

1 Opération de R&D dans le cadre de l'activité de l'entreprise

Le développement de contrôleurs fiables pour les véhicules autonomes et connectés (CAVs) repose sur la connaissance en temps réel de nombreuses variables dynamiques et environnementales (distances, vitesses, angles, accélérations, conditions d'adhérence, etc.). Or, la mesure simultanée de ces grandeurs entraîne des coûts élevés, certains capteurs spécialisés pouvant dépasser plusieurs milliers d'euros, tandis que d'autres variables restent inaccessibles faute de capteurs adaptés. Dans ce contexte, la fiabilité des capteurs et actionneurs est cruciale, car toute défaillance ou cyberattaque peut compromettre la sécurité.

Pour pallier ces limitations, les observateurs non linéaires offrent une solution efficace en estimant en temps réel les variables d'état non mesurables, renforçant ainsi la robustesse et la résilience des systèmes embarqués. Le projet VAHALSECU de SEGULA Technologies s'inscrit dans cette démarche : il vise à développer un contrôleur résilient pour le régulateur de vitesse adaptatif coopérative (CACC), capable de fonctionner avec une instrumentation réduite ou en cas de communication corrompue par une cyberattaque.

2 Indicateurs externes de recherche

Ces travaux bénéficient d'une thèse CIFRE qui a débuté le 01/06/2023 sur le sujet VEHALSECU avec M. NGUYEN Quang Huy (ANRT 2022/1732) « Développement d'une carte électronique embarquée basée sur des algorithmes d'estimation avancés pour l'amélioration de la résilience du véhicule autonome et connecté ». Cette thèse est réalisée en collaboration avec l'IUT Henri Poincaré de Longwy au sein du centre de recherche en automatique de Nancy (CRAN) à l'université de Lorraine. Les recherches menées au CRAN concernent l'automatique définie comme la science de la modélisation, de l'analyse, de la commande et de la supervision des systèmes dynamiques mais aussi le traitement du signal et le génie informatique.

Les premiers travaux de cette étude ont débouché sur plusieurs publications :

- (Diouf et al., 2023) : M. Diouf, A. Zemouche, et M. Haddad, « Finite-Time and Exact Cyber-Attack Estimation for Connected Autonomous Vehicles », présenté au premier Congrès Annuel de la Société Française d'Automatique de Génie Industriel et de Productique, Marseille, juin 2023
- (Nguyen et al., 2024): Q. H. Nguyen, O. Sadki, H. Rafaralahy, M. Haddad, et A. Zemouche, « Cyberattack Detection by Using a Discrete-Time Model-Based Unknown Input Observer »,

3 Objet de l'opération de R&D

Dans le cadre de ce projet, l'objectif principal est de concevoir un capteur embarqué intelligent capable d'estimer des grandeurs non mesurées et de détecter les perturbations liées aux cyberattaques ou aux défauts capteurs. Ce capteur, renforcé par des algorithmes d'estimation avancés, agit comme un capteur logiciel : il associe les mesures radar aux véhicules, reconstruit les variables critiques et distingue les anomalies physiques des attaques malveillantes. Ce travail s'inscrit dans une démarche de résilience pour les véhicules autonomes et connectés, en particulier dans trois cas d'étude : les régulateurs de vitesse adaptatifs (SA-ACC), le suivi de véhicules en platooning, et la prévention du renversement.

3.1 Objectifs et problématique

Cette opération de R&D se concentre sur la conception et l'intégration du capteur embarqué, en lien direct avec les problématiques d'estimation et de sécurité évoquées précédemment. Nous allons travailler pour ce faire autour des véhicules de test Qcar (Figure 1).



Figure 1 : Image de Qcar de Quanser

Les objectifs principaux sont :

1. Définir l'architecture technique de la carte en choisissant des composants adaptés aux besoins fonctionnels.
2. Réaliser un routage optimisé assurant la fiabilité électrique et la fabricabilité de la carte.
3. Produire un prototype fonctionnel de la carte électronique en autonomie, du sourcing à l'assemblage.
4. Vérifier le bon fonctionnement matériel de la carte via des tests encadrés par un protocole structuré.

3.2 Démarche scientifique

La démarche scientifique adoptée dans ce projet suit une approche systématique allant de la conception à la fabrication expérimentale, comme illustré à la Figure 2.

1. **Conception et spécification** : Définition de l'architecture matérielle et logicielle de la carte embarquée, en sélectionnant des composants adaptés (microcontrôleurs, interfaces) pour répondre aux besoins de fiabilité et de temps réel.
2. **Implémentation technique** : Réalisation des schémas électriques et du routage PCB via des outils CAO (KiCad), suivie de la programmation embarquée pour intégrer les fonctionnalités d'estimation et de détection. Cette phase optimise la cadence de transmission, essentielle pour les applications critiques.
3. **Validation et expérimentation** : Mise en place de protocoles de tests structurés, couvrant les aspects matériels (alimentation, courts-circuits) et fonctionnels (communication, transfert de données).
4. **Bilan critique** : Analyse des résultats obtenus par rapport aux objectifs initiaux, avec identification des perspectives d'amélioration pour une intégration future dans des systèmes réels.

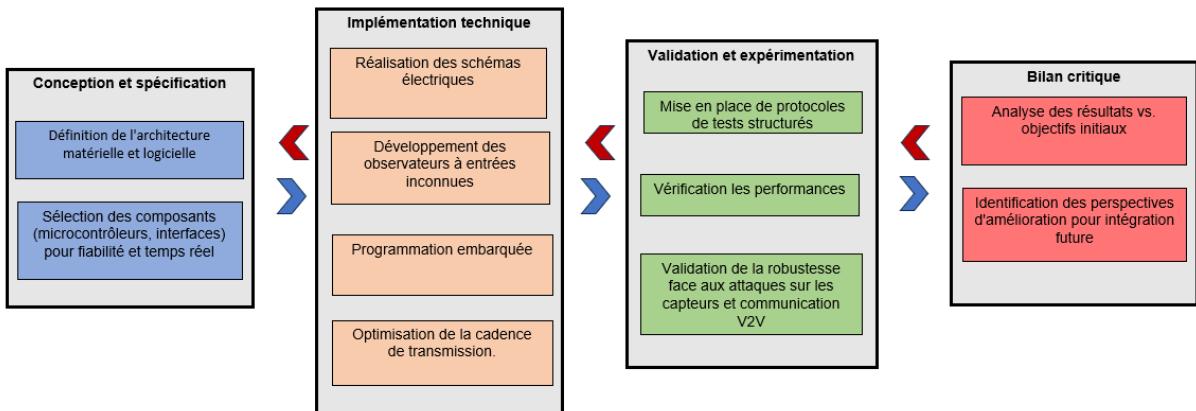


Figure 2 : Démarche scientifique

3.3 État de l'art

3.3.1 Travaux de recherche antérieurs et rappel des indicateurs antérieurs

Les travaux antérieurs sur les véhicules autonomes et connectés (CAV) se sont largement concentrés sur le contrôle coopératif adaptatif (CACC) et la sécurité des communications V2V, en particulier face aux cyberattaques. Dans le cadre du projet VAHALSECU de SEGULA Technologies, ces recherches ont donné lieu à une thèse CIFRE dirigée par NGUYEN Quang Huy, ainsi qu'à plusieurs publications portant sur la détection d'attaques malveillantes et l'estimation d'états non linéaires (Figure 3).

Les efforts se sont portés sur le développement d'observateurs avancés (comme des observateurs à entrer inconnue, distribués) capables d'estimer avec précision les signaux d'attaques (par exemple, injections de données falsifiées) et de compenser les perturbations, tout en intégrant des scénarios de trafic mixte (véhicules autonomes et humains).

- Nguyen et al. (2023) ont proposé un observateur pour l'estimation de cyberattaques dans les véhicules connectés.
- Nguyen et al. (2024) ont étendu cela à des observateurs inconnus pour isoler les attaques en peloton de véhicules.

Ces indicateurs antérieurs ont établi une base solide pour les développements à venir, en démontrant la faisabilité théorique et simulée. Pour préparer la validation embarquée, les tests ont été adaptés à des plateformes comme le QCar de Quanser, en intégrant des capteurs réels (IMU, GNSS) et des protocoles V2V (Wi-Fi 6), afin de passer de la simulation à l'implémentation physique tout en maintenant les performances sécuritaires.

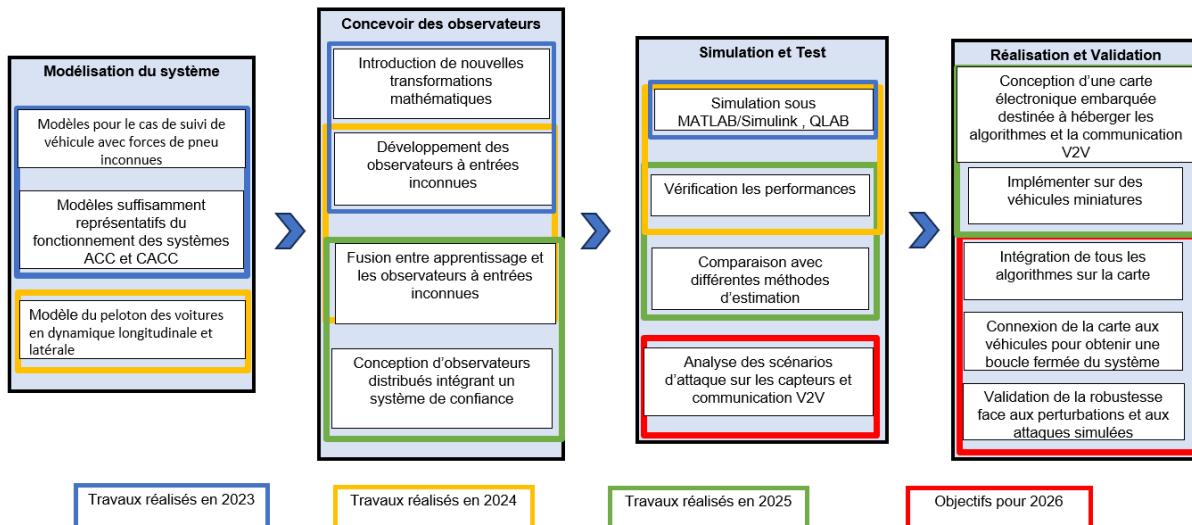


Figure 3 : La démarche scientifique globale du projet VAHALSECU

3.3.2 Recherche bibliographique / Etat des techniques existantes

Le domaine automobile a innové en matière de dispositifs de sécurité. Ces derniers se répartissent généralement en deux catégories :

- **Sécurité passive** : désigne les composants du véhicule qui agissent pendant ou après un accident.
Exemples : ceinture, airbags, tableau de bord rembourré...
- **Sécurité active** : désigne les technologies qui anticipent et évitent les accidents.
Exemples : freinage automatique d'urgence (AEB), contrôle électronique de la stabilité (ESC), détection des angles morts (BSD)...

