

SYSTÈMES AUTONOMES : UN POTENTIEL FRANÇAIS, UNE EUROPE INDISPENSABLE

Série « Écosystèmes industriels critiques pour 2035-2050 et technologies sous-jacentes »

À propos de la série « Écosystèmes industriels critiques pour 2035-2050 et technologies sous-jacentes » : issus du séminaire 2024 de l'Académie des technologies, les avis de cette collection proposent une liste (non exhaustive) des technologies et écosystèmes industriels à développer dès maintenant, pour assurer à la France (et l'Europe) la réindustrialisation, la souveraineté et la décarbonation de son économie à l'horizon 2035-2050.

En bref

Un système autonome est un système capable de fonctionner, sans intervention humaine directe. Ces systèmes sont au cœur des transformations numériques de nos sociétés et, bien utilisés, ils pourraient permettre une réduction de l'impact environnemental (optimisation énergétique) ou des intrants. Leurs problématiques éthiques (interactions homme-machine notamment) devront être anticipées et encadrées. Leurs usages concerneront :

- les mobilités, et notamment les véhicules autonomes, pour lesquels l'Europe et la France sont très en retard sur les Etats-Unis et la Chine. Il faudra se concentrer sur quelques atouts (couches dites « basses » des capteurs à la fusion des données, IA de confiance) et permettre les expérimentations sur le terrain, seules capables de fournir les données nécessaires aux IA et de faire grandir l'acceptabilité sociétale. Seul un programme européen d'ampleur permettra d'être au niveau mondial sur le véhicule autonome. Il est par ailleurs nécessaire d'explorer le potentiel français côté drones aérien ou marines ;
- l'industrie et l'agriculture, la France pouvant se positionner sur les robots agricoles ;
- la défense, en favorisant les dualités pour des retombées commerciales civiles.

1. Face aux grands enjeux du XXI^e siècle

Un système autonome est un système capable de fonctionner sans intervention humaine directe. Il perçoit son environnement, prend des décisions et exécute des actions basées sur ses analyses. Ces systèmes reposent sur des technologies avancées telles que l'intelligence artificielle (IA), des capteurs embarqués, de la connectivité et des actuateurs (dispositifs de conversion de l'énergie basés sur les commandes ou signaux reçus) pour accomplir des tâches spécifiques.

Leur fonctionnement repose sur des caractéristiques clés : la perception de l'environnement, l'accumulation et l'analyse massive de données, la simulation et les prédictions probabilistes, la prise de décision, l'exécution d'actions, l'adaptabilité pour s'ajuster et apprendre de nouvelles informations, ainsi que la communication avec d'autres systèmes ou utilisateurs.

Ces systèmes se classent en quatre grandes catégories : mobilités (avec un fort enjeu de sécurité), industrie et agriculture (robotisation pour la productivité), défense (encadrée par des considérations éthiques) et assistance (exécution de tâches humaines).

En matière de mobilité terrestre, l'autonomie dite de niveau 4 (le véhicule prend en charge l'ensemble des fonctionnalités de conduite, dans la grande majorité des conditions d'utilisation, sans supervision du conducteur et en est responsable) permettra des changements importants dans les mobilités routières, tant des personnes que des biens. Elle concernera en premier lieu les robotaxis partagés, les navettes, et bus, les camions (plutôt sur longue distance) et les domaines d'opérations spécifiques (livraison du dernier km, parking, zones de transit) en pénurie de main d'œuvre.

Ces véhicules, conçus spécifiquement pour des usages dédiés, sont en eux-mêmes autant de solutions pour répondre à la demande croissante de mobilité dans les grandes agglomérations (réduction des congestions, meilleure utilisation de l'espace, exigences de sécurité et de transition énergétique) et s'intègrent naturellement dans les systèmes de *Mobility as a service*, d'intermodalité et de gestion des flux.

Ils s'appuient sur les technologies d'aides à la conduite (ADAS) qui équipent les véhicules produits en volume (actuellement dite de niveau 2+, soit un contrôle latéral et longitudinal du véhicule, mais supervisé par le conducteur) et préfigurent les fonctionnalités qui seront embarquées sur les véhicules de volume des prochaines générations.

Leur mise en œuvre est plus rapide que celles nécessitant des infrastructures lourdes ; ils ne nécessitent que peu de financements publics et rendront la mobilité plus accessible pratiquement et économiquement aux personnes contraintes par l'âge ou le handicap.

