

Réseau de capteurs sans-fil pour les voitures autonomes

Lucile Brugiere
Nils Cercariolo
Alice Delphigué
Juliette Jeanjean
Lucas Taucoory
Romain Petitalot

June 7, 2021

Contents

1 Répartition des tâches et diagramme de Gantt	2
2 Historique	3
2.1 Voiture	3
2.2 Les systèmes électroniques embarqués pour l'automobile	5
3 Les capteurs pour voiture autonome	7
3.1 Systèmes de capteurs sans fils (WSN) dans une voiture autonome	7
3.1.1 L'histoire des réseaux de capteurs sans fils	7
3.1.2 Définition du réseaux de capteurs sans fils	8
3.1.3 La norme IEEE 802.15.4 et protocole ZigBee	9
3.1.4 Intégration dans une voiture autonome	11
3.2 Caméra	13
3.2.1 Fonctionnement	14
3.3 Radar et les capteurs ultrasons	14
3.3.1 Fonctionnement	14
3.4 Lidar	16
3.5 Divers capteurs	16
4 Intégration des réseaux de capteurs dans la voiture autonome	17
4.1 Comment implémenter ces capteurs dans une voiture autonome	17
4.2 Etude de cas : Stationnement d'un véhicule autonome grâce aux parking connectés	18
5 Limites	21
6 Conclusion	23
6.1 Remerciements	23
7 Bibliographie	24

1 Répartition des tâches et diagramme de Gantt

Ce projet a commencé le 1er février 2021 avec M.Idoudi Monaem en tant que professeur référent. Nous nous sommes répartis le travail dans un premier temps sur la documentation et la recherche d'informations. Lorsque nous en savions davantage sur les capteurs et son réseau, nous avons commencé à faire le plan du rapport et se concentrer dessus. Nous avons donc chacun pris une partie tout en communiquant avec le reste des membres du projet. Nous avons ensuite mis en commun et nous avons modifié certaines parties qui ne semblaient pas aussi pertinentes que voulu. Puis nous nous sommes concentrés sur le poster.

Voici l'occupation du temps représentée dans un diagramme de Gantt (Figure 1) :

Etapes du projet	Sous Etapes					Durée
Recherche documentaire & Etat de l'Art	vocabulaire &	Articles &	Tableau Avantages et			4
ébauche de plan	WSN	Voiture autonome + comparaison avec les piétons				3
Rédaction d'un brouillon du rapport	1- Historique(3)	2- Les capteurs	3- Intégration des réseaux de	4- Limites (1	5-	3
conception de l'affiche						1
préparation de l'oral						1