Les premiers travaux sur la sécurité active se sont orientés vers l'amélioration de la stabilité et de la maniabilité des véhicules, afin d'atténuer les effets dynamiques indésirables pouvant compromettre le contrôle du conducteur (Bengler et al., 2014). Ces recherches ont abouti à plusieurs dispositifs innovants basés sur des capteurs internes au véhicule, notamment :

- **Système antibloquage des roues (ABS)** : conçu pour assister le freinage, il empêche le blocage des roues lors d'un freinage soudain, permettant ainsi de conserver la capacité de direction du véhicule.
- **Contrôle électronique de la stabilité (ESC)** : dispositif antidérapage optimisant la tenue de route en détectant les pertes d'adhérence (notamment dans les virages), et en intervenant par un freinage ciblé sur une ou plusieurs roues pour corriger la trajectoire.

Grâce à l'intelligence embarquée, le véhicule peut désormais agir automatiquement sur la direction, l'accélération et le freinage, sans intervention humaine directe.

Ces fonctions sont regroupées sous le terme **ADAS** (*Advanced Driver Assistance Systems*). Elles utilisent à la fois des capteurs d'observation interne (véhicule) et externe (environnement). Parmi ces systèmes (Jiménez et al., 2016) :

- **Forward Collision Warning (FCW)** : aide le conducteur à éviter ou atténuer les collisions par l'arrière grâce à des alertes visuelles, sonores et/ou haptiques.

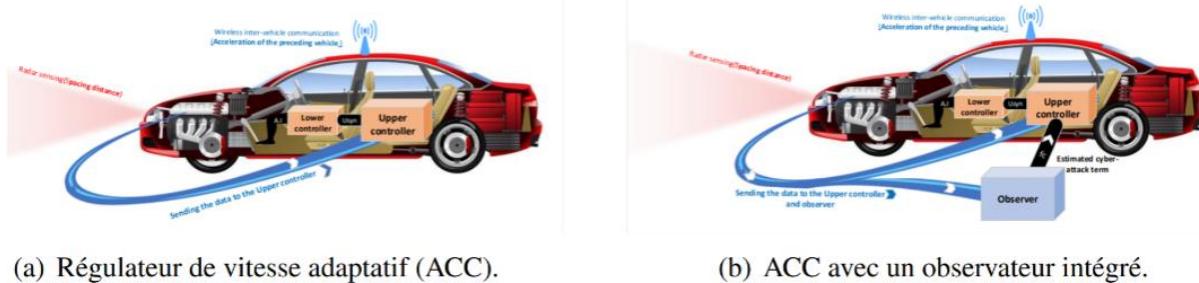
- **Automatic Emergency Brake (AEB)** : freine automatiquement en cas de risque imminent de collision, en particulier à basse vitesse (moins de 50 km/h).
- **Adaptive Cruise Control (ACC)** : régule automatiquement la vitesse du véhicule afin de maintenir une distance de sécurité avec celui qui précède.
- **Système de maintien de voie (LKS)** : veille au maintien du véhicule dans sa voie, avec corrections automatiques.
- **Lane Change Assistant (LCA)** : réduit les risques de collision lors des changements de voie, notamment à grande vitesse sur autoroute.

Le véhicule autonome peut être assimilé à un robot à roues. Les premières versions se sont largement appuyées sur des technologies issues de la robotique mobile. Un exemple marquant est le projet NavLAB (National Autonomous Vehicle Laboratory), développé par l'Université Carnegie Mellon (Thorpe et al., 1988). En tant que robot, un véhicule autonome peut être décrit selon les quatre primitives de la robotique (Murphy, 2019), présentées dans le Tableau 1.

Sentir (Sense)	Rassemble des données à partir des capteurs embarqués pour caractériser l'état interne du robot ainsi que les conditions de son environnement. On distingue les capteurs proprioceptifs (ex. : IMU, codeurs de roues) qui mesurent des variables internes, et les capteurs extéroceptifs (ex. : caméras, LIDAR, RADAR, GPS) qui captent des informations sur l'environnement externe.
Modéliser (Model)	Traite les données issues de la perception pour construire une représentation du monde. Cela comprend la localisation du robot, l'identification des zones accessibles à la navigation, ainsi que la détection des obstacles fixes ou mobiles, notamment via des techniques telles que le SLAM.
Planifier (Plan)	Élabore une stratégie de déplacement en définissant un objectif à atteindre, puis en calculant un itinéraire ou une trajectoire optimale pour y parvenir. L'itinéraire désigne une séquence de points dans l'espace, tandis que la trajectoire prend aussi en compte le facteur temps et les contraintes dynamiques.
Agir (Act)	Génère les commandes nécessaires aux actionneurs (direction, accélération, freinage...) afin que le robot suive la trajectoire planifiée, tout en réagissant aux éventuelles perturbations ou ajustements en temps réel.

Tableau 1 : Les quatre primitives fonctionnelles d'un robot autonome (Murphy, 2019).

Ce travail agira sur la première primitive (sensorielle) afin de guider au mieux le véhicule. Il faudra donc développer une carte électronique avec plusieurs capteurs pour observer l'environnement du véhicule. En ce qui concerne les cyber-attaques et la défaillance des systèmes ADAS, notamment le système ACC. La thèse introduit un troisième module, qui est la carte électronique conçue par ce stage, au sein du contrôleur ACC : un observateur intelligent, capable d'estimer en temps réel l'impact d'une éventuelle cyberattaque (Figure 4). Cette estimation est ensuite transmise au module supérieur du contrôleur, qui l'intègre dans son processus de décision afin de générer une commande fiable pour le véhicule. Ainsi, le contrôleur gagne en robustesse face aux attaques informatiques.



(a) Régulateur de vitesse adaptatif (ACC).

(b) ACC avec un observateur intégré.

Figure 4 : Détection de cyberattaques et résilience des systèmes ADAS.

Au vu de la criticité de l'application, la carte embarquée qui servira d'observateur devra avoir une cadence de transmission élevée.

Enfin, nous allons rappeler ce qu'est un PCB, ou circuit imprimé. C'est un support physique qui permet d'interconnecter des composants électroniques par l'intermédiaire de pistes conductrices gravées sur une ou plusieurs couches de matériau isolant, généralement en fibre de verre époxy (FR-4). Une couche est connectée à une autre couche par l'intermédiaire d'un trou traversant ou via métallisé dans la Figure 5.

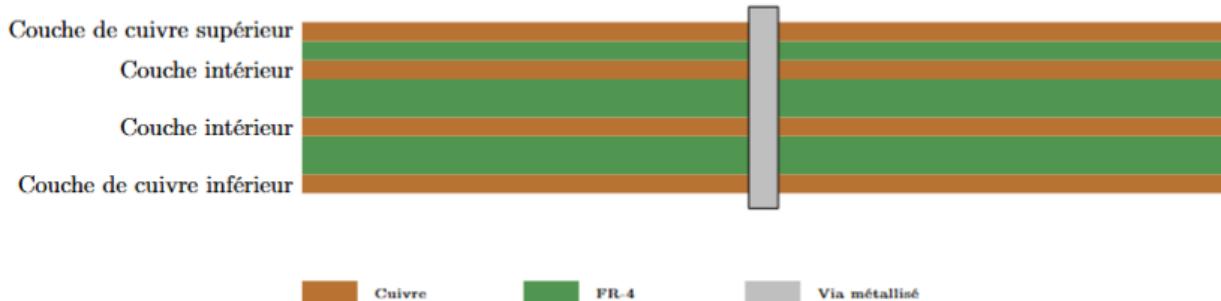


Figure 5 : Schéma d'un PCB à 4 couches en coupe verticale.

Il sert à la fois de structure mécanique et de réseau de connexion électrique, assurant la compacité, la fiabilité et la reproductibilité des assemblages électroniques. Les PCBs peuvent être simple face, double face ou multicouches, selon la complexité du circuit à réaliser.

Leur conception prend en compte des paramètres électriques (impédance, couplage, pertes) et mécaniques (dimensions, rigidité, dissipation thermique). Le PCB est utilisé dans presque tous les dispositifs électroniques modernes, des cartes mères d'ordinateurs aux systèmes embarqués en robotique (Jr & Holden, 2016) et (Brooks & Adam, 2021).

3.3.3 Etat des systèmes existants

3.3.3.1 Commsignia

Commsignia développe des solutions V2X de bout en bout afin de faciliter le déploiement de fonctions pour véhicules autonomes. L'entreprise propose un intergiciel ainsi que des applications de partage de données issues des capteurs, contribuant ainsi à l'intégration des véhicules dans des écosystèmes de mobilité intelligente. Ses produits incluent notamment :

- des systèmes **OBU** (*On-Board Units*),
- des systèmes **RSU** (*Road-Side Units*),
- des logiciels intégrés pour équipementiers.

