



Course de voitures autonomes

Article Revue 3EI

Anthony Juton, professeur agrégé de physique appliquée à l'ENS Paris Saclay, Hélène Horsin-Molinaro, responsable éditorial du Site Culture Sciences de l'Ingénieur, Fabien Adam, professeur agrégé de physique appliquée à l'ENS Paris Saclay, Pierre Mella, professeur agrégé de mécanique à l'ENS Paris Saclay, Bastien Durand, maître de conférence en mécanique à l'ENS Paris Saclay,

octobre 2019

L'apparition des véhicules autonomes est un thème majeur de l'informatique embarquée ces dernières années. Taxis, voitures particulières, camions, bateaux, drones, avions et même course automobile, tous les secteurs du transport sont concernés. Des premiers véhicules roulent, seuls en environnement connu ou avec un conducteur superviseur.

Les voitures autonomes utilisent pour se repérer :

- Un GPS, pour situer la voiture à quelques mètres près sur une carte,
- Un lidar : télémètre laser infrarouge tournant donnant une carte 3D ou 2D des obstacles autour de la voiture,
- Des radars 24 GHz donnant également des informations sur les éléments de l'environnement de la voitures,
- Une ou plusieurs caméra donnant des indications notamment sur la position de la route à l'avant de la voiture et la signalisation.
- Une centrale inertielle (accéléromètre 3 dimensions et gyromètre 3 dimensions) et des capteurs de vitesse de roue.

A cela s'ajoutent des calculateurs pour le traitement des images, la fusion des données et les calculs de trajectoires.

C'est dans ce cadre que l'ENS Paris Saclay a proposé aux étudiants en première année des départements de sciences de l'ingénieur de participer à une course de voitures (réduites) autonomes. Le projet a commencé en octobre 2018 et s'est terminé par les courses en juin 2019. Le présent article vise à relater cette expérience, les choix faits par les enseignants et les élèves et son analyse pour permettre à d'autres de bénéficier de cette expérience pour entamer un projet similaire. Une nouvelle course est notamment prévue à Saclay en mai 2020.

1. Présentation du défi

Pour que le projet soit accessible au plus grand nombre, financièrement et techniquement, il a été décidé que :

- La piste serait balisée par une bordure, ce qui rend optionnel seulement l'utilisation d'une caméra, un lidar étant suffisant.
- Le contexte serait une course sur circuit, ce qui réduit la complexité en supprimant croisements, piétons, signalisation.

1.1. Le matériel fourni

Le matériel fourni à chacune des 6 équipes est le suivant :

- Un châssis Tamiya TT-02 avec Moteur DC 540. Le châssis est l'entrée de gamme des châssis pour amateurs de courses de véhicules radiocommandés, ce qui permet de trouver des pièces détachées. Le moteur à courant continu permet un fonctionnement à basse vitesse, plus simplement qu'un moteur brushless de modélisme. Le kit Tamiya 58570 (140 € + 16 € pour le servo-moteur Futaba 3001 de direction) y ajoute une carrosserie de lancia Delta aux allures de voiture réaliste.
- Une batterie NiMH 7,2V, 3 Ah, 20 euros. La batterie NiMH assure une fiabilité supérieure aux batteries lithium de modélisme.
- Un lidar Rplidar Slamtec A2M8 choisi pour sa qualité et son prix raisonnable : 280 €.
- Une carte microcontrôleur mbed Nucléo STM32F746ZG choisie pour la simplicité de prise en main de l'environnement et des bibliothèques mbed, ses performances (cortex M7 à 208 MHz), son coût (20 €)
- Un module bluetooth Microchip BM78, pour les départs et arrêts à distance des véhicules.

