la croissance du secteur.

Un retard technologique persistant pourrait renforcer la dépendance aux drones chinois, tandis que la concurrence européenne, notamment de la part de l'Allemagne et de la Suisse, menace de marginaliser la France si aucune action forte n'est engagée.

Selon Statista, la valeur du marché civil est passée de 155 à 652 millions d'euros en 2025. Il se caractérise par un nombre élévé de start-ups et une mutation vers les services à valeur ajoutée par rapport à de la vente simple de drones.

Face à l'essor des usages, la réglementation européenne et nationale a encadré les pratiques pour garantir sécurité et traçabilité. La réglementation européenne[37] fixe les obligations des fabricants et des utilisateurs et introduit les catégories de poids des drones.

La DGAC [13], a publié un guide pour les usagers qui regroupe les obligations transposées en droit français.

L'obligation de balise électronique pour les drones de plus de 800 grammes s'ajoute aux exigences d'immatriculation et de formation. Ces règles orientent fortement les choix techniques et la gestion opérationnelle des flottes.

Table 4.1: Catégories des drones

Classe	Poids maximal	Usage principal	Règles clés
C0	Moins de 250 g	Loisir, captation légère	Pas d'enregistrement requis
C1	Moins de 900 g	Photographie amateur	Enregistrement recommandé, formation A1/A3
C2	Moins de 4 kg	Inspections techniques, sécurité	Immatriculation et formation pratique
C3	Moins de 25 kg	Applications professionnelles	Autorisation préalable et certifications
C4	Jusqu'à 25 kg automatiques	Usages industriels spécialisés	Certification avancée et surveillance

L'ADIF[38] dans son étude datée de 2022 sur l'industrie du drone civil notait déjà une forte dépendance à l'importation de batteries et de cartes électroniques et surtout le taux très faible de briques communes entre les constructeurs, ce qui augmente les coûts. La situation ne semble pas s'être améliorée.

37 https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0945

38 adif.aero

Table 4.2 : Quelques acteurs des drones en France

Entreprise	Chiffre d'affaires (2024–2025)	Part de marché / Positionnement
Parrot	~75 M€	Leader français, 2e fabricant mondial de drones de loisirs derrière DJI, forte présence à l'international.
Drone Volt	~25 M€	Spécialiste des drones professionnels, en forte croissance, positionné sur les services associés.
Delair	~30 M€	PME toulousaine, initialement civile, désormais aussi militaire, vise le leadership européen.
Nova-dem	Quelques centaines de drones NX70 produits	Drones de défense et de sécurité, mais aussi applications civiles (inspection, surveillance).
Azur drones	Filiale de Exail	Surveillance de sites.

4.2. Domaine militaire

Les drones à vocation militaire dédiés à la reconnaissance, aux communications, au brouillage et aux interdictions et neutralisations sont nombreux et forment un vivier d'innovations pour les domaines de la navigation en conditions perturbées, de stabilité de vol, de vol en essaim avec mode coopératif ainsi que l'intégration de charges utiles complexes.

Compte tenu du marché qui s'ouvre aux sociétés, on voit émerger des start-ups à croissance très rapide comme *Alta Ares*[39], fondée en janvier 2024, capable de remporter le challenge Innovation de l'OTAN en avril 2025 devant beaucoup de sociétés établies et de lancer une usine de production en novembre 2025 pour produire plusieurs milliers de drones intercepteurs.

La difficulté pour ces acteurs opportunistes réside dans leur capacité financière pour faire évoluer leurs produits et résister à des baisses de commande qu'une paix dans le conflit russo-ukrainien ne manquera pas de provoquer.

39 https://altaares.com

4.2.1. Dynamique de la filière et enjeux économiques

Comme indiqué précédemment la croissance est tirée par le militaire : à titre d'exemple le CA de DELAIR est passé de 4 M€ à 50 M€ en 4 ans, avec une transition d'une activité majoritairement civile (80 % en 2020) à militaire (85 % en 2025).

Au niveau européen les États semblent vouloir chacun disposer de leur champion national,; Quantum Systems[40] et Helsing en Allemagne, TEKEVER[41] au Portugal sont de redoutables concurrents pour l'écosystème français qui ne peut prétendre aux 10 milliards d'euros d'investissements[42] dans les drones prévus par l'Allemagne dans les prochaines années.

La France, avec 150 M€ prévus dans la loi LPM, ne peut à ce stade soutenir la comparaison malgré l'excellence des solutions.

Au niveau international les poids lourds sont :

- DJI (Chine) : 2 à 4 milliards d'euros de CA, capable d'investir 100 M€ par nouveau produit.
- AeroVironment (États-Unis) : 600-700 M$ de CA.
- Quantum-Systems (Allemagne) et TEKEVER (Portugal) : 100-150 M€.

À cette situation défavorable se rajoute la crainte de voir l'industrie ukrainienne inonder le marché européen et international dès la fin de la guerre compte tenu de la centaine de sociétés produisant les 4 à 5 millions de drones annuels consommés par les combats, de leur faible coût de production et de l'efficacité de leur systèmes même s'ils ne répondent pas aux normes OTAN.

40 https://www.frenchweb.fr/connaissez-vous-quantum-systems-la-nouvelle-triple-licorne-allemande-du-renseignement-aerien-autonome/458895

41 TEKEVER est une entreprise de technologies de défense portugaise fondée en 2001 qui vient de faire en mai 2025 une levée de fonds de 500 M€.

42 https://www.lalibre.be/dernieres-depeches/2025/10/15/lallemagne-annonce-un-investissement-de-10-milliards-deuros-dans-des-drones-militaires-VF5GMJN6ERA 2NDHZBEEBKYJYHI/

L'ADIF a négocié un MoU non exclusif avec les autorités ukrainiennes pour favoriser les échanges, les participations industrielles des parties prenantes dans les deux pays. Il couvre les points suivants :

- La coproduction et l'investissement conjoint dans des usines,
- Le développement de produits et le retour de terrain,
- Les essais en zone de guerre,
- Les technologies critiques (guerre électronique, navigation en environnement brouillé).

Ce type de protocole existe bien sûr avec d'autres pays.

4.2.2. La structuration de la filière

Elle est fortement dépendante des décisions prises par le Ministère des armées. Si l'on fait une règle proportionnelle aux nombres de brigades engagées par l'armée ukrainienne et les 2 brigades dont dispose la France, on constate que le volume annuel de production serait de l'ordre de 150 000 drones à comparer aux 3 000 en commande pour les armées et livrables en 2026 et plus.

Or multiplier la production par de tels facteurs ne s'improvise pas et nécessite une planification rigoureuse d'autant que certains composants à base de terres rares sont contrôlés par la Chine. Par ailleurs une politique de stock ne semble pas judicieuse compte tenu des mises à jour (tous les 2 à 3 mois) provoquées par l'évolution technico-opérationnelle du champ de bataille.

La création du *Pacte drone*[43] a permis d'innover dans le domaine de la commande publique dans un domaine qui évolue de mois en mois et pour lequel les procédures habituelles des marchés publics sont peu adaptés. La procédure – qui pourrait être source d'inspiration pour les ministères civils – permet de gérer un darwinisme progressif de l'écosystème au travers successivement :

- d'une demande d'information décrivant le besoin de manière simple mais précise,
- une première sélection suivie d'un appel d'offres restreint aux entités sélectionnées,
- les systèmes sont évalués, une commande publique minimale au gagnant de la sélection est assurée,
- les systèmes sont déployés dans les forces pour apprendre.

En 2025 un projet[44] a été attribué, 5 autres le seront d'ici fin 2026 ou début 2027.

43 Signé le 17 juin 2024, à Villepinte dans le cadre du salon Eurosatory par le ministre des Armées et des Anciens combattants, le *Pacte drones aériens de défense* regroupe 159 industriels français et 40 représentant des administrations de ce secteur d'activité. Ce pacte est destiné à fédérer les acteurs du domaine pour structurer la filière drones et apporter une réponse adaptée et souveraine aux besoins des forces armées.

44 Pour accélérer, la DGA a publié en février 2025 un appel d'offres européen à l'expression de besoin volontairement allégée – une vingtaine d'exigences techniques seulement. Objectif : encourager la réactivité des industriels, maintenir un coût unitaire maîtrisé et coller au plus près des usages des forces.
Plusieurs acteurs européens ont répondu. Harmattan AI l'a emporté avec un modèle conçu et assemblé en France, baptisé SORONA, commandé à 1000 exemplaires pour des livraisons fin 2025. Pensé d'abord pour l'entraînement et la préparation opérationnelle en missions ISR (Intelligence & Surveillance & Reconnaissance), SORONA mise sur la simplicité d'emploi : moins de 1,8 kg, plus de 40 minutes d'autonomie, 2 km de portée et undéploiement en moins d'une minute. Le drone embarque une caméra électro-optique avec zoom ×6 (dont ×3 sans perte), un capteur bas-lumière et une voie infrarouge fournie par Lynred ; sa stabilisation mécanique deux axes garantit une image exploitable en conditions dégradées.
Au-delà des chiffres, l'architecture retient l'attention : SORONA est modulaire et réparable, afin de réduire les coûts de maintenance et de prolonger la durée de vie en unités. Son IA embarquée, frugale et locale fonctionne sans cloud. Par la suite, la société a remporté un contrat avec le ministère de la Défense britannique pour 3000 drones https://opexnews.fr/harmattan-ai-commande-uk-3000-systemes-auton omes/.

Le cycle d'acquisition doit être le plus court possible pour donner envie aux industriels de participer avec la technologie existante et gérer l'écosystème. L'innovation est gérée par le renouvellement des projets sur un rythme rapide.

Le Pacte Drone Aérien de Défense créé en juillet 2024 par le ministre des Armées regroupe 150 industriels (pas seulement des dronistes) et a formé des groupes de travail sur :

- L'économie de guerre,
- La standardisation,
- L'IA.

Les conclusions et les recommandations doivent être mises en œuvre sous peine de marginaliser fortement les constructeurs français. Le maintien d'un savoir-faire industriel, de capacités reconfigurables et de mobilisation des ouvriers et techniciens doivent être anticipés fortement.

4.2.3. Enjeux technologiques et industriels

Le premier constat est que le drone aérien devient une commodité ; la valeur réside maintenant dans :

- La résilience (guerre électronique, navigation sans GNSS).
- La charge utile (capteurs, IA pour la détection et la classification).
- L'aspect système (essaim de drones coopératif, coopération drones aériens et terrestres et maritimes, intégration dans les SIC (Système d'Information et de Commandement), etc.).

Cependant, l'intégration des charges utiles et leur performance nécessite une bonne connaissance de la dynamique de vol et doit être conçue avec une approche système complète.

Les dépendances restent critiques dans les moteurs sans balai, les batteries (cellules chimiques importées de Chine car coût 2 à 3 fois supérieur en Europe) et les temps d'approvisionnement de certains composants optiques sont longs (lentilles en germanium, délais de 9 mois) pour les optiques IR (Infrarouge).

Au delà du marché français très limité, la nécessité d'exporter (Europe, Afrique, Asie) pour augmenter les volumes s'impose. De même il semble inévitable de consolider le secteur autour d'acteurs européens de 300 M€ de CA pour rivaliser avec DJI et les américains, il n'y a de la place que pour trois constructeurs de cette taille en Europe.

Chapitre 5

Systèmes maritimes

Les intérêts de la filière sont représentés par le GICAN (Groupement des Industries de Construction et Activités Navales). Ce dernier a publié une étude sur les drones navals du secteur civil et militaire[45] en 2024.

Quelques chiffres pour montrer la diversité de l'offre et des fabricants ; sur 126 constructeurs au niveau mondial, 55 % sont sur le segment USV (*Unmanned Surface Vehicle*), 25 % sur le segment UUV (*Unmanned Underwater Vehicle*) et 18 % sur les deux. De même sur les 300 engins à la vente ; 35 % sont à vocation militaire, 29 % à vocation civile et 35 % sont duaux.

Quelques définitions :

Un USV est un véhicule de surface sans équipage conçu pour naviguer sur l'eau de manière autonome ou télécommandée.

Un UUV est un véhicule sous-marin sans équipage capable d'opérer sous l'eau de manière autonome ou télécommandée.

Un glider (ou glisseur sous-marin) est un véhicule sous-marin autonome conçu pour effectuer des missions d'exploration et de collecte de données océanographiques sur de longues distances et durées.

45 Document réservé aux membres du GICAN : *Étude de marchés des drones navals*

Un waveglider est un type de véhicule marin autonome qui utilise l'énergie des vagues et du soleil pour se déplacer et fonctionner sans besoin de carburant.

Un navire autonome (MASS) est un navire en capacité de naviguer et d'effectuer des opérations maritimes sans intervention humaine directe.

Un ROV est un véhicule sous-marin télécommandé, généralement relié à un navire ou à une plate-forme offshore par un câble ombilical. Ce type d'engin ne sera pas évoqué.

5.1. Domaine civil

Le secteur civil marin couvre un large éventail d'applications, notamment le transport et la logistique, l'hydrographie et la cartographie, l'océanographie opérationnelle et scientifique à travers des outils comme les planeurs sous-marins et les flotteurs Argo, la surveillance environnementale et portuaire, le soutien aux énergies éoliennes en mer, l'inspection des infrastructures offshore, la recherche et le sauvetage en mer, le contrôle des émissions de soufre ainsi que la police des pêches[46] [47].

5.1.1. Acteurs clés en France

Parmi les institutions et opérateurs publics, on retrouve :

- l'Ifremer (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer), qui se consacre à la science et à la technologie marines, gère la flotte océanographique française et coordonne les réseaux Argo et Gliders,

- le SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine), responsable de l'hydrographie nationale,

46 https://www.cerema.fr
47 https://www.emsa.europa.eu

- la DGITM (Direction Générale des Infrastructures des Transports et de la Mer) et le CEREMA (Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement), encadrent la sécurité maritime et les environnements de test, notamment pour les systèmes de trafic maritime (VTS) et l'e-navigation,

- la DGAMPA (Direction générale des affaires maritimes de la pêche et de l'aquaculture) qui gère les espaces maritimes côtiers.

Côté industrie et start-ups :

- Exail (anciennement iXblue/ECA) se distingue avec ses USV DriX H-8, H-9 et O-16, ainsi que ses AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*) comme l'Ulyx et l'A6 K-M. En 2025, ce véhicule a réalisé un transit autonome de plus de 1100 milles marins entre La Ciotat et Troia, sous supervision à distance, et a traversé le détroit de Gibraltar, démontrant sa maturité opérationnelle,

- SeaOwl développe des solutions de télé-opération de navires, comme le projet ROSS, et a obtenu en 2020 le premier permis français pour un navire télé-opéré. La société a également lancé l'InSPEAR, un USV dédié à la sécurité, et collabore à l'international, notamment avec ADNOC L&S en 2024,

- ALSEAMAR (groupe Alcen) produit les planeurs SeaExplorer et a été lauréate en 2025 du programme *France 2030* pour le développement d'un planeur capable d'atteindre 3 500 mètres de profondeur, en partenariat avec l'Ifremer, le CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) et le SHOM,

- Naval Group et Thales interviennent principalement dans les senseurs, la guerre des mines et la perception, avec des applications à double usage, civil et militaire.

5.1.2. Initiatives

Dans le cadre du programme France 2030, la Direction générale de l'armement (DGA) et le Secrétariat général pour l'investissement (SGPI (Secrétariat Général pour l'Investissement)) ont attribué en 2024 des contrats pour le développement d'un AUV capable d'intervenir jusqu'à 6000 mètres

de profondeur, confié à Exail, ainsi que pour un ROV destiné aux grands fonds, porté par Travocean et LDA. L'EMSA déploie des systèmes de drones aériens (RPAS) en France pour des missions de surveillance, de lutte contre la pollution et de contrôle des émissions de soufre.

Le SHOM modernise ses moyens d'acquisition grâce aux USV, comme le DriX, pour réaliser des levés 24h/24 plus précis, tout en réduisant le bruit et l'empreinte carbone. Le réseau Argo-France est maintenu et étendu, avec 59 flotteurs déployés en 2024, dont les données sont traitées en temps réel par Coriolis. L'USV DriX O-16 a prouvé son endurance et sa capacité à gérer un trafic maritime dense, comme lors de la traversée du détroit de Gibraltar.

En France, l'ordonnance 2021-1330 définit les responsabilités, la police et le droit social liés aux navires autonomes, tandis que le décret 2024-461 encadre les autorisations d'essais et d'exploitation expérimentale dans les eaux territoriales, ainsi que la certification des opérateurs[48]. La France est le premier pays européen à disposer d'une telle réglementation qui permet le développement des activités commerciales et de test.

> *« Il vise principalement à définir ce qu'est un drone, à établir une nette distinction juridique entre drones maritimes de surface (USV) et navires autonomes – entre autres. Dans ce décret, l'engin est ainsi considéré comme navire autonome à partir du moment où il dépasse un certain nombre de seuils : Jauge brute supérieure à 100 tonnes, Taille supérieure à 16 m, Vitesse d'exploitation supérieure à 20 nds, Énergie cinétique supérieure à 300 kilojoules. »*
>
> *« Dans la réglementation, l'engin, pour être considéré comme drone, ne doit pas transporter de passager ou de cargaison commerciale (fret). Cette nouvelle réglementation devrait offrir un avantage comparatif aux entreprises françaises sur le marché à l'export. Elle leur permettra de pouvoir proposer aux États ou clients, un produit*

48 Décret n° 24-461 du 22 mai 2024 fixant les modalités d'application de l'ordonnance n° 2021-1330 du 13 octobre 2021 relative aux conditions de navigation des navires autonomes et des drones maritimes et portant diverses dispositions relatives aux navires professionnels https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000049583905.

qui a été approuvé, validé par une réglementation sur son territoire national[49]*. »*

5.1.3. Tendances technologiques

Éolien

On observe des regroupements de sociétés pour développer des solutions spécifiquement conçues pour le marché de l'éolien – Orsted qui a développé son propre USV[50]. La tendance pousse également au développement d'USV de 10 à 25 m équipés d'eROV – téléopérés à distance au sein d'un ROC. La filière développe aussi des docks sous-marins permettant à des AUV de rester de manière permanente ou semi- permanente sur des sites offshores. L'utilisation de petits AUV, disposant d'une très grande autonomie, en capacité d'être équipés de plusieurs systèmes acoustiques, pour un prix relativement modeste, est aussi envisagée et recherchée par plusieurs exploitants de ferme.

Oil & gaz

Plusieurs compagnies pétrolières et constructeurs s'engagent actuellement dans des projets communs de développement et de fabrication d'USV de 15 à 25 m équipés de ROV, destinés à des missions de maintenance et de réparation – en capacité de descendre à 1500 m de distance et téléopéré à distance au sein d'un centre d'opérations à distance – une tendance aussi observée dans l'éolien offshore.

49 Étude GICAN

50 https://orsted.com/en/media/news/2023/06/13698206

Océanographie et Surveillance

Les opérateurs d'AUV de recherche visent à maximiser la rentabilité de leur investissement, au travers de l'accroissement de la modularité des systèmes et de la variété de capteurs embarqués, de l'amélioration de l'endurance.

Pour les systèmes les plus technologiques, la concurrence se fait sur des briques technologiques plus avancées : intégration de briques IA, amélioration de la communication et de la localisation, navigation en flottille hétérogène, autonomie avancée (autodock, enchainement de missions sans intervention humaine).

Néanmoins le volume se fera avec des systèmes rustiques et abordables, visant en particulier des primo-acquérants et des pays moins développés.

5.1.4. Tendances marché

Éolien

L'utilisation de drones est déjà bien établie dans des pays européens comme l'Allemagne ou le Royaume-Uni. Cette tendance devrait s'accélérer considérablement grâce à l'objectif de l'UE de produire 35 % de son électricité à partir de sources offshores d'ici 2050. Dans ce contexte, l'Europe baltique, très ambitieuse mais marquée par la présence de nombreuses mines, offre de grandes opportunités. En Asie, le marché indien a de très fortes ambitions. Taïwan, pionnier mondial du secteur, a surtout un besoin de maintenance. Le Japon et la Corée du Sud se montrent également très ambitieux. La filière aux États-Unis, qui n'a pour le moment que peu recours à des drones, devrait progressivement se structurer et offrir des opportunités.

Oil & gaz

La croissance annuelle du secteur est estimée à 7 % jusqu'en 2030. Certaines régions devraient connaître une dynamique particulièrement intense dans les années à venir. Le Moyen-Orient (+24 %), (Arabie Saoudite, les EAU) ainsi que le Brésil, devraient intensifier leur utilisation d'AUV/USV pour des missions

d'exploration et d'inspection. L'Inde, l'Asie-Pacifique (Indonésie, Malaisie) ou encore l'Afrique de l'Ouest apparaissent également comme des marchés à fort potentiel pour des missions d'exploration sur les 5-10 prochaines années. L'Europe du Nord et l'Amérique du Nord, déjà matures dans l'utilisation de drones, devraient voir leurs besoins en exploration ralentir. Néanmoins, la demande en inspection et en surveillance est appelée à croître.

Océanographie et Surveillance

Le marché des UxV de recherche continue de croître – notamment aux États-Unis, qui représentent à eux seuls plus de 60 à 80 % du marché mondial. Le marché le plus porteur reste celui des gliders dont les qualités sont capables de séduire le plus grand nombre d'institutions de recherche. La combinaison entre coûts faible et très grande endurance en fait un produit irremplaçable à moyen terme. Pour les systèmes plus avancés, la tendance est à la rationalisation des flottes. Avec la démocratisation des UxV et l'émergence de prestataires de services, il apparaît que bien peu de centres de recherche sont capables d'atteindre une taille de flotte critique et un taux d'utilisation suffisant pour rendre pertinent l'acquisition d'UxV par rapport à la location – ou la soustraitance du recueil de données. Dans les années à venir, le gros du marché risque donc de se concentrer sur ces opérateurs de flottes.

5.1.5. Conclusion pour le secteur maritime civil

La France dispose en 2025 d'un « socle réglementaire unique en Europe », d' « industriels de rang mondial » (Exail, ALSEAMAR, SeaOwl), d « opérateurs publics » exigeants (Shom, Ifremer/Coriolis) et d'une « filière structurée » (GICAN/CMF, Pôles Mer). Les USV/AUV/RPAS sont déjà déployés (hydro, observation, surveillance, téléopération).

Pour renforcer encore cette situation il faut :

- Ouvrir et renforcer les capacités d'essais et de qualification numériques « à la mer » [51] qui vise à consolider le « bac à sable » national pour les systèmes maritimes autonomes (MASS), en étendant les autorisations expérimentales à des zones dédiées et en clarifiant la doctrine opérationnelle avec la DGITM, la DGAMPA, le CEREMA et le SHOM.

- Lancer un projet de navire autonome en liaison avec les chantiers navals et les armateurs français, incluant la partie terrestre (centre de contrôle, zone portuaires et moyens de communications).

5.2. Domaine militaire

La première application est la chasse aux mines, le renouvellement des capacités anti-mines, notamment en Europe, contribue fortement à la croissance prévue pour la prochaine décennie, tous segments confondus (ROV, USV, UUV). Il convient de souligner que plusieurs marines, telles que celles des États-Unis - qui devrait représenter plus de 50 % de la demande mondiale, de la Corée du Sud et de la Turquie, nourrissent l'ambition de créer des flottes entièrement dronisées d'ici 2040. Le Moyen-Orient constitue également un marché émergent, les États du Golfe souhaitent consolider leur capacité de surveillance maritime. Enfin, la région Asie-Pacifique devrait connaître une expansion significative sur tous les segments. Pour certains industriels le défi est la montée en cadence des chaînes de production pour faire face à la demande[52].

L'autre secteur en forte croissance est le secteur des petits drones kamikazes qui sont le plus souvent déployés depuis la terre (Ukraine, UAE,...) et ne sont que rarement appairés avec un navire de combat.

51 Voir l'avis de l'académie des technologies sur l'ingénierie océanique https://www.academie-technologies.fr/wp-content/uploads/2025/05/202505_avis_Ingenierie_oceanique.pdf.

52 Exail Technologies doit fournir 1000 drones K-STER.

Les projets sont moteurs et semblent tirer la technologie à usage civil. Le projet d'UCUV (*Unmanned Combat Underwater Vehicle*) de Naval Group et les drones de lutte anti-sous marine d'Exail sont les marqueurs d'un domaine maîtrisé dans la durée mais qui a besoin d'un marché – dans lequel la concurrence est rude – européen et mondial pour survivre économiquement.

Chapitre 6

Recherche et développement en France

6.1. Horizon Europe

Dans son document sur la stratégie digitale, l'UE tente de répondre à la question[53] de la légitimité du financement de la robotique et de l'IA en soulignant les avantages suivants de ces deux domaines :

- Ils sont indispensables pour la productivité et la compétitivité,
- Ils participent à la réindustrialisation et luttent contre le vieillissement de la main-d'œuvre,
- Ils s'avèrent indispensables pour relever les défis sociétaux tels que : santé, vieillissement de la population, environnement et sécurité,
- Ils représentent un potentiel de croissance au travers des marchés de services,
- Ils sont les principaux moteurs de l'innovation numérique, les systèmes autonomes transformant les TIC, l'automobile et d'autres secteurs.

Grâce à plus de 120 projets de recherche et actions de coordination, la Commission européenne a progressivement constitué une base solide de partage des connaissances et de coopération entre l'ensemble de la

53 https://digital-strategy.ec.europa.eu/fr/policies/robotics

communauté des parties prenantes de la robotique. Cette base comprend maintenant un partenariat public-privé sur la robotique, appelé SPARC qui regroupe notamment l'ADRA (*AI and Data and Robotics Association*)[54], l'écosystème privé lié à la robotique et l'IA. La vision[55] de l'ADRA pour 2030 est de permettre une transformation numérique responsable alimentée par l'IA pour une société attractive, durable, prospère, sûre et résiliente, basée sur les valeurs européennes.

Les objectifs principaux incluent la création d'une infrastructure de données sécurisée partagée, l'amélioration de l'efficacité et de la sécurité grâce à des *systèmes robotiques autonomes*, et l'augmentation de la part de marché des solutions techniques européennes en IA, données et robotique.

6.1.1. Nouveaux projets Horizon Europe 2024

L'analyse des 53 projets contenus dans le document[56] montre une répartition par pays très inégale ; par exemple la France participe à 14 projets, la Belgique à 10, la Suisse à 8, l'Allemagne à 34 et l'Italie à 30. Ces projets rassemblent de nombreux partenaires, jusqu'à 24 pour certains, et sont d'un volume financier très modeste de 5 à 10 M€, ce qui soulève des questions sur l'efficacité vers l'aval de ces financements dans les pays concernés. Cette multitude de petits projets conduit à un saupoudrage des financements et traduit une absence de stratégie globale face aux enjeux de la robotique et de l'IA pour l'Europe.

54 AI, Data and Robotics Association

55 Publiée dans le document : Stratégie de Recherche, Innovation et Déploiement de l'AI Data Robotics Association 2025-2027.