Ces solutions soutiennent des fonctions clés liées à la connectivité V2X, à la sécurité et aux applications de conduite autonome. Un exemple représentatif est le ITS-OB4, un système OBU déjà impliqué dans des projets majeurs tels que US DOT ou EU C-Roads (Figure 6). Ce dispositif présente une architecture matérielle robuste qui peut être réutilisée pour le développement de la carte observateur (Commsignia, 2025).

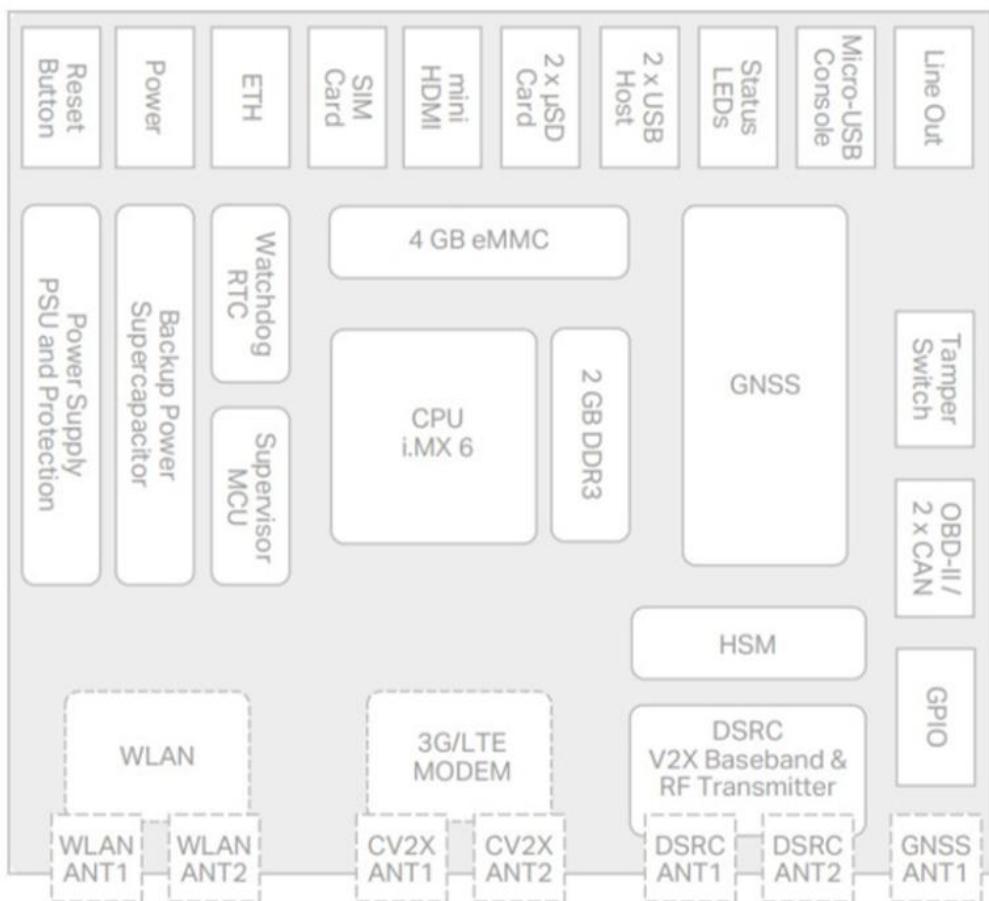


Figure 6 : Représentation générale de l'architecture de la ITS-OB4 de (Commsignia, 2025).

3.3.3.2 XTENTH-CAR

Le projet **XTENTH-CAR** (*eXperimental one-TENTH scaled vehicle platform for Connected autonomy and All-terrain Research*) a pour objectif de rendre la recherche expérimentale sur les Véhicules Autonomes Connectés (CAV) et les Véhicules Terrestres Autonomes (AGV) plus accessible, grâce à des coûts initiaux réduits et à des architectures matérielles et logicielles AV complètes (Figure 7).

- Cette plateforme, comparable au projet **X-CAR** (une plateforme expérimentale à taille réelle), favorise un développement efficace et interopérable entre les véhicules à petite échelle et ceux à grande échelle.
- En outre, **XTENTH-CAR** inclut le développement d'une architecture de carte électrique dédiée pour la voiture (Mehr et al., 2023).

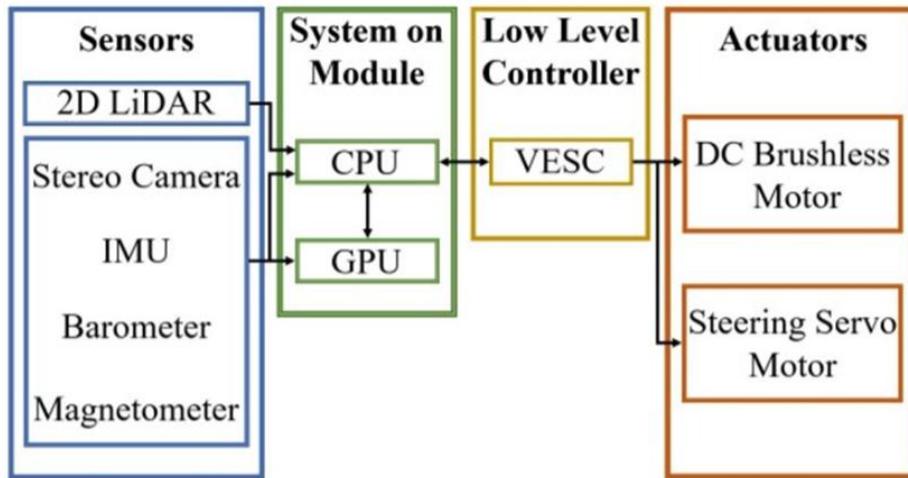


Figure 7 : Représentation générale de l'architecture de XTENTH-CAR (Sivashangaran & Eskandarian, 2023).

3.3.3.3 HADES

Le **Hades Flight Control System** est un projet **open-source** développé par (Salmony, 2019/2025) pour la commande de vol, conçu entièrement **à partir de zéro**. Il est principalement destiné aux **drones autonomes à voilure fixe**, afin de leur permettre d'exécuter de manière autonome diverses tâches : **décollage, atterrissage, navigation par points de passage, livraison de charges utiles**, etc.

Le projet propose **plusieurs modèles de cartes embarquées**. La carte principale d'HADES est celle qui regroupe le plus de fonctionnalités. Elle intègre des microcontrôleurs **STM32 F4 et H7**, permettant une **répartition des tâches** entre les deux MCU (Figure 8).

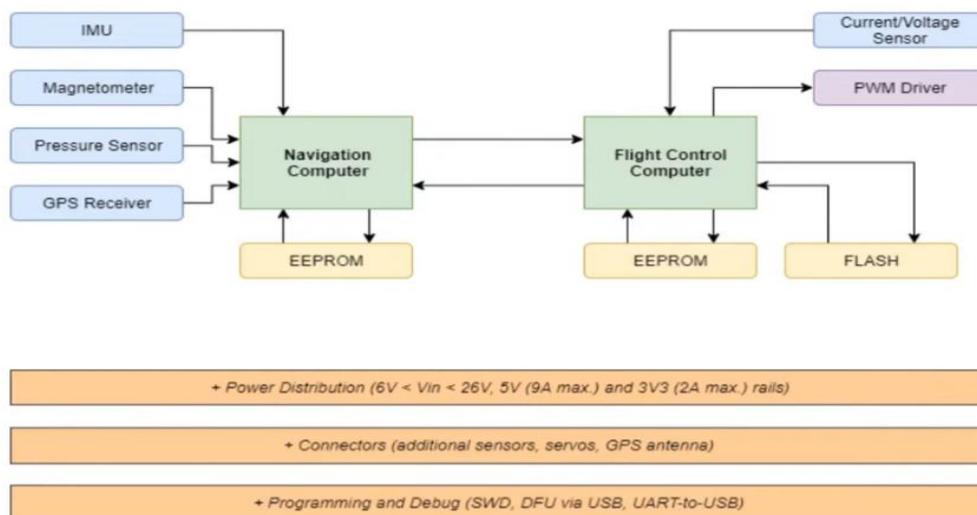


Figure 8 : Représentation générale de l'architecture de HADES (Salmony, 2019/2025).

Ces projets existants serviront de référence pour le développement de l'architecture de la carte. Les caractéristiques particulièrement intéressantes à analyser sont : le type de communication utilisé, les connexions disponibles, les capteurs intégrés, le type et la taille des mémoires, le protocole de transmission, le firmware embarqué, ainsi que la source d'alimentation.