Les systèmes autonomes s'inscrivent dans différents grands défis :

- **transformation numérique** : avec l'intégration de technologies avancées comme l'IA, les capteurs et les modèles prédictifs, les systèmes autonomes deviennent des piliers de la digitalisation des secteurs du transport, industriels, agricoles et urbains, comme du manufacturing ;
- **transition écologique** : ils peuvent contribuer à la réduction de l'impact environnemental, notamment via l'optimisation énergétique, la gestion des ressources naturelles et la limitation des déchets grâce à des processus automatisés et précis. En matière de mobilité, selon plusieurs études¹, l'usage massif de robotaxis et la baisse induite du nombre de véhicules particuliers pourraient permettre, dans les pays arrivés à maturité automobile, à la fois une réduction du temps perdu dans les embouteillages ainsi qu'une réduction des émissions de gaz à effet de serre lors de la production des voitures. Dans le secteur agricole,

¹ En particulier les études de l'International Transportation Forum, dont les études sur Lisbonne et Helsinki. <https://www.itf-oecd.org/shared-mobility-simulations-helsinki>

les systèmes autonomes contribuent à la modernisation et à la durabilité des exploitations agricoles en réduisant l'utilisation de produits chimiques, l'eau gaspillée en irrigation et la main-d'œuvre devenue rare ;

- **évolution des interactions homme-machine** : les systèmes autonomes obligent à repenser les interactions homme-machine, notamment grâce à des interfaces basées sur l'IA (dont les modèles de langage), dans la vie professionnelle comme dans la vie personnelle ; les questions d'usage et d'éthique doivent être centrales et pensées dès la conception ;

- **sécurité et résilience** : face aux défis croissants en matière de cybersécurité et de sûreté opérationnelle, les systèmes autonomes doivent intégrer des mécanismes robustes pour assurer leur fiabilité et leur adaptabilité dans des environnements complexes et changeants² ;

- **souveraineté** : les données nécessaires pour définir les systèmes autonomes et celles générées par leurs utilisations sont à la fois un élément essentiel de la compétitivité, mais également une source d'intérêt majeur pour d'autres applications commerciales ou militaires.

2. Le positionnement mondial de la France et de l'Europe

L'Europe est partie pour être absente de l'énorme domaine de développement autour des **mobilités routières** avec des risques de dépendance forte aux États-Unis et à la Chine, qui progressent vers une autonomie commerciale de niveau 4. Dans ces deux pays, ces développements se sont multipliés avec des résultats probants. Plus de 1500 voitures autonomes (VA) sans chauffeur de sécurité et 250,000 courses payées de véhicules autonomes par semaine dans 4 villes : Phoenix, San Francisco, Los Angeles et Austin³, par exemple, pour Waymo aux États-Unis. Et tout autant en Chine avec « *Baidu Apollo, qui exploite déjà 1 000 robotaxis à Wuhan et en fait circuler plusieurs centaines d'autres dans une douzaine d'autres grandes villes en Chine, de Pony.ai, dont le nombre de robotaxis sera de 1 000 en 2025 et pourrait monter à 10 000 en 2028, de WeRide, d'AutoX etc.* »⁴. Les dépenses cumulées de développement et de conduite dépassent 100 Mds \$. Waymo (filiale de Google-Alphabet) dépense plus de 1Md\$/an et emploie plus de 1000 personnes. Ils ont parcouru plus de 60 millions de kilomètres⁵ et Waymo simule, après avoir numérisé l'ensemble des voies où ils opèrent, des dizaines de milliards de kilomètres en appliquant sur ces voies numérisées une partie des 20 000 situations de conduite qu'ils ont recensées aux États-Unis.

En Europe, seul Mercedes travaille sur l'ensemble des technologies nécessaires, mais expérimente aux États-Unis et en Chine sur voie publique. Il n'y a rien d'équivalent, ni en conduite autonome avec ou sans chauffeur de sécurité, ni en simulation en Europe. Et il n'y a pas d'exploitation commerciale de véhicules de niveau 4 sur route ouverte du niveau de ce qui est fait par Waymo ou par Baidu par exemple.

En France : Valeo et plusieurs start-ups développent des composants des couches basses des technologies (voir graphique 1 en annexe), caméras, lidars⁶, radars, positionnement, cybersécurité et les couches d'IA qui y sont associées, jusqu'à la fusion de données. Milla subsiste avec ses navettes partiellement autonomes.