56 https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/horizon-europe-new-projects-ai-data-and-robotics-2024-edition

Table 6.1 : Répartition des projets par organisme

Pays	Projets
.fr	dAIEDGE, ELIAS, MANOLO, CEDAR, IRE, MYRTUS, AI4REALNET, PEER, TANGO, SECONROB, SOPRANO, ARISE, JARVIS, SHEREC
.de	dAIEDGE, ELIAS, ENFIELD, TRUSTLLM, AI-DAPT, EXTRA-BRAIN, MANOLO, CEDAR, DS2, DATAMITE, FAME, AI-BOOST, PISTIS, INTEND, MYRTUS, AI4REALNET, HUMAINE, TANGO, PERKS, SECONROB, SOLIDAIR, MANIBOT, PRIMI, SPEAR, SWAG, AUTOASSESS, MAGICIAN, SOPRANO, ARISE, INVERSE, IRE, ROBOSAPIENS, AI4WORK, SHEREC, SWARMCHESTRATE
.be	dAIEDGE, CEDAR, MANOLO, NOUS, PLIADES, EMPYREAN, PEER, THEMIS 5.0, ROBOSAPIENS, FAITH
.ch	AI4REALNET, DAIRY 4,0, SPEAR, AUTOASSESS, dAIEDGE, ELOQUENCE, PLIADES, MYRTUS
.it	dAIEDGE, ELIAS, ELOQUENCE, AI-DAPT, MANOLO, CEDAR, PLIADES, DATAMITE, FAME, PISTIS, UPCAST, AI-BOOST, NOUS, SWAG, INTEND, MYRTUS, AI4REALNET, TANGO, THEMIS 5.0, MANIBOT, PRIMI, MAGICIAN, SOPRANO, TALOS, ARISE, INVERSE, AI4WORK, FAITH, SHEREC

6.2. Critiques envers le programme Horizon

Le programme Horizon Europe a le mérite d'exister mais il n'est pas exempt de critiques croissantes, notamment en ce qui concerne la viabilité économique de ces politiques, leur efficacité sur le marché et leur capacité à répondre aux besoins des clients finaux.

- La lourdeur bureaucratique et la complexité des procédures : c'est la critique la plus récurrente, formulée à la fois par les chercheurs et les industriels[57], les causes sont multiples : complexité des procédures, manque d'accompagnement, décisions administratives incohérentes, et parfois mauvaise articulation entre les niveaux européen et national.

- Les taux de succès trop faibles décourageant les meilleurs chercheurs[58], le taux de réussite moyen à l'ERC tournait autour de 12 %, et chaque année, entre 350 et 450 projets évalués comme absolument excellents ne pouvaient pas être financés faute de budget.

57 Interview de Christophe Lefèvre rapporteur du Comité économique et social européen, encharge des politiques d'innovation : https://www.touteleurope.eu/institutions/horizon-europe-un-signal-politique-fort-pour-relancer-la-competitivite-europeenne/.

58 CNRS – Interview de Jean-Pierre Bourguignon, (septembre 2020) : https://www.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/en-organisant-une-stagnation-du-soutien-la-recherche-le-conseil-europeen-nous-tire-une.

- Un budget insuffisant et fragmenté face aux concurrents mondiaux : Le rapport Draghi (2024), analysé par le cabinet Finance Innovation, souligne que malgré son budget de 100 milliards d'euros sur sept ans, la longueur des procédures d'obtention, l'éclatement du budget et le manque de fonds dédiés à l'innovation de rupture (seulement 256 millions pour le mécanisme Pathfinder en 2024, contre 6 milliards de dollars pour l'ARPA/DARPA américaine) nuisent à l'impact du programme[59].

- Des inégalités marquées entre pays membres : certains pays parviennent à capter la quasi-totalité des fonds disponibles, en s'organisant en consortiums associant État, universités et entreprises, tandis que d'autres restent en retrait avec des taux d'utilisation très faibles[60].

- Difficultés d'accès pour les PME et les nouveaux candidats[61].

- Un programme trop orienté politiquement au détriment de la recherche libre : des voix de la communauté scientifique réclament de maintenir une approche *bottom-up*, c'est-à-dire une autonomie laissée aux chercheurs pour définir leurs sujets[62].

- Le manque d'investissement privé malgré les ambitions : la Commission européenne elle-même reconnaît dans une communication d'octobre 2024 que l'Europe est encore loin d'atteindre l'objectif de 3 % du PIB investi dans la R&D. La faiblesse de l'investissement privé reste entravée par des obstacles réglementaires, juridiques et administratifs[63].

Malgré les ambitions de souveraineté, l'Europe reste dépendante des technologies et des acteurs non européens (ex. : TSMC, Intel, Samsung). Les projets locaux peinent à attirer des investissements privés suffisants, et

59 https://www.financeinnovation.fr/2025/01/23/europe-strategie-europeenne-pour-linnovation-que-dit-le-rapport-draghi-2024/

60 Touteleurope.eu cité ci-dessus.

61 https://www.financeinnovation.fr/2024/12/20/horizon-europe-et-la-transition-verte/

62 Touteleurope.eu ci-dessus et https://www.senat.fr/rap/r18-154/r18-154_mono.html.

63 Commission européenne / Représentation en France – « La Commission analyse les possibilités de renforcer l'Espace européen de la recherche » (octobre 2024) : https://france.representation.ec.europa.eu/.

les usines prévues sont souvent reportées ou annulées [29]. Les clients finaux européens (industriels, fabricants d'équipements) restent méfiants quant à la capacité de l'Europe à fournir des composants compétitifs en termes de coût, de performance et de volume [18].

Les appels à projets sont souvent perçus comme trop rigides, avec des critères d'éligibilité complexes et des délais incompatibles avec les cycles d'innovation des entreprises, notamment des PME [17, 28].

Horizon Europe finance principalement la recherche fondamentale et le développement technologique, mais peine à accompagner les projets jusqu'à leur mise sur le marché. Les activités de démonstration, de prototypage et de première commercialisation restent limitées, ce qui réduit l'impact économique et la compétitivité des innovations européennes [17, 28].

Ces difficultés sont pour partie à l'origine du nombre limité de sociétés françaises présentes dans ces projets financés par l'Europe par rapport à nos concurrents européens.

Dans le domaine du programme Horizon et du document ci-dessus référencé, les agences de programme françaises (CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives), Inria (Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique), CNRS participent aux projets suivants :

Table 6.2 : Répartition des projets par organisme

Organisme	Projets
CEA	dAIEDGE, CEDAR, SOPRANO, ARISE, JARVIS, SHEREC
INRIA	dAIEDGE, ELIAS, MANOLO, IRE
CNRS	dAIEDGE

Les autres participations françaises étant menées dans quelques universités.

Le Comité robotique *France 2030*[64] est un lieu informel de coordination entre les acteurs de la recherche publique et un cluster régional d'entreprises.

Il existe également un Comité de pilotage qui rassemble 27 acteurs[65] privés et publics de la filière. L'interaction entre ces deux comités n'est pas précisée par une charte.

Lors de la 9e édition de *Viva Technology* en juin 2025, le gouvernement a annoncé, dans le cadre du plan *France 2030*, la création de trois nouveaux dispositifs dédiés à l'intelligence artificielle et à la robotique qui sont les deux vecteurs technologiques des systèmes autonomes.

L'ambition de cette démarche est la suivante :

Ce plan d'investissement stratégique vise à positionner la France comme un leader mondial de l'innovation, notamment dans les domaines cruciaux de l'IA et de la robotique. Ces technologies sont au cœur de la transformation industrielle et de la souveraineté technologique de notre pays.

L'intégration de l'IA et de la robotique est transversale à plusieurs de ces objectifs, soulignant leur rôle central dans la transformation industrielle que la France souhaite opérer.

6.3. Le programme de recherche de *France 2030*

Le programme en robotique intelligente est doté de 30 millions d'euros.

64 Regroupe principalement, le CNRS, le CEA, l'Inria et Aquitaine Robotics, cluster de 150 entreprises de la Région Aquitaine, https://c-robotique-france2030.org/fr/le-consortium-70.

65 Liste des organisations membres du Comité de pilotage : Agence de l'Innovation de Défense (MINARM/DGA), Agence de programme CEA ASIC, – Arts et Métiers – LISPEN, Airbus Defence & Space, Alliance Industrie du Futur, ANR (Agence Nationale de la Recherche), Bpifrance, CIMES, DGE, Evolis, Exail, Fuzzy Logic Robotics, IRT Jules Verne, LNE–Laboratoire national de métrologie et d'essais, Minalogic, Naval Group, Nio Robotics, Proxinnov, RESEAU 3R, Robotics Place, Robotics Valley, Safran, SGPI, Staübli, Université Marie et Louis Pasteur – Institut FEMTO-ST, Zeninnovation.

Piloté par le CNRS, il vise à lever les verrous technologiques de la robotique intelligente. En effet, il financera thèses, postdoctorats et postes d'ingénieurs de recherche, favorisant l'émergence de nouvelles compétences. Il encouragera les échanges entre chercheurs, industriels et partenaires européens, créant un écosystème propice à l'innovation robotique.

Programme et équipements prioritaires de recherche « Robotique organique »[66]

Le programme Robotique organique [PEPR (Programme et Équipements Prioritaires de Recherche) O2R] propose de mettre en œuvre une robotique socialement adaptée, dans ses principes, son comportement, ses performances et ses usages, et ouverte à la complexité des enjeux de la société. Ce programme de recherche exploratoire s'appuiera sur une approche pluridisciplinaire intégrant les sciences sociales et humaines, les sciences du numérique et les sciences de l'ingénieur. Doté de 34 M€ sur 8 ans.

Programme de recherche « Accélération de la Robotique »

Piloté par le CNRS, ce nouveau programme est doté de 30 M€. Le programme d'accélération robotique vise à structurer la recherche fondamentale pour lever les verrous scientifiques et techniques de la robotique intelligente. Il entend faciliter la convergence entre l'intelligence artificielle et la robotique autour de problématiques du contrôle, de la locomotion, de la perception, de l'adaptation et de la frugalité, qui seront notamment traitées dans le cadre de ce programme.

Le deuxième dispositif, « Pionnier de l'IA », cible les projets de rupture.

Il s'adresse aux start-ups « deeptech », laboratoires et consortiums développant des innovations à fort impact économique ou industriel. Ce fonds vise à soutenir des projets audacieux qui repoussent les limites de l'intelligence artificielle, facilitant leur passage de la recherche fondamentale à l'industrialisation. L'objectif est de faire émerger des solutions innovantes qui transformeront des secteurs entiers de l'économie française, renforçant la compétitivité nationale.

66 https://www.pepr-o2r.fr/

Le troisième dispositif est un appel à manifestation d'intérêt (AMI) axé sur la robotique et les machines intelligentes.

Plus précisément, cet AMI vise à identifier et soutenir des projets innovants répondant à des priorités stratégiques : efficience énergétique, sécurité, modularité et ergonomie des systèmes robotiques.

La notification des projets devrait intervenir en 2026 pour un montant global non connu. Le lecteur trouvera en Annexe C (178) une liste des projets retenus lors des différentes vagues d'appels à projets. On constate globalement :

- une absence de stratégie nationale centralisée et lisible pour la R&D en robotique et IA autonome, contrairement à d'autres pays (États-Unis, Chine où l'Allemagne[67]), ce qui entraîne une dispersion des efforts et des financements, y compris au niveau des régions. et ne permet pas de créer des leaders dans le domaine au niveau européen. Les budgets alloués (ex. 30 millions d'euros sur 6 ans pour le PEPR robotique) sont trop faibles et saupoudrés entre de nombreux petits projets, sans impact structurant. Les industriels et les académiques interviewés soulignent le besoin d'un nombre de projets limités mais ambitieux (> 100 M€ comme a réussi à faire Anybotics en Suisse[68]) capables de fédérer les énergies de la recherche et des financements industriels et ainsi déboucher sur des solutions opérationnelles. Les porteurs de ce type de projets doivent donc être en mesure de les gérer efficacement et de manière réactive sans être contraints par l'appareil administratif des agences de programme. Il serait opportun de structurer l'approche de la R&D en incluant les aspects industrialisation et mobilisation du capital adéquat sous peine de voir se perdre le bénéfice des travaux engagés.

- Le mille-feuille administratif et la multiplicité des acteurs font que les décisions sont prises par de nombreux intervenants (ministères, SGPI, ANR,

67 Voir l'effort récent de l'Allemagne pour structurer le secteur de la R&D grâce à une feuille de route commune à tous les acteurs, et son transfert vers l'industrie au travers du RIG.

68 https://www.anybotics.com/news/anybotics-secures-50m-series-b-funding/ en 2023 et 60 M€ de plus en fin 2024, https://www.ictjournal.ch/news/2024-12-16/anybotics-leve-60-millions-pour-boucler-son-tour-de-table-de-serie-b.

CNRS, Inria, etc.), sans coordination efficace, rendant difficile l'identification des responsables et des priorités.

Exemple concret de dysfonctionnement : Le montage du PEPR (Programme et Équipements Prioritaires de Recherche) en robotique a pris plus de deux ans, avec des changements de responsables ministériels qui ont des visions différentes, des allers-retours incessants, et une partie des propositions de la communauté scientifique rejetée après un an de travail, ce qui a démotivé les chercheurs.

- Les communautés française et européenne en robotique et IA peinent à dialoguer, avec des associations (Adra, euRobotics) envoyant des messages divergents à l'administration et à la Commission européenne, ce qui retarde les avancées technologiques.

- Il y a un décalage entre recherche académique et besoins industriels : certains industriels français sont en retard sur l'intégration de l'IA dans la robotique, faute de collaboration suffisante avec les laboratoires et de vision stratégique partagée.

- Problématiques de transfert technologique : Les innovations issues de la recherche (ex. robotique militaire, humanoïde) peinent à être industrialisées, en raison de silos entre acteurs, de contraintes réglementaires, et d'un manque de projets fédérateurs capables de structurer la filière. Dualité civil/militaire : les transferts de technologies entre défense et civil restent limités, malgré l'avance du secteur militaire dans les systèmes autonomes aériens et maritimes notamment.

- Enjeux éthiques : les chercheurs semblent réticents (ou mal informés) à travailler sur des applications militaires en raison de questions éthiques.

- la France (et l'Europe) accuse un retard dans la formation de profils doubles compétences (IA + robotique) et dans la capacité à attirer des investissements privés massifs. Compte tenu de la nécessité du maintien des équipes de recherche, du cycle de vie des doctorants et des transferts vers l'industrie, la durée des projets devrait être au moins de 5 ans, offrant une visibilité pour tous les acteurs de la filière.

Les remarques ci-dessus militent pour une simplification drastique des structures de financement au service d'une stratégie sélective destinée à créer *in fine* des entreprises et de la valeur industrielle.

Comme indiqué précédemment, France 2030[69] au travers de la BPI a financé des actions spécifiques destinées à aider à l'industrialisation de certains projets robotiques voir Annexe C (178). Les sujets sont variés et les montants de l'ordre du million d'euros par projet. Une autre solution aurait été de financer un nombre plus restreint de projets avec plusieurs titulaires par projet et de relancer périodiquement sur les mêmes thèmes une compétition en élevant les exigences fonctionnelles et techniques pour faire du « darwinisme » industriel.

6.4. R&D : comparaison internationale

Pour conclure, il est utile de regarder les investissements dans le monde même s'il n'existe pas de statistiques sur le domaine « systèmes autonomes » en tant que telles, le seul référentiel est celui de la robotique qui bien que plus large que les systèmes autonomes, donne une idée assez précise des efforts entrepris. En outre l'intégration croissante de l'IA dans les robots conforte le choix de cet indicateur.

Le document[70] de la fédération internationale de robotique donne un aperçu non homogène des financements[71] et des stratégies nationales rendant les comparaisons détaillées entre pays très difficiles mais les tendances de fond sont claires.

69 https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/france-2030-20-nouveaux-projets-laureats-pour-une-robotique-souveraine-d-excellence-97433

70 À noter que ce rapport ne fait pas mention de la France alors que l'Italie et l'Allemagne sont traités comme une entité à part de l'Europe. https://ifr.org/downloads/hidden/20250117 World Robotics RD Programs V04.pdf.

71 Les financements sont évoqués soit pour une année budgétaire soit sous forme de programme pluriannuel.

Voici les principaux chiffres retirés de la lecture de ce document.

Table 6.3 : Financement indicatif des pays en R&D

Pays / Région	Budget R&D Robotique (USD)	Programmes clés
Chine	90 M$ (2023-2024)	Intelligent Robots (Plan quinquennal)
Japon	334 M$ sur 2020-2025 660 M$ en soutien en 2023	Moonshot Program NEDO
Corée du Sud	163 M$ (2023), 128 M$ (2024)	4th Basic Plan for Intelligent Robots
Union Européenne	183.5 M$ (2023-2025)	Horizon Europe – Cluster 4
Allemagne	69 M$/an	Together Through Innovation
Royaume-Uni	28.8 M$	Made Smarter Electric Revolution
États-Unis	120 M$ 2023-2024 pour IRAS>10 Mds $2023 et 2024 53 M$ 2020-2025	IRAS (Intelligent Robotics and Autonomous systems), Darpa, NASA
Canada	152 M$	Canadarm3 CSA

Pour la Chine, peu de chiffres consolidés existent, mais on estime l'effort de R&D à plusieurs dizaines de milliards de dollars sur la durée du 14e plan quinquennal dont une des priorités était la robotique et l'IA.

Chapitre 7

Conclusions

7.1. Impact sociétal des systèmes autonomes

On ne peut pas conclure cette étude sans évoquer même succinctement les transformations qu'apportent dans le monde du travail l'introduction de ces systèmes qui se font l'écho des débats sur l'IA, partie importante de leur « autonomie ».

L'autonomie de ces machines, basée sur des algorithmes, a pour corollaire dans l'industrie et dans le service à la personne, un cadre rigoureux d'évaluation pour être à la fois efficace (faire le travail que l'on attend d'elles) et sûres (ne faire que ce que l'on veut même si un cadre large peut offrir des variantes).

Ces machines sont appelées à aider l'homme dans des tâches complexes et/ou pénibles voire dangereuses et permettront de faire face dans les années à venir à des pénuries de main d'œuvre peu qualifiée (postes de travail rouges dans l'industrie) ou des secteurs qui ont du mal à recruter (services à la personne).

Le système éducatif doit prendre en compte l'arrivée de ces systèmes et doit apprendre aux élèves en formation initiale et complémentaire à les maîtriser. Elles génèrent de nouveaux métiers depuis la conception jusqu'à la mise en œuvre (il faut un technicien pour 10 à 20 robots AMR par exemple dans les entrepôts logistiques).

Cependant on peut que constater qu'avec l'avènement des sociétés modernes, l'individu a déjà beaucoup perdu en autonomie : il ne sait plus travailler de ses mains la terre ou un bout de bois, il ne connaît pas le

fonctionnement des objets technologiques qu'il utilise tous les jours, il dépend de produits fabriqués à l'autre bout du monde et il doit s'adapter à des outils que les média, les grands groupes technologiques, son employeur et l'État lui imposent. Est-ce un nouveau pas vers la mise à l'écart de l'homme dans une société de plus en plus utilitariste ?

La transmission du savoir, essentiel au lien social, doit se faire entre êtres humains, et non pas des humains vers les machines – comme c'est le cas dans l'entraînement des robots qui imitent l'homme – sous peine d'aggraver les fractures sociales en rendant inutiles à la société des catégories socio-professionnelles entières.

On voit apparaître également des positions syndicales étonnantes comme le statut d'objecteur de conscience pour les ouvriers travaillant pour la Défense et la production de drones aériens[72] ou bien que les opérateurs de drones maritimes soient des « inscrits maritimes ».

7.2. Quel futur ?

Il est nécessaire de rappeler une évidence : il n'y a pas UN système autonome mais une infinité, fonction du milieu physique et de la mission.

Quel que soit le domaine d'application, leur déploiement à grande échelle repose non seulement sur l'intégration réussie entre capteurs, mécatronique, algorithmes et intelligence artificielle, sous contrainte de fiabilité et sécurité, mais encore et surtout sur l'existence d'un ensemble de ressources humaines spécialisées en nombre suffisant, de réglementations adaptées, d'une *acceptation sociale affirmée* et de conditions économiques qui favorisent le retour sur investissement.

72 https://www.leparisien.fr/seine-maritime-76/production-de-drones-militaires-chez-renault-a-cleon-la-cgt-veut-un-statut-dobjecteur-de-conscience-pour-les-salaries-21-01-2026-BUHA47OUUJGEVHTCJGDF2FGD2Y.php

Ces évolutions doivent être synchronisées sous peine d'échecs, elles abordent également des défis éthiques et réglementaires majeurs : responsabilité, biais de l'IA, protection des données.

Au terme de ce survol des systèmes autonomes, on constate que la France dispose à son échelle, de compétences dans la recherche publique et privée ainsi que dans l'industrie, mais l'absence de *stratégie globale* dans ce domaine, une dispersion des financements et la multiplicité des acteurs inhibent l'expression de ces talents et la constitution d'un écosystème producteur de valeur ajoutée dans le domaine non-militaire. Il nous met en position d'infériorité face à nos partenaires européens qui disposent d'une vision claire.

Il apparaît que le domaine aérien bénéficie en France des efforts de recherche faits dans la Défense et dans l'aéronautique civile. La plupart des constructeurs ont des applications duales et les financements de la Défense sont d'un ordre de grandeur supérieur à ceux de la R&D classique. De même, dans le domaine maritime, la Défense possède historiquement une longueur d'avance et sert de moteur aux applications civiles.

Le domaine terrestre est donc celui où l'effort doit être porté, car il est multiforme et non homogène. Mais l'immense enjeu de l'autonomie des véhicules autonomes, tant pour l'industrie automobile que pour la transformation des mobilités n'a, pour l'instant, généré que des efforts très insuffisants de la part des entreprises comme de l'État ou des grands laboratoires, si on les compare à ce qui se fait aux États-Unis ou en Chine. Il en est presque de même pour la robotique. Enfin, les systèmes autonomes sont une pièce majeure de la transformation de notre agriculture pour faire face aux changements climatiques, à la diminution du nombre d'agriculteurs et à la limitation de l'usage des phytosanitaires.

On doit souligner aussi que la répartition de la chaîne de la valeur des systèmes autonomes évolue rapidement entre les capteurs, les modèles d'IA, l'intégration sur une plateforme en vue de les rendre autonomes, les services autour de ces systèmes. Enfin, la valeur ajoutée semble se déplacer vite vers le système de mission civil ou militaire qui devient de plus en plus l'élément dominant, la plateforme devenant une commodité.

7.3. Définir une stratégie à long terme

Plus que jamais il est donc nécessaire de fixer une ambition, un cap et une feuille de route en modifiant la façon dont les financements sont alloués et gérés ; La puissance publique sait faire et connaît la structure à mettre en place pour arriver à un objectif ambitieux ; les exemples sont nombreux. Il s'agit de définir une stratégie au niveau national et les financements publics associés y compris en régions et de s'assurer de l'adhésion du secteur privé, de leurs ressources potentiellement disponibles qu'elles soient financières, humaines ou d'outils industriels.

Une connaissance des dépendances subies et choisies

Une fois une stratégie fixée et son harmonisation avec les politiques sectorielles de l'UE prise en compte, il faut conduire en liaison avec la Défense une analyse de ce qu'il convient de maîtriser en termes de composants, de logiciels et d'infrastructures numériques. Il devient essentiel de cartographier avec précision nos dépendances technologiques par filière – qu'il s'agisse des capteurs lidar et caméras, des unités de calcul GPU (*Graphics Processing Unit*) et SoC (*System on Chip*), des cartes haute définition ou encore des solutions de connectivité, des algorithmes et des bases de données, etc. Cette analyse doit s'accompagner d'une recherche de diversification géographique de nos fournisseurs, en intégrant des partenaires européens, américains et asiatiques, afin de limiter les risques liés à la concentration croissante du marché.

Chapitre 8

Recommandations

Les recommandations sont structurées en horizon court terme et moyen terme.

Compte tenu de la complexité technologique, réglementaire et applicative, il est urgent de :

Concevoir au niveau national une stratégie dédiée aux systèmes autonomes, adaptée à nos moyens et à nos ambitions, à horizon 5 ans, en la phasant avec les projets et financements européens disponibles ou prévus et en l'élargissant aux contributions possibles de nos partenaires européens.

Celle-ci doit servir de cadre à la puissance publique (État et Régions) et aux parties prenantes privées pour :

8.1. À court terme

Lancer des États Généraux des systèmes autonomes incluant pouvoirs publics, grands laboratoires et entreprises concernées et dont l'objectif serait d'initier le travail sur un plan stratégique France articulé avec ce que fait ou devrait faire l'Europe.

Décliner des stratégies sectorielles qui impliquent et obligent tous les acteurs des filières, en construisant une vision partagée de la stratégie sectorielle avec tous les acteurs concernés qui inclut le soutien réglementaire, l'intégration technologique et la préparation du marché, pour garantir que les innovations soient pratiques et bénéfiques pour les différents secteurs.

Concentrer les financements en ciblant 3 à 5 domaines dans lesquels la France/Europe a un avantage ou pense l'obtenir en dotant ces projets d'un volume financier capable de produire un effet à horizon 5 ans et capable d'entraîner la R&D publique et privée puis aussi et surtout mobiliser les financements pour passer à l'échelle industrielle.

Mettre en œuvre un pilotage interministériel du plan et du support à la BIT, avec un ministère leader (Défense ou Industrie) et la participation active et experte des ministères concernés (Agriculture, Transports, Numérique, Éducation, Recherche, Europe).

8.2. À MOYEN TERME

Renforcer la chaîne de valeur en créant un écosystème de fournisseurs de composants critiques (capteurs, actionneurs, accélérateur IA).

Associer les start-ups avec les futurs clients potentiels afin de donner la dimension industrielle et les cas d'usage pertinents.

Protéger le marché européen pour laisser éclore et se fortifier un écosystème.

Simplifier et harmoniser la réglementation dans le domaine agricole et aérien pour profiter des avancées des automatismes et de leur sécurité intrinsèque, accélérer l'adoption du Code MASS (navires autonomes) et clarifier les responsabilités juridiques pour lever les freins assurantiels.

Former la main-d'œuvre adaptée en lançant des formations d'ingénieur et de chercheur mixtes en IA embarquée et robotique et en veillant à une juste rémunération des doctorants pour éviter la fuite des meilleurs vers les autres pays européens.

Favoriser la formation des techniciens nécessaires à l'entretien, la configuration et la surveillance de ces systèmes.

Adapter les programmes de R&D du grand défi robotique (projet STAIRS) dans son volet agriculture en augmentant massivement les volumes

financiers et en finançant des fermes pilotes destinées à tester intensivement les solutions, notamment la reconnaissance de l'environnement et la discrimination des espèces végétales pour des tâches comme le désherbage. Tester, pour valider les parcours de certification, les problèmes de sécurité et de sûreté de fonctionnement des robots en milieu naturel.

Favoriser les commandes de robots sociaux par l'État via les hôpitaux et les cliniques et financer la charge de travail supplémentaire pour réaliser les tests grandeur nature à grande échelle afin de créer le marché (une centaine de robots, 4 à 5 M€) et pour doter les fabricants des bases de cas d'usage robustes.

Lancer un projet de navire autonome en liaison avec les chantiers navals et les armateurs français, incluant la partie terrestre (centre de contrôle, zones portuaires et moyens de communications).

Deuxième partie - État de l'art détaillé

Chapitre 9

Milieu terrestre

Le milieu terrestre s'avère le plus complexe par son hétérogénéité structurelle, au niveau du sol, du climat, des interactions souhaitables ou non avec l'environnement et par la présence d'un urbanisme très diversifié, source d'obstacles. Les études soulignent la difficulté pour un système mobile autonome terrestre de répondre aux questions :

- Où suis-je ?
- Où vais-je ?
- Quel est mon environnement physique ?
- Comment je me déplace sur ce terrain en évitant les obstacles et en faisant des choix ?
- etc.