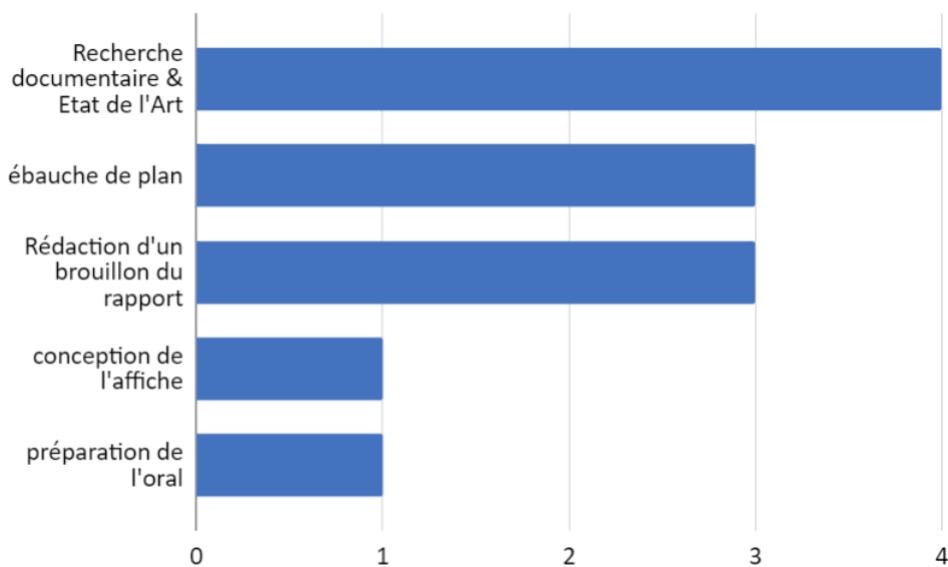


Figure 1: Diagramme de gant

2 Historique

2.1 Voiture

Depuis toujours, l'Homme se déplace pour voyager, découvrir de nouveaux territoires. . . Pour cela, il utilisait au départ ses pieds, puis pour aller plus vite et plus loin, des inventeurs ont créé des moyens de faciliter le transport. On peut alors trouver des carrosses, des vélos et plus récemment des trains, des avions, des métros et pleins d'autres. Mais s'il y en a un à retenir en particulier et qui est utilisé au quotidien par des millions de personnes, c'est bien la voiture. La voiture fait pour la première fois son apparition dans les années 1880 avec le Tricycle Benz 1 (Figure 2). Elle a été créée par Carl Benz et il s'agissait d'une voiture à 3 roues à moteur. Après la création de cette voiture, les innovations et les avancées dans le secteur de l'automobile sont devenues de plus en plus importantes pour en arriver aux voitures d'aujourd'hui, que l'on connaît et conduit.



Figure 2: Tricycle Benz 1

Les voitures, telles qu'on les imagine, ont généralement 4 roues, et fonctionnent à l'essence, à l'électricité ou même aux deux avec les voitures hybrides. De plus, elles possèdent de nombreuses fonctionnalités qui permettent aux usagers de conduire plus sereinement. En effet, on a l'habitude de voir déjà sur des voitures un GPS, ou bien des systèmes pour se garer en toute simplicité par exemple. Mais ce n'est pas tout, les voitures évoluent de plus en plus pour devenir autonomes.

Il n'existe pas en réalité de définition exacte d'un véhicule autonome à ce jour étant donné qu'il s'agit d'un domaine très récent. Ainsi même si l'expression "véhicule autonome" est aujourd'hui la plus répandue dans les pays et régions francophones, la législation de l'Union Européenne parle plutôt de "Véhicule entièrement automatisé".

Une définition d'un véhicule entièrement automatisé pourrait être : "véhicule à moteur qui a été conçu et construit pour se déplacer de façon autonome sans aucune supervision de la part d'un conducteur". En plus de cela, il existe une échelle de niveaux d'automatisation des véhicules autonomes créée par l'organisation internationale américaine Society of Automotive Engineers (SAE). Cette échelle est aujourd'hui reconnue comme l'échelle standard pour les niveaux d'automatisation de véhicules autonomes. Chaque niveau est fixé en fonction de ce qui est délégué au système et ce qui est délégué au conducteur (Figure 3). En voici un résumé :

La libération du conducteur...
...arrivera avec les véhicules du niveau 4

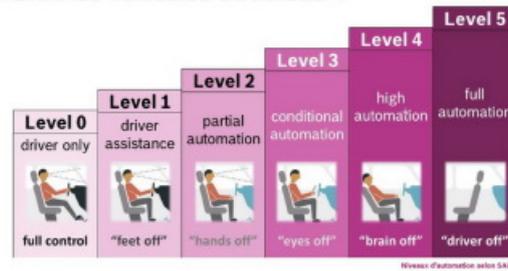


Figure 3: Différents niveaux d'autonomie

Niveau 1: Présent sur beaucoup de voitures récentes, le système aide très légèrement le conducteur avec des systèmes comme le régulateur de vitesse ou l'ABS. Le conducteur est encore responsable de la quasi-totalité de la conduite.