L'expérience française en matière d'automatismes (métro, avions, trains) et d'IA de confiance n'est que très peu utilisée pour le développement de véhicules autonomes par manque de leader-intégrateur, ni Stellantis, ni Renault ne jouant ce rôle, ayant donné la priorité à l'électrification de leurs gammes. Très peu de roulages sont faits. Transdev, Keolis et RATP expérimentent des systèmes partiellement autonomes (navettes guidées ayant appris un trajet).

² La fiction dystopique d'Alain Damasio dans Vallée du silicium (2024, Albertine/Seuil) illustre les craintes qui sont d'ores et déjà envisagées.

³ <https://waymo.com/blog/2025/05/scaling-our-fleet-through-us-manufacturing>

⁴ H.de Tréglodé « Robotaxis : la révolution a commencé, mais elle fait peur aux européens... » Transport, Infrastructures et Mobilités, Avril 2025 après une mission de France Stratégie en Chine.

⁵ <https://waymo.com/safety/>

⁶ Technologie de télédétection par faisceaux lasers.

Côté **mobilités aériennes**, les grandes entreprises de l'aéronautique civile, Airbus, Dassault Aviation, Thales et Safran, font des développements de fonctions d'automatisation qui vont jusqu'à des vols de démonstrateurs technologiques, mais sans commercialisation, à ce stade. De nombreuses startups se lancent dans l'automatisation d'opérations de petits systèmes de drones avec l'idée d'en faire une première étape vers l'automatisation de plus gros systèmes.

Dans le domaine de **l'agriculture autonome**, l'écosystème français est assez dynamique. L'une des entreprises phares est Naïo Technologies, qui développe des robots autonomes pour la récolte et le désherbage sans produit chimique, ce qui constitue un pas important vers une agriculture plus respectueuse de l'environnement. Ces solutions sont particulièrement attractives pour les exploitations bio, où le besoin de technologies durables est crucial.

En matière de **défense**, les systèmes autonomes se distinguent par leur capacité de détection, d'intégration dans les opérations en réseau et d'action dans un cadre éthique cardinal.

Dans le domaine aérien, les États-Unis ainsi qu'Israël ont développé des drones de reconnaissance et surveillance depuis de nombreuses années, qui dominent le marché occidental. L'Europe, et notamment la France, s'est pour l'instant concentrée sur les petits drones qui sont déployés dans les unités opérationnelles. Néanmoins, l'Europe et notamment la France ont les capacités techniques et industrielles pour être au niveau des États-Unis ; plusieurs démonstrateurs sont en développement pour un horizon de mise en service dans les années 2030.

Les États-Unis semblent plus nettement avancés en robotique militaire terrestre.

3. Les technologies clefs à horizon 2035-2050

- Intelligence artificielle : IA prédictive pour anticiper les situations et optimiser les décisions. Apprentissage fédéré et adaptatif pour améliorer l'autonomie. Fusion des informations provenant de capteurs différents pour une perception unique ou probabilisée de la réalité ;
- De nouvelles technologies telles que le *Vision Language Action* qui unifie perception, compréhension du langage et contrôle par apprentissage ;
- Plateformes complètes de simulation numérique (éventuellement avec un peu de *hardware in the loop*⁷) pour les mobilités autonomes, plateformes de simulations physiques pour les applications de robotique ;
- *Cloud et edge computing*⁸ : traitement délocalisé dans le système automatisé pour des analyses en temps réel ;
- Cybersécurité et *blockchain*⁹ : solutions intégrées pour protéger les systèmes contre les cyberattaques et garantir la traçabilité et la sécurité des échanges de données ;
- Internet des objets (IoT) : pour une communication fluide entre les composants autonomes ;
- Réseaux de communication : 5G/6G pour des connexions à faible latence et haut débit ;
- Technologies robotiques : actuateurs avancés pour des mouvements précis et robustes ;
- Réalité augmentée et virtuelle (AR/VR) : interfaces immersives pour l'interaction homme-machine.

Au-delà du numérique et des exemples cités (véhicules, drones de surveillance, de transport ou de combats aériens, marins, sous-marins, agriculture, défense), d'autres secteurs pourraient être concernés et donc à explorer.

⁷ Technologie avancée qui intègre avec une communication rapide modèles virtuels et contrôleurs réels.