9.1. Mobilité routière

Dans le modèle de la mobilité terrestre sur route deux solutions ont été développées ;

WAYMO utilise une combinaison avancée de 29 caméras, radars, micros et LiDAR pour offrir une perception multisensorielle de l'environnement. Cette technologie lui permet d'adopter un style de conduite qualifié de « safe mais assertif », capable de reconnaissance et d'analyse de situations complexes et de boucles décision-action dans des temps bien meilleurs que des humains. Waymo est déjà à un niveau de conduite autonome de niveau 4 SAE, ce qui signifie qu'il peut fonctionner sans intervention humaine dans des conditions spécifiques peu à peu étendues à 24x7x365 hors météo exceptionnelle. Cela

impose de définir une zone précise dans laquelle les véhicules sont autorisés à circuler et Waymo se doit de récupérer toujours plus de données et de confronter ses véhicules à toujours plus de situations différentes afin d'affiner les algorithmes d'apprentissage. Ce qui implique de les entraîner et de les recalibrer constamment. Chaque zone desservie – désormais des villes entières y compris la desserte complexe de leurs aéroports – nécessite une autorisation basée sur des critères définis par la puissance publique.

Le retour sur investissement réel de cette solution doit encore être prouvé, les investissements d'Alphabet depuis 2009 n'étant pas connus avec certitude[73].

Tesla quant à lui, s'appuie sur un système de huit caméras externes, 12 capteurs ultrasoniques, et une intelligence artificielle centrée sur la vision, sans LiDAR et radar. Bien que cela simplifie le matériel, cela impose des défis en termes de perception et de sécurité. Tesla exige encore la présence d'un conducteur derrière le volant, signe que son système n'est pas totalement autonome. L'architecture choisie pose des questions sur la fiabilité en situation météorologique dégradée (suppression du radar).

Une troisième voie qui utiliserait une infrastructure déployée sur les axes routiers n'a pas été développée compte tenu des coûts de déploiement de cette approche mais la Chine au travers de la 6G semble s'y intéresser.

9.2. Agriculture

Pour les applications dans le domaine agricole, la mauvaise prise en compte de l'expérience utilisateur et des retours sols sur les châssis des robots, provoqués par les outils, a engendré des difficultés pour certaines start-ups.

En outre la rusticité nécessaire à ces engins et leur concept d'emploi doivent être pris en compte dès la conception pour ne pas créer des machines trop fragiles et trop complexes pour l'utilisateur.

73 Alphabet aurait investi depuis 2009, 30 Mds de dollars incluant les 5 milliards de levée de fonds de 2024. https://www.roadtoautonomy.com/metaverse-waymo-spending/.

Enfin ces robots, qui opèrent sur des terrains très différents, rendent les méthodes d'apprentissage pour le moment trop chères, et des solutions spécifiques doivent être développées pour chaque sous segment d'activité (élevage, arboriculture, céréalier, etc.). En effet pour une parcelle donnée il existe une variété de cultures possibles et une grande variété de structure du sol (capacités de pénétration ou d'adhérence) en fonction de la météo par exemple.

9.3. Robotique de service

9.3.1. Dans la logistique

L'environnement structuré allège la complexité des mécanismes d'autonomie et du type de missions que le système autonome peut accomplir. Le succès repose à la fois sur la prise en compte des objets à manipuler mais surtout de l'intégration dans les systèmes logistiques existants :

- WMS (*Warehouse Management System*) : Gestion des stocks, des emplacements, des mouvements et des commandes. Les AMR s'intègrent pour automatiser le picking, le transport interne et le réapprovisionnement.

- MES (*Manufacturing Execution System*) : Suivi et contrôle des processus de production. Les AMR transportent des pièces entre les postes de travail.

- ERP (*Enterprise Resource Planning*) : Planification globale des ressources. Les AMR sont pilotés via des modules dédiés ou des interfaces avec le WMS/MES.

- TMS (*Transportation Management System*) : Gestion des flux entrants/sortants. Les AMR assurent la liaison entre les quais de chargement et les zones de stockage.

9.3.2. Robotique logistique - Chaîne de la valeur

Répartition hardware / logiciel / services

Le marché des robots logistiques dépassait 15 Md$ en 2024 (CAGR 17,3 % jusqu'en 2034), avec le segment hardware représentant ~66 % des parts. Le logiciel affiche les marges les plus élevées – supérieures à 15 % – contre le hardware et les services. [21]

Segment	Part du marché 2024	Marge brute typique	Tendance
Hardware	~66 %	10–20 %	Commoditisation
Logiciel	~15 %	30–60 %	Forte croissance
Services	~19 %	10–20 %	Croissance rapide

Les intégrateurs systèmes : cœur de la création de valeur

ABI Research projette que les intégrateurs systèmes génèreront plus de 137 Md$ de revenus d'ici 2032 dans l'automatisation d'entrepôts, soit le triple du marché 2025 (44,4 Md$). L'Amérique du Nord et l'Europe représentent 75 % des revenus totaux, tandis que l'Asie-Pacifique enregistre le CAGR le plus rapide (18 %) [1].

Environ 30 % des entrepôts ont intégré la robotique dans leurs opérations. Les grandes installations sont les plus susceptibles d'avoir adopté ces solutions, et les intégrateurs comblent un écart crucial en termes d'expertise technique [1].

Modèles de captation de valeur émergents : le RaaS

72 % des entreprises logistiques prévoient d'adopter des contrats RaaS (*Robotic as a Service*), transformant des investissements Capex de plusieurs millions en Opex basés sur l'usage, ouvrant l'automatisation aux expéditeurs de taille moyenne [39].

Le cas Amazon est emblématique : acquisition de Kiva Systems en 2012, internalisation totale de la valeur de l'intégrateur, positionnement comme opérateur et propriétaire de la technologie. Walmart a investi 1 Md$ dans l'automatisation de ses centres de distribution. [40]

D'importantes transactions M&A illustrent la bataille pour la valeur logicielle : ABB a acquis Sevensense (navigation 3D par IA) en janvier 2024 ; en janvier 2025, Symbotic a signé un accord de 200 M$ pour acquérir la division Advanced Systems and Robotics de Walmart ; KION a annoncé une collaboration avec NVIDIA et Accenture pour intégrer la « Physical AI » dans les opérations d'entrepôt. [36]

Répartition de la valeur d'un projet logistique type

Niveau	Part de la valeur	Exemples d'acteurs
Fournisseurs HW (AMR, AS/RS)	35–40 %	Geek+, AutoStore, Locus Robotics, Boston Dynamics
Logiciel (WMS, orchestration)	15–20 %	Manhattan Associates, GreyOrange, Symbotic
Intégrateur système	25–30 %	Swisslog, Dematic, Bastian Solutions
Opérateur / maintenance (TCO)	15–20 %	Amazon Logistics, DHL, DSV

9.3.3. Robots bipèdes et quadrupèdes

On assiste à une explosion de modèles (voir Annexe B, page 175) provoquée par des programmes public ou privés de R&D bien structurés (notamment en Chine) dont le but est à la fois de faire avancer la recherche, de créer un tissu de PME pour les différents composants, et de trouver des applications fonction des performances réelles des robots déployés.

L'analyse stratégique qui sous-tend ces développements repose sur la conviction que des facteurs sociétaux et de compétitivité conduiront à l'introduction de ces robots pour travailler en collaboration ou en remplacement des humains dans les tâches les plus simples.

Même si les vidéos de démonstrations démontrent qu'ils semblent doués pour exécuter des pas de danse, du karaté ou des acrobaties, peu pour le moment développent des fonctionnalités sophistiquées, signe d'une difficulté intrinsèque à reproduire les capacités d'un être humain.

La difficulté de l'inclusion de ces robots dans un milieu industriel est liée à :

- leur interfaçage avec le système d'information des usines c'est à dire la capacité de recevoir des instructions, de les exécuter sans un long entraînement pour garantir la polyvalence,
- la possibilité de générer des données utiles à la qualité et à la performance du processus global,
- leur taux de disponibilité,
- leur respect des normes de sécurité.

En Allemagne la société Neura Robotics[74] a su créer une gamme large de produits et développe et a mis en production la 3e génération de son robot 4NE1 après une levée de fonds[75] de 120 M€. La société affiche des ambitions mondiales puisqu'elle souhaite livrer 5 millions de robots d'ici 2030 ([76]).

En Italie la société Oversonic vient d'annoncer[77] un partenariat avec STMicroelectronics pour la fourniture de plusieurs robots RoBee pour la logistique et la production au sein de ses usines (Voir section 14.2, page 130 pour une analyse de la valeur).

74 NEURA brings together more than 600 employees from over 45 nations. All key technologies, such as AI, control software, sensor technology and mechanical components, are developed in-house. https://neura-robotics.com/products/4ne1/

75 https://www.usine-digitale.fr/article/neura-robotics-leve-120-millions-d-euros-pour-ses-robots-dotes-de-capacites-cognitives

76 https://www.usine-digitale.fr/article/neura-robotics-l-allemand-qui-defie-figure-ai-et-unitree-dans-la-robotique-humanoide.N2234266

77 https://www.roboticstomorrow.com/news/2025/12/22/oversonic-robotics-signs-humanoid-robots-supply-agreement-with-stmicroelectronics/25937/

9.4. Dans le domaine militaire

Aux problématiques ci-dessus évoqués vient se rajouter, l'intégration du robot dans un SIC (Système d'Information et de Communication) qui grâce à une connectivité accrue, est capable de diffuser les informations de combat en temps réel, entre toutes les unités déployées. La problématique des ordres de tir est une dimension nouvelle qui doit s'exécuter dans le cadre défini par le commandement.

Chapitre 10

Milieu aérien

Deux domaines bien séparés coexistent, celui dédié au transport de passager et les aéronefs sans pilote.

10.1. Mobilité aérienne

Dès que des vies humaines sont potentiellement en jeu le critère sécurité est celui qui l'emporte. Bien qu'aujourd'hui un avion de type Airbus ou Boeing puisse accomplir toutes ces phases de vol (décollage, croisière, atterrissage) en automatique, les conditions de trafic au roulage, en croisière avec insertion dans le trafic aérien général rendent la présence d'un pilote et son intervention nécessaire.

Le pilote est un gestionnaire de systèmes automatisés (et ils sont très nombreux sur un avion et intégrés dans le FMS (*Flight Management System*)) capable de reprendre la main lorsque cela est nécessaire. Les systèmes automatiques étant prévus pour les incidents « connus » et l'humain doit traiter le reste.

Les automatismes sont source de risques bien identifiés :

- Risque de somnolence intellectuelle : Les équipages, en mode automatique, peuvent perdre leur vigilance (ex. : distraction par des activités secondaires ayant conduit à un atterrissage raté aux États-Unis).

- Confiance aveugle *versus* surveillance : Malgré des taux de panne très faibles (1 incident pour 10 000 vols), les pilotes doivent rester en alerte. Les capteurs de vigilance (analyse de la pupille) sont rejetés pour des raisons de vie privée.

- Défis culturels : Dans certaines régions (ex. : Asie), la surestimation de la fiabilité des automatismes a conduit à des accidents qui auraient pu être évités.

- Limites cognitives sous stress : Les simulateurs ne reproduisent pas la pression réelle en vol et le changement brusque d'une sous charge à une surcharge cognitive.

- Gestion des « inconnus inconnus » : Les systèmes actuels peinent à gérer les situations non anticipées (ex. : explosion d'un moteur générant des pannes en cascade). L'humain reste le dernier recours pour ces cas.

- Automatisme non documenté : cas du Boeing 737 MAX[78] : Le MCAS, introduit sans formation adéquate ni redondance des capteurs, et une certification douteuse illustre les risques de l'interdépendance des automatismes. (accident de Vol 610 de Lion Air en 2018).

- Transparence et explicabilité : Les algorithmes d'IA manquent de transparence, ce qui limite leur intégration à haut niveau (niveau 3 d'autonomie exclu par l'EASA).

10.2. Drones aériens sans pilotes

Les drones aériens sont tous, à date, dotés d'automatismes mais force est de constater qu'ils sont, pour la très grande majorité, téléopérés ou télésurveillés sur tout ou partie de leur mission même si beaucoup de fonctions disposent d'un automatisme intégré, comme la planification des itinéraires, la stabilité du vol, le déclenchement des fonctionnalités de la charge utile, etc.

78 https://fr.wikipedia.org/wiki/Maneuvering Characteristics Augmentation System

Un grand nombre sont dotés de fonctions de sécurité leur permettant des atterrissages d'urgence ou un retour vers le point initial, suite à une perte de liaison ou autre incident.

Que ce soit dans le domaine civil ou militaire, ils sont soumis à des règles de circulation aérienne strictes imposant la présence d'un pilote à distance et pour beaucoup le maintien d'une perception visuelle du drone par l'opérateur.

Ces règles sont une garantie pour la sécurité des biens et des personnes mais constituent aussi un frein dans certaines applications notamment l'agriculture, la surveillance de lignes aériennes ou la lutte contre les incendies. À notre connaissance aucun de ces engins n'est capable d'analyser une situation, de prendre une décision dans le cadre de sa mission, de se reprogrammer et de la poursuivre, les excluant de la catégorie des systèmes totalement autonomes.

10.3. Dans le domaine militaire

Les armées dans tous les pays ont fortement développé depuis une dizaine d'années les drones pilotés à distance. Ils constituent des plateformes opérationnelles sur lesquelles sont introduits des capacités d'autonomie pour le vol sans réception de signaux GPS ainsi qu'en cas de rupture des liaisons.

Le choix automatique de sélection de cibles et le verrouillage/poursuite sur la cible sans intervention humaine sont désormais mis en œuvre. Technologiquement ces avancées pourraient avoir des applications dans le domaine civil mais le peu d'information en source ouverte sur les performances réelles de ces systèmes ne permet pas d'aller plus loin dans l'analyse.

Chapitre 11

Milieu maritime

11.1. Navires de surface

L'OMI a achevé en mai 2021 un « regulatory scoping exercise » pour les navires autonomes (MASS) afin d'analyser comment les traités de sécurité maritime existants s'appliquent ou doivent être modifiés.

Les problèmes soulevés sont nombreux : définition de « maître », « équipage », « personne responsable », la responsabilité en cas d'accident, la fiabilité des systèmes autonomes. Or sans cadre clair sur la responsabilité et la couverture juridique associée, l'acceptation des navires autonomes se heurte à des risques légaux.

Il existe peu de normes « type » pour les navires autonomes (ou fortement automatisés). Par exemple, la classification des navires selon les niveaux d'autonomie (MASS Levels) reste encore à clarifier[79].

L'autonomie implique que les systèmes doivent gérer toutes les situations, ou que l'intervention à distance soit possible. Cela impose redondance, fiabilité, gestion des pannes, communication sécurisée. Les risques cyber sont élevés (prise de contrôle à distance, interférence, navigation autonome dans trafic dense) et la maturité du secteur faible.

79 https://www.hfw.com/insights/mass-update-part-2-autonomous-shipping-a-reality/

Pour opérer des navires autonomes, il faut donc des centres de contrôle à terre, des communications haut débit (satellite, 5G, etc.), des ports avec des services connectés. Certains corridors ou ports ne seront pas encore prêts avant longtemps.

De plus, l'interaction avec les navires conventionnels doit être gérée (trafic mixte). Chaque État côtier peut avoir ses propres règles pour la navigation autonome et la certification créant un morcellement réglementaire.

Les navires autonomes peuvent aussi apporter des bénéfices (par ex. optimisation de route, réduction de consommation, navires plus petits, flottes intelligentes). Cela s'inscrit dans les objectifs européens « verdissement » du transport maritime.

Pour atteindre un haut niveau d'autonomie maritime (jusqu'à des navires entièrement autonomes – niveau 4 MASS), il existe encore plusieurs défis techniques majeurs à résoudre et des technologies critiques à développer ou fiabiliser.

Ces verrous concernent l'ensemble des systèmes embarqués, la prise de décision autonome, l'environnement opérationnel et la cybersécurité :

- Les capteurs actuels (radar, AIS (*Automatic Identification System*), caméra, LiDAR (*Laser Imaging Detection and Ranging*), sonar) doivent être fiables dans toutes les conditions météo et de visibilité (brouillard, nuit, mer agitée).

- La fusion de données entre ces capteurs reste complexe et sujette à erreurs.

- La détection d'obstacles flottants non répertoriés (filets, conteneurs semi-immergés, petits bateaux sans AIS) est encore difficile.

- La navigation autonome en environnement non structuré (mer libre, zones côtières, trafic dense) nécessite une prise de décision dynamique.

- La gestion des situations imprévues (COLREGs (Collision Regulations) interprétés par l'IA) reste limitée.

- Le niveau de confiance dans l'IA en conditions critiques n'est pas encore suffisant pour un usage réglementé.

Le tableau ci-dessous fait état de la maturité du secteur dans différents domaines.

Table 11.1 : Maturité du secteur

Domaine	Défis clés	Maturité actuelle
Perception & capteurs	Fiabilité tous temps, fusion capteurs	Moyenne
IA décisionnelle	COLREGs, imprévus, IA explicable	Faible à moyenne
Autonomie énergétique	Endurance, recharge autonome	Moyenne
Communication	Latence, sécurité, continuité	Moyenne à faible
Cybersécurité	Robustesse face à attaques	Faible à moyenne
Interaction humaine	Coexistence avec trafic humain	Faible
Simulation & certification	Validation à grande échelle	Faible à moyenne
Maintenance autonome	Longévité, diagnostics	Faible

11.2. Sous-marins

Dans le domaine sous-marin, l'absence de communications impose un mode de fonctionnement semi-autonome ou la programmation de la mission se marie avec un recalage des données lors du retour périodique ou non du sous-marin à la surface.

Dans le domaine civil, ces solutions existent d'ores et déjà et les missions sont essentiellement liées à l'océanographie et à la surveillance des plateformes pétrolières ou éoliennes. Comme tout véhicule sous-marin, la résistance à la pression, l'autonomie demandée, la précision de localisation et les charges utiles embarquées sont des facteurs dimensionnants dans la définition du sous-marin et de son coût.

11.3. Dans le domaine militaire

Les missions demandées à des engins à vocation militaire ont pour but essentiel d'accroître la capacité de surveillance, d'intervention ou de destruction de l'escadre à la mer.

La difficulté à résoudre est d'intégrer ces engins dans le système de combat du bâtiment dont il dépend et de partager la situation tactique générale afin qu'ils puissent prendre les bonnes décisions dans leur domaine opérationnel fixé. L'annexe E (page 189) donne une indication sur les programmes en cours connus dans les principales marines.

Chapitre 12

Véhicules autonomes

Le tissu industriel nécessaire aux systèmes autonomes est d'une grande variété et l'interdépendance entre les plaques Asie, États-Unis et Europe est forte. Il est constitué d'acteurs historiques et de start-ups. Il y a ceux, peu nombreux, qui opèrent des véhicules autonomes sans chauffeur de sécurité dans des zones urbaines ou péri-urbaines significatives (Waymo, Zoox, Apollo Go-Baidu, Pony AI, AutoX, WeRide) et ceux qui n'en sont pas encore là (Tesla, Mercedes, Motional, Mobileye, Wayve).

12.1. Aux États-Unis et en Chine

12.1.1. Les acteurs majeurs des robots-taxis

Waymo – est le leader incontesté du marché des robotaxis en 2025. L'entreprise propose des services de voitures autonomes sans conducteur dans dix villes américaines dont Phoenix, San Francisco, Los Angeles, Austin, Atlanta, Miami etc. et teste sa technologie à New-York, Londres et Tokyo. Waymo, après une numérisation détaillée des voies de chacune des zones où l'entreprise opère, valide son logiciel issu d'apprentissage massif par la simulation de plusieurs milliers de situations de conduite sur chaque portion de voie, croisement etc. de la zone visée. Waymo réalise, début 2026, plus de 500 000 trajets payants par semaine sans chauffeur de sécurité. Son approche repose sur une combinaison de caméras, de lidars et de radars pour assurer une perception robuste de l'environnement. Waymo a fait étudier par un organisme indépendant la comparaison entre le taux d'accidents dans les lieux et aux horaires opérés de ses robotaxis versus les

voitures des particuliers. Le résultat montre un ration d'environ 1 à 10 assez constant en faveur des véhicules autonomes de Waymo.[80]

Apollo Go – développé par Baidu en Chine, connaît une croissance rapide avec plus de 9 millions de trajets cumulés début 2025. Le service est disponible dans plus de dix grandes villes chinoises, dont Beijing, Shanghai et Guangzhou. Baidu bénéficie d'un soutien fort des autorités locales, qui facilitent les tests et le déploiement commercial dans des zones urbaines dédiées.

Motional – issu d'une coentreprise entre Hyundai et Aptiv, a récemment recentré sa stratégie. Après avoir réalisé plus de 100 000 trajets autonomes à Las Vegas, l'entreprise se concentre désormais sur le développement de sa technologie de niveau 4 plutôt que sur une expansion immédiate. Hyundai a renforcé son investissement, tandis qu'Aptiv a réduit le sien en raison des pertes financières.

Zoox – filiale d'Amazon, mise sur des véhicules électriques conçus spécialement pour les robotaxis, sans volant ni pédales. Malgré un incident récent ayant entraîné un rappel logiciel, Zoox prépare le lancement de ses premiers services commerciaux à Las Vegas et San Francisco en 2025. L'entreprise table sur une production à grande échelle pour se différencier.

Mobileye – filiale d'Intel, collabore avec plusieurs partenaires pour déployer sa technologie. En Europe, Mobileye s'associe à Volkswagen pour lancer des flottes de véhicules autonomes, tandis qu'aux États-Unis, un partenariat avec Lyft permettra d'intégrer ses systèmes dans le réseau de VTC. Mobileye vise également à supprimer les conducteurs de sécurité dans ses projets pilotes en Allemagne et en Israël.

12.1.2. Les acteurs du transport autonome de marchandises

Aurora – a marqué l'histoire en 2025 en devenant la première entreprise à opérer des camions autonomes sans conducteur sur des routes publiques,

80 https://waymo.com/safety/impact/

entre Dallas et Houston. Aurora collabore avec Uber Freight et Hirschbach Motor Lines et prévoit d'étendre ses opérations vers d'autres corridors logistiques.

Kodiak Robotics – se spécialise dans le transport à longue distance et a réalisé plus de 100 000 miles de livraisons autonomes en partenariat avec des entreprises comme J.B. Hunt et Maersk. Kodiak a également ouvert un hub logistique à Houston pour accélérer le déploiement de ses camions autonomes au Texas et en Oklahoma.

Gatik – se concentre sur la logistique du « middle-mile », c'est-à-dire les trajets courts et répétitifs entre entrepôts et magasins. L'entreprise travaille avec Walmart, Kroger et Tyson Foods, et a reçu un investissement stratégique d'Isuzu pour produire des camions autonomes de niveau 4 d'ici 2027. Gatik collabore aussi avec NVIDIA pour renforcer ses capacités d'IA embarquée.

Plus – mise sur des partenariats mondiaux pour déployer sa technologie. En 2025, l'entreprise a lancé des tests publics de camions autonomes en Allemagne et aux États-Unis, en collaboration avec Volkswagen et Scania. Plus.ai prépare également une introduction en Bourse pour financer son expansion et vise une production en série de camions autonomes d'ici 2026.

12.2. En Europe

Wayve – une start-up britannique, s'est associée à Uber pour déployer une flotte de robotaxis expérimentaux à Londres dès 2025. Ce partenariat illustre l'émergence de solutions locales en Europe, même si le cadre réglementaire reste plus strict qu'aux États-Unis ou en Chine.

Mobileye – bien qu'israélienne, est un acteur clé en Europe grâce à ses partenariats avec des constructeurs comme Volkswagen. Ensemble, ils travaillent sur des systèmes de conduite autonome de niveau 4, avec des déploiements commerciaux prévus à partir de fin 2026. Mobileye fournit aussi sa technologie à d'autres acteurs européens, comme Zeekr et Polestar.

Renault – collabore avec le groupe chinois WeRide pour tester des navettes autonomes en France, notamment lors d'événements comme Roland-Garros.

Ces projets restent pour l'instant limités à des trajets courts et à basse vitesse, mais montrent l'implication des constructeurs européens dans des partenariats technologiques.

Volkswagen – via sa filiale CARIAD, investit massivement (4 milliards d'euros) dans le développement de la conduite autonome, en s'appuyant sur des partenariats avec des spécialistes comme Mobileye. L'objectif est de proposer des solutions autonomes adaptées au marché européen, notamment pour des usages urbains et autoroutiers.

Mercedes-Benz – est le pionnier européen avec son système Drive Pilot de niveau 3, déjà homologué en Allemagne sur certains modèles haut de gamme. Ce système permet des manœuvres autonomes sur autoroute, sous supervision humaine. Mercedes teste des véhicules en niveau 4 avec chauffeur de sécurité aux États-Unis (San Jose) et en Chine.

Enfin, des équipementiers (Valeo, Bosch) et start-ups européennes (Verne[81] a annoncé la mise en service de ses robots-taxi à Zagreb (Croatie) en mai 2026 et devient avec une flotte de 60 véhicules le premier en Europe, il utilise la technologie Mobileye) participent à des projets pilotes de robots-taxis ou de logistique autonome, souvent en collaboration avec des acteurs internationaux.

En Europe, la conduite de voitures autonomes est autorisée jusqu'au niveau 3. Cela signifie que le conducteur doit pouvoir reprendre le contrôle du véhicule si nécessaire. Malgré tout, l'Europe a annoncé un plan ambitieux pour soutenir la R&D dans le domaine de la conduite autonome et des véhicules connectés.

La Commission européenne a alloué 1 milliard d'euros (à comparer aux 30 milliards d'Alphabet !) spécifiquement pour accélérer le développement des technologies de conduite autonome, de l'intelligence artificielle embarquée et des véhicules connectés. Ce financement s'inscrit dans un plan d'action plus large visant à repositionner l'Europe comme leader dans la mobilité intelligente et durable. Une partie de ces fonds est destinée à

81 http://letsverne.com

des projets d'intérêt européen commun, notamment via ECAVA (*European Connected and Autonomous Vehicle Alliance*), qui rassemble constructeurs, équipementiers et acteurs du numérique.

12.2.1. ECAVA

L'*Alliance européenne des véhicules connectés et autonomes* (en anglais ECAVA), lancée en 2025, réunit les principaux acteurs de la chaîne de valeur automobile européenne : constructeurs (comme Volkswagen, Renault, Stellantis, Mercedes-Benz, BMW), équipementiers (Bosch, Continental, Valeo), fournisseurs de technologies (Mobileye, NVIDIA Europe, Infineon), ainsi que des start-ups et PME innovantes spécialisées dans l'IA, les capteurs et les logiciels embarqués autour de projets communs tels que :

1. Développement d'une plateforme logicielle européenne commune. L'Alliance travaille sur une architecture logicielle open-source et des composants matériels partagés, afin de standardiser les systèmes de conduite autonome et réduire la dépendance aux solutions américaines ou asiatiques.

2. Bancs d'essai transfrontaliers à grande échelle. Des zones de test sont mises en place pour valider les technologies autonomes dans des conditions réelles, avec des « bacs à sable » réglementaires permettant des essais sur routes ouvertes.

3. Projets pilotes de mobilité autonome. Plusieurs projets sont soutenus, comme des navettes autonomes en milieu urbain (ex. : partenariats Renault-WeRide en France) ou des systèmes de stationnement automatisé, avec une première législation prévue dès 2025. L'objectif est de tester des cas d'usage concrets (logistique, transport public, mobilité partagée) avant une généralisation.