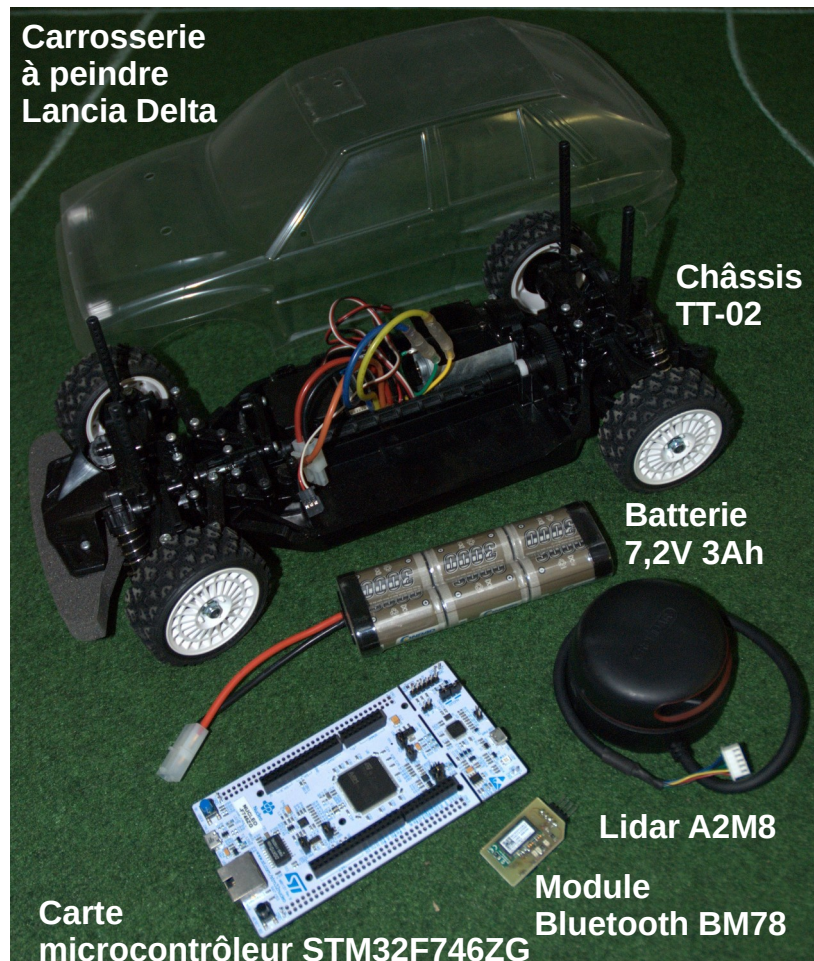


Figure 1: composants fournis à chaque équipe

Certaines équipes y ont ajouté une centrale inertielle avec magnétomètre (MPU9250), finalement non exploitée, et un capteur optique réflectif pour mesurer la vitesse de l'arbre moteur, bien utile pour détecter le blocage du véhicule.

1.2. Le règlement

1.2.1. Le véhicule :

Le véhicule doit utiliser un kit châssis/moteur Tamiya TT02 et une batterie NiMH 7,2V 3000 mAh maximum. Il doit avoir une carrosserie le recouvrant à plus de 80 %.

Le véhicule avec l'ensemble de ses capteurs et actionneurs doit entrer dans les dimensions ci-dessous :

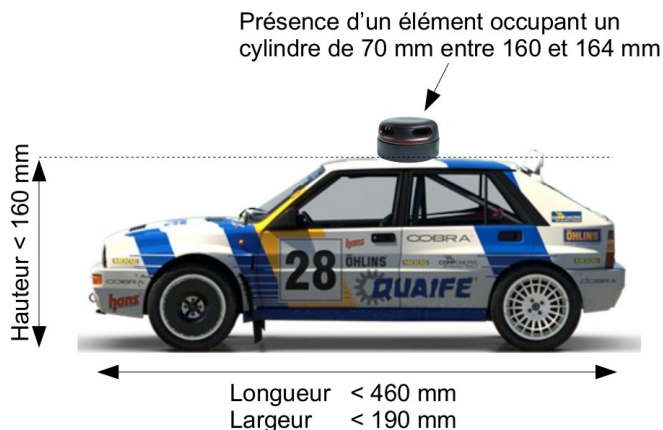


Figure 2: dimensions à respecter par la voiture

La communication de l'équipe avec le véhicule doit se limiter à l'envoi d'un signal de démarrage et d'un signal d'arrêt. Le véhicule peut envoyer des informations à l'équipe (Monitoring).

Afin de garantir la sécurité des biens et des personnes, si la connexion entre l'équipe et le véhicule est interrompue durant plus de 2 secondes, le véhicule devra s'arrêter de manière autonome.

1.2.2. La piste :

La piste est constituée de bordures de 200 mm de hauteur. Ces bordures seront composées d'éléments droits et d'arcs de cercles de rayon de courbure supérieurs à 500mm. Des angles droits sur les bords de pistes sont possibles si ils permettent un passage avec un rayon de courbure supérieur à 500 mm. Aucun marquage au sol n'est prévu. La piste est en tout point d'une largeur supérieure à 1 m, mais peut contenir des obstacles à l'intérieur.

Le tracé n'est pas connu à l'avance. On donne ici un exemple de piste :