⁸ L'edge computing est une technique d'optimisation utilisée dans le « cloud » (hébergement des données à distance) pour minimiser les besoins en bande passante.

⁹ La blockchain est une technologie de stockage et de transmission d'informations. Elle est basée sur un principe d'absence d'autorité centrale.

Enfin, les technologies liées aux systèmes autonomes sont par nature « duales » et se transposent relativement facilement d'un secteur d'activité à un autre. Le traitement de l'image par exemple peut être utilisé sur un véhicule autonome, civil ou militaire, terrestre ou pas, comme en contrôle qualité en production ou en reconnaissance faciale.

4. Les recommandations de l'Académie des technologies

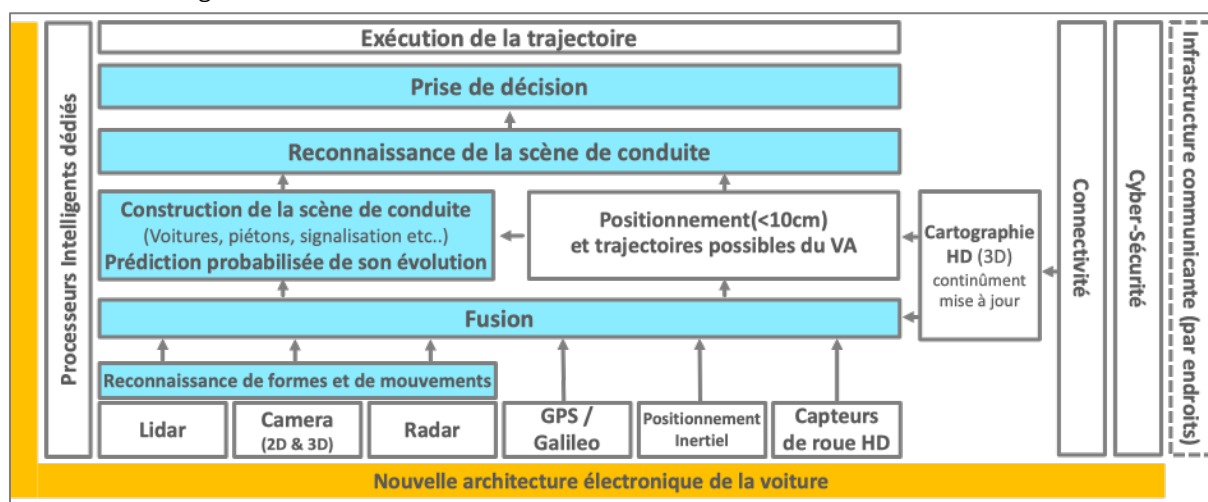
Le retard français, en l'absence de leader en France, semble irrattrapable pour le stack complet de technologie des véhicules autonomes. Il faut :

- concentrer les efforts de R&D et de soutien sur :
 - o les couches basses du stack de technologies (des capteurs à la fusion de données, voire à la simulation de scénarios probabilisés) ;
 - o l'IA de confiance et les processeurs associés fonctionnant en *edge* sous contrainte de temps garanti (utiles pour tous systèmes autonomes) ;
 - o l'exploration du potentiel français pour les drones aériens ou marins, les robots agricoles ;
- pousser à un programme européen substantiel regroupant des constructeurs européens et acteurs des composants partageant les données de conduite, qui permettent l'apprentissage de l'intelligence artificielle du système autonome (dont le coût d'obtention a été gigantesque) et la propriété intellectuelle, certains éléments logiciels voire les composants, capteurs et actionneurs ;
- faire évoluer la réglementation pour permettre des applications de masse en niveau 4. Cela nécessite une modification significative de la Convention de Vienne et surtout la définition d'un process de certification du triplet [voiture / zone de roulage / Operation Design Domain¹⁰], mais pourrait s'inspirer de ce qui est fait par le Department of Motor Vehicles en Californie ;
- faire évoluer les conditions d'application du niveau 3 (garantissant que le conducteur puisse reprendre la main sur son véhicule dans un délai compatible avec la capacité du système) et ainsi permettre le développement d'un marché dont les technologies sont une composante importante du niveau 4 ;
- rénover sur ces bases le cadre réglementaire européen à partir de données issues de l'EU et selon un processus qualifié garantissant une sécurité de conduite très supérieure aux meilleures pratiques européennes de conduite manuelle ;
- comme toute innovation d'usage radicale, des expérimentations en vraie grandeur doivent être menées en parallèle des développements techniques pour préparer l'appropriation par les usagers potentiellement avec les opérateurs actuels de transport, mais aussi pour identifier et traiter les questions d'ordre éthique ou sociétal que leurs usages soulèvent en situations réelles ;
- ne pas soutenir un projet de véhicule autonome uniquement français avec un investissement très inférieur à celui de Waymo ou à ceux de la Chine. Mais favoriser les partenariats avec les pays leaders ;
- accentuer les efforts sur des systèmes de niche comme l'agriculture autonome, pour laquelle l'expérimentation est beaucoup plus accessible que pour la mobilité sur route.