4. Mise en commun des données et IA. L'Alliance encourage le partage de données entre membres, sous encadrement juridique, pour améliorer les algorithmes d'IA dédiés à la conduite autonome, notamment via des projets d'intérêt européen commun (PIIEC) accessibles aux PME.

5. Feuille de route technologique ambitieuse. Une roadmap a été élaborée pour prioriser le développement de composants critiques (lidars, radars, unités de calcul) et harmoniser les normes européennes, afin de faciliter l'interopérabilité et la compétitivité des solutions locales.

12.3. Aides à la conduite

Les systèmes ADAS (*Advanced Driver Assistance Systems*) de niveau 2 et 3 constituent une base industrielle solide, avec une forte demande en capteurs (radars, caméras, LiDAR) et en calculateurs. Une analyse des principaux fournisseurs du marché démontrent l'importance de ce domaine comme fondement du futur des systèmes autonomes de niveau 4 en mobilité terrestre.

12.3.1. Fournisseurs des capteurs

Fournisseur	Type de capteur	Part de marché (2024-2026)	Produits phares	Clients principaux
Bosch	Radars, caméras, capteurs ultrasons	25-30 %	Radar LRR4, caméras stéréo, capteurs ultrasons	Mercedes, BMW, Volkswagen, Toyota, Tesla
Continental	Radars, caméras, LiDAR	20-25 %	Radar ARS 540, caméra haute résolution, LiDAR HRLS	Ford, General Motors, Renault, Nissan
Valeo	Caméras, LiDAR, capteurs thermiques	15-20 %	LiDAR Scala 2, caméra 3D, capteurs infrarouges	Stellantis, Tesla, Hyundai, Kia
Mobileye (Intel)	Caméras, LiDAR, calculateurs intégrés	10-15 %	EyeQ6, LiDAR solid-state	BMW, Volkswagen, Nissan, Toyota
NVIDIA	LiDAR, caméras (*via* partenariats)	5-10 %	Plateforme DRIVE Thor, LiDAR (partenariats)	Mercedes, Volvo, Lucid Motors, BYD
Hesai / RoboSense	LiDAR	5-8 % (en forte croissance)	LiDAR Pandar (Hesai), RS-LiDAR (RoboSense)	NIO, XPeng, Li Auto, Honda
Innoviz	LiDAR	3-5 %	InnovizTwo (LiDAR solid-state)	BMW, Volkswagen, Volvo
Aptiv	Radars, caméras, intégration système	5-7 %	Solutions de fusion de capteurs, radars 4D	General Motors, Ford, Stellantis
In} neon / NXP	Capteurs semi-conducteurs (radar, ultrason)	10-12 %	Puces radar (In} neon), capteurs ultrasons (NXP)	Tous les constructeurs (*via* équipementiers)

Dynamiques du marché des capteurs

Le marché des capteurs ADAS connaît une expansion rapide et une transformation technologique majeure, portée par des avancées significatives et une réglementation de plus en plus exigeante.

- Croissance du marché : Le marché des capteurs ADAS devrait passer de 63,2 milliards USD en 2026 à 308,6 milliards USD en 2035, avec un TCAC de 19,3 % [82].

- Radars dominants : Les radars représentent 46 % du marché ADAS en 2024, suivis par les caméras et les LiDAR en forte croissance[83].

- LiDAR en expansion : Le coût des LiDAR a chuté (de 70 000 € en 2017 à moins de 2 000 € en 2026), grâce à des acteurs comme Hesai, Innoviz et Luminar[84].

- Fusion de capteurs : La fusion de données (radar + caméra + LiDAR) devient standard pour les niveaux 2+ et 3, avec des acteurs comme Bosch, Continental et Mobileye en tête[85].

- Réglementation : L'Europe et la Chine imposent désormais des normes strictes pour les ADAS (freinage automatique, maintien de voie), ce qui stimule la demande[86].

82 Market Growth Reports, *Rapport sur le marché ADAS*, 2025.
83 Mordor Intelligence, *Taille du Marché des systèmes avancés d'aide à la conduite*, 2025.
84 CM-Aisne, *Voitures autonomes : entre mythe et futur proche*, 2026.
85 Mordor Intelligence, *Taille du Marché des systèmes avancés d'aide à la conduite*, 2025.
86 Mordor Intelligence, *Taille du Marché des systèmes avancés d'aide à la conduite*, 2025.

12.3.2. Fournisseurs de calculateurs

Fournisseur	Type de calculateur	Part de marché (2024-2026)	Produits phares	Clients principaux
NVIDIA	Calculateurs IA (Domain Controllers)	30-35 %	DRIVE Thor (2000 TFLOPS), DRIVE Orin	Mercedes, Volvo, Lucid Motors, BYD, Tesla
Mobileye (Intel)	Calculateurs embarqués	20-25 %	EyeQ6 (10 TOPS), EyeQ Ultra (prévu pour 2025)	BMW, Volkswagen, Nissan, Toyota
Qualcomm	Calculateurs (Snapdragon Ride)	10-15 %	Snapdragon Ride (10 TOPS)	General Motors, Honda, Renault
ZF Friedrichshafen	Calculateurs de mouvement (IA)	10-12 %	ProAI (calculateur centralisé)	Ford, Stellantis, Volkswagen
Aptiv	Calculateurs sécurisés	8-10 %	Calculateurs axés sur la cybersécurité	General Motors, Ford
Continental	Domain Controllers	7-9 %	Contrôleurs de domaine centralisés	BMW, Mercedes, Renault
Denso	Calculateurs gestion de batterie	5-7 %	Calculateurs pour véhicules électriques	Toyota, Honda, Subaru

Dynamiques du marché des calculateurs

Le marché des calculateurs ADAS est en pleine mutation, marqué par une croissance soutenue, une centralisation accrue des architectures, des avancées technologiques majeures et des alliances stratégiques pour répondre aux exigences croissantes en puissance de calcul et en cybersécurité.

- **Croissance du marché** : Le marché des calculateurs ADAS devrait croître à un TCAC de 21,2 % entre 2025 et 2034, porté par la demande en puissance de calcul pour la fusion de capteurs[87].

87 GM Insights, *Taille du marché des logiciels ADAS et perspectives de croissance*, 2025.

- Centralisation des calculateurs : Les constructeurs réduisent le nombre d'ECU par véhicule (ex. : Continental réduit de 20 % le nombre d'ECU) pour simplifier l'architecture[88].

- Puissance de calcul : Les calculateurs modernes (ex. : NVIDIA DRIVE Thor) atteignent 2 000 TFLOPS et gèrent jusqu'à 20 capteurs simultanément[89].

- Cybersécurité : Les calculateurs doivent désormais intégrer des protections avancées contre les cyberattaques, avec des acteurs comme Aptiv en pointe[90].

- **Alliances stratégiques** :

  - Volkswagen, Valeo et Mobileye ont annoncé un partenariat en 2025 pour déployer des ADAS niveau 2+ sur les véhicules MQB[91].
  - Aurora, Continental et NVIDIA collaborent pour produire des calculateurs pour camions autonomes basés sur NVIDIA DRIVE Thor[92].

12.3.3. Véhicules autonomes

Structure de la chaîne et enjeux de captation

Une évolution structurelle majeure est en cours : les experts prévoient pour 2035 un scénario où chips et logiciels sont soit co-développés par un acteur technologique et un fabricant de puces, soit entièrement réalisés en interne par l'OEM, traduisant une bataille pour capter la valeur logicielle au cœur du véhicule[93].

88 Industry Research, *Rapport sur la taille et l'industrie du marché des ECU automobiles*, 2025.
89 Market Growth Reports, *Rapport sur le marché ADAS*, 2025.
90 Industry Research, *Rapport sur la taille et l'industrie du marché des ECU automobiles*, 2025.
91 Mordor Intelligence, *Taille du Marché des systèmes avancés d'aide à la conduite*, 2025.
92 Mordor Intelligence, *Taille du Marché des systèmes avancés d'aide à la conduite*, 2025.
93 McKinsey Center for Future Mobility, *Where to Next ? Insights from Autonomous-Vehicle Experts*, janvier 2026. https://www.mckinsey.com/features/mckinsey-center-for-future-mobility/our-insights/future-of-autonomous-vehicles-industry.

Waymo : cas d'école d'intégration verticale opérateur

Waymo illustre comment la valeur remonte vers celui qui contrôle le stack complet :

- **Revenus :** Waymo a atteint un taux de revenus annualisé de 355 M$ en février 2026, contre ~125 M$ fin 2024, avec un tarif moyen de 15–17 $ par trajet (soit ~15 % en dessous d'Uber dans les marchés communs)[94].

- **Avantage de coût :** Waymo opère à ~0,30 $/mile contre 0,69 $/mile pour Uber, et peut capter près de 100 % des revenus de chaque course, contre ~15 % pour Uber (le reste étant reversé aux chauffeurs)[95].

- **Coût du véhicule :** Chaque robotaxi Waymo (Jaguar I-PACE à 75 000 $) est équipé d'un kit capteurs de 100 000 $ (LiDAR, radar, caméras 360°), portant le coût total à ~175 000 $ par véhicule. Goldman Sachs projette une chute de ~120 000 $ à ~50 000 $ d'ici 2030.[96] [97]

- **Pertes courantes :** Waymo affichait une perte opérationnelle de 1,23 Md$ au Q1 2025, reflet des investissements massifs en R&D et expansion, pour une valorisation en négociation de 100–110 Md$ fin 2025 (contre 45 Md$ en octobre 2024)[98]. Résultat à relativiser puisque sa maison mère, Alphabet (ex Google), a fait plus de 60 Md$ de cash flow libre sur les 12 derniers mois[99].

94 Sacra, *Waymo Revenue, Funding & News*, février 2026. https://sacra.com/c/waymo/. Sur certains trajets WAYMO peut-être plus cher que UBER.

95 Ivey Business Review, *Waymo Than Meets the Eye*, février 2025. https://www.iveybusinessreview.ca/magazine/articles/waymo

96 The Driverless Digest, *Waymo Stats 2025: Funding, Growth, Coverage, Fleet Size & More*, 2025; The DriverlessDigest, *15 Charts That Explain the Autonomous Vehicle Industry*, janvier 2026. https://www.thedriverlessdigest.com/p/waymo-stats-2025-funding-growth-coverage

97 Il y a quelques années, Jaguar était le seul fabricant à accepter les adaptations nécessaires à un véhicule autonome. Waymo aujourd'hui travill avec un constructeur chinois et a annoncé une coopération avec Toyota.

98 TSG Invest, *Waymo Stock: Private Investment Guide*, janvier 2026. https://tsginvest.com/waymo/

99 https://abc.xyz/investor/Earnings/default.aspx

Différents modèles de captation selon les acteurs

Acteur	Modèle	Exemple chiffré
Fournisseur SW pur	Licence logicielle aux OEM	Mobileye : ~70 % marge brute ; Wayve → Nissan
Opérateur intégré	Fleet + software + ride	Waymo : 355 M$ ARR (fév. 2026)
OEM + logiciel	Vente véhicule + abonnement	Tesla FSD : ~99 $/mois
Tier 1 système	HW+SW embarqué ADAS	Bosch, Valeo, Mobileye
Plateforme robotaxi	Opérateur en Chine	Baidu Apollo Go, WeRide, Pony.ai

Taille de marché

Le marché mondial des véhicules autonomes était estimé à **68 Md$** en 2024 et devrait atteindre **214 Md$** d'ici 2030 (CAGR 19,9 %). Le segment véhicules de tourisme représentait 69 % des revenus en 2024.[100] L'écosystème autonome a attiré **12,6 Md$** de capitaux propres en 2024, Waymo, Tesla, Baidu et Cruise représentant collectivement ~45 % des parts de marché identifiables.[101]

100 Grand View Research, *Autonomous Vehicle Market Size, Share & Growth Report to 2030*, 2025. https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/autonomous-vehicles-market

101 Persistence Market Research, *Autonomous Vehicles Market Size & Trends Report to 2033*, 2025. https://www.persistencemarketresearch.com/market-research/autonomous-vehicles-market.asp

Chapitre 13

Drones et UAS

Nous n'aborderons pas dans ce paragraphe les fabricants de drones exclusivement militaires qui sont nombreux et qui regroupent l'ensemble des industriels traditionnels[102] de l'industrie de défense avec l'émergence de start-up avec le statut de quasi licorne comme Harmattan[103] en France, Quantum Systems en Allemagne, TEKEVER au Portugal. Les sociétés ukrainiennes qui ont su innover et organiser une production de masse (plusieurs millions par an) à bas coût sont aussi très actives comme Skyeton auquel Harmattan s'est associé. Parmi la centaine d'acteurs du marché mondial des drones commerciaux recensée[104] on peut noter :

13.1. En Chine

DJI (Da-Jiang Innovation) – Fondée en 2006 à Shenzhen, DJI domine le marché mondial avec plus de 70 % de part de marché mondial, grâce à ses drones grand public et professionnels (série Mavic, Phantom, Inspire). L'entreprise a un chiffre d'affaires estimé à 3,5 milliards de dollars en 2024 et se distingue par ses innovations en matière d'intelligence artificielle, d'évitement d'obstacles et d'imagerie haute résolution. DJI mise sur l'automatisation totale et l'intégration de ses drones dans des applications variées, comme le cinéma, l'agriculture ou l'inspection d'infrastructures. Son leadership devrait

102 https://www.unmannedsystemstechnology.com/expo/unmanned-aerial-vehicles/

103 fondée en 2024 par un CEO de 25 ans, cette société a réussi à produire 1300 drones en plein cœur de Paris et envisage en 2026 d'ouvrir un site à Orly pour en produire 10 000.

104 https://uavcoach.com/drone-companies/

se maintenir grâce à des investissements continus en R&D, le soutien des autorités chinoises et à son adaptation aux réglementations internationales malgré les restrictions croissantes dans certains pays.

EHang – Il est reconnu comme le leader mondial des plateformes technologiques dédiées à la mobilité aérienne urbaine (UAM), avec une spécialisation dans les eVTOL (aéronefs électriques à décollage et atterrissage vertical) autonomes. L'entreprise a obtenu la première certification de ce type au monde pour son eVTOL EH216-S (sans pilote et transportant des passagers) délivrée par l'Administration de l'aviation civile de Chine (CAAC). En 2025, les premiers certificats d'exploitant aérien (OC) pour des vols commerciaux de masse ont été attribués à des opérateurs en Chine.

Autel Robotics – Autel Robotics, basée à Shenzhen, propose des drones haut de gamme pour les professionnels, avec des fonctionnalités comme l'évitement d'obstacles et des caméras 360°. La série EVO est particulièrement prisée dans les secteurs de l'agriculture, de la sécurité et de l'inspection industrielle.

13.2. Aux États-Unis

AeroVironment – Ce géant américain, présent depuis 1971, se concentre sur les drones tactiques et de surveillance pour les armées et les agences de sécurité. Avec 600 millions de dollars de revenus en 2024, AeroVironment répond à une demande croissante en drones autonomes pour la reconnaissance et les missions de défense, notamment auprès de l'OTAN et des forces armées américaines.

Skydio – Créée en 2014, Skydio est devenue le principal fabricant américain de drones autonomes, grâce à des technologies avancées d'IA et de sécurité des données. Ses drones, utilisés par les forces de l'ordre et les entreprises, bénéficient d'une conformité stricte aux réglementations américaines, ce qui lui permet de capter une part importante du marché gouvernemental et industriel. Il bénéficiera très vraisemblablement des commandes de plusieurs millions de drones dans les 3 prochaines années décidées par le DoD.

Vantage robotics – La société développe des drones pour applications civiles et militaires.

13.3. En Europe

Parrot SA – Basée à Paris, Parrot se positionne comme un acteur clé en Europe et en Amérique du Nord, spécialisé dans les drones pour l'agriculture, la cartographie et la défense. Avec un chiffre d'affaires de 75 millions de dollars en 2024, l'entreprise profite des restrictions croissantes sur les drones chinois pour renforcer sa présence, notamment dans les secteurs exigeant une sécurité des données accrue.

Delair – Se spécialise dans les drones pour la cartographie et l'inspection industrielle. Delair mise sur l'analyse par IA et les vols hors de vue (BVLOS (*Beyond Visual Line of Sight*)) et a réalisé en 2024 un chiffre d'affaires de 30 M€ avec un doublement prévu en 2025.

Wingtra – D'origine suisse, se spécialise dans les drones pour la cartographie et l'inspection industrielle. Wingtra innove avec des drones à décollage vertical (VTOL), idéaux pour les missions de grande envergure dans la construction ou l'agriculture.

13.4. Autres pays

Airobotics et Percepto – Ces deux entreprises israéliennes, Airobotics et Percepto, développent des solutions de drones autonomes en boîte, capables de fonctionner sans pilote pour des applications industrielles, sécuritaires ou militaires. Leurs technologies BVLOS et leur automatisation complète répondent aux besoins des smart cities et des infrastructures critiques.

Chapitre 14

Robots bipèdes et quadrupèdes

D'ici 2030, les fabricants actifs de robots humanoïdes bipèdes et quadrupèdes en série seront principalement situés en Chine, aux États-Unis et en Europe, avec une concentration notable en Chine[105].

En effet, la Chine a affiché dans son plan stratégique l'objectif de dépasser en 2027 une capacité de production totale de 10 000 robots mobiles intelligents, en soutenant plus de 50 entreprises principales en amont et en aval de la chaîne industrielle des robots intelligents, mettra sur le marché pas moins de 50 produits fabriqués en série, réalisera pas moins de 100 projets d'application industrielle à grande échelle[106].

Aux États-Unis et en Europe, les modèles phares incluent Digit (Agility Robotics), Optimus (Tesla), Figure 02 (Figure AI), G1 Bionic (Unitree), NEO Gamma (1X Technologies), GR-1 (Fourier Intelligence), Miroka (Enchanted tools) et Calvin (Wandercraft) et le suisse Anybotics avec son quadrupéde ANYMal.

Les robots présentent des degrés de liberté (DoF) variables, souvent autour de 6 DoF par jambe, avec des capacités d'IA avancées intégrant apprentissage par renforcement, téléopération, et compatibilité ROS.

Les applications couvrent la logistique, l'industrie, la santé, la sécurité, l'assistance domestique, et la recherche, avec des prix variant de quelques milliers à plusieurs dizaines de milliers de dollars.

105 Pour une liste exhaustive et à jour des systèmes existants, voir : https://www.aparobot.com/.
106 https://www.globaltimes.cn/page/202501/1326584.shtml

Les stratégies commerciales reposent sur des partenariats avec des géants technologiques (NVIDIA, OpenAI, Amazon), des distributions exclusives, et des politiques nationales d'innovation, notamment en Chine.

14.1. Points forts et faiblesses par région

- **Europe :** Les fabricants européens, notamment Enchanted Tools, Wandercraft, 1X Technologies, se distinguent par une forte intégration de l'IA pour des applications domestiques et industrielles, avec des partenariats stratégiques et une distribution ciblée. Néanmoins ils sont fortement dépendants de composants d'origine chinoise pour rester compétitifs ; à titre d'exemple, les moteurs des robots humanoïdes peuvent représenter jusqu'à 50 % du coût des approvisionnements.

  Le volume de production envisagé et la diversité des modèles restent très limités par rapport à la Chine et aux États-Unis.

- **États-Unis :** Les fabricants américains dominent en termes d'innovation technologique et de capital investi, avec des modèles très avancés (Digit, Optimus, Figure 02, Atlas) et des collaborations majeures (Amazon, OpenAI, NVIDIA). La production en série est en cours de montée en puissance, notamment avec Agility Robotics et Tesla. Les prix restent élevés, ce qui limite l'accessibilité. Il n'y a pas de plan national pour intégrer ce type de robots dans les usines.

- **Chine :** La Chine se positionne comme le leader mondial de la production de masse de robots humanoïdes, avec une stratégie nationale ambitieuse (« Made in China 2025 »), un écosystème industriel complet, et des modèles compétitifs en prix et en performance. Les fabricants chinois bénéficient d'un soutien gouvernemental fort, d'investissements massifs, et d'une capacité de production à grande échelle. À titre d'exemple la société Agibot a annoncé fin mars 2026 avoir livré 10 000 robots humanoïdes.[107] La diversité

107 https://roboticsandautomationnews.com/2026/03/30/agibot-reaches-10000-humanoid-units-built-as-real-world-demand-for-robots-accelerates/100218/

des modèles et des applications est très large, couvrant l'industrie, la santé, la sécurité et l'assistance domestique.

14.2. Chaîne de la valeur

14.2.1. Répartition des valeurs

Les analyses de coût des humanoïdes révèlent une concentration sur quelques postes clés. L'actionnement (moteurs, réducteurs, assemblages articulaires) représente 40 à 60 % du coût total, la perception et le calcul (caméras, LiDAR, GPU embarqués) 10 à 20 %, et la structure mécanique 10 à 15 % [37].

BofA Global Research estimait en mars 2025 le coût total d'un humanoïde typique à environ 35 000 $ par unité (composants majoritairement chinois), et prévoit une chute à 13 000–17 000 $ d'ici 2030–2035, soit une baisse de plus de 50 % en cinq ans [4].

Yole Group estime un coût 2025 de 32 000 $ avec un prix de vente moyen de 75 000 $ en 2025, attendu à 25 000 $ en 2035. Le coût est dominé par les systèmes mécaniques, mains dextres, actionneurs et servomoteurs, le silicium ne représentant qu'environ 8 % en 2025, contre 5 % prévu en 2035 [69].

Poste	Part du coût	coût 2025 ($)	Évolution
Actionneurs	40–60 %	13 000–19 000	Goulot principal
Mains dextres	10–15 %	3 000–5 000	Déclin rapide
Perception & calcul	10–20 %	3 000–6 000	Commoditisation
Structure mécanique	10–15 %	3 000–5 000	Stable
Batterie & énergie	5–8 %	1 500–2 500	Baisse progressive
Silicium (puces)	~ 8 %	~ 2 500	→ 5 % en 2035

14.2.2. Goulot d'étranglement dans la chaîne d'approvisionnement

Les actionneurs constituent le verrou stratégique de la chaîne : moins de 10 fournisseurs mondiaux sont capables de produire la précision requise pour les actionneurs à haute performance. C'est pourquoi la décision de Tesla de concevoir

ses propres actionneurs en interne est stratégiquement critique : maîtriser les coûts d'actionnement à grande échelle pourrait lui donner un avantage de 30 à 40 % sur les concurrents qui s'approvisionnent auprès de tiers [53].

14.2.3. Acteurs et stratégies de captation de valeur

Goldman Sachs souligne que les meilleures opportunités d'investissement à court terme se situent chez les fabricants de composants de la chaîne d'approvisionnement, mieux positionnés que les intégrateurs du fait des coûts élevés de développement et de production à l'échelle [52].

Morgan Stanley identifie trois couches dans la chaîne : *Brain* (semi-conducteurs, logiciels), *Body* (composants industriels) et *Integrators* (assembleurs d'humanoïdes complets) – avec NVIDIA, Qualcomm, Mobileye côté cerveau ; Harmonic Drive, Timken, SKF côté corps [41].

Tesla adopte une stratégie de **pure intégration verticale** – IA, batteries, fabrication maîtrisées en interne – pour son projet Optimus. Figure AI (valorisé 39 Md$, levée d'1 Md$ en septembre 2025 auprès d'Intel, NVIDIA, Qualcomm, Salesforce) cible d'abord les tâches industrielles haute valeur (BMW, Amazon) avant de descendre en gamme [26].

14.2.4. Taille de marché et projections

Le marché mondial des robots humanoïdes était estimé à 1,55 Md$ en 2024 et devrait atteindre 4,04 Md$ d'ici 2030 (CAGR 17,5 %). Le segment hardware représentait 69,7 % des parts en 2024 [22].

Goldman Sachs projette **38 Md$** d'ici 2035 et Morgan Stanley envisage **5 000 Md$** d'ici 2050 (soit plus d'un milliard d'unités en opération)[108].

108 Goldman Sachs Research, *The global market for humanoid robots could reach $38 billion by 2035*, février 2024 ; Morgan Stanley Research, 2025.

Chapitre 15

Maritime/MASS

Les solutions opérationnelles sont rares et le domaine est encore dans une phase initiale de maturité compte tenu des freins juridiques et assurantiels existants.

Kongsberg avec son bateau Yara Birkeland[109] (contrôle à distance, autodocking) est le plus avancé, il totalise plus de 250 voyages et environ 35 000 trajets camions évités sur 3 ans.

Rolls-Royce[110] a lancé le projet **AAWA** (*Advanced Autonomous Waterborne Applications*) en 2016, visant à faire naviguer un cargo sans équipage en haute mer d'ici 2025. Ce projet est mené en partenariat avec divers acteurs maritimes et doit permettre une autonomie vers 2035.

La Chine est très active dans ce domaine, avec la création de l'Alliance de développement des cargos autonomes (**Unmanned Cargo Ship Development Alliance**) et la construction du plus grand centre d'essais en mer au monde dédié aux bateaux sans pilote. La Chine prévoit de lancer son premier navire autonome avant la fin de l'année 2025, intégrant des énergies renouvelables (solaire, éolienne, hydrogène) pour une autonomie totale.

109 https://www.offshore-energy.biz/yara-birkeland-worlds-1st-fully-electric-autonomous-containership-marks-3-years-in-service/

110 https://www.rolls-royce.com/~/media/Files/R/Rolls-Royce/documents/%20customers/marine/ship-intel/rr-ship-intel-aawa-8pg.pdf

Le Japon au travers de la Nippon fondation a lancé le projet **MEGURI 2040**[111] qui est entré en 2025 dans sa phase 2. Le but est aussi de créer un bateau totalement autonome avec toutes les technologies de navigation autonome en place fin 2025.

En janvier 2025, DNV[112] qui est une autorité de certification[113] a lancé une nouvelle famille de notations pour les navires autonomes et télécommandés (AROS), fournissant un cadre pour démontrer que ces navires peuvent atteindre une sécurité équivalente ou supérieure à celle des navires conventionnels. Ce projet s'inscrit dans une démarche plus large de l'Union européenne et de l'OMI pour encadrer l'utilisation des navires autonomes.

Le projet **AUTOSHIP** (*Autonomous Shipping Initiative for European Waters*), soutenu par le Bureau Veritas et d'autres acteurs, vise à développer le « smart shipping » en Europe, en collaboration avec l'OMI pour adapter la réglementation.

Ces initiatives montrent une tendance mondiale vers l'automatisation et une autonomie croissante des navires à vocation commerciale.

Dans le domaine militaire l'apparition des drones sous-marins aux États-Unis (Orca XLUUV (*Extra Large Unmanned Underwater Vehicle*)), au RU (Excalibur), en France (UCUV), au Japon et probablement en Chine[114] marquent l'arrivée de nouvelles capacités pour les Marines concernées et la technologie associée devrait diffuser dans les applications civiles comme c'est le cas avec Exail et son drone Drix de surveillance des plateformes pétrolières ou des éoliennes en mer.

Ces initiatives montrent une tendance mondiale vers l'automatisation et l'autonomie des navires, avec des applications tant civiles que militaires.

111 https://en.nippon-foundation.or.jp/what/projects/ocean/meguri2040

112 https://www.dnv.com/maritime/autonomous-remotely-operated-ships/aros-class-notation/

113 Det Norske Veritas. Il s'agit d'une société norvégienne internationale spécialisée dans la certification, la classification et l'assurance qualité pour les industries maritime, énergétique et autres secteurs industriels.