3.3.4 Références Bibliographiques

- Bengler, K., Dietmayer, K., Farber, B., Maurer, M., Stiller, C., & Winner, H. (2014). Three Decades of Driver Assistance Systems: Review and Future Perspectives. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 6(4), 6-22. <https://doi.org/10.1109/MITS.2014.2336271>
- Brooks, D., & Adam, J. (2021). *PCB design guide to via and trace currents and temperatures*. Artech House.
- Commsignia. (2025). *Commsignia*. <https://commsignia.com/products/obu>
- Diouf, M., Zemouche, A., & Haddad, M. (2023, juin 7). *Finite-Time and Exact Cyber-Attack Estimation for Connected Autonomous Vehicles*. 1 er Congrès Annuel de la Société Française d'Automatique de Génie Industriel et de Productique, Marseille.
- Hammerstad, E., & Jensen, O. (1980). Accurate Models for Microstrip Computer-Aided Design. *1980 IEEE MTT-S International Microwave symposium Digest*, 407-409. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.1980.1124303>
- Jiménez, F., Naranjo, J. E., Anaya, J. J., García, F., Ponz, A., & Armingol, J. M. (2016). Advanced Driver Assistance System for Road Environments to Improve Safety and Efficiency. *Transportation Research Procedia*, 14, 2245-2254. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.240>
- Jr, C. F. C., & Holden, H. (2016). *Printed Circuits Handbook, Seventh Edition*. McGraw-Hill Education.
- Mehr, G., Ghorai, P., Zhang, C., Nayak, A., Patel, D., Sivashangaran, S., & Eskandarian, A. (2023). X-CAR : An Experimental Vehicle Platform for Connected Autonomy Research Powered by CARMA. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 15(2), 41-57. <https://doi.org/10.1109/MITS.2022.3168801>
- Murphy, R. R. (2019). *Introduction to AI Robotics* (2^e éd.). MIT Press.
- Salmony, P. (2025). *HadesFCS* [C]. <https://github.com/pms67/HadesFCS> (Édition originale 2019)
- Sivashangaran, S., & Eskandarian, A. (2023). *XTENTH-CAR: A Proportionally Scaled Experimental Vehicle Platform for Connected Autonomy and All-Terrain Research* (No. arXiv:2212.01691). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.01691>
- Texas Instruments. *WEBENCH Power Designer : Online tool for custom power-supply design*. Disponible sur : <https://webench.ti.com/power-designer/switc...> Consulté le 13 août 2025. (s. d.). Bing. Consulté 14 octobre 2025, à l'adresse https://www.bing.com/search?q=Texas+Instruments.+WEBENCH+Power+Designer+%3A+Online+tool+for+custom+power-supply+design.+Disponible+sur+%3A+https%3A%2F%2Fwebench.ti.com%2Fpower-designer%2Fswitching-regulator.+Consulté+le+13+août+2025.&cvid=1a7de2eb55154183af05d8308ab745c5&gs_lcrp=EgRIZGdlKgYIABBFGDkyBggAEEUYOTIICAEQ6QcY_FXSAQc1MTJqMGo5qAllsAIB&FORM=ANAB01&PC=DCTS
- Thorpe, C., Hebert, M. H., Kanade, T., & Shafer, S. A. (1988). Vision and navigation for the Carnegie-Mellon Navlab. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 10(3), 362-373. <https://doi.org/10.1109/34.3900>

3.3.5 Bilan critique

L'état de l'art présenté demeure limité par la spécificité de notre observateur et par la nature des problèmes que nous cherchons à résoudre dans le cadre des véhicules connectés. À ce jour, il n'existe pas de littérature librement accessible décrivant de manière exhaustive le développement d'une carte embarquée aussi complexe, allant de la définition de l'architecture jusqu'à la fabrication physique et la programmation bas niveau.

Il nous revient donc de rassembler des contributions issues de domaines variés tels que l'alimentation et l'électronique de puissance, la communication sans fil et les télécommunications, la compatibilité électromagnétique, entre autres. Par souci de lisibilité, notre état de l'art reste volontairement général et n'entre pas dans les détails techniques propres à chacun de ces champs disciplinaires. Néanmoins, il est essentiel de garder à l'esprit que la conception d'une telle carte mobilise un spectre très large de connaissances et de recherches interdisciplinaires.

Nous pouvons d'ailleurs voir cette pluridisciplinarité sur les systèmes existants qui seront des exemples pour notre développement de carte électronique. Ces systèmes ne sont pas exactement des capteurs embarqués renforcé par des algorithmes d'estimation avancés qui jouent le rôle de capteurs logiciels mais ont des architectures plus ou moins proche du capteur électronique, que nous voulons développer, qui attribue les mesures radar brutes à des véhicules individuels et estime les trajectoires des véhicules ; reconstruit les variables nécessaires aux systèmes de prévention ; détecte et différencie les cyber-attaques et les défauts de capteurs.

3.4 Aléa et verrou

Pour rappel les objectifs principaux peuvent être résumé par le développement d'un prototype de carte embarquée fonctionnel et vérifier la validité de son fonctionnement pour une estimation rapide et fiable des cyberattaques, en combinant les travaux de la thèse CIFRE sur les outils mathématiques avancés et l'apprentissage neuronal adaptatif.

L'électronique constitue une discipline appliquée de la science. Dans ce projet, nous serons donc principalement confrontés à des problématiques techniques et concrètes plutôt qu'à des aspects théoriques ou abstraits. Ce travail s'inscrit dans une démarche de recherche et développement, puisque le prototypage d'une carte embarquée destinée à l'estimation avancée et à la détection des cyberattaques dans les véhicules autonomes et connectés soulève nécessairement un ensemble de questionnements :

- Quels sont les besoins précis auxquels la carte embarquée doit répondre ?
- Quels capteurs doivent être intégrés pour fournir, en temps réel, les mesures nécessaires aux algorithmes d'estimation ?
- Quelle capacité mémoire est indispensable pour traiter efficacement les informations ?
- Quels sont les besoins en vitesse de transmission pour les différentes données, et quelles technologies ou protocoles de communication privilégier ?
- Quel type d'unité de traitement et de calcul choisir pour garantir le bon fonctionnement des programmes, susceptibles d'être exécutés en parallèle afin de répondre aux contraintes de criticité de l'application ?

La littérature ou les systèmes existants que nous avons trouvé ne répondent pas ou partiellement à ces questions qui doivent faire l'objet d'un travail de recherche, d'hypothèses et de calculs.

4 Contribution scientifique, technique ou technologique

4.1 Nouvelles connaissances acquises

Cette opération de R&D a apporté des bases sur l'architecture d'une carte dédié à la communication entre véhicules et la vitesse des données nécessaires pour le bon fonctionnement de notre système d'estimation des trajectoires des véhicules, de reconstruction des variables nécessaires aux systèmes de prévention et la détection des cyber-attaques et des défauts de capteurs. Nous pouvons par exemple prendre le cas de la Figure 9 qui nécessite une carte embarquée avec une architecture capable de répondre à des contraintes de temps de réponse et la gestion de plusieurs variables en parallèle comme la distance entre le véhicule en amont et en aval.

Nous avons également exploré l'ensemble des technologies existante dont certaines pourraient être des alternatives plus performantes selon notre budget et les disponibilités comme le protocole de communication sans fil, C-V2X qui est le plus performant sur le marché actuellement mais qui nécessite plus de ressource financière que la Wi-fi 6 que nous avons choisis de mettre en place.

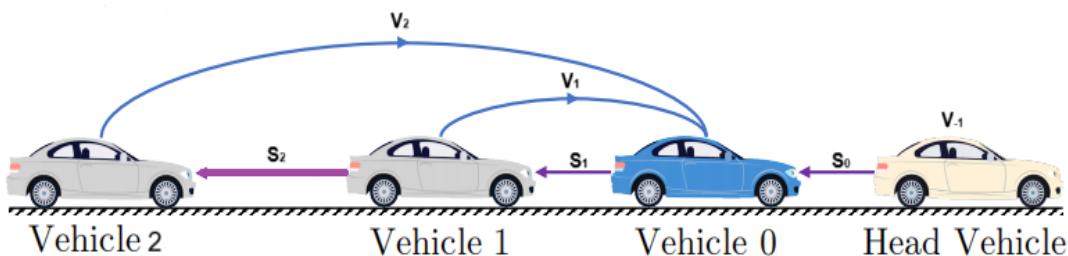


Figure 9 : Trafic à autonomie mixte (Wang et al. 2020).

4.2 Perspectives

Nous avons vu dans cette partie que la mission de conception d'une carte embarquée a été menée à bien. La programmation du *firmware* a été partiellement réalisée : seule la structure du code a été mise en place.

Nous avons également identifié plusieurs optimisations possibles en vue d'une reprise du projet par une autre équipe. Dans cette optique, voici quelques pistes de travaux futurs qui pourraient être intéressantes à explorer :

- **Validation du fonctionnement de la carte** et notamment en validant les différents canaux de communications.
- **Fusion de données au sein du réseau** afin d'exploiter les données partagées par les autres véhicules à travers le réseau (via Wi-Fi ou autres protocoles de communication) en appliquant des techniques avancées de fusion de données. Cette

intégration permettra d'obtenir des estimations plus précises des états du système et d'améliorer la détection des cyberattaques en utilisant des informations globales.

- **Changement de capteurs ou des MCU** pour améliorer les performances de la carte
- **Analyse du coût computationnel** permettra d'évaluer le temps de calcul des observateurs développés afin de déterminer leur faisabilité pour une implémentation en temps réel.
- **Développer un boîtier adapté** pour protéger et intégrer la carte électronique.
- **Affiner le choix des matériaux (PCB, diélectriques)** pour de meilleures performances en haute fréquence.
- **Réduire la consommation énergétique** via une meilleure gestion de l'alimentation et du mode veille.

4.3 Transférabilité / Reproductibilité des résultats

Les travaux sont consignés dans différents rapports et supports pour être réemployés ultérieurement. Les fichiers de fabrications sont également disponibles pour pouvoir repartir de ces plans ou fabriquer la carte.

5 Description de la démarche suivie et des travaux réalisés

5.1 Démarche expérimentale

La démarche expérimentale adoptée dans ce projet suit un enchaînement logique, depuis la conception jusqu'à la validation matérielle et logicielle du prototype. Elle s'articule autour de **quatre phases principales**, correspondant aux grands axes de résultats présentés dans la suite du rapport :

Phase 1 – Définition de l'architecture

- Cette première phase a porté sur l'analyse des besoins fonctionnels et la définition de l'architecture technique de la carte embarquée.
- Elle a permis d'identifier les capteurs nécessaires, les microcontrôleurs à utiliser, ainsi que les protocoles de communication adaptés (SPI, I²C, UART, Wi-Fi 6).
- Les travaux de cette phase ont abouti à la conception du schéma bloc de la carte et à la sélection des composants clés, préparant ainsi la conception électronique détaillée.

Phase 2 – CAO pour l'électronique

- Cette étape a consisté à traduire l'architecture en un design électronique complet sous KiCad.
- Elle a inclus la réalisation des schémas électriques, le routage et le placement des composants sur un PCB 4 couches.
- Un travail approfondi a été mené sur l'alimentation, les contraintes d'impédance, la compatibilité électromagnétique et la gestion des signaux haute fréquence (Wi-Fi, GNSS).