Niveau 2: Présent encore sur bon nombre de modèles récents également, le système aide le conducteur avec des mécanismes plus complexes, comme un système d'aide au stationnement (Figure 4) ou encore un correcteur de trajectoire pour des routes en ligne droite. Cependant, le conducteur doit toujours surveiller la route et contrôler le véhicule dans la plupart des cas.

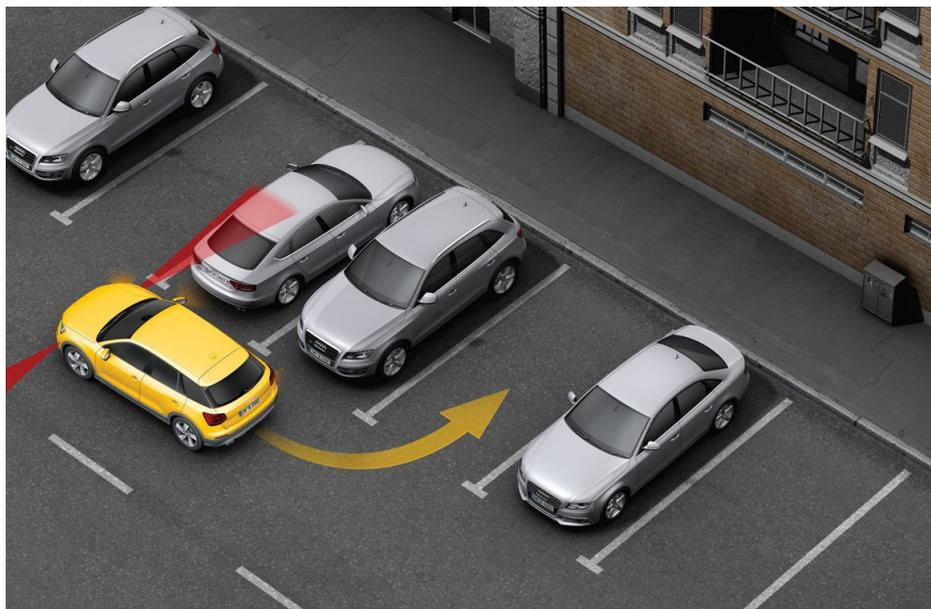


Figure 4: Aide au parking

Niveau 3: A ce stade, le système prend en charge l'entièreté de la conduite sur certaines phases de conduite. La voiture est par exemple capable de conduire sur l'autoroute, en respectant les distances de sécurité, en dépassant si nécessaire etc. Ainsi le véhicule est capable de gérer l'accélération, le freinage et la direction dans certains cas. Toutefois, le conducteur doit rester vigilant en cas de soucis.

Niveau 4: On se rapproche de la voiture totalement autonome, à ce niveau, le véhicule est géré de manière complètement autonome sur certains types de routes comme les autoroutes et le véhicule continue de rouler sans que le conducteur intervienne, même en cas de problème. Le conducteur peut donc se laisser conduire complètement sur les tronçons de route où la voiture est compétente.

Niveau 5: Dernier niveau des véhicules autonomes, c'est probablement le plus proche de la représentation d'une voiture autonome dans l'imaginaire collectif. Le conducteur n'a pas à

surveiller la route ou quoi que ce soit, la voiture conduit toute seule en toutes situations, qu'il s'agisse de l'autoroute, d'une ville ou d'une route sinueuse en montagne. Le conducteur peut même s'adonner à d'autres activités (Figure 5), il est un passager comme un autre dans le véhicule.



Figure 5: Conducteur pouvant faire ce qu'il veut

Toutefois, pour le moment, les véhicules disponibles sur le marché sont pour la plupart de niveau 2 voire 3 maximum. En effet, les véhicules de classes 3 à 5 sont surtout des prototypes et des projets qui n'ont encore jamais vu le jour.

2.2 Les systèmes électroniques embarqués pour l'automobile

Un système embarqué est un système électronique et informatique autonome. Il est dédié à une tâche précise afin de l'effectuer au mieux. Il peut désigner à la fois le matériel informatique et le logiciel utilisé.