114 https://interestingengineering.com/military/china-building-largest-underwater-drone

Chapitre 16

Modèles économiques

Le secteur de la robotique voit émerger des modèles économiques innovants, parmi lesquels le *Robotics-as-a-Service* (RaaS) s'impose comme une alternative à l'investissement initial. Ce modèle, fondé sur l'abonnement ou la facturation à l'usage – qu'elle soit mensuelle, horaire ou liée à la production – remplace les dépenses en capital par des coûts opérationnels récurrents. Il facilite ainsi une adoption plus rapide des technologies robotiques, tout en intégrant la maintenance et les mises à jour, et offre aux clients une scalabilité accrue. Pour les fournisseurs, il garantit des revenus réguliers et favorise l'adoption de solutions logicielles complémentaires. Selon les projections d'ABI Research, relayées par Formic, le marché du RaaS devrait dépasser les 34 milliards de dollars de revenus d'ici 2026.

Dans le domaine de la mobilité, le *Mobility-as-a-Service* (MaaS) se développe autour des robots-taxis et des navettes autonomes, facturés à la course ou à la minute. L'optimisation de ces services repose sur des systèmes de dispatching et de géolocalisation dynamique. Les analyses récentes placent Waymo en tête du marché américain, tandis qu'en Chine, Baidu, Pony.ai et WeRide se distinguent, certains véhicules atteignant déjà la rentabilité dans des villes pilotes.

La monétisation des données au travers de plateformes constitue un autre levier économique majeur. Les acteurs du secteur exploitent les données de cartographie, les scénarios de conduite, la télémétrie ou encore les analyses de sécurité, tout en commercialisant des licences logicielles pour la perception ou la simulation. Les mises à jour à distance, notamment pour se conformer à la réglementation UNECE (*United Nations Economic Commission for Europe*) R156, renforcent également ce modèle. Enfin, les

modèles basés sur un service mesurable (*outcome-based*) transforment la facturation en fonction des résultats obtenus : nombre d'unités produites ou palettisées en robotique industrielle, kilomètres parcourus en toute sécurité pour les camions autonomes, ou inspections réalisées par des drones.

16.1. L'impact de la réglementation sur les modèles économiques

Le RAI, adopté par l'Union européenne en 2024, impose des exigences strictes pour les systèmes à haut risque, incluant la gestion des risques, une documentation rigoureuse et un suivi post-commercialisation. Ces contraintes stimulent la demande en services d'assurance, d'évaluation et de conformité, donnant naissance à un marché du *compliance-as-a-service* destiné aussi bien aux fournisseurs qu'aux utilisateurs finaux.

Dans le domaine maritime, le Code MASS – dont l'application deviendra obligatoire en 2028 – encourage le développement de solutions hybrides, combinant assistance et autonomie, ainsi que la création de centres de contrôle à terre. Le projet Yara Birkeland illustre cette transition vers des opérations autonomes supervisées, avec des fonctionnalités telles que l'amarrage automatique ou la navigation en autonomie.

En robotique industrielle, l'Asie domine en volume, bénéficiant d'économies d'échelle et d'écosystèmes d'intégration matures. En Europe et aux États-Unis, la différenciation passe par les cobots, le RaaS et l'émergence d'intégrateurs spécialisés par secteur.

16.2. Tendances structurantes 2025 – 2030

La robotique et la mobilité autonome révèlent une dualité marquée entre l'Asie et l'Occident. La Chine, portée par une politique publique volontariste, une production à grande échelle et des coûts maîtrisés, accélère le déploiement des robots-taxis et des camions autonomes, tout en misant sur les infrastructures de communication véhicule-infrastructure (V2X). Aux États-Unis, l'accent est mis sur la consolidation des services de robots-taxis et le renforcement des capacités de calcul, tandis que l'Europe se distingue par une approche centrée sur la conformité et la fiabilité,

notamment à travers le RAI, ainsi que par une expertise reconnue dans le domaine maritime.

Parallèlement, le marché des capteurs connaît une profonde transformation. La baisse continue des coûts des lidars, avec un taux de croissance annuel composé de 18 à 19 %, couplée à des fusions stratégiques comme celle d'Ouster et Velodyne, favorise leur intégration au cœur des architectures des véhicules autonomes.

Le basculement vers des modèles *as-a-service*, tels que le *Robotics-as-a-Service* (RaaS) et le *Mobility-as-a-Service* (MaaS), s'impose comme une tendance lourde. Ces modèles permettent de convertir les investissements initiaux en dépenses opérationnelles récurrentes, rendant les technologies accessibles aux PME industrielles et aux collectivités locales, notamment pour les flottes de robots-taxis et de navettes autonomes.

Les revenus liés aux logiciels, en particulier dans le secteur des drones (UAS), connaissent une croissance significative depuis 2024. Dans le même temps, le RAI génère une demande accrue en services d'assurance, d'évaluation et de conformité, couvrant le testing, l'audit et le suivi post-commercialisation. Cette évolution donne naissance à une nouvelle offre de services dédiés à la conformité réglementaire.

Le secteur maritime amorce une transition progressive vers l'autonomie, avec l'adoption de centres de contrôle à terre (ROC) et le développement de fonctions autonomes telles que l'amarrage et la navigation automatisés. Le Code MASS, dont l'application deviendra obligatoire entre 2025 et 2028, encadre cette transformation en normalisant les opérations autonomes.

Les aspects réglementaires prennent une importance majeure dans le déploiement de ces solutions, il faut donc anticiper et phaser leurs évolutions au niveau national et international pour ne pas freiner les projets qui sont en cours.

Chapitre 17

Les différentes briques

Depuis 10 ans, les progrès sont continus et la réduction du coût des composants matériels, notamment ceux produits en Chine, offrent des perspectives de retour sur investissement, d'industrialisation et de déploiement d'ici 2030 pour les systèmes cyber-physiques. Le rapport de l'Adra intitulé : *Adra Strategic Research, Innovation, and Deployment Agenda 2025-2027*, offre une synthèse de l'état de l'art et des orientations à donner à la recherche.

17.1. Modèles fondamentaux, agents et industrialisation

Les rapports sur l'état de l'art dans les publications académiques en 2025 et dans les réalisations confirment une **accélération** des capacités en IA (hausse significative en un an sur les analyses comparatives de type MMMU (*Massive Multi-discipline Multimodal Understanding*), GPQA (*General Problem Question Answering*), SWE-bench (*SoftWare Engineering Benchmark*)) et une **industrialisation** des usages, tout en signalant des limites persistantes en **raisonnement, fiabilité et pertinence de ces benchmarks** [60], [27], [6].

L'**investissement privé** cumulé sur 2013-2023 a atteint 335 Md$ aux États-Unis, soit 3 fois l'effort de la Chine, et 40 fois celui de la France [60].

Pour la production de modèles « notables »[115], les institutions américaines restent en tête en 2024 avec 61 modèles, suivies de la Chine avec 15 et la

115 Le terme « notable » désigne des modèles d'IA particulièrement influents dans l'écosystème.

France avec 8. La Chine progresse rapidement en performances (écarts sur MMLU/HumanEval réduits à quasi-parité) [60], [6].

Les revues systématiques récentes (2024 – 2025) montrent que les **modèles multimodaux** (VLM/MLLM (*Multimodal Large Language Model)*) ont progressé, avec des avancées en alignement[116], benchmarks et sécurité (hallucination, robustesse, équité) [7], [35], [38].

Les orchestrateurs en intelligence artificielle jouent un rôle central dans la gestion des workflows complexes[117]. Des solutions commerciales ou open-source permettent de coordonner des agents spécialisés, de gérer des appels de fonctions, de planifier des tâches ou encore d'assurer la sécurité et la traçabilité des échanges.

L'émergence du protocole MCP (*Model Context Protocol*), introduit par Anthropic [2] fin 2024, semble devenir un standard de fait pour l'interaction entre les modèles de langage et les systèmes tiers malgré les vulnérabilités critiques [15, 49] identifiées en 2025 (notamment les injections de prompts et les détournements de session) et les surcoûts liés aux mécanismes de contrôle indispensables.

Les MAL (Machines autonomes logicielles) sont des systèmes capables de planifier et d'exécuter des tâches multi-étapes *sans intervention humaine continue*. Contrairement aux scripts classiques qui sont déterministes, elles adaptent leur comportement en fonction du contexte.

L'architecture d'un agent autonome repose généralement sur trois piliers :

- l'Hôte (Host) i.e l'environnement d'exécution (ex : VS Code, Claude Desktop, ou un orchestrateur personnalisé).

- le Client MCP, module qui négocie les capacités avec les serveurs.

116 L'alignement des LLM vise à garantir que le comportement et les sorties des modèles correspondent aux intentions des développeurs et aux besoins des utilisateurs.

117 Voir le blog d'Yves Caseau : https://organisationarchitecture.blogspot.com/2025/09/futur-du-travail-agents-intelligents-et.html.

- le Serveur MCP, service (local ou distant) qui expose des outils (APIs, accès fichiers, bases de données) via une interface JSON-RPC 2.0.

Les cas d'usage vont du développement logiciel (agents capables de diagnostiquer des bugs, de proposer des correctifs et de déployer du code via des serveurs MCP) à l'analyse de données (machines autonomes interrogeant des bases SQL pour générer des rapports financiers en temps réel) en passant, par exemple, par la cybersécurité (Red-teaming automatisé où l'agent utilise des serveurs MCP spécialisés en scan de vulnérabilités).

Pour limiter les risques, les flux de travail [25, 44] imposent :

- l'isolation (*Sandboxing*) : exécution des serveurs MCP dans des conteneurs isolés (*Docker*) pour éviter l'accès au système de fichiers hôte.

- logs et traçabilité : enregistrement systématique de la chaîne de décision (*Chain of Thought)* et des entrées/sorties des outils.

- validation Humaine (*Human-in-the-loop*) si un seuil de confiance est dépassé ou une liste de commandes sensibles nécessitant une approbation explicite est proposée.

Dans un environnement de type *Smart Factory*, on conceptualise une architecture *Massive Multi-Agents* (Industrial Swarm [71]. Elle ne repose plus sur un seul agent omniscient, mais sur une hiérarchie de services MCP organisés suivant un modèle *Hub-and-Spoke.* On déploie alors par exemple :

- une couche capteurs (*Physical Layer*) qui représente des dizaines de serveurs MCP locaux (*Edge MCP*). Chaque serveur gère un cluster de 50 à 100 capteurs (température, vibration, débit).

- une couche de mémoire (State Layer) qui stocke l'historique et les logs dans des serveurs MCP hébergeant des bases de données vectorielles et structurées.

- un essaim d'agents (Agentic Layer) : par exemple des dizaines d'agents de diagnostic spécialisés par type d'équipement (pompes, turbines, vannes, etc.).

Pour contrôler le tout, il faut mettre en place :

- des agents de planification qui optimisent les ressources et les interventions.
- un agent Superviseur/Orchestrateur[118] qui gère les conflits entre agents et la communication avec l'humain.

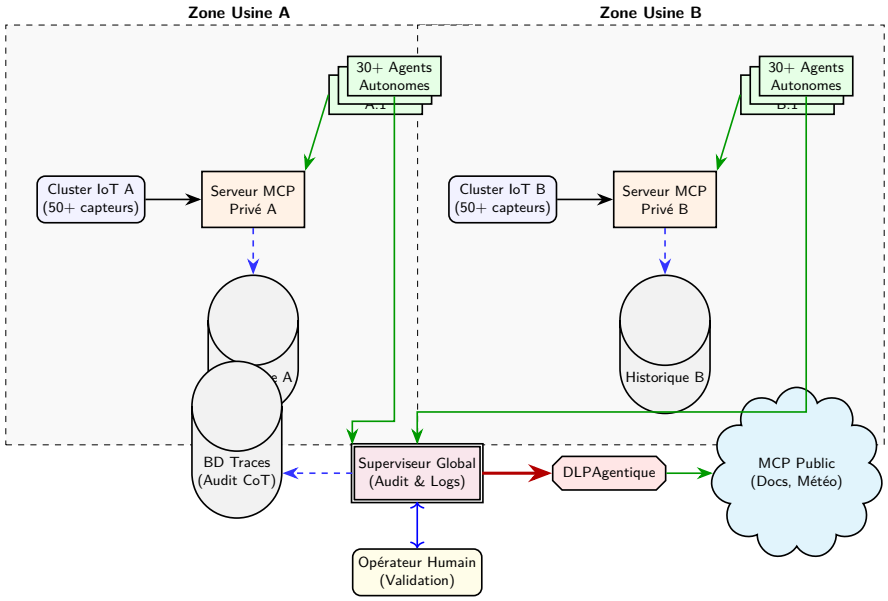


Figure 17.1 : Architecture Agentique Massive : Maillage de serveurs MCP et isolation des clusters.

On trouvera ci-dessous un exemple très simplifié d'un échange entre les différentes couches, inspiré par les récentes annonces de Total [24, 61] dans le domaine.

118 comme CrewAI, Microsoft AutoGen ou LangGraph.

Étape 1 : Requête Contextuelle

L'agent de diagnostic AI détecte une anomalie de vibration. Requête envoyée :

```
{
  "method": "tools/call",
  "params": {
    "name": "get_vibration_telemetry",
    "arguments": {"sensor_id": "PUMP_742", "duration": "5m"}
  }
}
```

Étape 2 : Vérification du Guardrail

Middleware de sécurité :

```
[OK] Agent AI autorisé pour PUMP_742
[OK] sensor_id valide, pas d'injection détectée
```

Étape 3 : Décision

Trace de raisonnement :

```
Vibration: 8.2mm/s > seuil 7.0
Dernier changement roulement: 2 ans
Probabilité défaillance: 85%
ACTION: Réduire charge pompe
```

L'association entre modèles d'IA très petits SLM (*Small Language Model*) et IA symbolique repose sur une complémentarité intéressante. Les SLM, bien que limités en capacité, peuvent être spécialisés dans des tâches ciblées comme la classification, l'extraction ou la détection. En les combinant à des moteurs de règles ou des ontologies, on obtient des systèmes plus robustes, explicables et contrôlables. Cette hybridation permet de pallier les faiblesses des petits modèles, notamment en matière de raisonnement ou de gestion des cas limites, tout en conservant une faible latence et une empreinte réduite, idéale pour les environnements frugaux, embarqués ou sensibles.

Côté robotique, l'émergence des VLA et la mutualisation de données multi-robots (Open X-Embodiment) permettent des politiques généralistes de manipulation. OpenVLA7B (open-source) montre des gains substantiels

par rapport à des systèmes fermés plus vastes (RT-2-X 55B), tout en restant finançable et déployable sur des GPUs grand public.

« En intégrant l'apprentissage par renforcement, les modèles VLA peuvent surmonter les limites de l'apprentissage par imitation et parvenir à un apprentissage par essais et erreurs et à une exploration autoguidée plus proches de ceux des humains. La triade du progrès : modèle, données et matériel. L'IA incarnée vise à gérer la nature non structurée et à créer un modèle du monde physique, une ambition qui exige une synergie entre les modèles, les données et le matériel qui doivent évoluer ensemble, progressant en tandem plutôt que de manière isolée » [64], [72].

17.2. Capteurs & perception : fusion multi-modalités et SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) robuste

Le paysage capteurs automobile/robotique reste dominé par les caméras, LiDAR, radars avec les tendances suivantes : LiDAR à état solide, radar 4D, caméras événementielles[119], normalisation de la simulation (ASAM (*Association for Standardization of Automation and Measuring Systems*) / ISO/ASTM (*American Society for Testing and Materials*)) et calendriers d'innovation jusqu'en 2035+. [10] Les revues récentes confirment :

- la complémentarité vision-radar pour la détection 3D (*end-to-end* BEV (*Bird's Eye View*), RoI Fusion (*Review of Image and Fusion*),
- la fusion LiDAR-IMU (*Inertial Measurement Unit*) – caméra pour un SLAM plus robuste,
- l'importance de la calibration multi-capteurs,
- des pipelines orientés temps réel [65], [16], [73], [68].

119 Les caméras événementielles capturent les changements dans la scène au fur et à mesure qu'ils se produisent, imitant le fonctionnement de l'œil humain.

Les synthèses industrielles/académiques détaillent également la montée des architectures de fusion et les jeux de données multi-météo (nuScenes, SeeingThroughFog, RadarScenes, K-Radar, etc.) [67], [56].

La perception d'un système autonome crédible s'appuie donc sur une redondance hétérogène, une calibration stable et des métriques de sûreté adaptées (détection, suivi, segmentation, open-set), y compris la validation en simulation réaliste (matériaux, météo, trafic) [10], [46].

17.3. Actionneurs : essor des DEA et intégration mécatronique

Les actionneurs électro-actifs à élastomère diélectrique (DEA) gagnent en densité énergétique, réponse rapide et conformabilité[120], étendant le domaine d'emploi des robots souples (pinces adaptatives, locomotion) [70], [33], [66], [48], [34].

Les revues 2023 – 2025 mettent en évidence : la réduction de l'instabilité électromécanique, l'apparition de matériaux à rigidité variable/auto-cicatrisants, et des architectures (coniques/bilatérales) avec amplification de déplacement pour saisies délicates.

Pour la cohabitation homme-machine et les environnements non structurés, les DEA offrent des interactions sûres et une forte compliance ; restent des défis d'endurance, de modélisation-contrôle et de conditionnement haute tension.

Un autre domaine important est celui de la perception haptique[121], qui obtient des résultats déjà impressionnants.

120 La conformabilité est la capacité d'un matériau à s'adapter aux déformations sans perdre ses propriétés initiales.

121 La perception haptique permet d'obtenir des informations sur l'environnement par le toucher. Elle implique des capteurs et des récepteurs cutanés situés dans la peau, ainsi que des récepteurs musculaires et tendineux.

17.4. Puissance de calcul

Les États-Unis avancent vite, portée par la suprématie de Nvidia et par le retour en force des accélérateurs « maison » des hyperscalers ; la Chine, privée d'importations haut de gamme, transforme la contrainte en aiguillon pour industrialiser ses propres puces ; l'Europe, enfin, cherche son souffle stratégique en consolidant une chaîne de valeur encore incomplète, mais désormais dotée d'un cap politique et de quelques champions en devenir. Sur la scène des processeurs pour l'IA, les États-Unis, la Chine et l'Europe jouent une partie d'échecs accélérée où chaque sortie de version se mesure en pétaflops, en interconnexions et en accès à la mémoire à haute bande passante.

17.4.1. Les États-Unis

Aux États-Unis, l'ère Hopper (H100/H200) est remplacée par Blackwell : les B100/B200 et surtout les baies GB200 (NVL36/NVL72) promettent un saut d'échelle, mêlant GPU Blackwell, CPU Grace, NVLink de 5e génération et réseaux HDR, avec des déploiements s'étalant de fin 2024 à 2025.

AMD a déroulé une cadence annuelle inédite : MI325X (288 Go HBM3e), puis MI350 sous architecture CDNA 4 en 2025, avant un MI400 en 2026.

Intel, lui, a stabilisé sa proposition alternative avec Gaudi 3 : 128 Go de HBM (*High Band Memory*) et 3,7 TB/s par carte, maillée nativement en Ethernet 200 GbE (24 ports) pour des grappes à coût contenu.

17.4.2. La Chine

La Chine, de son côté, a vu dans les contrôles à l'exportation un aiguillon plus qu'un verrou. Privé des A/H-100 et des variantes bridées, l'écosystème a accéléré ses propres voies. Elle a notamment lancé un projet[122] en 2018 pour se rendre indépendant du fabricant AMSL dans le domaine de la lithographie

122 https://www.reuters.com/world/china/how-china-built-its-manhattan-project-rival-west-ai-chips-2025-12-17/

à ultraviolets extrêmes Le prototype a été construit par une équipe d'anciens ingénieurs chinois du géant néerlandais des semi-conducteurs ASML et ouvre la voie à la maitrise des procédés inférieurs à 7 nm d'ici 2035. Il a commencé ses phases de test début 2025.

Huawei a mis en production l'Ascend 910C – fruit d'un packaging « double-die » sur base 910B et d'un processus SMIC N+2 – avec une montée en volume freinée par les rendements de fabrication, mais une progression sensible en 2025 ; ces puces se posent désormais en substrat incontournable pour l'inférence nationale et, selon les usages, pour des entraînements intermédiaires.

Baidu, en parallèle, a « allumé » un cluster de 30 000 Kunlun P800 et revendique une compatibilité outillée avec les flux logiciels existants, y compris CUDA-like chez certains équipementiers – stratégie d'adoption pragmatique qui abaisse les coûts de migration des développeurs.

Dans l'automobile, Xpeng illustre l'ambivalence chinoise : longtemps adossé à Nvidia DRIVE Orin pour ses SUV intelligents et son système XNGP, le constructeur greffe désormais sa propre puce « Turing » (700 TOPS environ, montée à 3 000 TOPS par véhicule en configuration robotaxi) et annonce des déploiements à partir de 2025-2026 – une bascule de « l'achat » vers le « faire. ».

Plus récemment la start-up chinoise Zhonghao Xinying[123] a indiqué que son unité de traitement tensoriel polyvalente (GPTPU), développée en interne, est entrée en production de masse dès 2023. Sa puce phare, baptisée Chana, offre jusqu'à « 1,5 fois la performance de calcul » de l'unité de traitement graphique tensoriel (GPU) A100 de Nvidia, tout en « réduisant la consommation d'énergie de 30 % pour des charges de travail équivalentes sur des grands modèles » et en « ramenant le coût unitaire de calcul à 42 % de celui de Nvidia »[124].

123 https://www.scmp.com/tech/tech-war/article/3334244/ai-start-offers-local-alternative-googles-tpu-china-seeks-cut-nvidia-reliance

124 Zhonghao Xinying a été fondée en 2018 par Yanggong Yifan, un ingénieur en électronique formé à Stanford et à l'Université du Michigan, qui a précédemment travaillé sur l'architecture des puces chez Google et Oracle. Selon l'entreprise chinoise, il a participé à l'ensemble du cycle de conception et de déploiement des TPU (Tensor Processing Unit) v2, v3 et v4 de Google.

17.4.3. L'Europe

L'Europe a choisi de promulguer un règlement. Le *Chips Act* (règlement 2023/1781) traçait à l'horizon une part de marché à 20 % d'ici 2030 et organisait un triptyque :

- « Chips for Europe » (lignes pilotes, centres de compétences, fonds),
- statut d'usines intégrées ou « open foundries », et
- mécanismes de coordination de crise.

Cependant la Commission européenne a admis l'échec de cette ambition, la part européenne devant passer de 9.8 % en 2022 à 11.7 % en 2030 !

L'enveloppe totale mobilisée est annoncée à 43 milliards d'euros[125].

Certains[126] préconisent l'option « fabless », vision qui peut être taxée de lucide ou de défaitiste.

Dans un marché mondial estimé à 626 milliards de dollars en 2024, l'Europe ne détient que 8,1 % des parts de marché et ne capte que 4 % des investissements mondiaux. Ce déséquilibre nourrit une dépendance structurelle vis-à-vis des fournisseurs non européens et creuse un retard industriel désormais irrattrapable. Nous devons accepter ce constat et concentrer nos moyens sur la seule bataille encore à notre portée : la conception, la maîtrise de nos architectures électroniques de pointe et, *in fine*, la protection de nos technologies critiques.

Dans ce cadre, SiPearl incarne un pari différent : non pas un accélérateur IA, mais un CPU Arm Neoverse V1 pour le HPC–Rhea, pensé pour faire travailler ensemble GPU, IA ou quantique au service d'EuroHPC et des exascales

125 https://www.lesechos.fr/idees-debats/sciences-prospective/semi-conducteurs-leurope-doit-gagner-la-bataille-de-la-conception-pas-seulement-de-la-production-2185137

126 https://www.lesechos.fr/idees-debats/sciences-prospective/semi-conducteurs-leurope-doit-gagner-la-bataille-de-la-conception-pas-seulement-de-la-production-2185137

européens, et qui devrait intégrer les supercalculateurs JUPITER et ALICE RECOQUE d'ici fin 2026. En attendant, celui-ci, inauguré en septembre 2025 en Allemagne, est le premier supercalculateur en Europe capable d'atteindre un ExaFLOP par seconde ; il a été construit par EVIDEN autour de 24 000 GPU Hopper de Nvidia.

À l'autre extrémité du spectre, l'européen Axelera AI s'est spécialisé dans l'inférence « edge » : ses cartes Metis au format M.2 et PCIe, fondées sur un AIPU RISC-V et du « digital in-memory computing », livrent jusqu'à 214 TOPS avec une consommation de quelques watts.

L'Europe a vu l'anglais Graphcore[127] passer sous pavillon SoftBank en 2024, signe que la route vers un champion GPU-like autonome reste difficile.

Kalray, spin-off du CEA, créée en 2008 a développé un DPU (*Data Processor Unit*) basé sur une architecture massivement parallèle. Les volumes financiers nécessaires à la fabrication et à l'intégration de toutes les couches logicielles l'ont conduit à changer de stratégie. Il se tourne vers des fabricants de SoC pour intégrer sa technologie dans leurs produits. L'accord passé avec Openchip[128] qui prévoie une prise de participation majoritaire possible dans le capital de Kalray) est une étape pour essayer de créer un acteur européen dans les infrastructures nécessaires aux applications consommant massivement des données. Il a annoncé mi 2022, un contrat avec un acteur américain des data-centers devant lui assurer une production en 2026 de plusieurs milliers de cartes par an.

Si l'on compare les générations, l'argument décisif n'est plus la puissance de calcul pure : la bande passante mémoire et le réseau d'interconnexion sont aussi déterminants dans la performance globale du système.

- Nvidia, de Hopper à Blackwell, a déplacé la bataille vers le système complet – racks GB200, NVLink, HBM3e jusqu'à 288 Go par GPU – pour hausser le débit d'inférence et allonger les contextes.

127 Graphcore, créée en 2012, produit le processeur BowIPU capable de 359 TeraFlops.

128 https://evertiq.fr/news/2025-07-14-kalray-signe-la-seconde-phase-de-laccord-industriel-avec-openchip

- Google, avec Trillium (v6e), double la mémoire à haute bande passante et le réseau d'interconnexion entre puces, par rapport à v5e et empile des pods à 256 chips.

- AMD, avec CDNA 4, promet des gains massifs en inférence et pousse le packaging 3D pour rapprocher calcul et mémoire ;

- Intel, avec Gaudi 3, parie sur l'Ethernet et le coût total de possession, acceptant un écosystème moins « collant » que CUDA mais plus ouvert.

- En Chine, les Ascend et les Kunlun capitalisent sur des procédés 7 nm locaux et des clusters massifs ; l'avance de Nvidia en nœuds (4 nm chez TSMC) demeure, mais l'écart se resserre sur des cas d'usage ciblés, à commencer par l'inférence souveraine.

À l'échelle des CPU/SoC généralistes, Apple illustre un autre front : l'IA « on-device ». Entre l'A18 et le M4, la firme a augmenté la puissance de ses Neural Engines vers la quarantaine de TOPS, optant pour une stratégie de traitement local pour la confidentialité et la latence – une tendance qui existe déjà dans les PC IA et qui, demain, devrait dialoguer avec les modèles en edge.

Dans l'automobile – où Xpeng ou BYD utilisent désormais DRIVE Thor – le calcul embarqué converge vers des plates-formes L4 capables d'héberger des modèles multimodaux compacts, communicants au besoin avec des infrastructures edge.

En 2025, les restrictions américaines redessinent à court et moyen terme les capacités : après les A800/H800, les H20 ont été à leur tour encadrés à l'exportation, ouvrant en Chine un boulevard pour les Ascend et les GPU domestiques, tandis qu'en Europe la demande des « clouds AI souverains » se base malgré tout sur les produits NVIDIA.