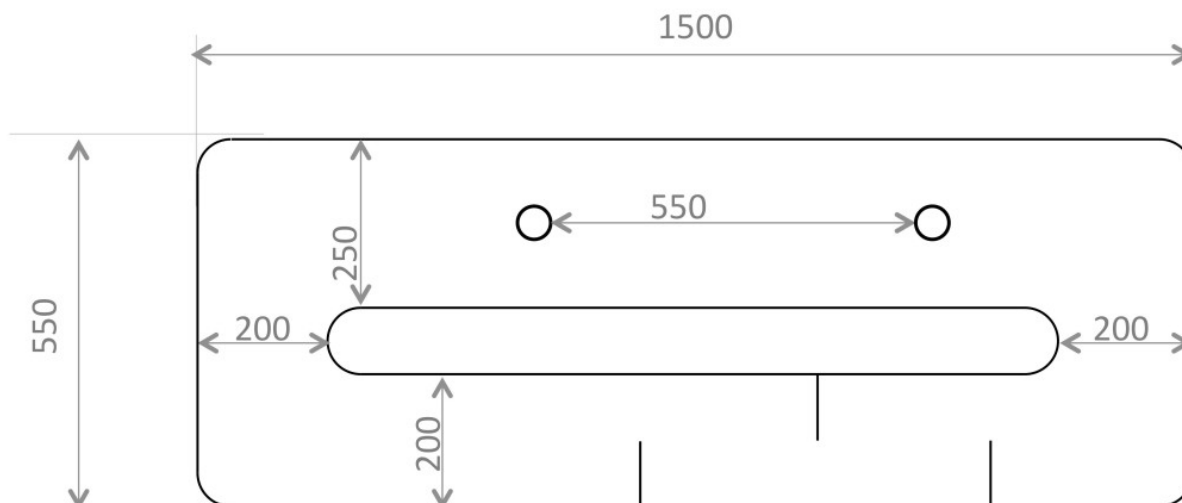


Figure 3: exemple de piste, dimensions en cm

1.2.3. Homologation :

L'homologation repose sur la validation des éléments du véhicule (dimensions, batterie, châssis, démarrage et arrêt à distance...) et la vérification de l'aptitude du véhicule à se déplacer sur un élément droit de piste sans toucher les bordures.

1.2.4. Qualifications :

Les équipes s'élanceront chacune à leur tour sur la piste pour 2 tours de piste. Le temps de parcours du circuit sera alors relevé. Le signal de départ est donné oralement par l'arbitre.

Chaque équipe aura un « droit à l'erreur » c'est-à-dire la possibilité d'effectuer une deuxième qualification en cas de problème technique (batterie déchargée, connectique débranchée, bug...)

1.2.5. La course :

Les équipes ont 3 mn pour installer leur véhicule sur la piste.

L'ensemble des véhicules est positionné sur la grille de départ selon les résultats des tours de qualification. Une fois que toutes les équipes ont annoncées être prêtes, il est interdit de toucher les véhicules. Le signal de départ est donné oralement par l'arbitre.

On relève l'ordre d'arrivée après un nombre de tours défini à l'avance.

En cas de non achèvement de la course par une voiture, la distance parcourue sera relevée pour le classement.

Un véhicule ne peut avoir un comportement notoirement agressif envers les véhicules adverses. L'arbitre peut disqualifier un tel véhicule et le retirer de la piste.

L'arbitre ou l'un de ses assistants peut enlever un véhicule immobilisé sur la piste.

2. Études et réalisations mécaniques

2.1. Propulsion et direction du véhicule

Les équipes ont du caractériser le comportement des véhicules en vitesse et trajectoire : angles des roues, virages possibles, vitesse maximale, conditions de non dérapage, éventuellement conditions de versement (bien qu'il s'avère que le poids du véhicule suffisait à la maintenir au sol même en condition de virage brusque). Cette phase a permis ensuite simuler numériquement le comportement du véhicule dans un circuit test et ainsi tester les algorithmes de décision de trajectoire.

Un moteur électrique de tension nominale 7,2 V alimenté via un variateur de vitesse par la batterie assure la propulsion du véhicule.

Un servomoteur couplé à l'essieu avant du véhicule commande en direction le véhicule via un système de biellettes (retracé en bleu et rouge ci-dessous). La mécanique du véhicule impose les angles de braquage extrêmes à droite et à gauche limités à 20°.



Figure 4: Détail du système de biellettes de commande de direction

La commande du servomoteur et du variateur de vitesse est très similaire et se résume à l'envoi d'une PWM avec une période choisie de 20 ms dont on fait varier le temps haut. Les élèves ont mesuré la relation entre le temps haut et l'angle de la direction.

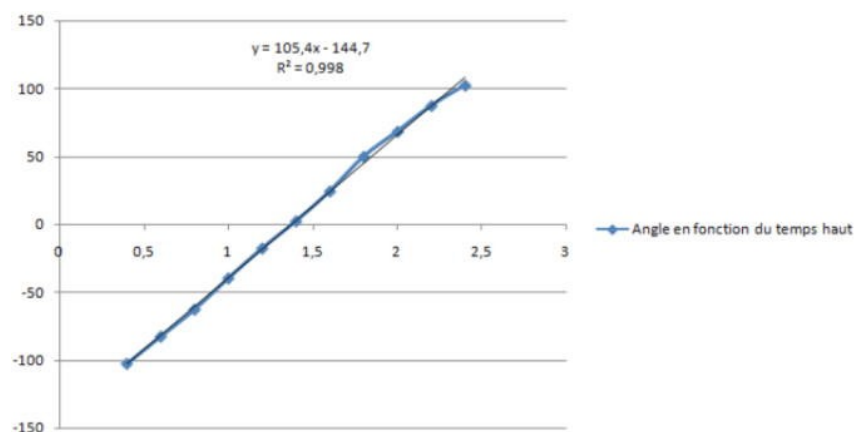


Figure 5: Évolution de l'angle du servomoteur [°] avec le temps haut [ms]

Les temps hauts ont également été déterminés pour obtenir la vitesse maximale ($V_{\text{max}}=7,56$ V, temps_haut = 1,14 ms) et l'arrêt du véhicule ($V_{\text{min}}=0$ V, temps_haut = 1,48 ms).