Les systèmes embarqués sont composés d'électronique numérique, de microprocesseurs ou encore de calculateurs. On y retrouve des logiciels ainsi qu'un protocole de communication entre les calculateurs. Pour fonctionner, ils ont besoin d'autonomie de fonctionnement pour les processeurs et le logiciel, mais aussi d'autonomie d'énergie.

Les premiers systèmes embarqués sont apparus en 1971 avec l'apparition du Intel 4004, le premier microprocesseur. Ce microprocesseur était le premier circuit intégré avec tous les éléments d'un ordinateur dans un seul boîtier. On pouvait y retrouver une unité de calcul, de la mémoire, le contrôle des entrées / sorties. À la suite de cette invention, on a commencé à retrouver des microprocesseurs dans la plupart des objets du quotidien tels que les télévisions, les micro-ondes et bien évidemment les voitures. L'unité de commande électronique est un système embarqué qui commande des dispositifs d'une machine dans les domaines aéronautique, industriel, médical et automobile (Figure 6).



Figure 6: Lien entre tous les domaines

Au sein d'une voiture, de nombreuses fonctions sont donc gérées à l'aide d'un système embarqué. Par exemple, au niveau du moteur avec la gestion des commandes de boîtes de vitesses, mais aussi pour la sécurité active avec le système antiblocage des roues (ABS), la sécurité passive avec les airbags, les ceintures ou encore les radars de recul. Finalement, même l'ordinateur de bord et le système de GPS constituent un système embarqué.

Pour les voitures autonomes, les systèmes électroniques embarqués sont d'autant plus conséquents par la complexité et le nombre des fonctionnalités qui doivent être présentes pour assurer la sécurité des passagers et une conduite agréable. Nous allons donc voir comment tout ceci est possible en étudiant plus en détails les différents réseaux de capteurs que constituent les systèmes embarqués.