Dans ce monde fait d'embargos réels et de « souverainetés » rêvées par les Européens, la standardisation logicielle devient une monnaie d'échange. La compatibilité CUDA (créé par Nvidia) qu'affichent certains acteurs chinois n'est pas un détail, c'est une stratégie pour faciliter l'adoption de leurs produits mais qui s'obtient par des concessions qui ont un coût. Le rachat de

Groq fin 2025[129], qui était avec ses LPU, un potentiel concurrent, lui permet de verrouiller le marché et son statut monopolistique.

À court terme, 2025 a vu l'arrivée des baies Blackwell et la généralisation des CDNA 4 ; les TPU v7e Ironwood[130] sont devenus opérationnels fin 2025 ; en Chine, 910C et Kunlun continueront à combler le vide laissé par Nvidia, surtout en inférence et dans les clouds publics.

Le débat se déplacera du seul « meilleur GPU » au « meilleur système » : densité par rack, efficacité énergétique, orchestration de la mémoire, et surtout maturité logicielle – du compilateur aux bibliothèques – pèseront autant que la puissance crête de FLOPS.

À moyen terme, l'Europe n'a pas la volonté de cloner la Silicon Valley : elle peut, en revanche, occuper des positions différenciées – CPUs d'Exascale (SiPearl) mariés à des accélérateurs hétérogènes, inférence frugale en périphérie (Axelera), et un tissu de lignes pilotes qui font du continent un archipel d'expérimentation industrielle. Si ce cap tient, la souveraineté ne sera pas un slogan mais une géographie de choix technologiques prometteurs.

Comparées génération par génération, ces évolutions technologiques racontent une histoire : l'Amérique pousse l'intégration « rack-scale » et le logiciel propriétaire à grande échelle ; la Chine bâtit une capacité nationale, certes encore limitée par les rendements et le pas de gravure mais déjà suffisante pour ses besoins stratégiques et ses flux de données ; l'Europe a choisi l'HPC, l'edge et la régulation.

Demain, le « meilleur processeur » sera celui qui saura converser avec la donnée là où elle naît, s'agréger à des mémoires plus proches que celles via

129 https://www.reuters.com/business/nvidia-buy-ai-chip-startup-groq-about-20-billion-cnbc-reports-2025-12-24/

130 Les TPU Ironwood permettent de connecter jusqu'à 9 216 puces dans un seul pod, mises en réseau à 9,6 Tb/s par une technologie propriétaire. Cela signifie que les pods Ironwood peuvent fournir 118 fois plus d'exaFLOPS que « le concurrent le plus proche ». Cette connectivité massive permet aux puces de communiquer rapidement et d'accéder à 1,77 pétaoctets de HBM partagée (ce qui équivaut à environ 40 000 films Blu-ray HD ou le texte de millions de livres), éliminant les goulets d'étranglement de données pour les modèles les plus exigeants.

le réseau, et s'inscrire dans un *continuum* de calcul qui va du module M.2 au superpod.

L'efficacité n'appartient plus à la seule puissance brute, mais à la juste architecture.

17.4.4. Parts de marché mondiales (accélérateurs IA)

Les parts de marché mondiales des accélérateurs IA révèlent une domination actuelle de Nvidia, tout en laissant entrevoir une diversification progressive d'ici 2030, avec l'émergence de nouveaux acteurs et technologies.[131 132 133 134 135]

Table 17.1 : Parts de marché mondiales des accélérateurs IA

Acteur	2025 (consensus)	2030 (projection)
Nvidia (GPU)	78–90 %	65–67 %
Google Cloud (TPU)	5 %	5–10 % (est.)
AMD (Instinct)	3–5 % (est.)	4–5 %
Intel (Gaudi)	1–2 % (est.)	2–4 % (est.)
Broadcom (custom XPUs)	<2 % (est.)	14 %
AWS / Microsoft (Trainium/Inferentia, Maia, etc.)	1–3 % (est.)	3–6 % (est.)
Chine (Huawei Ascend, Baidu Kunlun)	<3 % mondial (est.)	5–10 % (est.)
Europe (SiPearl HPC, Axelera edge)	<1 %	1–2 % (est.)

131 https://www.yicaiglobal.com/news/chinese-chipmakers-challenge-nvidias-dominance-in-smart-driving-chip-sector

132 https://www.techpowerup.com/319122/apple-m4-a18-chipsets-linked-to-significant-neural-engine-upgrade

133 https://www.cnbc.com/2025/11/05/china-xpeng-to-launch-robotaxis-humanoid-robots-with-own-ai-chips.html

134 https://www.scmp.com/business/china-business/article/3306493/chinese-ev-maker-xpeng-use-own-ai-chip-power-its-self-driving-cars-quarter

135 https://www.phonearena.com/news/apple-a18-chipset-more-powerful-neural-engine-than-m4_id159802

Table 17.2 : Taille de marché des accélérateurs IA

Indicateur	2025	2030 (« consensus »)	2030 (« haut »)
Marché global des accélérateurs IA	140 Md $	440–475 Md $	1 000 Md $

17.5. Points forts actuels et axes de développement

En synthèse, on constate à date que :

- les performances techniques soutiennent des benchmarks de plus en plus élevés (raisonnement multimodal, code, vidéo),
- les agents et modèles ouverts facilitent l'adaptation locale et la souveraineté technologique [7, 45, 60],
- l'écosystème capteurs s'appuie sur des stacks fusion (BEV, *end-to-end*) à maturité, l'émergence de radar 4D[136] améliore la résilience météo/éclairage [10, 54, 55],
- les actionneurs souples : pinces adaptatives et morphologies multi-modes (*crawler/roller*) élargissent l'enveloppe opérationnelle en manutention et assistance.

Il reste cependant des points durs à travailler dans les domaines suivants :

- **Fiabilité/raisonnement** : on constate des lacunes en robustesse, raisonnement, l'existence d'hallucinations et il reste à traiter la sécurité des MLLM/VLM au travers d'évaluations dynamiques, de *red-teaming* et de métriques de calibration [7], [35], [38], [31], [72], [64], [45],
- **Validation système** : il faut passer de la performance du modèle sur une tâche précise à l'assurance système (perception-planification-contrôle), avec simulation standardisée, ODD (*Operational Design Domain*) explicite et surveillance *in situ*[137],

136 https://www.aptiv.com/en/insights/article/what-is-4d-imaging-radar

137 Ce qui pose des problèmes de confidentialité et de vie privée.

- **Matériaux/actionneurs** : il faut encore développer l'endurance, des modèles prédictifs sous sollicitations complexes, et une intégration électronique/énergétique compacte pour les DEAs [38], [45],

- **Données & calcul** : il reste à améliorer de plusieurs ordres de grandeur, le coût du pré-entraînement, la traçabilité des données, et l'efficience (quantification, LoRA, distillation) pour obtenir un TCO (*Total Cost of Ownership*) soutenable [60], [7], [31], [64].

Pour progresser, il semble nécessaire d'aligner les programmes de R&D avec l'état de l'art et analyser la capacité de la France et de l'Europe soit de rattraper son retard, soit de consolider son avance, soit de lancer de nouveaux axes de recherche.

17.6. Compétition internationale

On ne sera pas étonné du constat suivant :

- **Chine** : 1re en brevets totaux et brevetabilité GenAI (depuis 2017), montée en qualité sur benchmarks, forte représentation dans Nature Index[138],

- **États-Unis** : 1er en modèles « avancés » et investissements, densité de laboratoires académiques et industriels (Big Tech) ; production en robotics-foundation (VLA),

- **Union européenne / Royaume-Uni / Suisse** : excellence scientifique (ETH (Eidgenössische Technische Hochschule) /EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) /Oxbridge/TUM (Technische Universität München)), avance en robotique académique, et leadership normatif/réglementaire (*AI Act*),

138 https://www.nature.com/nature-index/research-leaders/2025/country/all/global

- **Japon / Corée / Singapour** : écosystèmes capteurs-perception (imagerie, radar, LiDAR), robotique avancée et semi-conducteurs ; montée des centres singapouriens dans la multimodalité[139].

La France apparaît loin derrière, même au niveau européen, malgré un bon niveau de recherche, probable conséquence de manque de visibilité et d'une désindustrialisation qui ne tire pas le besoin.

17.6.1. ANA Avatar XPRIZE

Le ANA Avatar XPRIZE [23] était une compétition internationale organisée de 2018 à 2022, qui défiait les équipes de concevoir un système robotique « avatar » télérobotisé. Ce système permet aux opérateurs humains de transporter leurs sens, leurs actions et leur présence sur de longues distances.

Les avatars représentent une nouvelle génération d'appareils de télétravail, permettant aux utilisateurs non seulement de communiquer par audio et vidéo, mais aussi de se déplacer et de manipuler des objets dans un environnement distant.

Il est intéressant de constater dans le tableau suivant que le taux d'admission en finale des équipes américaines fut de 16 %, pour les européens de 33 % et de 21% pour les asiatiques. Le vainqueur fût la société allemande NimbRo, suivi *exaequo* par une française située à Bordeaux, Pollen Robotics, et enfin en troisième position, d'une équipe américaine, Team Northeastern de Boston.

139 https://edurank.org/engineering/robotics/eu/

Table 17.3 : Résultats de l'ANA Prize

	Team Count	Countries Represented	Total Team members	Average Team Size
Registered Teams	99	Americas 50, Europe 20, Asia 24, Oceania 3, Middle East 2	323	3
Qualified Teams	77	Americas 34, Europe 19, Asia 22, Oceania 2	275	3
Semifinalist Teams	38	Americas 14, Europe 16, Asia 11	478	12
Finalist Teams	20	Americas 8, Europe 11, Asia 7	300	15

17.7. Transversalité des technologies dans les trois milieux et le militaire

La perception et le positionnement constituent par exemple les couches les plus naturellement transversales d'un système autonome, parce que le problème physique qu'elles résolvent – « où suis-je et qu'y a-t-il autour de moi ? » – est invariant selon le porteur. Un télémètre laser mesure une distance de la même façon qu'il soit monté sur une voiture, un drone ou un navire. C'est l'**environnement d'emploi** (eau salée, altitude, vibration, pression, brouillage) et la **réglementation**, bien plus que la fonction du capteur, qui dictent le coût de transfert d'un domaine à l'autre.

17.7.1. LiDAR – l'exemple de la dualité inter-domaines

Le LiDAR est l'exemple le plus net de composant conçu pour un domaine et diffusé dans tous les autres. Velodyne, popularisé au DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) Grand Challenge de 2007 pour la voiture autonome, a fusionné avec Ouster en 2023 pour former un acteur dont le portefeuille couvre désormais l'automobile, l'industrie, la robotique et les infrastructures intelligentes. Les mêmes gammes (par exemple la famille REV8 d'Ouster) sont vendues pour les véhicules, la robotique et les villes intelligentes, avec des déclinaisons durcies pour l'environnement minier, capables de résister aux chocs, vibrations et contraintes de température.

Le passage terrestre → aérien (drones de cartographie) est quasi direct ; le passage vers le **maritime de surface** l'est aussi. Le passage vers le **sous-**

marin (AUV) relève en revanche du transfert à adaptation majeure : le LiDAR aérien ne fonctionne pas sous l'eau (atténuation optique), il faut un LiDAR bathymétrique vert ou un report vers l'acoustique. C'est l'illustration claire que **la frontière de transversalité la plus coûteuse n'est pas civil/militaire, mais surface/immersion**.

17.7.2. Caméras visible et thermique – transfert direct, frein réglementaire spécifique

Les caméras visibles sont les capteurs les plus transversaux qui soient : aucune adaptation fonctionnelle entre domaines, seul le conditionnement (étanchéité, antireflet) varie. Les **caméras thermiques** (LWIR (*Long-Wave Infrared*)) illustrent en revanche parfaitement l'effet de bord réglementaire. Le même module peut équiper un drone civil, un robot de surveillance et un véhicule ; Teledyne FLIR le décline d'ailleurs ouvertement pour la défense, l'automobile, les plateformes sans équipage et l'IA. Mais la sensibilité thermique est intrinsèquement contrôlée : le module Lepton XDS est classé sous l'ECCN 6A003.b.4.b, son statut ITAR-free permettant une disponibilité commerciale mondiale. Autrement dit, le capteur traverse sans peine les domaines techniques, mais sa résolution et sa fréquence d'image conditionnent son régime d'export : au-delà de certains seuils, il bascule de l'EAR (*Export Administration Regulations*) commercial vers un contrôle plus strict.

17.7.3. Radar – convergence autour du 77 GHz

Le radar automobile millimétrique (76–77 GHz) anti-collision est devenu un standard COTS (*Commercial Off-The-Shelf*) réutilisé tel quel hors de la route. Des brevets décrivent explicitement l'emploi sur drone de radars anti-collision automobiles COTS à ondes millimétriques. Côté offre, des fabricants présentent une même base radar « des mers aux routes, des mines aux ports » couvrant la sécurité, l'UAV, l'automobile et le trafic intelligent.

Le transfert terrestre ↔ aérien ↔ maritime de surface est ici à adaptation mineure (forme du faisceau, traitement du *clutter*). Le radar de navigation maritime (bande X/S) et le radar à synthèse d'ouverture restent en revanche spécifiques à leur domaine.

17.7.4. GNSS – où dualité technique et dualité réglementaire se confondent

Le positionnement est techniquement le plus transversal de tous : le même module GNSS sert indistinctement véhicule, drone et navire. VectorNav vend explicitement à l'intégration de systèmes pour les industries militaire, aérospatiale, marine et robotique, à partir d'une même base inertielle. Mais c'est précisément ici que le régime de contrôle bascule selon la performance, pas selon l'application : le VN-300 grand public est annoncé « Made in the USA, ITAR-free », tandis que la gamme tactique supporte le GPS SAASM (*Selective Availability Anti-Spoofing Module*) pour les applications de défense en ISR, guerre électronique, munitions et navigation d'UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*).

Le cadre américain formalise cette ligne de partage : depuis la réforme de la Category XII de l'USML (*United States Munitions List*), la grande majorité des équipements GPS/GNSS civils et commerciaux ne relèvent pas de l' et tombent sous l'EAR du *Department of Commerce*, les récepteurs militaires basculant sous la catégorie guidage et navigation (Cat XII (d)). La dualité du positionnement n'est donc jamais binaire : un même fabricant gère un continuum de produits où la précision angulaire, l'anti-leurrage et le chiffrement déterminent le régime juridique.

17.7.5. ITAR/EAR et listes américaines

Trois mécanismes distincts structurent le risque réglementaire, qu'il faut bien différencier.

ITAR *vs* EAR. L'ITAR (*International Traffic in Arms Regulations*) (*Department of State*, USML) vise les articles spécifiquement militaires ; l'EAR (*Department of Commerce*, dont la classification EAR99 ou par ECCN (*Export Control Classification Number*)) vise le dual-use commercial. Pour la perception et le positionnement, la quasi-totalité des composants civils relève de l'EAR, et la mention « ITAR-free » est devenue un argument commercial explicite (FLIR, VectorNav) car elle conditionne l'accès au marché mondial. La bascule vers l'ITAR se fait sur des seuils de performance, non sur l'intention d'usage. **Listes américaines visant des entreprises étrangères.** Il faut distinguer plusieurs

listes aux effets juridiques très différents. Le cas du LiDAR l'illustre : Hesai, premier fabricant chinois, a été ajouté en janvier 2024 à la liste « Section 1260H » des « Chinese Military Companies » du *Department of Defense*. Point crucial souvent mal compris – les firmes de cette liste ne sont pas, de ce seul fait, soumises à des contrôles à l'export ou à des sanctions ; l'effet direct est l'interdiction d'achat par le Pentagone (et ses contractants) à compter de 2026 au titre du NDAA (*National Defense Authorization Act*) 2024. C'est une liste distincte de l'*Entity List* du BIS (*Bureau of Industry and Security*), qui, elle, impose des restrictions d'export. Hesai a riposté en qualifiant son inscription « d'injuste, capricieuse et sans fondement », en soulignant que tous ses LiDAR sont classés EAR99 par le BIS – ce qui indique qu'ils ne conviennent à aucune application militaire – et a engagé une action en justice ; le Pentagone l'a un temps retiré de la liste avant de l'y réinscrire fin 2024 « sur la base des informations les plus récentes disponibles ».

La dimension politique. Le dossier LiDAR montre que la dualité peut être *attribuée politiquement* indépendamment des spécifications. Le *House Select Committee on China* a demandé d'enquêter sur toutes les entreprises chinoises de technologie LiDAR pour déterminer si elles devaient figurer sur l'*Entity List* ou être soumises à des restrictions d'investissement, au motif que le LiDAR est une technologie critique des systèmes autonomes, actuellement non soumise aux contrôles américains. Pour un acheteur civil européen, le signal est clair : un composant aujourd'hui purement commercial peut devenir un point de dépendance ou de rupture d'approvisionnement par décision réglementaire, sans changement technique.

17.7.6. Synthèse : coût de transfert par famille

Le coût de transfert inter-domaines et les freins réglementaires varient significativement selon les familles de composants, avec des défis techniques et juridiques spécifiques à chaque environnement (aérien, maritime, sous-marin).

Table 17.4 : Coût de transfert inter-domaines et frein réglementaire dominant par famille de composant

Famille	Terrestre ↔ Aérien	Terrestre ↔ Maritime surface	→ Sous-marin (AUV)	Frein réglementaire dominant
LiDAR	Direct	Mineur (étanchéité)	Majeur (bathymétrie / acoustique)	Listes américaines (cas Hesai)
Caméra visible	Direct	Mineur (boîtier)	Majeur (caisson, optique)	Faible
Caméra thermique	Direct	Mineur	Majeur	ECCN selon résolution / fréquence
Radar 77 GHz	Mineur (clutter)	Mineur	Non applicable	Faible à modéré
GNSS/INS	Direct	Direct	Majeur (couplage acoustique / DVL)	ITAR/EAR selon performance

17.7.7. Conséquences

Pour l'industriel civil

La perception et le positionnement offrent les opportunités de standardisation interdomaines les plus élevés : une même brique LiDAR, caméra, radar 77 GHz ou GNSS/INS peut servir trois domaines moyennant un effort d'intégration (conditionnement, fusion de capteurs) bien inférieur à un nouveau développement.

La vraie ligne de fracture technique n'est pas civil/militaire mais **surface/immersion** : tout passage sous l'eau impose une refonte (étanchéité haute pression, bascule vers l'acoustique, navigation DVL (*Doppler Velocity Log*) / USBL (*Ultra-Short BaseLine*)).

Pour la gestion du risque d'approvisionnement

Le risque réglementaire ne suit pas la fonction du composant mais deux variables : (1) la **performance** (qui détermine ITAR *vs* EAR *vs* EAR99) et (2) l'**origine du fournisseur** (qui expose aux listes américaines, dont le cas Hesai montre la volatilité). Un composant EAR99 chinois peut rester commercialement libre tout en devenant inéligible à certains marchés et exposé à un risque d'escalade réglementaire. La diversification des sources

sur les couches de perception et de positionnement est donc une décision stratégique, pas seulement logistique.

17.8. Conclusion

La définition d'un plan stratégique national semble indispensable pour mettre en phase les secteurs que l'on souhaite développer en France et en Europe en R&D et en industrialisation afin de concentrer les investissements publics et privés sur ces derniers.

Il faut donc clairement indiquer les secteurs qui ne seront plus soutenus, car il est contre productif financièrement d'être présent sur tous les secteurs, il faut éviter le « saupoudrage »[140].

140 Le saupoudrage étant défini comme l'insuffisance de financement d'équipes et d'outils industriels pour réussir à établir un écosystème pérenne avec des débouchés. Par contre, le maintien d'équipes de R&D nécessaires à la formation des chercheurs à un tissu d'expertise au niveau national doit être conforté.

Bibliographie

[1] ABI Research. "Where Robotics System Integrators Can Win in Warehouse Automation". In : (2025). URL : https://www.abiresearch.com/blog/robotics-system-integrators-for-warehouse-automation (cf. page 102).

[2] Anthropic. *Model Context Protocol (MCP) Specification v1.0*. Rapport technique. Anthropic PBC, 2024. URL : https://modelcontextprotocol.io (cf. page 9).

[3] S. Asenkerschbaumer *et al. AI-based-Robotics*. Rapport technique. Acatech, 2025 (cf. page 33).

[4] Bank of America Global Research. "Humanoid Robots 101". In : (avr. 2025). URL : https://institute.bankofamerica.com/content/dam/transformation/humanoid-robots.pdf (cf. page 130).

[5] Torben Beernaert *et al.* "Framing the concept of autonomy in system design". In : *Design Conference Proceedings*. Tome 15. Faculty of Mechanical Engineering et Naval Architecture, University of Zagreb, Croatia ; The Design Society, Glasgow, UK, 2018, pages 2821-2832. DOI : 10.21278/idc.2018.0281 (cf. page 25).

[6] Nathan Benaich. *2025 report launch*. 2025. URL : https://www.stateof.ai/2025-report-launch (cf. page 137).

[7] Davide Caffagni *et al.* "The Revolution of Multimodal Large Language Models : A Survey". In : (2024). DOI : 10.48550/ARXIV.2402.12451. URL : https://arxiv.org/abs/2402.12451 (cf. pages 138, 151).

[8] G. Chance. "Assessing trustworthiness of autonomous systems". In : *KBR Technical Journal* (2023) (cf. page 24).

[9] Comité éthique Défense. *Avis sur l'intégration de l'autonomie dans les systèmes d'armes létaux*. 2021. URL : https://www.defense.gouv.fr/sites/default/files/ministere-armees/20210429_Comit%C3%A9%20d'%C3%A9thique%20de%20la%20d%C3%A9fense%20-%20Avis%20int%C3%A9gration%20autonomie%20syst%C3%A8mes%20armes%20l%C3%A9taux.pdf (cf. page 33).

[10] Edlyn Dcruz et Gunny Dhadyalla. *Roadmaps and Standards Landscape of Perception Sensors and Simulation Report*. Rapport technique. Août 2025. URL : https://sim4camsens.org/wp-content/uploads/2025/09/D5.1-Standardslandscape-and-sensors-roadmaps_V1.0.pdf (cf. pages 142, 143).

[11] Comité d'éthique de la Défense. *Avis sur l'usage des technologies d'intelligence artificielle par les forces armées*. Rapport technique. Ministère des Armées, 2025. URL : https://www.defense.gouv.fr/sites/default/files/ministerearmees/20250114_np_comedef_avis-sur-l%27usage-des-technologiesd%27intelligence-artificielle-par-les-forces-armees.pdf (cf. page 33).

[12] Hubert Defrancq. *Agritechnica 2025 compte-rendu de visite*. Rapport technique. Nov. 2025 (cf. page 38.

[13] DGAC. *Guide pour l'usage des aéronefs sans équipage à bord*. Rapport technique. Déc. 2024. URL : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/Guide_categorie_Specifique_0.pdf (cf. page 64).

[14] DGAC. *Rapport d'activités 2024*. Rapport technique. Page 51. DSAC-Direction de la sécurité aérienne civile, 2024. URL : https://salledelecture-ext.aviation-civile.gouv.fr/externe/DSAC/Rapport_activite_2024_DSAC.pdf (cf. page 61).

[15] Docker. *MCP Horror Stories : The Security Issues Threatening AI Infrastructure*. 2025. URL : https://www.docker.com/blog/mcp-security-issuesthreatening-ai-infrastructure/ (cf. page 138).

[16] Zheng Fan *et al.* "LiDAR, IMU, and camera fusion for simultaneous localization and mapping : a systematic review". In : *Artificial Intelligence Review* 58.6 (mars 2025), page 174. DOI : 10.1007/s10462-025-11187-w. URL : https://link.springer.com/10.1007/s10462-025-11187-w (cf. page 142).

[17] "FAQ - Les grands principes d'Horizon Europe". In : *Horizon Europe* (2025). URL : https://www.horizon-europe.gouv.fr/faq-les-grands-principesd-horizon-europe (cf. page 84).

[18] Forbes France. "European Chips Act : quelle est la valeur d'un plan stratégique sans viabilité économique ? " In : *Forbes France* (nov. 2022). URL : https://www.forbes.fr/technologie/european-chips-act-quelle-estla-valeur-dun-plan-strategique-sans-viabilite-economique/ (cf. page 84).

[19] Guillaume Garnier *et al. Les robots dans l'industrie, saisir l'opportunité*. Rapport technique. Académie des technologies, 2022. URL : https://www.academietechnologies.fr/wp-content/uploads/2022/06/RobotiqueIndustrieV6_091220.pdf (cf. pages 10, 14).

[20] GICAT-ADIF. *Rapport Drones GICAT-ADIF*. Rapport technique. 2024 (cf. pages 34, 59).

[21] Global Market Insights. "Logistics Robots Market Size, Forecast Report 2025–2034". In : (2025). URL : https://www.gminsights.com/industry-analysis/logistics-robots-market (cf. page 102).

[22] Grand View Research. "Humanoid Robot Market Size, Share & Growth Report to 2030". In : (2024). URL : https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/humanoid-robot-market-report (cf. page 131).

[23] Kris Hauser *et al.* "Analysis and perspectives on the ANA avatar XPRIZE competition". In : *International Journal of Social Robotics* 17.3 (jan. 2024), pages 473-504. issn : 1875-4805. DOI : 10.1007/s12369-023-01095-w. eprint : 2401.05290. URL : https://arxiv.org/html/2401.05290v1 (cf. page 153).

[24] Honeywell. *Honeywell and TotalEnergies Pilot AI-Assisted Control Room to Accelerate Shift to Industrial Autonomy*. 2025. URL : https://www.honeywell.com/us/en/press/2025/11/honeywell-and-totalenergies-pilotai-assisted-control-room-to-accelerate-shift-to-industrialautonomy (cf. page 140).

[25] Xinyi Hou *et al.* "Model Context Protocol (MCP) : Landscape, Security Threats, and Future Research Directions". In : *arXiv preprint arXiv : 2503.23278* (avr. 2025). URL : https://xinyi-hou.github.io/files/hou2025mcp.pdf (cf. page 139).

[26] Humanoids Daily. "The Great Valuation Chasm : A 2025 Guide to the Humanoid Robotics Capital Race". In : (nov. 2025). URL : https://www.humanoidsdaily.com/news/the-great-valuation-chasm-a-2025-guide-to-thehumanoid-robotics-capital-race (cf. page 131).

[27] IBM Think. *Key findings from Stanford's 2025 AI Index Report*. 2025. URL : https://www.ibm.com/think/news/stanford-hai-2025-ai-index-report(cf. page 137).

[28] "Instruments de financements". In : *Horizon Europe* (2025). URL : https://www.horizon-europe.gouv.fr/instruments-de-financements-28960 (cf. page 84).

[29] Intel. "Intel slows 28 bn chip factory project in Ohio". In : (2025). URL :https://www.france24.com/en/live-news/20250301-intel-slows-28-bn-chip-factory-project-in-ohio (cf. page 84).

[30] International Committee of the Red Cross. *Position Paper Autonomous Weapon Systems and IHL*. Oct. 2025. URL : https://www.icrc.org/sites/default/files/media_file/2025-10/ICRC-Position_Paper-Autonomous_Weapon_Systems_and_IHL-Selected_issues_Oct2025.pdf (cf. page 32).

[31] Moo Jin Kim *et al.* "OpenVLA : An Open-Source Vision-Language-Action Model". In : (2024). DOI : 10.48550/ARXIV.2406.09246. URL : https://arxiv.org/abs/2406.09246 (cf. page 151).