2.2. Adaptation des différents éléments

Chaque équipe a du adapter les éléments principaux sur le châssis fourni du véhicule comme la carte électronique, la centrale inertielle, le module bluetooth et le Lidar.

Une plaque support de la carte électronique mais également du Lidar a été réalisée par chaque équipe. Le positionnement en hauteur de la carte se fait par des goupillages transversaux aux axes verticaux.

La carte électronique y a ensuite été fixée ainsi que le Lidar avec des systèmes de positionnement différents. Le lidar est une pièce maîtresse du véhicule autonome, plusieurs points sont à prendre en compte pour sa fixation :

- La hauteur du Lidar par rapport au sol une fois monté ne doit pas dépasser 160 mm. Cette dimension imposée dans le cahier des charges est liée à la hauteur des obstacles présents sur le circuit. Un lidar trop haut empêcherait de détecter les obstacles (dont les bords du circuit, hauteur 200 mm) et un lidar trop bas empêcherait les concurrents de localiser la voiture.
- La partie supérieure de ce support Lidar doit permettre la fixation de celui-ci (appui-plan, centrage court et vis dans les taraudages du lidar). Des trous de passage de vis sont donc à prévoir.
- La partie supérieure du support doit vérifier une contrainte d'horizontalité relativement stricte pour permettre au capteur une bonne détection des obstacles lointains, notamment les bords du circuit.
- La partie inférieure du support doit pouvoir se fixer sur la plaque.

Des équipes ont simplement utilisé des pattes, d'autres équipes ont réalisé une pièce par impression 3D afin de garantir une structure rigide et optimiser l'encombrement.

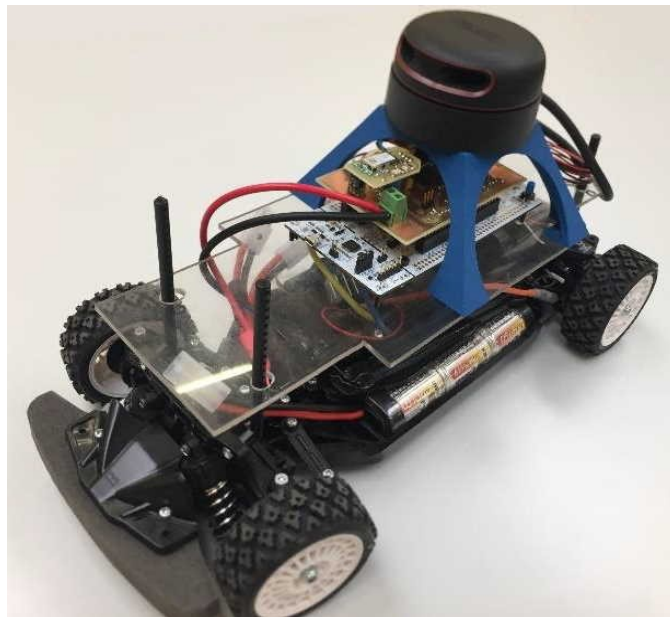


Figure 6: Exemple de positionnement des différents éléments

2.3. Mesures de vitesse

Des équipes ont choisi de mesurer les vitesses des roues afin de détecter un blocage potentiel du véhicule. Cette option a permis de dégager le véhicule, par une marche arrière, lorsqu'il se trouvait bloqué contre une palissade ou un autre véhicule.

Des capteurs optiques ont été placés à la hauteur d'une roue arrière ou à la hauteur de l'arbre de transmission. Une petite bande blanche a été tracée.

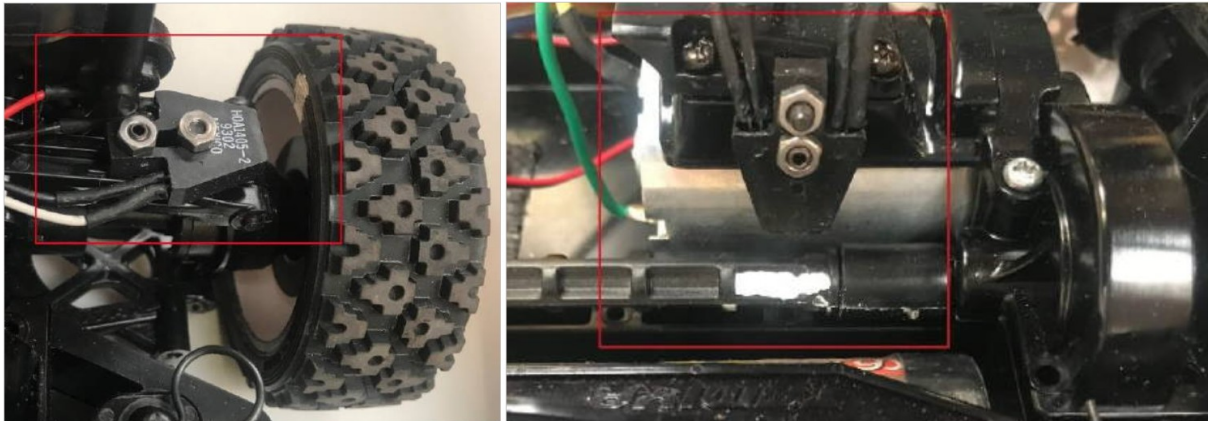


Figure 7: Exemples de placement et fixation de capteur optique sur une roue arrière et sur l'arbre de transmission

3. Conception et réalisation électronique

3.1. Le capteur optique de mesure de vitesse

Le capteur utilisé HOA1405 est une simple association d'une led infrarouge et d'un photo-transistor. Son montage électronique demande une résistance pour maîtriser le courant dans la diode (220 Ohms pour 20 mA environ) et une résistance (20 kOhms) pour assurer la saturation du transistor lors d'un passage sur du blanc et son blocage lors d'un passage sur du noir.