3 Les capteurs pour voiture autonome

3.1 Systèmes de capteurs sans fils (WSN) dans une voiture autonome

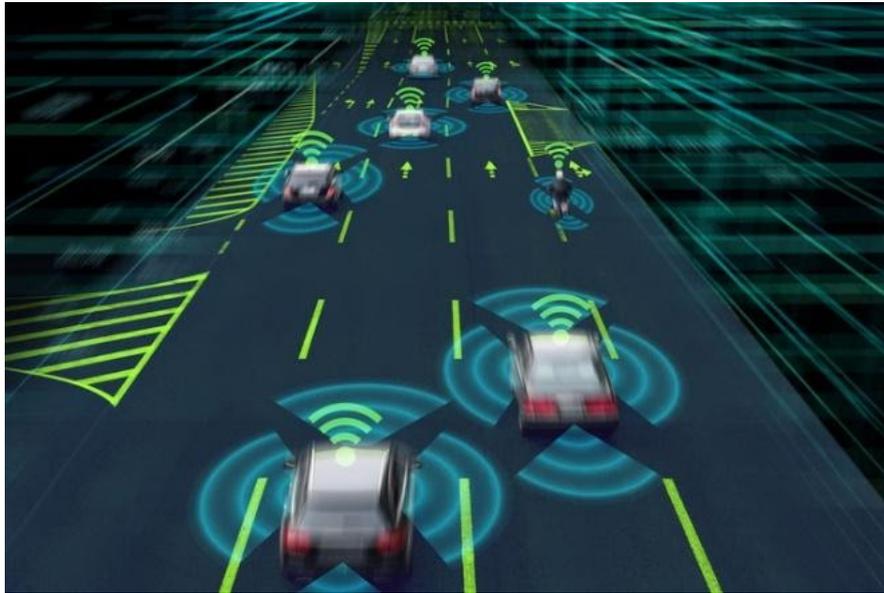


Figure 7: Illustration de l'interconnexion entre les voitures autonomes

3.1.1 L'histoire des réseaux de capteurs sans fils

Dès les années 1990 de nombreux chercheurs se sont intéressés au déploiement de réseaux de capteurs sans fils pour pallier aux réseaux filaires très coûteux et encombrants. En effet seul des réseaux sans fils et quelques balises radio existaient alors et il y avait un besoin évident de créer une communication des données rapide et économe financièrement comme spatialement. Aujourd'hui les réseaux de capteurs sans fils sont partout autour de nous et les défis se sont tournés vers une communication encore plus rapide et respectueuse de l'environnement mais aussi toujours plus innovante. On remarque que l'utilisation, le prix et le coût en énergie des réseaux de capteurs sans fils à beaucoup évolué avec le temps (Figure 8).

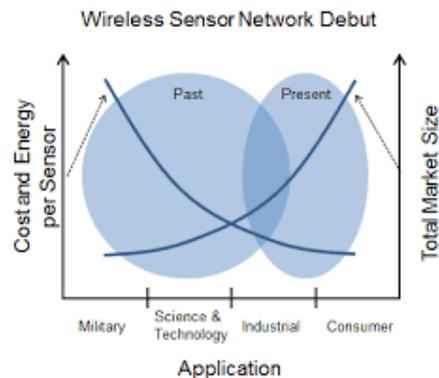


Figure 8: Croissance du marché des capteurs et réduction du coût en fonction de l'application et du temps

Par ailleurs, alors qu'au début les réseaux de capteurs au sein des voitures ne concernaient que des données sur le véhicule en lui-même aujourd'hui ils récoltent des informations autour de celui-ci mais aussi sur toute la Terre. De plus, la création de voitures autonomes nécessite

des réseaux de capteurs sans fils performant pour prévoir chaque obstacles et dangers que la voiture pourrait rencontrer.

3.1.2 Définition du réseaux de capteurs sans fils

Premièrement, les réseaux de capteurs sans fils (Figure 9) répondent à une problématique de partage de l'information entre capteurs, ordinateurs et utilisateurs. Pour y répondre les capteurs partagent les données qu'ils mesurent au nœuds-puits (puits de données) qui est un périphérique capable d'émettre et de recevoir des données. Le nœuds-puits communiquera ensuite avec la partie logicielle (server).

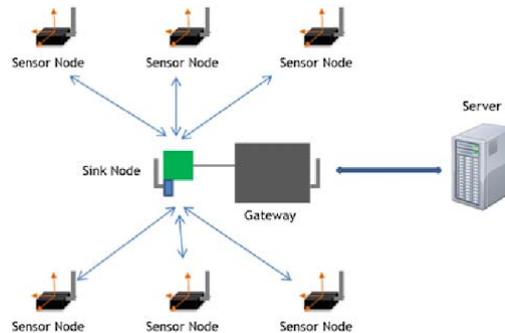


Figure 9: Schéma d'un réseau de capteur sans fil

De plus, il faut différencier les réseaux indoor et outdoor qui intègrent des problématiques différentes (Figure 10).

Key issue	GPS	Vision	RF	Acoustic
Accuracy	High localization accuracy outdoors	High localization accuracy outdoors where no obstacles	Low localization accuracy in both (indoors & outdoors)	Reasonable localization accuracy in both (indoors & outdoors)
The requirement of attaching additional HW to target node	Requires a receiver and transceiver devices	No need to attach any devices	A simple device is required	No need to attach any device
The requirement of attaching additional HW to reference node	No need	A high resolution camera is required	A simple device is required	An acoustic sensor is required
Cost	High	High	Low	Moderate
Density of reference nodes	Low	High density of reference nodes in order to cover the tracking area of interest	Moderate	Moderate
Deployability	Flexible outdoors	Hard indoors	Flexible	Medium
Power consumption	High power consumption	High power consumption	Low	Moderate

Figure 10: Problème majeur pour chaque type de capteur selon certaines problématiques