[32] Philip Koopman et Michael Wagner. "Autonomous Vehicle Safety : An Interdisciplinary Challenge". In : *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 9.1 (2017), pages 90-96. DOI : 10.1109/MITS.2016.2583491. URL : http://ieeexplore.ieee.org/document/7823109/ (cf. page 25).

[33] Ning Li *et al.* "A soft gripper driven by conical dielectric elastomer actuator to achieve displacement amplification and compliant grips". In : *Intelligent Service Robotics* 17.5 (sept. 2024), pages 993-1003. DOI : 10.1007/s11370-02400553-2. URL : https://link.springer.com/10.1007/s11370-02400553-2 (cf. page 143).

[34] Shuo Li *et al.* "Recent Advances in Dielectric Elastomer Actuator-Based Soft Robots : Classification, Applications, and Future Perspectives".

In : *Gels* 11.11 (oct. 2025), page 844. DOI : 10.3390/gels11110844. URL : https://www.mdpi.com/2310-2861/11/11/844 (cf. page 143).

[35] Z. Li et *et al.* "A Survey of State of the Art Large Vision Language Models". In : *arXiv/CVPRW* (2025) (cf. pages 138, 151).

[36] MCF Corporate Finance. "Warehouse Automation : Market Outlook & M&A Trends for 2025". In : (fév. 2025). URL : https://www.mcfcorpfin.com/news/warehouse-automation-market-outlook-ma-trends-for-2025/ (cf. page 103).

[37] McKinsey & Company. "Humanoid Robots : Crossing the Chasm from Concept to Commercial Reality". In : (oct. 2025). URL : https://www.mckinsey.com/industries/industrials-and-electronics/our-insights/humanoid-robots-crossing-the-chasm-from-concept-to-commercialreality (cf. page 130).

[38] Jose Gabriel Islas Montero et Dmitry Kazhdan. "Multimodal Large Language Models : Transforming Computer Vision". In : (2025). URL : https://www.edgeai-vision.com/2025/01/multimodal-large-language-modelstransforming-computer-vision/ (cf. pages 138, 151).

[39] Mordor Intelligence. "Warehouse Automation Market". In : (fév. 2026). URL : https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/warehouseautomation-market (cf. page 102).

[40] Mordor Intelligence. "Warehouse Robotics Market". In : (jan. 2026). URL : https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/warehouserobotics-market (cf. page 103).

[41] Morgan Stanley Research. "The Humanoid 100 : Mapping the Humanoid Robot Value Chain". In : (fév. 2025) (cf. page 131).

[42] MSC LEGFAL JWG. *Maritime Autonomous Surface Ships (MASS).* Rapport technique. Mai 2023. URL : https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/HotTopics/Documents/MSC%20107-5-1-Report%20of%20the%20MSC-LEG-FAL%20Joint%20Working%20Group.pdf(cf. page 27).

[43] Manuel Müller *et al.* "Industrial autonomous systems : a survey on definitions, characteristics and abilities". In : *at - Automatisierungstechnik* 69.1 (jan. 2021), pages 3-13. DOI : 10.1515/auto-2020-0131 (cf. page 25).

[44] NIST. *Guidelines for Securing Autonomous Software Agents in Industrial Environments*. Rapport technique SP 800-231. National Institute of Standards et Technology, 2025 (cf. page 139).

[45] OCDE. "Trends-and-data". In : (2025). URL : https://oecd.ai/en/trendsand-data (cf. page 151).

[46] Ashish Pandharipande *et al.* "Sensing and Machine Learning for Automotive Perception : A Review". In : *IEEE Sensors Journal* 23.11 (juin 2023), pages 1109711115. DOI : 10.1109/JSEN.2023.3262134. URL : https://ieeexplore.ieee.org/document/10089400/ (cf. page 143).

[47] Raja Parasuraman, Thomas B. Sheridan et Christopher D. Wickens. "A model for types and levels of human interaction with automation". In : *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A : Systems and Humans* 30.3 (mai 2000), pages 286-297. DOI : 10.1109/3468.844354 (cf. page 25).

[48] Ron Pelrine *et al.* "Dielectric elastomer artificial muscle actuators : toward biomimetic motion". In : sous la direction d'Yoseph Bar-Cohen. San Diego, CA, juill. 2002, pages 126-137. DOI : 10.1117/12.475157. URL : http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=882848 (cf. page 143).

[49] JFrog Security Research. *CVE-2025-6515 : Prompt Hijacking Attack Affects MCP Ecosystem*. Consulté le 11 janvier 2026. 2025. URL : https://jfrog.com/blog/mcp-prompt-hijacking-vulnerability/ (cf. page 138).

[50] Luke Richardson, Justin Fidock et Indra Gunawan. "Systematic literature review of Levels of Automation (Autonomy) Taxonomy : Critiques and Recommendations". In : *International Journal of Human–Computer Interaction* (mai 2025), pages 1-20. DOI : 10.1080/10447318.2025.2502978 (cf. page 25).

[51] On-Road Automated Driving Committee. *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*. Rapport technique. ORAD Committee, 2021. DOI : 10.4271/J3016_202104. URL : https://saemobilus.sae.org/standards/j3016_202104-taxonomy-definitionsterms-related-driving-automation-systems-road-motor-vehicles (cf. page 26).

[52] Robozaps. "How to Invest in the Humanoid Robot Revolution". In : (jan. 2026). URL : https://themesetfs.com/insights/how-to-invest-in-thehumanoid-robot-revolution (cf. page 131).

[53] Robozaps. "Humanoid Production Economics 2026". In : (mars 2026). URL : https://blog.robozaps.com/b/economics-of-humanoid-robotproduction (cf. page 131).

[54] Amelia Ross. *Generative AI and the Race for Patent Protection : Insights from WIPO's Patent Landscape Report*. Mars 2025. URL : https://www.keltie.com/knowledge/generative-ai-and-the-race-for-patent-protectioninsights-from-wipos-patent-landscape-report (cf. page 151).

[55] Williams Samore. *WIPO Issues a Patent Landscape Report on Generative AI*. 2024. URL : https://www.patentnext.com/?s=WIPO+Patent+Landscape+Report+on+Generative+AI (cf. page 151).

[56] Chirag Shah. "Sensor Fusion and Multi-Sensor Data Integration for Enhanced Perception in Autonomous Vehicles". In : *Sciences Time* (juin 2024). URL : https://www.sciencetimes.com/articles/50773/20240617/sensor-fusionand-multi-sensor-data-integration-for-enhanced-perceptionin-autonomous-vehicles.htm (cf. page 143).

[57] Thomas B. Sheridan et William Verplank. "Task analysis, task allocation and supervisory control". In : *Handbook of Human-Computer Interaction*. Elsevier, 1997, pages 87-105. DOI : 10.1016/b978-044481862-1/50071-6 (cf. page 25).

[58] Joseph Sifakis. *Autonomous Systems, Where are we ?* Juin 2025 (cf. page 26).

[59] Joseph Sifakis *et al.* "A Reference Architecture for Autonomous Networks : An Agent-Based Approach". In : (2025). DOI : 10.48550/ARXIV.2503.12871. url :https://arxiv.org/abs/2503.12871 (cf. page 7).

[60] Stanford. *AI report Index*. Rapport technique. 2025. URL : https://hai.stanford.edu/ai-index/2025-ai-index-report (cf. pages 137, 151).

[61] TotalEnergies. *Collaboration with Mistral AI for Multi-Energy Strategy*. 2025. URL : https://totalenergies.com/news/press-releases/totalenergies-collaborate-mistral-ai-increase-application-artificial (cf. page 140).

[62] U.S. Department of Defense. *Autonomy in Weapon Systems*. Jan. 2023. URL : https://www.esd.whs.mil/portals/54/documents/dd/issuances/dodd/300009p.pdf (cf. page 33).

[63] United Nations Institute for Disarmament Research. *Interpretation and Application of IHL to LAWS*. 2024 (cf. page 32).

[64] Linfeng Wang et Deok Jin Lee. "Open-source vision-language-action models for robotics". In : *JMST Advances* 7.3 (sept. 2025), pages 201-206. DOI : 10.1007/s42791-025-00108-1. URL : https://link.springer.com/10.1007/s42791-025-00108-1 (cf. pages 142, 151).

[65] Di Wu *et al.* "A Survey of Deep Learning Based Radar and Vision Fusion for 3D Object Detection in Autonomous Driving". In : (juin 2024). DOI : 10.48550/arXiv.2406.00714. URL : http://arxiv.org/abs/2406.00714 (cf. page 142).

[66] Yale Yang et Dengfeng Li. "Muscle-inspired soft robots based on bilateral dielectric elastomer actuators". In : *Microsystems & Nanoengineering* 9 (2023). URL : https://www.nature.com/articles/s41378-023-00592-2 (cf. page 143).

[67] Shanliang Yao *et al.* "Radar-Camera Fusion for Object Detection and Semantic Segmentation in Autonomous Driving : A Comprehensive Review". In : *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles* 9.1 (jan. 2024), pages 2094-2128. DOI : 10.1109/TIV.2023.3307157. URL : https://ieeexplore.ieee.org/document/10225711/ (cf. page 143).

[68] De Jong Yeong *et al.* "Sensor and Sensor Fusion Technology in Autonomous Vehicles : A Review". In : *Sensors* 21.6 (mars 2021), page 2140. DOI : 10.3390/s21062140. URL : https://www.mdpi.com/1424-8220/21/6/2140 (cf. page 142).

[69] Yole Group. "Humanoid Robots 2025 : The Race to Useful Intelligence". In : (nov. 2025). URL : https://www.yolegroup.com/press-release/humanoidrobots-2025-the-race-to-useful-intelligence/ (cf. page 130).

[70] Qinghai Zhang *et al.* "A Review of the Applications and Challenges of Dielectric Elastomer Actuators in Soft Robotics". In : *Machines* 13.2 (jan. 2025), page 101. DOI : 10.3390/machines13020101. URL : https://www.mdpi.com/20751702/13/2/101 (cf. page 143).

[71] Y. Zhang et K. Lee. "Scaling Law for Agentic Meshes : How 100+ Agents Synchronize via MCP". In : *Journal of Autonomous Systems* 12.1 (2025) (cf. page 139).

[72] Yifan Zhong *et al.* "A Survey on Vision-Language-Action Models : An Action Tokenization Perspective". In : (2025). DOI : 10.48550/ARXIV.2507.01925. URL : https://arxiv.org/abs/2507.01925 (cf. pages 142, 151).

[73] Jun Zhu, Hongyi Li et Tao Zhang. "Camera, LiDAR, and IMU Based Multi-Sensor Fusion SLAM : A Survey". In : *Tsinghua Science and Technology* 29.2 (avr. 2024), pages 415-429. DOI : 10.26599/TST.2023.9010010. URL : https://ieeexplore.ieee.org/document/10258154/ (cf. page 142).

Autres sources utilisées

- https://avcc.org/
- https://finance.yahoo.com/news/autonomous-driving-sensors-research-report-142500765.html
- https://www.sae-itc.com/programs/avsc
- https://mesh.vc/reports/autonomous-driving-in-2025-state-of-the-industry-and-the-road-ahead
- https://autoware.org/autowareio/avcc/
- https://www.offshore-energy.biz/yara-birkeland-worlds-1st-fully-electric-autonomous-containership-marks-3-years-in-service/
- https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/xx/pdf/2024/02/de coding-the-eu-artificial-intelligence-act.pdf
- https://iapp.org/resources/article/top-impacts-eu-ai-act/
- https://formic.co/resources/articles/robots-as-a-service-raas
- https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/global-lidar-market

- https://www.businesswire.com/news/home/20230213005229/en/Ouster-and-Velodyne-Complete-Merger-of-Equals-to-Accelerat e-Lidar-Adoption
- https://arxiv.org/pdf/2404.07214
- https://builtin.com/robotics/robotics-as-a-service-raas
- https://droneii.com/global-drone-industry-review-2024
- https://rollingout.com/2024/12/28/autonomous-vehicles-future-2025/

Annexes

A. Liste des abréviations

ADAS : Advanced Driver Assistance Systems

ADIF : Association de Drone de l'Industrie Française

ADRA : AI and Data and Robotics Association

AGV : Automated Guided Vehicle

AIS : Automatic Identification System

AMR : Autonomous Mobile Robot

ANR : Agence Nationale de la Recherche

ANSSI : Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information

ASAM : Association for Standardization of Automation and Measuring Systems

ASTM : American Society for Testing and Materials

AUV : Autonomous Underwater Vehicle

BEV : Bird's Eye View

BIS : Bureau of Industry and Security

BVLOS : Beyond Visual Line of Sight

C2 : Command and Control

CBTC : Communications Based Train Control

CEA : Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives

CEREMA : Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement

CICDE : Centre interarmées de concepts de doctrines et d'expérimentations

CICR : Comité international de la Croix-Rouge

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

COLREGs : Collision Regulations

COTS : Commercial Off-The-Shelf

CUMA : Coopérative d'Utilisation de Matériel Agricole

DARPA : Defense Advanced Research Projects Agency

DEA : Dielectric Elastomer Actuator

DGAC : Direction Générale de l'Aviation Civile

DGAMPA : Direction générale des affaires maritimes de la pêche et de l'aquaculture

DGITM : Direction Générale des Infrastructures des Transports et de la Mer

DIH : Droit international humanitaire

DPU : Data Processor Unit

DVL : Doppler Velocity Log

EAR : Export Administration Regulations

EASA : European Union Aviation Safety Agency

ECAVA : European Connected and Autonomous Vehicle Alliance

ECCN : Export Control Classification Number

EPFL : École Polytechnique Fédérale de Lausanne

ERP : Enterprise Resource Planning

ETH : Eidgenössische Technische Hochschule

FMS : Flight Management System

FPDC : Fédération Professionnelle du Drone Civil

GICAN : Groupement des Industries de Construction et Activités Navales

GICAT : Groupement des Industriels français de la Défense et de la sécurité terrestres et AéroTerrestres

GNSS : Global Navigation Satellite System

GPQA : General Problem Question Answering

GPU : Graphics Processing Unit

HBM : High Band Memory

Ifremer : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer

IMU : Inertial Measurement Unit

Inria : Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique

IR : Infrarouge

ISO : International Organization for Standardization

ISR : Intelligence & Surveillance & Reconnaissance

ITAR : International Traffic in Arms Regulations

LiDAR : Laser Imaging Detection and Ranging

LoA : Level of Automation

LPM : Loi de Programmation Militaire

LWIR : Long-Wave Infrared

MAL : Machines autonomes logicielles

MASS : Maritime Autonomous Surface Ship

MCP : Model Context Protocol

MES : Manufacturing Execution System

MLLM : Multimodal Large Language Model

MMMU : Massive Multi-discipline Multimodal Understanding

NDAA : National Defense Authorization Act

ODD : Operational Design Domain

OMI : Organisation maritime internationale

PEPR : Programme et Équipements Prioritaires de Recherche

RaaS : Robotic as a Service

RAI : Règlement européen sur l'intelligence artificielle

RoI Fusion : Review of Image and Fusion

RPAS : Remotely Piloted Aircraft System

SAASM : Selective Availability Anti-Spoofing Module

SAE : Society of Automotive Engineers

SALA : Systèmes d'armes létaux autonomes

SGPI : Secrétariat Général pour l'Investissement

SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

SIC : Système d'Information et de Commandement

SLAM : Simultaneous Localization and Mapping

SLM : Small Language Model

SoC : System on Chip

SWE-bench : SoftWare Engineering Benchmark

TCO : Total Cost of Ownership

TMS : Transportation Management System

TPU : Tensor Processing Unit

TUM : Technische Universität München

UAS : Unmanned Aircraft System

UAV : Unmanned Aerial Vehicle

UCUV : Unmanned Combat Underwater Vehicle

UNECE : United Nations Economic Commission for Europe

UNIDIR : United Nations Institute for Disarmament Research

USBL : Ultra-Short BaseLine

USML : United States Munitions List

USV : Unmanned Surface Vehicle

UUV : Unmanned Underwater Vehicle

VLA : Vision Language Action

VLM : Vision Language Model

WMS : Warehouse Management System

XLUUV : Extra Large Unmanned Underwater Vehicle

B. Liste des robots bipèdes et quadrupèdes

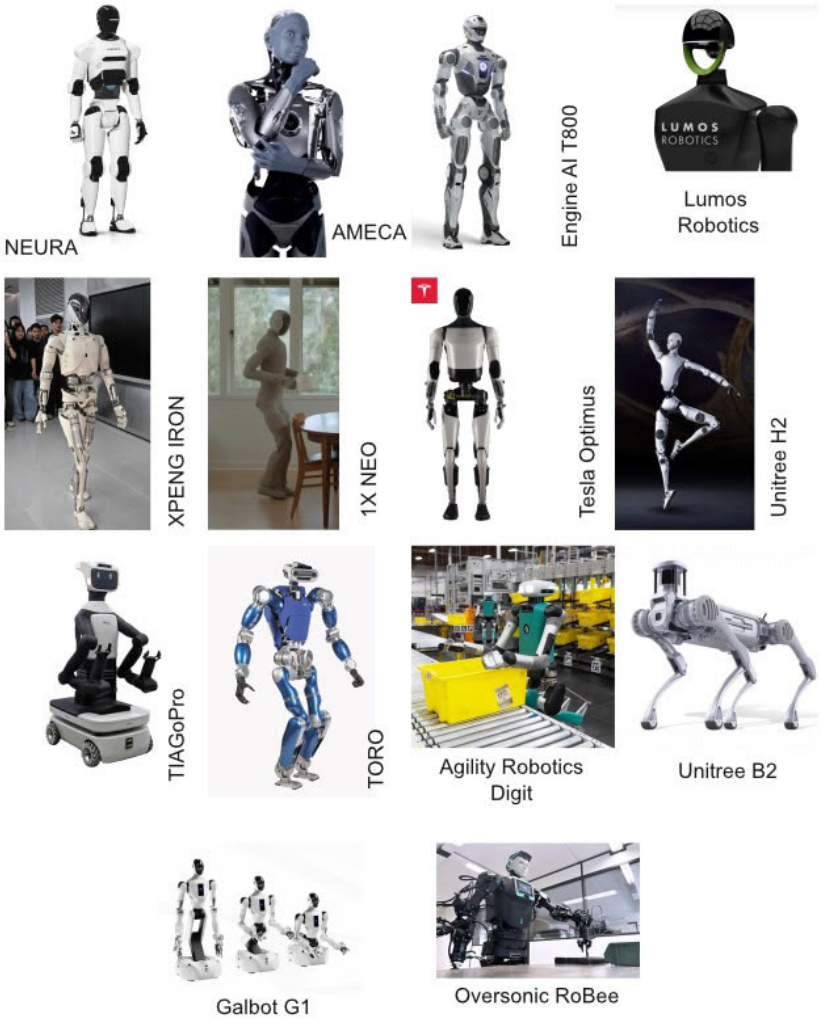


Figure B.1: Quelques représentations de robots

Table B.1: Liste non exhaustive des robots bipèdes et quadrupèdes

Pays	Robot	Fabricant	Type	Coût estimé	Fonction
France	Miroki / Miroka	Enchanted Tools	Humanoïde (Base sphérique)	30 000 €	Logistique sociale, manipulation d'objets, accueil hospitalier
	Calvin-40	Wandercraft	Bipède (Humanoïde)	Non public (B2B)	Manutention industrielle lourde, travaux pénibles (capacité 40 kg)
	Nao (V6)	United Robotics (ex-Aldebaran)	Bipède	12 000 €	Éducation, recherche, thérapie (autisme)
	Reachy	Pollen Robotics	Bipède (Bio-inspiré)	17 000 € (Kit)	Recherche en IA, téléopération, prototypage rapide (Open Source)
Norvège	NEO (ex-EVE)	1X Technologies	Bipède	Objectif < 20 000 €	Assistant domestique généraliste (soutenu par OpenAI)
Suisse	ANYmal	ANYbotics (ETH Zurich)	Quadrupède	> 100 000 €	Inspection industrielle autonome (Pétrole, Gaz, Mines)
Allemagne	4NE-1	Neura Robotics	Bipède	Non public	Robot cognitif pour l'aide à domicile et l'industrie
	TORO	DLR (Agence Spatiale)	Bipède	Non connu	Téléopération spatiale, recherche en manipulation fine
	Agile One	Agile Robots		Logistique	
Espagne	TALOS	PAL Robotics	Bipède	100 000 €+	Recherche avancée en contrôle de force et locomotion complexe
	TIAGo	PAL Robotics	Manipulateur mobile	30 000 €	Recherche académique, assistance intérieure (très populaire en labo)
Italie	ergoCub	ergoCub	Bipède		Logistique social
	Oversonic	RoBee	Multiforme		Logistique, social Santé
Royaume-Uni	Ameca	Engineered Arts	Bipède (Statique pour l'instant)	Location	Interaction homme-machine, divertissement (visage hyper-réaliste)

Pays	Robot	Fabricant	Type	Coût estimé	Fonction
États-Unis	Spot	Boston Dynamics	Quadrupède	75 000 $	Inspection, surveillance, collecte de données sur terrains accidentés.
	Digit	Agility Robotics	Bipède	250 000 $	Logistique d'entrepôt, transport de bacs (le « dernier mètre »)
	Figure 03	Figure AI	Bipède		Tâches ménagères
	Optimus	Tesla	Bipède		Industrie Maison
Chine	Go2	Unitree Robotics	Quadrupède	1600 $ – 3 000 $	Grand public, éducation, surveillance légère (le moins cher)
	H1	Unitree Robotics	Bipède	90 000 $	Plateforme de développement pour la locomotion humanoïde
	CyberDog 2	Xiaomi	Quadrupède	1800 $	Compagnon technologique pour développeurs (Open Source)
	G1	Galbot2	Bipède		
	LUS2	Lumos	Bipède/ Quadrupède		
	Martian/ Wanda 2.0	Unix AI	Bipède		Social
	PM01	Engine AI	Bipède		1er robot à faire un flip avant
	LimX Oli	LIMX Dynamics	Bipède		Robot capable d'évoluer en terrain encombré

Source : https://humanoidroboticstechnology.com/, https://www.aparobot.com/

C. Projets français de consolidation du secteur industriel

Plusieurs appels à projets ont été lancés comme :

C.1. Appel à projets « Offre de robots et machines intelligentes d'excellence »

Opéré par Bpifrance, cet appel à projets s'adresse aux acteurs de la filière équipements robotiques et industriels pour développer des solutions robotiques opérationnelles. Les projets adressant spécifiquement la robotique médicale, les équipements agricoles, la robotique spatiale et la robotique militaire ne seront pas éligibles dans le cadre de cet appel à projets. En revanche, les projets portant sur les composants internes aux vecteurs ainsi que les briques matérielles essentielles à leur intégration dans des systèmes (moteurs, moto-réducteurs, capteurs, actuateurs,...) sont désormais éligibles (Élargissement des TRL des projets attendus : à partir du TRL 4.). Exemple : projet Spider de l'entreprise AXGROUP à travers un financement de 574 000 € pour une durée de 36 mois. Ce projet vise le développement d'un robot de nettoyage de toitures photovoltaïques déclenchant les cycles de nettoyage de façon autonome en fonction de la météo et de l'encrassement des panneaux solaires. Le robot est conçu pour être autonome en énergie électrique grâce à ses batteries et son propre panneau solaire. Il est également autonome en eau puisqu'il utilise l'eau de pluie.

C.2. Appel à projets « Défi transfert robotique »

L'objectif de ce défi est de réussir à adapter et valoriser les travaux des laboratoires de recherche en solutions robotiques pionnières en vue de leur exploitation industrielle. La première phase de ce défi consiste à soutenir des pré-projets issus de la recherche. Dans un second temps, les travaux les plus concluants bénéficieront d'un soutien financier pouvant atteindre 10 millions d'euros pour assurer leur déploiement industriel (voir la liste des 15 projets sélectionnés en octobre 2024[141]). Premiers résultats attendus fin 2026.

141 https://anr.fr/fileadmin/aap/2023/selection/france2030-aap-transfert-robotique-2023-selection.pdf

C.3. Appel à projets générique n° 4 « i-Démo – soutien aux projets structurants de R&D&I »

L'appel à projets « i-Démo » du plan France 2030 a pour objectif le développement d'entreprises industrielles et de services sur les marchés porteurs, créateurs de valeur et de compétitivité pour notre économie et contribuant aux transitions énergétiques, écologique et numérique. Il n'est pas certain que les aspects systèmes autonomes soient retenus parmi les projets qui ont été soumis mi 2025.

Le projet LOGIE AI se distingue sur la convergence entre IA et Robotique. Porté par Enchanted Tools, NXP, Inria, le LIA, et Isir-Sorbonne, en collaboration avec Hugging Face, il vise à transformer la filière de la logistique en milieux humains grâce à l'IA générative intégrée à des robots. Financé à hauteur de 3 millions d'euros pour 24 mois par France 2030, le projet utilise une approche open source pour développer et intégrer dans des robots, des modèles de langage avancés spécifiques, moins dépendants du Cloud et s'appuyant sur l'IA embarquée. Les robots ont ainsi la capacité de comprendre, interpréter et répondre aux commandes de manière contextuelle et précise, en temps réel et avec une plus faible consommation énergétique.

C.4. Lauréats de la 1re vague (2 à 3 M€ par projet)

MT Robotics – Projet collaboratif qui réunit V.L.M (PE), Janus Engineering (PE), Naval Group, CETIM et École Centrale de Nantes – Le projet vise à développer une robotique de manufacturing française à vocation européenne pour faire émerger un schéma industriel nouveau de fabrication à la demande de pièces de grandes dimensions. Le projet comprend une base robotique boostée pour le manufacturing et une cellule robotisée hybride (Fabrication Additive, Usinage, Contrôle, Sécurité & RSE).

VAD – Projet collaboratif entre 2 PME du domaine du Drone, Delair et Skydrone – Le projet vise à introduire des innovations majeures, fortement anticipées par les acteurs du secteur énergétique, avec l'objectif de réduire significativement les coûts, les délais, et les risques associés aux opérations de transport de l'énergie sur les réseaux aériens. Ce projet ambitieux de développement d'un drone spécifique se positionne comme un catalyseur de

changement, contribuant à une gestion optimale des énergies renouvelables et renforçant la résilience des infrastructures électriques.

SEANET4 – porté par IADYS (PE) – Le projet vise à approfondir l'autonomie, les fonctionnalités et l'intelligence de la solution robotisée Jellyfishbot pour en faire la solution 100 % clé en main de dépollution de plans d'eau industriels. Il comprend le développement d'une nouvelle version du robot avec des fonctionnalités améliorées et la capacité de collecter des données environnementales, la création d'une *docking station* pour améliorer son autonomie, la mise en place d'une plateforme de gestion des robots et d'analyse de données, ainsi que la verticalisation de la production en France pour réduire la dépendance extra-européenne.

CU – porté par PaintUp (PE) – PaintUP industrialise le robot mobile XL, vainqueur du concours de robotique d'assainissement organisé par EDF et Nuclear Valley. Cet équipement fabriqué en France est capable de nettoyer et de cartographier la radioactivité résiduelle et permettre la réutilisation des bâtiments démantelés.

C.5. Lauréats de la 2e vague (1 à 2 M€ par projet)

ARU ENERGIES – Nimble One (PE) propose ARU, un robot mobile à l'architecture polymorphe en rupture, doté d'une grande capacité de mouvements. L'objectif de ce projet est d'industrialiser ARU et de le spécialiser aux secteurs de l'énergie (nucléaire, hydro-électricité, etc).