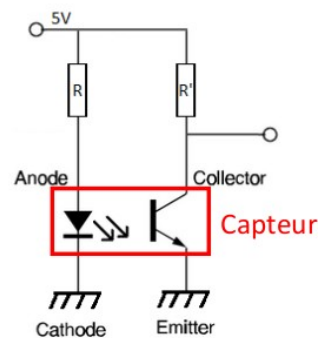


Figure 8: Montage électronique du capteur de mesure de vitesse d'arbre

3.2. La carte interface

La conception électronique a surtout concerné dans ce projet la carte interface entre la carte microcontrôleur fournie, le servo-moteur, le variateur du moteur de propulsion et les différents capteurs.

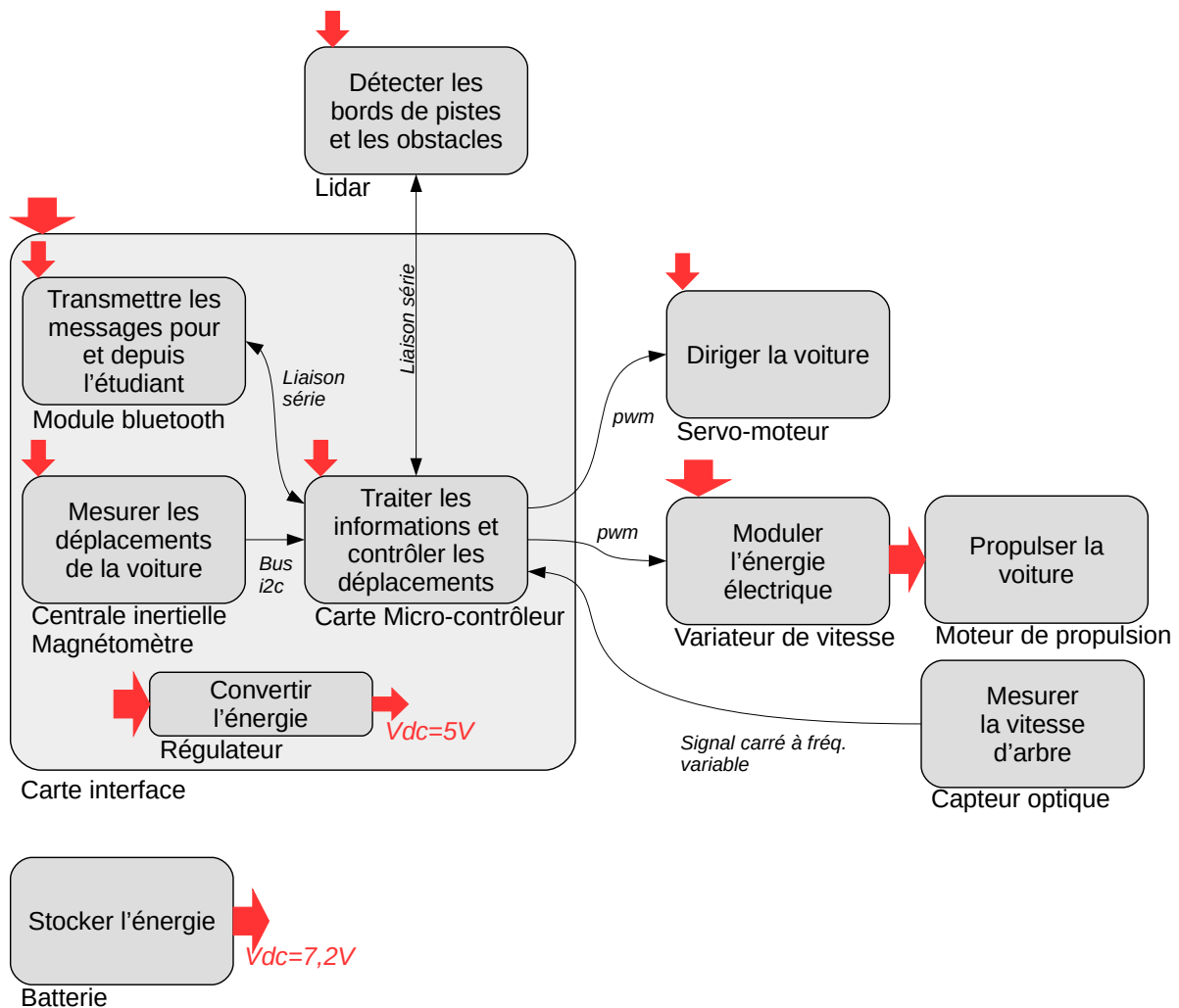


Figure 9: Schéma synoptique typique de l'électronique de la voiture

Une fois les fonctionnalités de la carte interface arrêtées, les élèves ont saisi le schéma sous Eagle, routé le PCB et demandé la gravure de la carte au technicien. Ils ont ensuite soudé et testé fonction par fonction leur carte interface.