Phase 3 – Travaux et programmation embarquée

- Dans cette phase, les premières validations logicielles ont été réalisées à l'aide de kits de développement avant l'intégration sur carte réelle.
- Le développement du firmware, sous STM32CubeMX et STM32CubeIDE, a permis de configurer les protocoles de communication, d'intégrer un système d'exploitation temps réel (RTOS) et de préparer le code d'acquisition et de communication inter-véhicules.

Phase 4 – Tests et protocoles de validation

- La dernière phase a concerné la vérification expérimentale du prototype à travers des tests d'alimentation, de communication et de transfert de données.
- Des protocoles rigoureux ont permis de contrôler la stabilité électrique, la continuité des signaux et la fiabilité des communications UART, I²C, SPI et Wi-Fi.

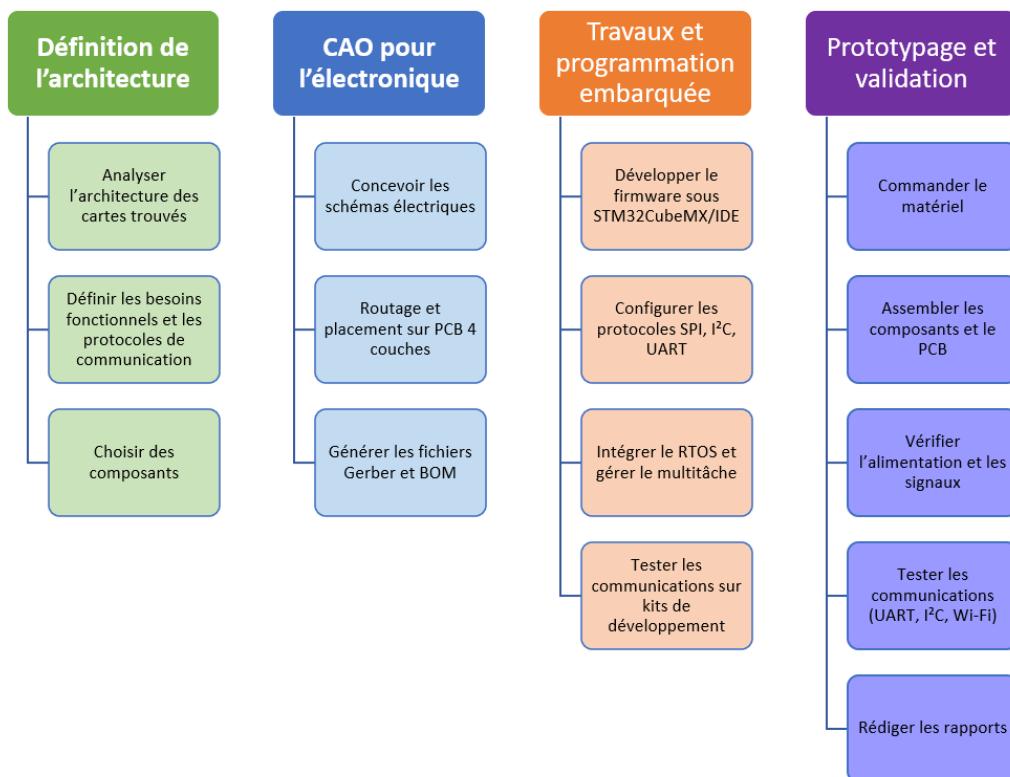


Figure 10 : Schéma global de la démarche expérimentale

5.2 Travaux & résultats de l'opération de R&D

5.2.1 Définition de l'architecture

Nous avons débuté le projet par une analyse des besoins en termes de capteurs et d'informations, ainsi que des exigences de performance associées, notamment en matière de vitesse de traitement et de mémoire nécessaires pour notre application.

À partir des fiches techniques des différentes technologies retenues et de l'estimation du volume de données généré par chaque type de capteur, nous avons établi les tableaux synthétiques présentés aux Tableau 2 et Tableau 3.

Composant	Capacité de stockage	Utilisation prévue
EEPROM / Flash	1 Mo	Stockage des paramètres de calibration (offsets, coefficients), sauvegarde des états du système en cas de redémarrage, données temporaires, réduction de l'usure du MCU.
Carte SD	64 Go	Enregistrement des données issues des capteurs pour analyse ou archivage.

Tableau 2 : Bilan des mémoires et du stockage embarqué.

Composant	Fréquence de rafraîchissement	Débit de données estimé
Wi-Fi	10–100 Hz	~130 Kbit/s – 13 Mbit/s
GNSS	10–20 Hz	~8 Kbit/s
Magnétomètre	50–100 Hz	~5 Kbit/s
IMU	1000 Hz	~96 Kbit/s
MCU	1000 Hz	~15 Mbit/s

Tableau 3 : Bilan de débit de données des composants

Ce bilan, combiné aux architectures des systèmes existants étudiées précédemment, permet de construire une architecture adaptée au projet de stage ainsi qu'une liste des besoins de la carte Figure 11.

Liste des besoins de la carte embarquée :

- Embarquer des composants fiables et précis.
- Être muni d'un IMU, Magnétomètre, Module GNSS et un module de communication sans-fil
- Avoir un MCU de navigation pour acquérir les données des capteurs
- Avoir un MCU avec la mémoire et la puissance de calcul suffisante pour la gestion des données
- Pouvoir récupérer les données sur une carte SD
- Programmer le MCU grâce à un port USB
- Communiquer avec le véhicule par un port USB
- Gérer et distribuer l'alimentation
- Avoir la connexion WIFI , V2V

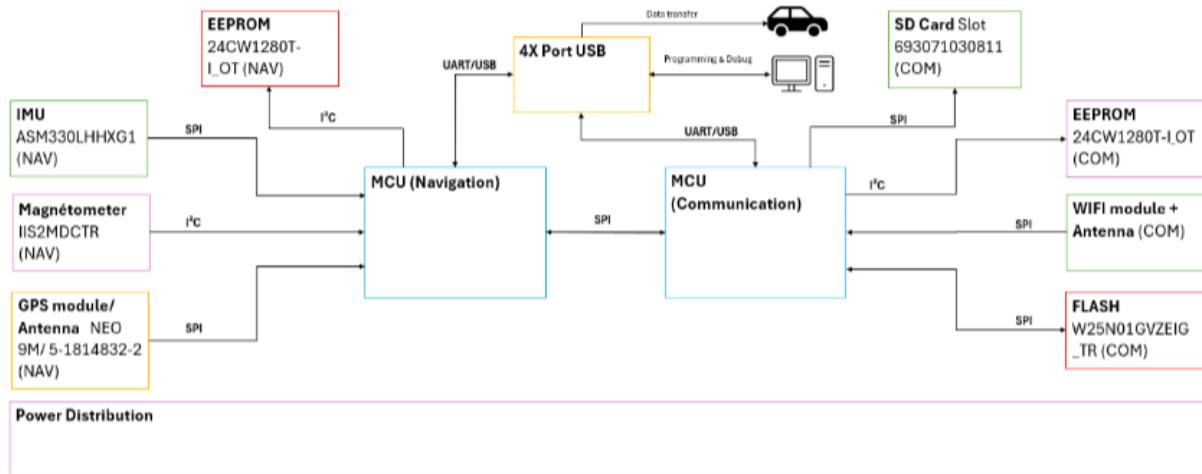


Figure 11 : Schéma bloc de la carte électronique.

Problème de communication sans fil : À l'issue de notre étude, nous avons retenu le protocole de communication sans fil Wi-Fi 6 comme solution privilégiée. Cette décision repose sur une analyse comparative des différents protocoles de communication inter-véhicules, prenant en compte des critères tels que la bande passante, la latence, la portée, la compatibilité et la maturité technologique. Nous avions retenu comme solution :

DSRC / ITS-G5

Bande passante	10 MHz
Sécurité	Pas d'association ou authentification (connexion rapide)
Latence	1–100 ms
Bandes de transmission	5.9 GHz
Débit de données	6–27 Mbps
Distance	<1 km (300 m nominal)
Standard	IEEE 802.11a
Type de communication	1 véhicule

Tableau 4 : Caractéristiques du DSRC / ITS-G5.

C-V2X (LTE-V2X, 5G-V2X)

Bande passante	10 MHz / 20 MHz
Bandes de transmission	5.9 GHz (PC5) et bandes LTE/5G (Uu)
Débit de données	1.5–27 Mbps
Standard	3GPP LTE Release 14 (LTE-V2X), Release 16/17 (5G-V2X)
Latence	<10 ms (PC5), <1 ms (5G-V2X)
Distance	>1 km
Type de communication	Plusieurs véhicules

Tableau 5 : Caractéristiques du C-V2X (LTE-V2X, 5G-V2X).

Wi-Fi 6

Bandé de transmission	2.4 GHz / 5 GHz
Bandé passante	20, 40, 80, 160 MHz
Standard	IEEE 802.11ax
Latence	2–5 ms
Distance	70 m
Débit de données	9.6 Gbps

Tableau 6 : Caractéristiques du Wi-Fi 6.

Le choix s'est porté sur le Wi-Fi 6, car cette technologie est plus accessible en termes de mise en œuvre et offre des performances largement suffisantes pour un prototype destiné aux véhicules de tests QCar qui est un véhicule à échelle réduite et qui nécessite donc des portées moins importantes. Elle permet de répondre aux besoins en connectivité tout en simplifiant l'intégration matérielle et logicielle dans un contexte de développement expérimental.

Nous avons maintenant toutes les clés pour passer à l'étape de conception sur KiCad.