Les types d'obstacles pouvant être rencontrés entre les capteurs et les récepteurs jouent sur le choix de la stratégie à choisir pour la connexion entre eux . Lorsque l'on est en intérieur ou en souterrain, des murs ou des fenêtres peuvent être présents et impacter la connectivité du réseau. Il faut donc choisir la bonne stratégie de connexion réseau en fonction du type d'application auquel il est soumis. D'autres facteurs entrent en jeu pour le choix de la connexion réseau: la mobilité du système, la consommation électrique, le contrôle à distance, la quantité de données, la fréquence d'envoi, et la sécurité. Dans notre cas, la voiture autonome se situe majoritairement à l'extérieur mais elle peut aussi être dans un parking ou un tunnel ce qui pose un problème d'adaptabilité du réseau de capteur à l'environnement. Un réseau de capteur peut aussi être défini par 3 fonctions (Figure 11):

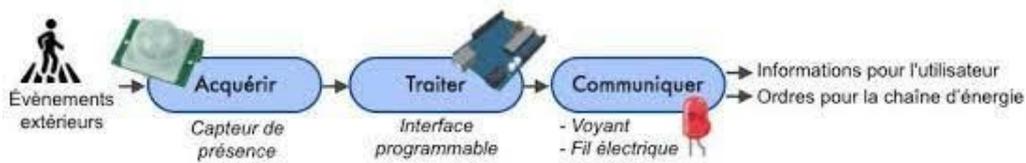


Figure 11: 3 fonctions qui caractérisent un réseau de capteurs

Ainsi le capteur obtiens les informations, l'automate et le microcontrôleur les traitent et enfin l'application, l'écran, le voyant communique l'information à l'utilisateur ou à un objet. Dans le cas de la voiture autonome l'information est communiquée sous forme de commandes ou ordres pour que la voiture agisse et le schéma serait plus compliqué. Il prend en compte la chaîne d'énergie afin de distribuer et de convertir l'information en une action réalisable par les différents outils de la voiture (direction, vitesse, freinage, etc..) (Figure 12).