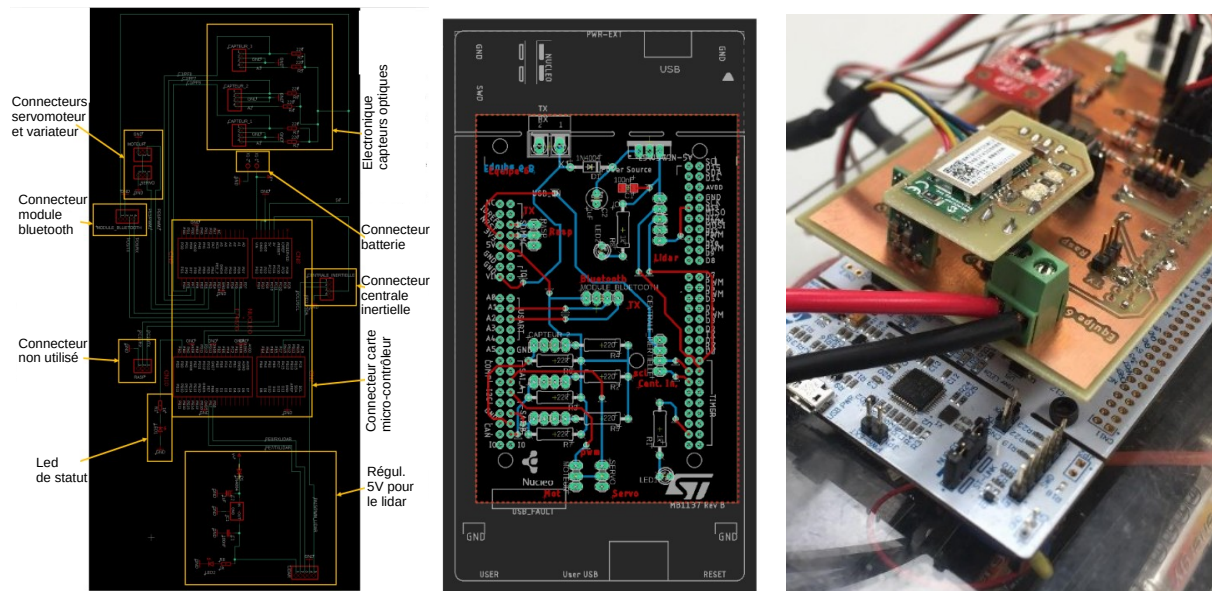


Figure 10: Schéma, pcb et réalisation de la carte électronique d'interface

4. Informatique

Le développement le plus important de ce projet est informatique :

- La mise en place de la communication entre le microcontrôleur et chacun des composants est du domaine de l'informatique embarquée,
- La conception d'un simulateur sur PC est du domaine du développement informatique,
- Les stratégies de conduite, sur simulateur puis en embarqué, sont du domaine de l'algorithmique.

4.1. Communication entre le microcontrôleur et chacun des composants

Une fois l'électronique réalisée, la première tâche informatique fut d'établir la communication entre le microcontrôleur et les différents composants.

Le signal de commande du **servo-moteur de direction** est une pwm de période 20 ms dont le temps haut est de 1 à 2 ms ce qui correspond aux positions extrêmes :

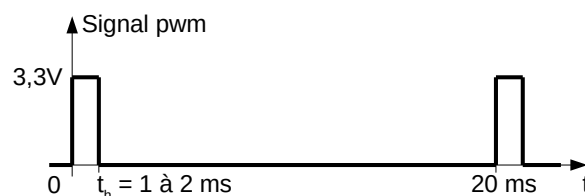


Figure 11: signal de commande de servo-moteur

Le **variateur de vitesse du moteur de propulsion** est commandé de la même manière, 1,5 ms correspondant à l'arrêt, 1 ms à la vitesse maximale. Une fois paramétré correctement, le variateur permet de faire tourner le moteur en sens inverse (marche arrière), avec une pwm dont le temps haut est entre 1,5 ms et 2 ms.

La centrale inertielle (+ magnétomètre) MPU9250, communiquant en i2c, possède une bibliothèque mbed, ce qui a facilité grandement l'acquisition des données, même si ces données n'ont pas été exploitées ensuite, par aucune des 6 équipes.

Le capteur optique envoie un signal 1 lorsqu'il est sur un secteur noir de l'arbre et 0 lorsqu'il est sur un secteur blanc de cet arbre (partie colorée par les élèves). Les fronts déclenchent des interruptions, ce qui permet de mesurer l'intervalle de temps de passage du secteur blanc et ainsi de calculer la vitesse. Cette information n'a été utilisée que par une équipe, pour détecter le blocage de sa voiture et ainsi déclencher une marche arrière.