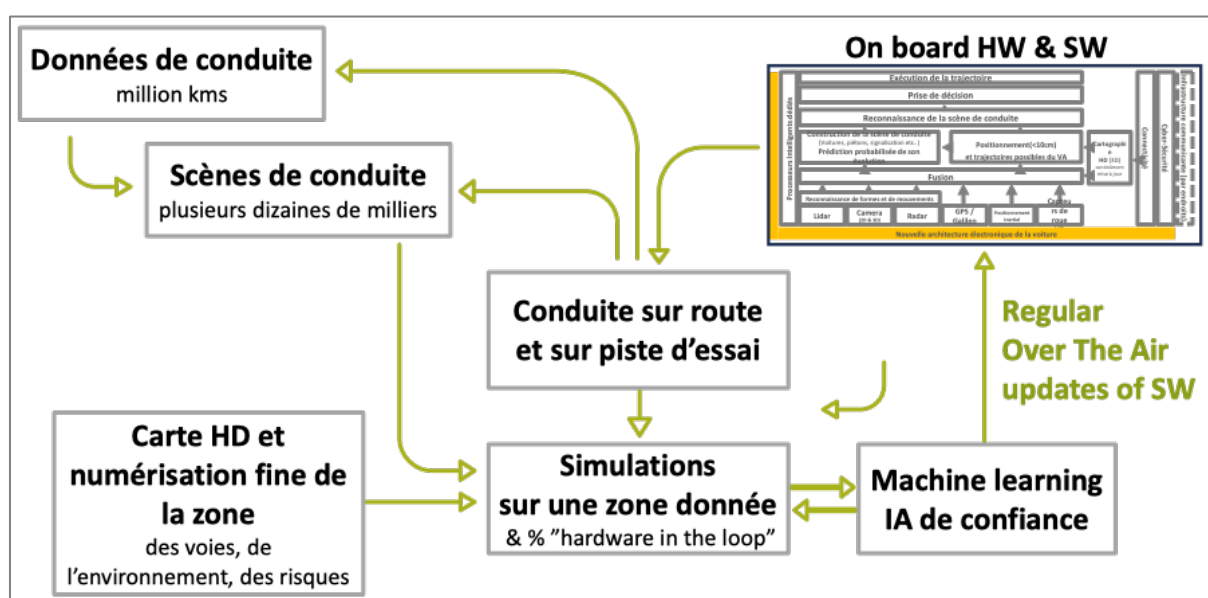
En matière de **défense**, il faut exploiter les développements de démonstrateurs de systèmes autonomes pour que les retombées profitent aux acteurs du secteur civil. Un acteur reste à identifier pour structurer ces transferts possibles.

¹⁰ Son contexte de fonctionnement.

Graphique 1 : Exemple du stack d'un véhicule autonome (hors actionneurs). En bleu les domaines où Machine learning et IA de confiance sont nécessaires



Graphique 2 : Le process de conception (Google-Waymo depuis 2009)



Source : Patrick Pélat, séance « Quelle place du véhicule autonome dans la mobilité de demain ? », Académie des technologies, 27 janvier 2021

Auteurs principaux (liens d'intérêts en relation avec le thème, le cas échéant) : Patrick Pélat ; Bruno Stoufflet. Les auteurs remercient Guillaume Devauchelle, François Lefaudeaux et Didier Evrard pour leurs relectures attentives.

La déontologie académique exige que tout contributeur à l'élaboration d'un rapport n'apporte au collectif que sa seule expertise, en se gardant de promouvoir tout intérêt personnel, institutionnel ou corporatiste. L'indépendance de nos positions est assurée par le caractère collectif de nos travaux. Ce document a été validé par l'Académie des Technologies selon la procédure disponible sur le site de l'Académie.