5.2.2 CAO pour l'électronique

Dans cette partie, nous aborderons le développement de la carte embarquée. La CAO électronique regroupe les outils dédiés à la conception et à la fabrication de systèmes électroniques, allant des circuits imprimés (PCB) aux circuits intégrés (FPGA). Dans le cadre de ce travail, nous allons concevoir un circuit imprimé à l'aide du logiciel KiCad. Toutefois, les étapes de fabrication d'un PCB restent identiques, quel que soit le logiciel utilisé comme présenté dans la Figure 12.

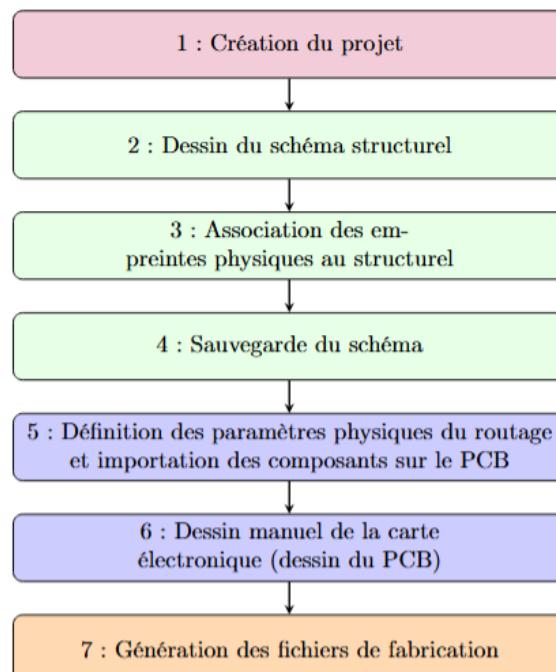


Figure 12 : Étapes de création d'un PCB.

Pour permettre la fabrication de la carte, il est nécessaire de générer les fichiers suivants :

- les fichiers Gerber et les NC drill files
- un PDF des schémas et du plan d'implantation du PCB
- la liste de matériel (BOM)

Nous allons donc, dans cette section, détailler l'ensemble des étapes réalisées sous **KiCad** afin de générer les fichiers de production nécessaires à la fabrication de la carte électronique.

5.2.2.1 Schémas électriques

La première étape de conception sur KiCad concerne le dessin du schéma électrique structurel (Tableau 7). Nous commençons par diviser l'architecture sur plusieurs feuilles en fonction du rôle de chaque composant, afin de rendre le schéma plus lisible.

Titre de la feuille	Description
Power	Gestion de l'alimentation : régulateurs de tension, protection, connecteurs de batteries.
Navigation MCU	Microcontrôleur dédié à la navigation et au traitement des capteurs.
Périphérique NAV	Capteurs liés à la navigation : GNSS, IMU, magnétomètre, ainsi qu'une mémoire EEPROM.
Communication MCU	Microcontrôleur dédié à la communication avec la voiture et les véhicules environnants.
Périphérique COM	Modules de communication sans fil, mémoire EEPROM et mémoire Flash pour le MCU de communication.
Connecteurs (Programming, Debug & Data storage/transfert)	Ports USB-C pour la programmation, ports de débogage, ainsi que le port SD pour le stockage et le transfert de données.
Connecteurs (USB Debug)	Connecteurs USB dédiés au débogage et à la communication avec l'ordinateur hôte.
Connecteurs (Additional peripherals + Mounting + (NAV <=> COM))	Connecteurs pour périphériques additionnels, trous de montage et liaison entre les MCU de navigation et de communication.

Tableau 7 : Description de la division du schéma électrique.

Problème du choix des composants : Nous pouvons ensuite entamer un travail de documentation afin de sélectionner les composants les plus adaptés à notre carte destinée à un véhicule autonome. Pour cela, nous nous appuyons sur les fiches techniques (datasheets) des différents composants, qui nous permettent d'évaluer leurs caractéristiques, de vérifier s'ils répondent aux besoins fonctionnels identifiés et d'identifier les composants complémentaires nécessaires à leur bon fonctionnement.

Cela inclut des composants passifs tels que les condensateurs de découplage, les résistances de pull-up/pull-down ou les inductances de filtrage, ainsi que des composants actifs comme les diodes Schottky, les convertisseurs de tension ou les duplexeurs.

Certains composants demandent davantage d'attention, notamment lorsque leur datasheet est incomplète ou peu détaillée. Ce fut le cas, par exemple, des connecteurs USB-C ou du module GNSS, qui requièrent des composants passifs ou actifs spécifiques pour fonctionner correctement. Dans ces situations, nous avons puisé dans les cours de conception de la HE-Arc dispensés par les professeurs Manon Mayer et Serge Monnerat, ainsi que dans les conseils du professeur Christophe Liebe.

Afin d'éviter les problèmes liés à la disponibilité ou à la commande des composants, nous avons choisi, autant que possible, de nous approvisionner auprès d'un fournisseur unique tel que **Digi-Key**.

Ce fournisseur présente l'avantage de proposer, pour une grande partie de ses composants, une empreinte, un symbole et un modèle 3D déjà prêts à l'emploi (Figure 13). Cela facilite considérablement le travail de conception, ne laissant que quelques empreintes à dessiner manuellement.



Figure 13 : Image sous KiCad du symbole, empreinte et modèle 3D d'une capacité polarisé.

De fait, une fois le choix des composants terminé, il fallait s'assurer que chacun dispose d'un symbole, d'une empreinte et, si possible, d'un modèle 3D. Il était alors possible de tracer les circuits électriques et de passer plus facilement à l'étape du routage.

Problème d'alimentation : Nous remarquons qu'il est nécessaire de convertir la tension de 12 V en provenance de la batterie en une tension de 3.3 V. Il convient donc, à partir d'une alimentation 12 V (externe), de concevoir ou de sélectionner une alimentation capable de fournir du 3.3 V.

La gestion de l'alimentation est un aspect essentiel pour assurer le bon fonctionnement de la carte. Le dimensionnement et le choix des composants associés ne doivent en aucun cas être négligés. Il existe des solutions automatisées permettant de concevoir une architecture d'alimentation, telles que l'outil WEBENCH Power Designer proposé par Texas Instruments (*Texas Instruments. WEBENCH Power Designer, s. d.*). Toutefois, nous avons

choisi d'adopter le modèle développé par Philip Salmony dans le cadre du projet Hades (Salmony, 2019/2025), en raison de sa proximité avec notre application et de sa validation expérimentale préalable.

5.2.2.2 Routage et placement

Lorsque nous avons terminé le schéma électrique de la carte, nous pouvons passer à l'étape du routage et du placement des composants. Nous devons alors dimensionner et dessiner la carte sous KiCad. Au vu de la taille des voitures de test Qcar, nous allons faire une carte de 140 cm sur 70 cm.

Problème du nombre de couche : Pour notre projet, nous avons opté pour la réalisation d'un circuit imprimé (PCB) à 4 couches. Ce choix s'est imposé car les configurations en simple ou double face ne permettaient pas d'intégrer l'ensemble des composants tout en respectant les contraintes d'encombrement et de routage. Bien qu'un PCB à 6 couches puisse offrir de meilleures performances en termes de fabricabilité, de réduction des interférences électromagnétiques et de résistance mécanique (les cartes multicouches devant impérativement comporter un nombre pair de couches), cette solution s'est révélée trop coûteuse. De plus, les gains en surface et en complexité de routage offerts par une carte à 6 couches étaient jugés insuffisants au regard du surcoût, comparés à une architecture à 4 couches, qui représente un compromis technique et économique adapté à notre besoin.

Le routage consiste à placer les composants et les vias, d'une part, puis à tracer les pistes de cuivre, d'autre part. Les composants doivent être placés tout en prenant en compte :

- Les pistes qui ne doivent pas se croiser
- Les potentielles interférences avec les lignes hautes fréquences comme les lignes de données USB ou les composants de télécommunication.
- Les recommandations de placement du constructeur.
- L'optimisation des placements selon les différentes couches

Les pistes définies dans le routage serviront de guide au fabricant, qui retirera le cuivre des couches supérieure et inférieure, à l'exception des zones correspondant aux tracés. Cela permettra d'établir les connexions électriques entre les composants.

Problème de routage : Ce travail minutieux de placement a conduit à une organisation optimisée des couches internes du PCB :

- La seconde couche a été réservée au plan de masse
- La troisième couche au plan d'alimentation en 3.3V

Ce choix s'explique par le fait que tous les composants doivent être reliés à la masse et alimentés. Il est donc cohérent de centraliser ces connexions sur des couches dédiées, accessibles par vias, afin de réduire les croisements de pistes sur les couches externes et de faciliter le routage.

La masse a été placée sur la seconde couche, directement sous la couche supérieure, afin de minimiser l'impédance entre les pistes de signal et le plan de référence. Cette disposition est particulièrement bénéfique pour les lignes de transmission à haute fréquence, notamment celles utilisées pour la communication sans fil, où la stabilité du signal et la réduction des perturbations sont essentielles. Cet aspect sera détaillé ultérieurement.

Enfin, des plans de masse partiels ont également été ajoutés sur les couches supérieure et inférieure. Cette mesure permet de limiter les interférences électromagnétiques (EMI) et d'améliorer la qualité du signal.

Problème des points de mesure : D'une manière générale il faut prévoir des points de mesure permettant de mesurer facilement les éléments sensibles de notre système, on pense ici au bus I2C, SPI, UART, etc... (Les protocoles de communications)

Par manque d'espace sur le circuit, nous avons décidé de placer des points de mesure uniquement sur les lignes du bus I2C. Cette décision permet de conserver une capacité de diagnostic minimale tout en respectant les contraintes d'encombrement.

Problème de quartz externes : Les horloges externes, notamment les quartz, sont des sources importantes de perturbations électromagnétiques, en raison des pulsations rapides qu'elles génèrent. Un système temps réel nécessite impérativement une source d'horloge pour fonctionner correctement.