Le module bluetooth communique en liaison série asynchrone avec le microcontrôleur. L'usage de la bibliothèque mbed pour la liaison série est aisé. La seule difficulté est liée aux modules bluetooth des PCs, pas toujours reconnus par linux. Les smartphones modernes n'ont pas eu de difficulté à communiquer, en utilisant par exemple SenaBT, un terminal bluetooth pour android.

La communication la plus complexe à mettre en œuvre fut donc la communication avec **le lidar**. Ce dernier communique via une liaison série asynchrone à 115200 bits/s. Le logiciel PC fourni permet d'observer à l'oscilloscope les trames échangées et la documentation du protocole est complète et claire.

Toutes les équipes se sont contentées du mode SCAN, le plus simple : une fois que le lidar reçoit la séquence START_SCAN {0xA5, 0x20}, il émet un acquittement {0xA5 0x5A 0x05 0x00 0x00 0x40 0x81} puis envoie en continu la séquence de 5 octets suivante :

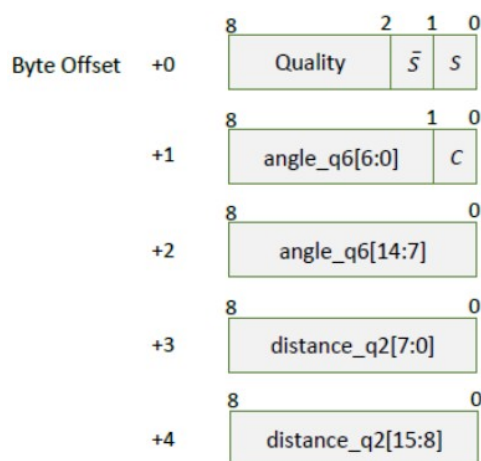


Figure 12: composition des messages SCAN envoyés par le lidar

L'envoi étant continu, la réception des trames se fait alors sur interruptions. Pour la plupart des équipes, à chaque lot de 5 octets reçus, le traitement vérifie l'intégrité du message (via S, /S, C et Quality) et reconstitue l'angle en degré de la mesure et la distance mesurée en mm.

Les données sont ensuite placées pour la plupart des équipes dans un tableau pour lequel les indices sont les angles et les valeurs sont les distances correspondantes.

Une fois la communication établie, plusieurs équipes ont monitoré via le bluetooth les mesures obtenues en retraçant l'environnement autour de la voiture, dans le but de vérifier la fiabilité des mesures.

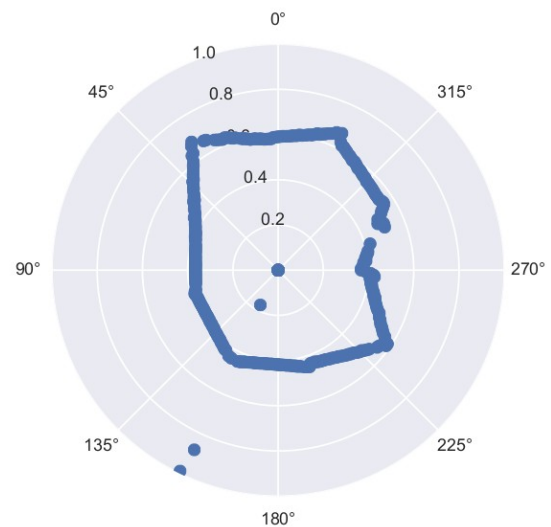


Figure 13: Résultat du monitoring des mesures lidar reçues par le microcontrôleur

Un an d'expérimentation sur 6 lidars A2M8 nous a permis d'apprécier la fiabilité du composant et la qualité des données reçues : pas ou très peu de fausses mesures, performances (précision, vitesse) conformes à la documentation.

A sa vitesse maximale, le lidar fait environ 10 tours par secondes avec une mesure tous les 1,5 degrés environ.

4.2. Simulateur

Rapidement, 4 équipes sur les 6 ont perçu le besoin de développer un simulateur pour tester des algorithmes de conduite avant que la voiture ne soit fonctionnelle.

Sont alors apparus 3 simulateurs en python et un, plus original via processing, logiciel de programmation basé sur java auquel s'ajoute des bibliothèques orientées jeu vidéo.