EFF GEN 2 – Aisprid (PE) : Le projet vise le développement de la deuxième génération de robot d'effeuillage de tomates, plus robuste, précise et fiable dans ses trajectoires. Il propose une reconnaissance détaillée de l'ensemble de la plante et sa coupe, d'étendre la plage d'utilisation du robot (travail de nuit) et d'accroître les performances de la solution sur les différents types et variétés de tomates.

EIS3D – Kelenn Technologies (PE) : L'objectif du projet est de révolutionner la conception et la fabrication des fonctions électroniques en développant les nouvelles technologies additives et digitales d'électronique imprimée structurelle, combinées à la robotique. Cette approche novatrice permettra

de déposer et d'interconnecter directement les composants électroniques dans et sur les structures 3D.

ENIREP2 – Lynxter (PE) : Le projet vise le développement d'une solution de fabrication additive élastomère à la hauteur des attentes industrielles et médicales sur le plan des matériaux, de la sécurité logicielle et des spécificités applicatives.

FINRIP – FINRIP (PE) s'érige en premier champion français et européen sur les préhenseurs pluridigitaux. Fondée sur une innovation technologique disruptive et souveraine, FINRIP développe une gamme de doigts et de préhenseurs pluridigitaux, standards, modulaires, pour répondre aux enjeux de la préhension industrielle pour les robots et les cobots. Le projet de 3 ans vise à accélérer le déploiement industriel de la solution.

FLYRENOV – Flying Green (ETI) : Le projet Flying Green s'engage à offrir une solution flexible, efficace et respectueuse de l'environnement pour les travaux de maintenance, répondant ainsi aux besoins du secteur énergétique. À travers sa technologie brevetée, il vise à nettoyer les pales et les mats des éoliennes à l'aide de drones équipés de jets haute pression et d'un système de positionnement ultraprécis. Cette approche garantit un nettoyage optimal et régulier des équipements, réduisant les pertes de production énergétiques.

LUCAS40 porté par l'entreprise LUCAS (ME) : Le projet vise le développement d'une nouvelle gamme de robots avec un dimensionnement au plus juste par rapport aux besoins finaux. Cette nouvelle offre sera composée de robots multiaxes modulaires de charge utile de 150 kg à 3 000 kg, de poignets de robot, d'armoires de commande ainsi que de logiciels métiers pour le domaine d'application de la tôlerie industrielle ainsi que d'autres procédés de fabrication comme l'injection plastique, la fabrication additive ou encore l'usinage et la soudure.

NATE – NIRYO (PE) : Le projet Nate vise à développer une solution robotique collaborative agile et accessible au plus grand nombre permettant de replacer l'humain au cœur des process industriels. Cette démarche vise à revaloriser le travail des opérateurs en améliorant leurs conditions de travail par l'automatisation des tâches répétitives à faible valeur ajoutée et sources de pénibilité.

NOVA 2027 – Génération Robots (PE) : L'objectif du projet est la conception et la production en France de robots autonomes pour la surveillance, la sécurité et la sûreté des sites industriels.

PRODEEGY – EXCEENIS (PE) : Le projet Prodeegy vise à développer une machine-outil robotisée intégrant de l'intelligence artificielle à destination des usines de production et de reconditionnement afin qu'elles puissent automatiser les vérifications des produits, bénéficier d'une IA pour diagnostiquer la qualité et effectuer les tests fonctionnels, à moindre coût, avant de mettre (ou de remettre) les produits sur le marché.

REACHY – Pollen Robotics (PE) : Ce projet vise à développer des robots collaboratifs de nouvelle génération équipés de systèmes d'IA modernes, et répondant aux exigences de l'industrie. L'innovation majeure repose sur les capacités supérieures de ces robots à s'adapter aux environnements humains, à passer d'une tâche à une autre, à se déplacer au sein d'un espace de travail en toute sécurité.

SMARTH – Semo (PE) : Smart-H a pour objectif de concevoir, industrialiser et commercialiser des machines intelligentes mettant en œuvre des procédés d'avenir pour la production compétitive de produits électroniques en France et en Europe.

SPAMR – ONERA et SHARK ROBOTICS (PE) : Le projet consiste au développement d'un robot de sécurité incendie autonome en matière de navigation et d'intervention pour le marché B2B, notamment des parkings et des entrepôts. Grâce à sa propre cuve en eau intégrée et sa capacité à intervenir de manière autonome, ce robot vise à contenir les départs d'incendies plus rapidement, et à permettre une intervention plus efficace et en toute sécurité des pompiers.

TALOS – Elistair (PE) : Talos est un drone filaire « in a box », entièrement automatisé et à autonomie « illimitée », permettant de réaliser des missions de surveillance et de communications avec des performances en termes de zone couverte, de temps de vol et d'intelligence de la donnée inégalées, en milieu terrestre et maritime

D. Recommandations du GT GICAT-ADIF

Un sous-ensemble des recommandations du GICAT-ADIF, utiles au secteur civil ont été reprises ici.

Recommandation nº 1

Une feuille de route R&D nécessitant des investissements considérables, une approche collective et structurée de type filière industrielle gouvernement/industrie est indispensable pour pouvoir disposer des briques clefs pour cette filière des drones/MTO de moins de 150 kg. Il est proposé la mise en place d'un COmité de concertation Drone Militaire France, couvrant les drones et MTO de moins de 150 kg, le CODM150, dispositif de concertation Gouvernement/Filière industrielle Drone, permettant de s'accorder et gérer une feuille de route stratégique R&D.

Recommandation nº 2

Le GT recommande ainsi de poursuivre ses travaux en 2024 pour :

- Réaliser une étude plus détaillée avec la DGA pour construire une feuille de route « production industrielle » drones/MTO de moins de 150 kg afin de garantir l'autonomie stratégique de la France dans ce domaine au niveau adéquat ;

- Mener une réflexion sur l'intérêt d'un GIE pour mettre en commun les moyens et expertises des différents acteurs ;

- Étudier la possibilité du lancement d'un appel à projet « souveraineté industrielle » commun DGA/France 2030 pour permettre d'avoir en France des sources souveraines nécessaires à l'industrie du drone.

Les premières technologies à analyser pourraient être notamment : les moteurs brushless, les batteries, les calculateurs IA embarqués… Les travaux pourraient se traduire par la mise en place d'un outil de production et/ou d'essai mutualisé via un GIE.

Recommandation nº 3
La France doit déclarer drones et MTO comme systèmes de souveraineté afin qu'elle puisse maintenir son autonomie stratégique en imposant des conditions de localisation géographique de la conception et/ou production de certains composants ou l'assemblage de drones/MTO.

Recommandation nº 4
Jurisprudence CAESAR : encourager la prise de risque et l'innovation chez les industriels en menant une politique dynamique de soutien aux matériels développés sur fonds propres par l'acquisition de petites séries symboliques à des fins d'expérimentation et qui permettrait à l'industriel de bénéficier du SOUTEX. Étudier la possibilité de faire évoluer le CCP pour élargir les possibilités d'application de cette orientation, qui pourrait d'ores et déjà être mise en œuvre avec simplement une volonté « politique ».

Recommandation nº 5
Privilégier les achats sur étagère même s'ils ne satisfont pas tout à fait le besoin en :

- vérifiant par des tests sur site étatique la réalité du caractère « sur étagère » du matériel et qui soient un critère éliminatoire avant même le dépouillement des offres financières ;

- ayant recours à un processus de contractualisation qui permette de s'assurer que le besoin s'adapte autant que possible aux équipements disponibles et non l'inverse.

Recommandation nº 6
Passer, pour répondre à la demande exprimée par la LPM, un marché ouvert à tous les services de l'État, de type accord cadre multi attributaires, pour les achats sur étagère de drones de moins de 50 kg répondant à un cahier des charges précis les rendant éligibles à être mis en œuvre par l'administration française. Même si elle ne passe pas le marché, la DGA devra garder la responsabilité de sélectionner les matériels qui pourront candidater pour figurer dans ce marché, via notamment une labellisation « Approved for

French army use ». Cette politique de sélection devra être rigoureuse pour contribuer à la consolidation de la BITD.

Recommandation nº 7
Passer d'une logique d'application stricte du CCTP à une logique systématique d'ITP (*Intention To Proceed*) ou ATP (*Autorisation To Proceed*) tout en respectant la notation initiale de l'appel d'offre.

Recommandation nº 8
Préparer dès le temps de paix le temps de guerre avec le systémier en :

- Maintenant l'outil de production opérationnel ;
- Prévoyant dès le contrat temps de paix, des dispositions pour commander des matériels supplémentaires en temps de guerre/crise, avec des délais et des cadences qui auront été prédéfinis, en prévoyant si besoin un élargissement de la base industrielle de production ;
- Étudiant, voire développant, dès le temps de paix et, idéalement soit dès la conception, soit à l'issue du développement du système de drones considéré, une version simplifiée/bas coût/consommable temps de guerre, ou même en concevant le matériel en ce sens ;
- Intégrant l'export, à la fois au niveau de ses contraintes, mais aussi de ses opportunités.

Recommandation nº 9
En matière de drones/MTO de moins de 150 kg, pour aider à structurer et soutenir notre BITD, il faut remettre à plat nos stratégies et méthodes d'acquisition en :

- Revoyant les modes de contractualisation pour être plus réactif et réduire l'ensemble des délais, que ce soit pour les achats sur étagère ou avec des développements ;

- Privilégiant des commandes plus fréquentes sur des séries plus limitées de matériels ;

- Dimensionnant au plus juste les stocks en temps de paix, mais prévoir dès le temps de paix les conditions industrielles d'une montée en puissance rapide de la production en temps de guerre ;

- Privilégiant les achats sur étagère de matériels répondant à nos impératifs nationaux d'autonomie stratégique et de souveraineté nationale ;

- Favorisant l'innovation en :

  - Achetant une petite série de matériels novateurs à des fins d'expérimentation quand un industriel les a développés sur fonds propres, même s'il ne répond pas à un besoin avéré, (jurisprudence CAESAR) ;
  - Mettant en place une politique active multifacettes de R&D sur des briques technologiques clairement identifiées comme prioritaires et spécifiquement militaires en profitant de tous les dispositifs/financements existants.

Recommandation nº 10
L'État doit faciliter la consolidation de la BITD pour faire émerger 2–3 champions nationaux multisegments :

- Via une politique active de soutien à l'industrie par la commande de produits autant que possible sur étagère ;

- En laissant jouer la loi du marché sans succomber à la tentation de jouer au mécano industriel : les industriels dont les produits sont commandés en grande série se développent et les autres disparaissent ou sont rachetés ;

- En revoyant à la hausse les montants prévus dans la LPM pour ce segment pour être en cohérence avec la concurrence au niveau mondial.

Recommandation nº 11
Mettre en place un « pacte drone défense » entre le MINARM et la filière représentée par le GICAT et l'ADIF, associations professionnelles

représentatives, pour qu'un vrai pilotage de celle-ci s'instaure au travers d'un dialogue régulier entre acteurs étatiques et industriels. Un document de référence sur la structuration de la filière drones/MTO de moins de 150 kg pourrait être rédigé dans ce cadre et une conférence/salon/manifestation annuelle (dont la 1re édition pourrait être inaugurée par le ministre). Le CODM150 (recommandation nº 1) pourrait s'inscrire dans ce pacte.

Recommandation nº 14
Améliorer le partage d'information entre les acteurs étatiques et industriels de la navigabilité avec :

- La diffusion par l'État d'une synthèse de la réglementation sur les drones militaires et d'État et les possibilités qu'elle offre ;
- La mise en place d'une réunion d'échange annuelle avec les différents acteurs ;
- En associant les acteurs de la DGAC à ces échanges, notamment dans l'optique de contribuer à faire évoluer la réglementation civile.

Recommandation nº 15
Le MINARM doit s'investir sur ce dossier des zones d'essais et champs de tir drone en :

- Se rapprochant des centres d'essais civils et de la DGAC pour élaborer une politique nationale cohérente en matière de moyens d'essais drones, condition indispensable si l'on veut une BITD drone française forte, et de manière plus générale une industrie française du drone forte. Cette politique devrait :
  - Définir une répartition des rôles/tâches/missions entre centre d'essais étatiques et privés ne serait-ce que pour éviter des concurrences stériles ;
  - Définir quel soutien (financier, technique, zones aériennes…) le MINARM peut apporter à des centres civils pour qu'ils puissent réaliser des activités d'essais au profit de la BITD (éventuellement par le biais de conventions) ;

  - Évaluer l'opportunité d'un grand centre d'essais drones à l'instar de celui du DLR. Une attention particulière devra être portée aux capacités d'essais de brouillage dont l'importance dans une guerre moderne a été démontrée lors du conflit ukrainien.

- Établissant un cadre et des procédures permettant de classer aéronefs d'État des drones industriels lorsque les besoins d'essais le nécessitent.

- Établissant une cartographie des moyens et zones d'essais MINARM qui peuvent être mis à la disposition des industriels et définir les conditions pour que ceux-ci puissent en bénéficier d'un usage gratuit, ce qui constituerait une preuve concrète de soutien à la filière. Un POC unique devra être identifié côté MINARM pour traiter les demandes de zones d'essais étatiques. Le SEEAD gagnerait à être associé à la démarche au côté de la DGA.

Recommandation nº 20
Adapter la LPM actuelle en matière de drones et MTO de moins de 150 kg en prévoyant une feuille de route pluriannuelle avec uniquement par segment des flux financiers, sans forcément identifier un produit en particulier, qui aurait vocation à être remplacé par un produit plus moderne dans les trois ans. « Jalonnement » de cette feuille de route d'opérations d'acquisition majeures tous les ans. Un montant cible annuel de 250 M€ serait à atteindre en fin de LPM pour les drones/MTO de moins de 150 kg se répartissant comme suit :

- 170 M€ pour les acquisitions ;

- 60 M€ pour la R&D ;

- 20 M€ pour la souveraineté industrielle.

E. Les sous marins militaires autonomes

E.1. États-Unis

L'Echo Voyager est un sous-marin sans équipage dont le premier exemplaire de série a été livré fin 2023 à la marine américaine sous le nom d'Orca XLUUV[142].

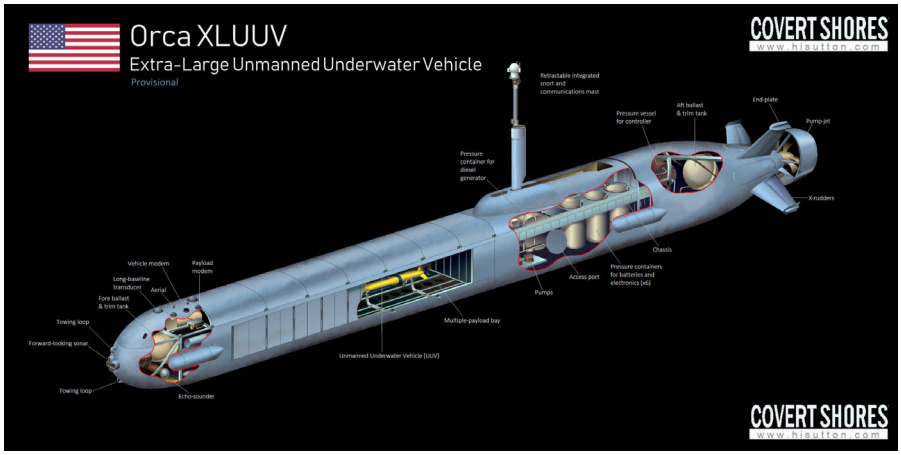


Figure E.1: ORCA XLUUV

D'une longueur de 25 m de long (équivalent à un sous-marin de 60 m avec équipage) équipé de 12 torpilles, capable de plonger à 3 000 m et de naviguer sur 12 000 nm.

142 XLUUV : eXtra Large Unmanned Underwater Vehicle

ANDURIL produit aussi son propre UUV :

Figure E.2 : DIVE LD

E.2. Royaume-Uni

La Royal Navy a dévoilé officiellement le 15 mai 2025, à l'occasion d'une cérémonie de baptême, l'Excalibur, un sous-marin autonome expérimental. Avec ses 12 mètres de long et 2,2 mètres de diamètre pour un déplacement de 19 tonnes, il est l'engin de ce type (XLUUV) le plus important en Europe. Cet événement marque la concrétisation du projet expérimental Cetus, lancé en 2022 et développé pour la Royal Navy.

Figure E.3 : Excalibur de la Royal Navy

BAE systems en coopération avec le canadien Cellula Robotics a produit l'UUV Herne.

Figure E.4 : Dessin d'artiste Herne

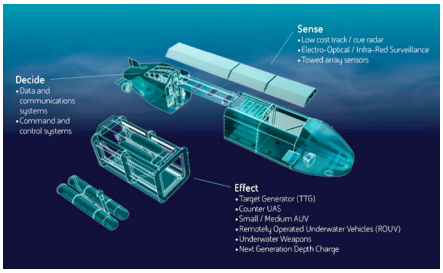


Figure E.5 : Éclaté de Herne

Figure E.6 : Mise à l'eau de Herne

E.3. France

La prise de conscience du retard a eu lieu en 2016 lorsque Boeing, a testé son sous-marin *Echo Voyager*, successeur des *Echo Ranger* et *Echo Seeker*, destinés à de la cartographie océanographique.

À la suite de Boeing, Naval Group a développé un concept de taille plus modeste adapté à la Marine Française, dont le premier prototype interne fonctionne depuis quelques années et pour lequel la DGA a notifié[143] fin 2023 la fabrication au travers du projet UCUV (classe 15 m, 15 t, tout électrique, autonomie de 5 à 7 jours, profondeur limité à 200 m pour éviter de surdimensionner le système).

Figure E.7 : UCUV de Naval Group

Le principe de design de Naval Group est basé sur le concept FILI : Fiable, Inaltérable, Létal, Inviolable.

Dans un milieu où les communications sont limitées et parfois impossibles ou non désirées, il est indispensable de pouvoir garantir la réussite de la mission en toute confiance. Dans cette optique, Naval Group a développé l'ADC[144], visant à apporter une extension capacitaire à l'exploitation des drones dans le cadre d'une mission de longue durée en leur permettant de mener à bien leurs missions sans télé-opération et en faisant ainsi des systèmes autonomes.

143 https://www.naval-group.com/fr/presse/naval-group-va-realiser-un-demonstrateur-de-drone-sous-marin-autonome-pour-la-direction

144 Autonomie Décisionnelle Contrôlée

Grâce à une replanification permanente alimentée par l'analyse de la situation tactique, l'ADC permet aux systèmes autonomes de s'adapter aux aléas tactiques, à l'environnement et aux éventuelles avaries. Ce système permet aux systèmes autonomes d'accomplir leur mission seul ou en collaboration tout en respectant la doctrine d'emploi. L'ADC garantit le respect des ordres de l'opérateur humain dans les objectifs de la mission, dans les règles de comportements et les degrés de liberté laissés au système autonome.

Les drones de surface télé-pilotés, partiellement ou en totalité, sont développés par la filiale de Naval Group, Sirehna[145] avec le Seaquest C930 qui dispose d'une autonomie de 200 nm avec une vitesse maximale de 35 nœuds.

Extail[146] est aussi un expert dans la chasse aux mines via ses drones et a des utilisations civiles dans le domaine de la surveillance des plateformes off-shores.

Figure E.8 : Drone de surface Seaquest de Sirehna

La difficulté est d'intégrer de manière efficace ces UUV à des systèmes de combat existants. Il s'agit de pouvoir préparer la mission. Aujourd'hui l'opérateur du drone naval est vu comme l'équivalent d'un commandant de sous-marin et

145 https://www.sirehna.com/unmanned-surface-vehicle-sirehna-usv/
146 https://www.exail-technologies.com/fr/

doit planifier au travers des outils mis à sa disposition la mission. Le système autonome est reconfigurable dans le sens où au travers de modules de mission spécifique, il peut être adapté à différents scénarios depuis la reconnaissance active ou passive jusqu'à la neutralisation de cibles. Les communications avec son bateau mère sont programmées de manière périodique pour échanger les informations avec le système de combat de l'escadre à la mer.

E.4. Japon

L'agence d'acquisition, de technologie et de logistique (ATLA) a présenté en fin 2023 dans leur site de test IWAKUNI *Maritime Environment Test & Evaluation Satellite* (IMETS) son XLUUV. L'UUV a été construit par Mitsubishi Heavy Industry (MHI).

Figure E.9 : UUV japonais

Version avec compartiment charge utile.

Figure E.10 : Version longue

E.5. Chine

Lors d'une parade militaire en 2019, la Chine montrait le HSU001.

Figure E.11 : UUV type HSU chinois

Lors de la parade militaire de 2025, la chine a présenté son modèle de XLUUV, le AJX002 d'une longueur de 20 m capable de poser des mines de manière autonome et de fonctionner en essaim.

Figure E.12 : XLUUV chinois

Peu d'informations de source ouverte circulent sur les capacités de la Chine mais récemment l'Indonésie à découvert dans les filets d'un pêcheur[147] dans le détroit de Lombok[148] un sous marin chinois fabriqué par le CSIC (*China Shipbuilding Industry Corporation*) de 3,7 m de long et de 70 cm de diamètre qui démontre la capacité de la Chine a opéré loin de ses bases un tel engin.

Figure E.13 : UUV chinois

147 https://defencesecurityasia.com/en/chinese-uuv-discovered-indonesia-lombok-strait-undersea-surveillance-network/

148 Pour la navigation internationale, c'est un point de passage obligé (PPO) pour les plus imposants pétroliers et minéraliers reliant le golfe Persique ou l'Australie à l'Asie de l'Est (Chine, Japon, Corée du Sud), car ceux-ci ne peuvent emprunter les détroits trop peu profonds de Malacca (25 m) ou de la Sonde (20 m). Lombok fait donc partie des 15 points de passage obligés qui polarisent 80 % de la valeur du trafic maritime mondial.

F. Personnes auditionnées

Table F.1: Liste des intervenants

Organisme	Mission	Représentant
Académie de l'Air et de l'Espace	Think-tank	Alain Garcia, ex Executive Vice-President Engineering chez Airbus SAS, ancien Ingénieur en chef programme A330-340 Jacques Verrière, ancien Commandant de bord, Instructeur Air France
Agreen Technology	Constructeur	Christophe Aubé, CEO & Président de l'Association RobAgri
AMPERE, filiale du Groupe Renault	R&D et prototype TRL8	Rodolphe Gelin
Association du drone de l'industrie française, ADIF	Association	Pdt Antoine Level
AXEMA	Syndicat des constructeurs et importateurs machines agricoles	DG Laurent de Buyer
CEA	R&D	Gregorio Ayumego, chef de division IA et Systèmes Interactifs Caroline Vienne, chef de projet.
Conseil général de l'économie	Ministère économie	Paul Jolie, référent IA
Cyclair	Constructeur robot	Sébastien Gorry, CEO
Dassault Aviation	Constructeur	Pierre Renvoisé, architecte produits militaires Joël Rode, ex Officier de marque Mirage 2000-5
ENCHANTED Tools	Constructeur robot	CEO Jérôme Monceaux
EXXACT Robotics	Constructeur	Vincent Rachet, DG
Fédération Professionnelle du Drone Civil, FPDC	Association	Pdt Philippe Boyadjis
FETIS	Constructeur composants	Damien Fétis (PDG) Anthony Dollet (CTO)
GICAT	Association	Claude Chenuil, Responsable Pacte Drones

Organisme	Mission	Représentant
HARMATTAN	Constructeur drone	Jean-Patrice Coste Cofondateur
INRAE	R&D	Roland Lenain, chercheur
INRIA	R&D	Pierre-Brice WIEBER, Adjoint au Directeur Scientifique
Naval Group	Constructeur	Cyril Lévy, Directeur de la Division Drone
Renault	Automobile et robotique	Eric Marchiol, VP Metaverse Industry & Quality, Jean-Marc Chatelanaz, Program Director Industry Metaverse, Raphaël Obry, Antoine Lejeune
Thalès	Avionique	CTO for Flight Avionics
Wandercraft	Constructeur de robot	Chef de projet CALVIN

Colloques et séminaires

- Séminaire Robotique de l'Académie des technologies en juillet 2025 :

  - *Abderrahmane Kheddar*, Directeur Joint Robotics Laboratory (JRL) Japon, directeur de recherche CNRS, académicien,
  - *Raja Chatila*, professeur émérite à la Sorbonne, ancien président de la IEEE Robotics and Automation Society, ancien directeur du LAAS,
  - *Christian Duriez*, directeur de recherche à l'Inria et responsable du programme robotique organique,
  - *Catherine Simon*, secrétaire générale pour l'investissement robotique France 2030,
  - *Damien Chablat*, responsable du programme Défi Robotique auprès de l'ANR.

- Journée d'études *Intelligence artificielle et fonctions opérationnelles embarquées*, organisée par l'Académie militaire de Saint-Cyr Coëtquidan (le CReC) en partenariat avec KNDS France le mardi 20 janvier 2026

- Colloque *Quelle autonomie pour les robots armés de demain ?* organisé par le CICDE (Centre interarmées de concepts de doctrines et d'expérimentations) et l'Académie militaire de Saint-Cyr Coëtquidan avec son centre de recherche le CReC, le lundi 13 octobre 2025.

- Journée Robotique et IA organisée par le SGPI le mardi 27 janvier 2026.

G. Déclaration de conflits d'intérêts

Les rédacteurs, le comité de relecture et le comité de la qualité déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêt avec les entreprises citées dans ce rapport.

Rédacteurs

Jean-Luc MOLINER, membre de l'Académie des technologies,

Didier JUVIN, expert auprès du Pôle numérique,

Hubert DEFRANCQ, membre de l'Académie d'agriculture

Relecteurs

Ce rapport a été relu par :

- *Stéphane Andrieux*, membre de l'Académie des technologies,
- *Guillaume Devauchelle*, membre de l'Académie des technologies,
- *Hervé Guillou*, membre de l'Académie des technologies,
- *Patrick Pélata*, membre de l'Académie des technologies,
- *Bruno Stoufflet*, membre de l'Académie des technologies.

Ce rapport a été visé par le Comité d'éthique et le Comité qualité de l'Académie des technologies.

Approbation

Le Rapport a été adopté par l'Académie lors de la séance plénière du 10 juin 2026.

Les systèmes autonomes sont des dispositifs dotés de capacités d'automatisation et d'algorithmes avancés, y compris d'intelligence artificielle, leur permettant de percevoir leur environnement, de sélectionner et d'exécuter des actions sans intervention humaine. Ils représentent une rupture technologique majeure, accélérant une nouvelle révolution industrielle amorcée largement avec la mise en place des metavers industriels basés sur les jumeaux numériques.

La partie visible des systèmes autonomes que sont les véhicules, les drones, les robots industriels ou les navires automatisés incarne déjà cette évolution profonde qui bouscule les paradigmes techniques, économiques et sociaux historiques. La partie invisible et moins connue du grand public que sont les machines logicielles constituent néanmoins le cœur de cet écosystème. Portés par l'IA, les capteurs avancés, l'accroissement des puissances de calcul et les réseaux de communication, ils sont un moteur clé de la quatrième révolution industrielle, avec des enjeux considérables de gains en efficacité, sécurité et réduction des coûts. Les politiques publiques (Asie, États-Unis, Europe) encouragent massivement leurs développements pour renforcer leurs positionnements dans cette compétition désormais féroce.

Académie des technologies
Le Ponant – Bâtiment A
19, rue Leblanc
75015 PARIS
+33(0)1 53 85 44 44
secretariat@academie-technologies.fr
www.academie-technologies.fr

ISBN : 979-10-97579-75-3

9 791097 579753

Couverture : Illustration générée à l'aide de l'IA