Elles sont donc particulièrement cruciales dans notre architecture, notamment pour le bon fonctionnement des microcontrôleurs (MCU), qui s'appuient sur une horloge stable pour exécuter les instructions avec précision et garantir la réactivité du système.

Afin de limiter leur impact sur le reste du circuit, nous avons pris soin de les isoler des plans de masse partiels. Cette isolation permet de réduire les couplages parasites et d'éviter la formation de boucles de masse, qui pourraient amplifier les émissions indésirables et dégrader la qualité du signal dans les zones sensibles du PCB.

Problème des pistes à haute fréquence : Les modules GNSS et Wi-Fi sont protégés des interférences électromagnétiques grâce à l'implantation de vias de masse autour des lignes de transmission, ainsi qu'à la présence d'un plan de masse sur la seconde couche du PCB. Ce plan permet de réduire l'impédance de couplage entre les couches, améliorant ainsi le confinement du champ électromagnétique. Le contrôle de l'impédance caractéristique des lignes de transmission est crucial pour garantir une valeur proche de 50Ω , conventionnellement utilisée dans les systèmes RF. Une telle adaptation minimise les réflexions du signal, optimise la qualité de transmission et limite les pertes.

L'impédance caractéristique Z_0 d'une ligne *microstrip* (avec le plan de masse en dessous de la ligne) peut être approximée par la formule suivante (Hammerstad & Jensen, 1980) :

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \ln \left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h} \right)$$

- Z_0 : impédance caractéristique de la ligne (en ohms, Ω)
- ϵ_{eff} : permittivité effective du substrat
- ϵ_r : permittivité relative du matériau (FR-4 typiquement entre 4.2 et 4.8)
- h : hauteur du substrat entre la piste et le plan de masse (en mm)
- w : largeur de la piste (en mm)

La permittivité effective ϵ_{eff} est donnée par :

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{w}}} \right)$$

Il était question de jouer sur la permittivité du substrat en changeant le FR4 en une autre matière de la série RO4000 pour réduire la largeur des pistes de transmission mais cela avait un coup conséquent. Nous avons donc préféré réduire l'épaisseur des couches de FR4.

L'ensemble du travail réalisé n'a pas été détaillé dans ce rapport afin d'en préserver la lisibilité. Toutefois, les principales étapes de conception ainsi que les problèmes rencontrés ont été présentés et analysés.

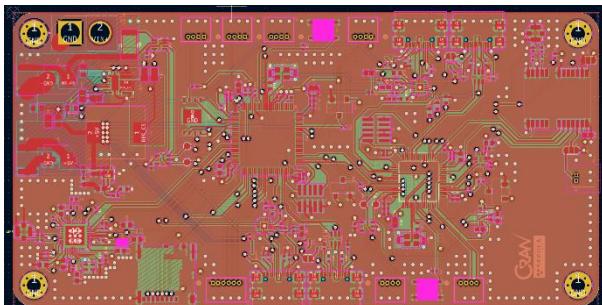


Figure 14 : Image sous KiCad du routage final de la carte embarquée.

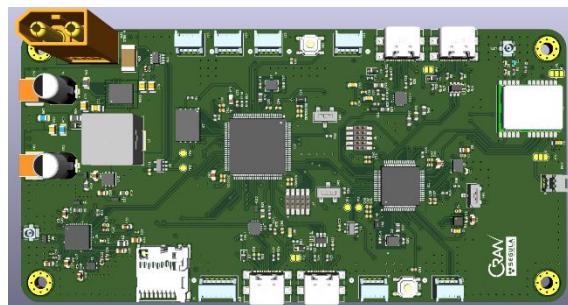


Figure 15 : Image sous KiCad du modèle 3D final de la carte embarquée.

Pour conclure cette section, abordons l'aspect lié à la commande du matériel. À différentes étapes de ce travail, il a été nécessaire de commander des composants. Il fallait rechercher les références des produits auprès des fournisseurs partenaires, d'établir les devis, puis de les transmettre au maître de stage afin que celui-ci procède à la commande. Problème de fabrication de la carte : La fabrication de la carte embarquée a représenté la commande la plus complexe du projet. Il a été nécessaire de sélectionner au moins trois fabricants différents et d'établir un devis pour chacun. Après le choix du fournisseur, il a fallu adapter la conception aux capacités de fabrication de celui-ci.

En effet, si les classes de circuits transmises ne respectent pas les contraintes de production (pistes trop fines, espacement entre conducteurs insuffisant, perçages trop petits, etc.), le sous-traitant refusera la fabrication et retournera les fichiers pour correction, généralement plusieurs jours après la commande. Cela entraîne une perte de temps significative pour le projet. Par ailleurs, il est préférable de rester sur des spécifications standard, car plus les tolérances sont serrées (pistes et perçages de petites dimensions), plus le coût du PCB augmente.

Le choix s'est porté sur Eurocircuits en raison de la familiarité avec ce fabricant, de la précision et de la fiabilité de ses services, ainsi que de la proximité et de la qualité de l'accompagnement client.

Plusieurs corrections ont été nécessaires sur la conception et les fichiers de fabrication pour valider la commande. Le coût final du PCB s'élève à **2 010,14 €**.

5.2.3 Prototypage et programmation embarquée

Le projet implique également la réalisation d'une programmation partielle ou complète de la carte embarquée, dans le but de valider le bon fonctionnement du matériel.

Dans le contexte évoqué dans la section précédente, la programmation embarquée a volontairement été réduite afin de privilégier la réalisation d'une carte électronique répondant à des critères de qualité et de fiabilité. Les développements logiciels se sont ainsi limités à des tests fonctionnels de validation du matériel, ainsi qu'à la mise en place de l'environnement de développement destiné aux travaux ultérieurs.

Nous avons décidé d'utiliser, dans un premier temps, des modules de développement afin de préparer un code fonctionnel en amont. Ces modules ont été exploités sur plaque de test afin de valider les fonctionnalités et d'anticiper les éventuelles contraintes d'implémentation.

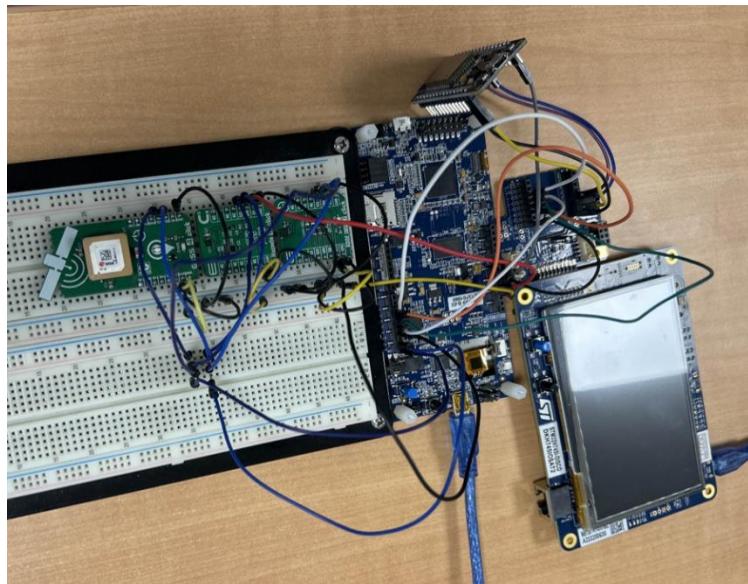


Figure 16 : Photographie du montage expérimental réalisé à l'aide du kit de développement.

Nous allons utiliser 3 types de protocoles de communications filaire durant ce projet qui sont SPI, I²C et UART (Tableau 8). L'utilisation de ces différents protocoles de communication contribue à atteindre l'objectif principal de la carte, qui est de servir d'observateur pour le véhicule. Elle permet ainsi de détecter d'éventuelles défaillances et de prévenir les risques liés aux cyberattaques. Le code embarqué doit permettre de réaliser les fonctions suivantes :

- Récolter les informations sur l'environnement à l'aide des capteurs embarqués.
- Structurer ces données dans une liste dynamique adaptée au traitement en temps réel.

- Communiquer avec les véhicules voisins afin d'échanger les données environnementales.
- Fusionner les informations reçues avec celles mesurées localement pour obtenir une vision cohérente.
- Transmettre les données consolidées au système du véhicule pour prise de décision.

	UART	I ² C	SPI
Nombre de fils	2 (Rx, Tx)	2 (SDA, SCL)	3 (SCK, MOSI, MISO) + 1 par esclave
Adressage	Point à point	Encodé sur 7 bits	Physique (1 fil par esclave)
Vitesse de transmission	1.2 kbit/s à 230 kbit/s	100 kbit/s à 3.4 Mbit/s	1 à 30 Mbit/s
Distance maximale	Quelques mètres (RS-232 : dizaines)	Quelques mètres (extensible avec buffers)	Quelques mètres
Accusé de réception	Aucun	Oui (ACK/NACK)	Aucun
Conditionnement des signaux	Aucun	Résistances de pull-up	Aucun

Tableau 8 : Comparaison des protocoles de communication série.

La suite logicielle proposée par STMicroelectronics a été utilisée pour programmer et tester le matériel embarqué. Plus précisément, nous avons exploité STM32CubeMX pour la configuration des périphériques et la génération automatique de l'architecture logicielle, ainsi que STM32CubeIDE pour le développement, la compilation et le débogage du code. Ce choix s'aligne naturellement avec les microcontrôleurs STM32 que nous avons sélectionnés, et il présente l'avantage de garantir une compatibilité optimale avec le matériel tout en offrant une interface intuitive et des outils intégrés facilitant le développement embarqué.

La majorité de la structure du code est générée automatiquement à l'aide de STM32CubeMX, qui permet également de configurer de manière intuitive les broches du microcontrôleur (MCU) ainsi que les périphériques associés. Cet outil facilite la mise en place de l'architecture logicielle de base, tout en assurant une cohérence entre la configuration matérielle et le code embarqué.