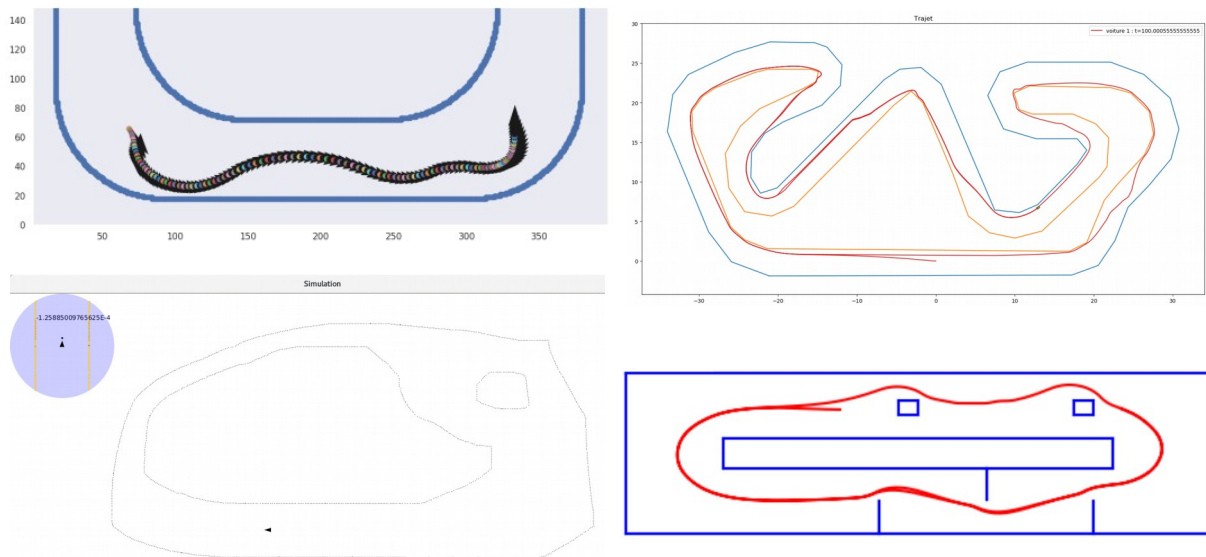


Figure 14: captures d'écran des différents simulateurs

Sur chaque simulateur, on retrouve les bordures de pistes et une fonction émulant le lidar en indiquant à la voiture simulée la position des bordures et obstacles. Certains ont pris en compte la vitesse du lidar, les limites de la direction, d'autres non.

4.3. Algorithmes de conduite autonome

A partir de ces simulateurs les étudiants ont pu tester leurs algorithmes de conduite. Autant la mécanique, l'électronique et l'informatique embarquée ont mené à des solutions peu diversifiées d'une équipe à l'autre, autant l'algorithmique a amené les équipes à des solutions originales, s'inspirant pour certains d'articles de recherche ou des technologies utilisées pour les déplacements de personnage dans les jeux vidéos. Voici les grands principes de quelques solutions fonctionnelles, les algorithmes étant évalués à chaque tour de lidar (toutes les 100 ms) :

- La voiture teste la présence d'obstacle à 0° , 15° , 30° , -15° , -30° et suit la trajectoire la plus centrale sans obstacle.
- La voiture recherche le maximum local de distance en partant de l'avant-centre de la voiture et se dirige dans cette direction. Un ajustement est nécessaire pour ne pas toucher la bordure dans les virages.
- La voiture cherche les fronts, correspondant à des discontinuités (une fin de détection de bordures et donc potentiellement la piste).
- Chaque point détecté par le lidar est associé à un potentiel positif, comme la voiture. Un point de potentiel positif fort, induisant également des forces répulsives, est placé derrière la voiture. Les équations de la physique donnent alors le déplacement de la voiture.

- La voiture teste 64 trajectoires possibles (liées à une valeur de commande de la direction) et choisit la trajectoire la plus centrale parmi celles ne rencontrant pas d'obstacle.

5. Conclusion et perspective

5.1. Bilan de la première édition

5 des 6 véhicules ont participé à la compétition. Une courte vidéo a été montée à l'issue de la compétition :

https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/saph-team-racing-le-film



Figure 15: Lien QR Code vers la vidéo de la course

3 voitures étaient performantes et 2 plus lentes. Les qualifications (une voiture sur la piste) permettent d'évaluer objectivement les performances des voitures et la course amène son lot de collisions, d'imprévu et de spectacle.

Le principal défaut est la difficulté des voitures à détecter les autres voitures. En effet, le positionnement du lidar 2D sur le toit implique que le lidar d'une voiture ne voit que le lidar d'une autre voiture placée devant. C'est petit et souvent pas suffisant pour être considéré comme un obstacle à éviter par les algorithmes des voitures. Un placement du lidar plus bas ou la présence d'une pièce (type aileron) derrière le lidar améliorerait ce point tout en privant le lidar de la visibilité arrière.

Le projet comporte peu de conception mécanique et la conception électronique est peu originale d'un véhicule à l'autre. La différence se fait au niveau des algorithmes. La part de l'informatique prend donc plus d'importance que les deux autres.

A noter, les bordures de 20cm de haut sont un peu basses en cas de sol imparfait. Lors des premiers essais sur un sol un peu accidenté, les lidar voyaient parfois au-dessus de la bordure.

5.2. Perspectives pour mai 2020

Une seconde édition aura lieu en mai 2020, avec plusieurs écoles du plateau de Saclay notamment. Le châssis, le moteur et la batterie sont imposés. Les capteurs et systèmes de contrôle sont libres.

A l'ENS, nous travaillons sur une voiture reprenant l'électronique de l'an passé mais avec un algorithme issu d'un apprentissage automatique par renforcement.

Les personnes ou écoles souhaitant participer peuvent contacter Anthony Juton par mail : anthony.juton@ens-paris-saclay.fr .