Les premiers tests du firmware ont permis de valider :

- La lecture et la transmission des données capteurs via UART ;
- Le fonctionnement stable du scheduler RTOS à 100 Hz ;
- Une gestion correcte des interruptions et des tâches asynchrones ;
- Une compatibilité complète entre les périphériques configurés et le matériel cible.

La dernière étape, pour garantir le bon fonctionnement de l'architecture logicielle embarquée, est de définir les différentes tâches correspondant aux fonctions du système, puis de les organiser en fonction de leur priorité et de leur rôle.

5.2.4 Tests et protocoles

Dans cette partie, nous aborderons les tests de la carte embarquée (Figure 17). Pour cela, il est nécessaire de définir des protocoles de test rigoureux et de mettre en œuvre des essais afin de démontrer que la carte est fonctionnelle et qu'elle répond aux différents besoins identifiés au cours du projet.

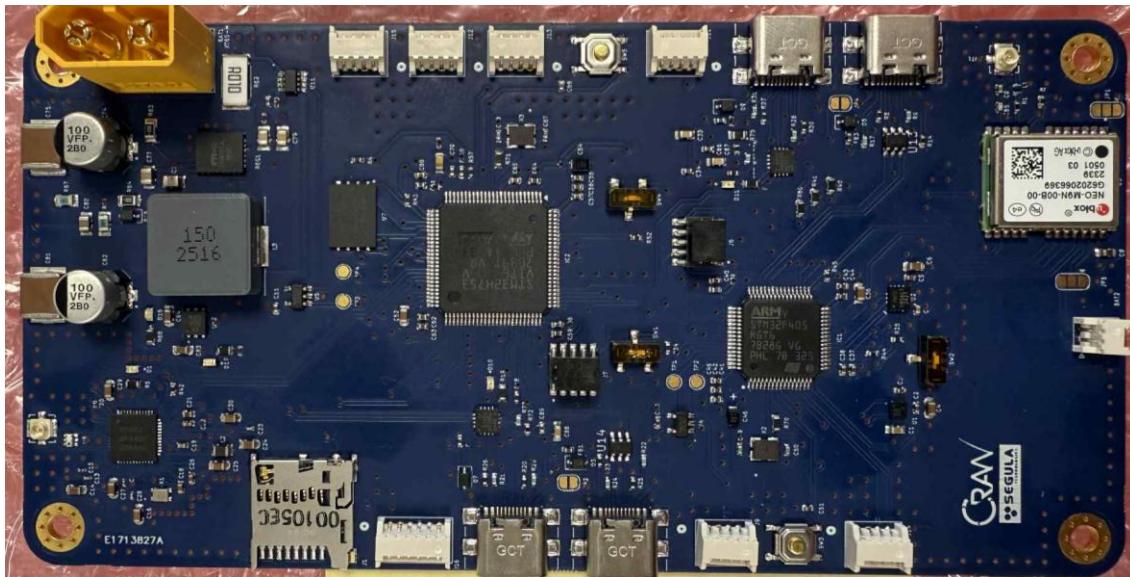


Figure 17 : Image de la carte fabriqué

5.2.4.1 Alimentation et courts-circuits

La première étape de vérification sur notre carte embarquée consiste à s'assurer du bon fonctionnement de l'alimentation et à confirmer l'absence de tout court-circuit. Cette phase est essentielle avant toute mise sous tension prolongée, afin de prévenir tout dommage aux composants.

Matériel

- Multimètre numérique
- Alimentation de laboratoire réglable (0–15 V, courant limité)
- Oscilloscope (visualisation des ondulations et transitoires)
- Fils de connexion et pinces crocodiles
- Carte embarquée à tester

Protocole

1. Inspection visuelle

- Vérifier l'absence de composants manquants, de soudures défectueuses ou de ponts de soudure.
- S'assurer que la polarité des condensateurs électrolytiques et des diodes est correcte.

2. Test de continuité

- À l'aide d'un multimètre en mode continuité, contrôler qu'aucun court-circuit n'existe entre les rails d'alimentation (Vcc et GND).

3. Mise sous tension progressive

- Régler l'alimentation de laboratoire sur la tension nominale d'entrée (ex. 12 V), avec une limitation de courant sécuritaire (ex. 100 mA).
- Appliquer la tension et observer le courant consommé.

4. Mesure des tensions régulées

- Vérifier que chaque régulateur délivre la tension attendue (ex. 3,3 V, 5 V).
- Consigner les valeurs mesurées et les comparer aux tolérances indiquées dans les fiches techniques.

5. Analyse à l'oscilloscope

- Mesurer l'ondulation (*ripple*) sur les lignes d'alimentation et vérifier qu'elle reste dans les limites acceptables.
- Contrôler la stabilité des tensions lors de variations brusques de charge.

6. Validation finale

- S'assurer que l'alimentation fonctionne correctement et qu'aucun composant ne présente d'échauffement anormal.

Analyse des résultats

- Tension régulée mesurée : $3.31 \text{ V} \pm 0.03 \text{ V}$
- Courant de repos : 72 mA
- Ondulation (ripple) : 38 mV crête-à-crête
- **Erreur identifiée** : résistance de 6.8Ω remplacée par $6.8 \text{ k}\Omega$, provoquant une surtension initiale corrigée par remplacement.

5.2.4.2 Communication et transfert de données

La deuxième partie de notre vérification consiste à tester les lignes de données (UART, I2C, SPI) ainsi que le bon fonctionnement des communications sans fil (GNSS et Wi-Fi).

Matériel

- Ordinateur avec logiciels de communication série (STM32Cube IDE)
- Oscilloscope (visualisation des ondulations et transitoires)
- Multimètre numérique
- Réseau Wi-Fi disponible (point d'accès)
- Carte embarquée à tester

Protocole

1. Inspection des connexions

- Vérifier le câblage correct des lignes UART, I2C et SPI (TX/RX, SDA/SCL, MOSI/MISO/SCK/CS).

2. Test UART

- Configurer un terminal série sur l'ordinateur.
- Envoyer et recevoir un message simple (ex. « Hello »).
- Vérifier sur l'oscilloscope la forme d'onde et la fréquence de transmission.

3. Test I2C

- Scanner le bus I2C pour détecter les périphériques présents (adresse valide).
- Envoyer une commande simple (lecture registre) et vérifier la réponse.
- Observer les signaux SDA et SCL à l'oscilloscope via les points de test.

4. Test SPI

- Configurer le microcontrôleur en mode maître.

- Transmettre un octet de test vers un périphérique SPI (ex. mémoire ou capteur).
- Vérifier que la réponse correspond à l'attendu.
- Contrôler les signaux MOSI, MISO, SCK et CS à l'oscilloscope.

5. Test GNSS

- Connecter l'antenne GNSS et placer le module dans une zone à ciel ouvert.
- Confirmer l'acquisition d'un fix GPS (nombre de satellites ≥ 4).

6. Test Wi-Fi

- Configurer la carte pour rechercher les réseaux disponibles.
- Tenter une connexion à un point d'accès connu (SSID et mot de passe).
- Vérifier l'attribution d'une adresse IP par DHCP.
- Tester la transmission de données (ex. ping ou envoi d'un paquet).

7. Validation finale

- S'assurer que toutes les interfaces physiques de communication fonctionnent correctement.

Analyse des résultats

- **UART** : transmission stable à 115200 bauds, bidirectionnelle entre MCU ;
- **I²C** : détection correcte des périphériques;
- **SPI** : configuration opérationnelle, validation en attente de périphérique externe ;
- **GNSS** : acquisition du signal en 25 s, précision horizontale $\pm 4\text{-}6 \text{ m}$;
- **Wi-Fi 6** : connexion établie au réseau de test, débit mesuré $\approx 21 \text{ Mbit/s}$.

Ces tests confirment la **fonctionnalité du système de communication** et la **stabilité du design électrique**.

5.3 Bilan des travaux

Ce projet a permis de concevoir et de développer une carte électronique embarquée dédiée à l'estimation avancée et à la détection des cyberattaques dans les véhicules autonomes et connectés. L'ensemble des travaux menés s'inscrit dans une démarche de recherche appliquée, combinant contraintes matérielles, compatibilité électromagnétique et perspectives logicielles. Les principaux résultats peuvent être résumés ainsi :

- La carte électronique conçue constitue une base matérielle robuste, dont la validation sera confirmée par les tests fonctionnels.
- Le choix des composants et la définition du *stackup* PCB ont permis d'assurer une compatibilité électromagnétique satisfaisante et une adaptation correcte des impédances pour les lignes de communication sans fil, malgré certains points d'optimisation identifiés.
- Le développement a mis en évidence plusieurs axes d'amélioration, notamment l'optimisation du réseau d'adaptation RF, la réduction des pertes liées aux vias, l'amélioration du routage haute fréquence et la gestion plus fine des alimentations.
- Sur le plan logiciel, la programmation embarquée est encore limitée mais constitue une étape essentielle pour valider le bon fonctionnement du matériel et préparer un environnement adapté aux futures évolutions.

Les objectifs majeurs étaient :

- Concevoir et fabriquer une ou deux cartes électroniques répondant aux besoins définis.

- Produire un rapport technique détaillé conforme aux standards industriels, incluant les étapes de conception, les fichiers de production et les rapports de tests.

La majorité de ces objectifs a été atteinte. Les tests restants permettront de confirmer la validité du matériel et d'évaluer les performances réelles en conditions d'utilisation. La plateforme obtenue représente d'ores et déjà un **socle technique fiable**, apte à servir de référence et de support pour les développements ultérieurs.

6 Ressources humaines

Cf. documents économiques

7 Partenariat scientifique et recherche confiée

Ce projet s'inscrit pour partie dans une collaboration avec le Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN) et bénéficie d'une thèse CIFRE de NGUYEN Quang Huy. Le laboratoire apporte son expertise dans les domaines de l'électronique et le développement d'observateurs et contrôleurs. Il met à disposition aussi sa plateforme de test pour la validation des modèles.