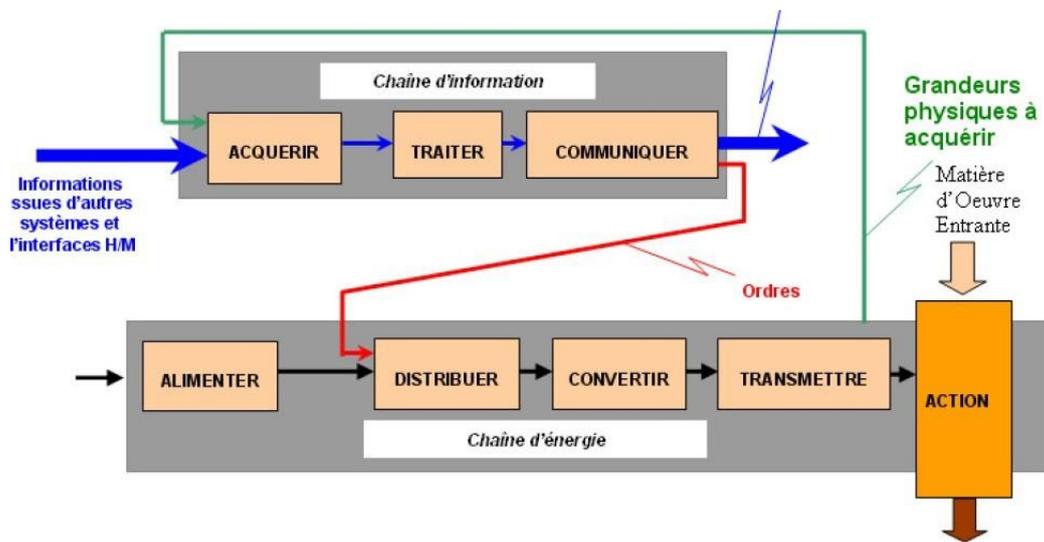


Figure 12: Chaîne d'énergie et d'information pour un réseau de capteurs

3.1.3 La norme IEEE 802.15.4 et protocole ZigBee

La norme IEEE 802.15.4 est une norme standardisée qui assure la bonne transmission d'informations et la lecture de ces informations entre les capteurs et l'application. Cette norme est utilisée par ZigBee Alliance (protocole) dont Amazon, Google, ou Apple font partie. Par ailleurs, il existe d'autres protocoles comme le wifi et le Bluetooth. Mais Zigbee permet à l'instar des autres protocoles d'avoir une autonomie et un coût beaucoup plus bas en énergie. En effet on remarque grâce au tableau suivant (Figure 13) que l'autonomie du protocole Zigbee se compte en années à la grande différence du Bluetooth et du Wi-Fi et que ses besoins mémoire sont moindres en comparaison de ceux du Wi-Fi et du Bluetooth.

Protocole	Zigbee	Bluetooth	Wi-Fi
Bande de fréquence	2,4 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz
IEEE	802.15.4	802.15.1	802.11a/b/g
Besoins mémoire	4-32 KO	>250 KO	>1 MO
Autonomie avec pile	années	jours	heures
Nombre de Nœuds	>65000	7	32
Vitesse de transfert	250 Kb/S	1 Mb/s	11-54-108 Mb/s
Portée	100 m	10-100 m	300 m

Figure 13: Différences techniques entre 3 protocoles

La norme IEEE 802.15.4 peut se découper en deux couches : Dans un premier temps, il faut assurer la transmission des données de manière physique. Dans un deuxième temps il faut pouvoir communiquer avec la partie logicielle.

Pour la première partie, cette norme se caractérise par 3 bandes de fréquences 868MHz, 915MHz et 2,4 GHz avec un débit respectif de 20, 50 et 250 Kbits/s. 27 canaux de transmission différents sont proposés. Dans cette couche, nous trouvons aussi ces fonctionnalités :

- Activer et désactiver le module radio
- Remonter l'état d'un lien à la couche supérieure
- Tester l'occupation du canal
- Choisir le canal de transmission

Un nœud est une unité de base d'un réseau. En pratique c'est souvent un périphérique qui peut émettre et recevoir des informations.

Pour la deuxième partie qui sert d'interface entre la partie logicielle contrôlant la liaison d'un nœud et la partie matérielle, elle se caractérise par 2 types de nœuds :

- Les Full Function Devices (FFDs) : Les FFDs sont équipées d'un coordinateur PAN ou d'un routeur. Si le nœud est un FFD il peut envoyer des beacons (balise), permet la synchronisation, la communication et la possibilité de connecter des services réseaux.
- Reduced Function Devices (RFDs) : Les RFDs ont des fonctionnalités réduites par rapport au FFDs. Ils sont prévus pour des applications simples (signaler l'état d'un capteur, contrôler l'activation d'un actionneur, etc.).

L'importance de ce protocole peut être remarquée par l'intérêt que les GAFAs lui portent, allant jusqu'à s'associer pour pouvoir partager les informations entre leurs produits (Figure 14). Ce projet porte le nom de « Connected Home over IP » et réunit :



Figure 14: Membres collaborant avec Zigbee Alliance

3.1.4 Intégration dans une voiture autonome

L'intégration des systèmes de réseaux de capteurs sans fils est aujourd'hui présente partout mais dans le cas de la voiture autonome on retrouve de nombreux projets. Nous en avons synthétisé certains ci-dessous d'après des documents de recherche (Figure 15) :

Projet	Hardware utilisé	Avantages	Inconvénients
Wireless Sensor Networks for Car-Park Management	<ul style="list-style-type: none"> 1- bloc d'alimentation: avec un LM7805 régulant la tension 2- microcontrôleur PIC18F452 (Pics pins) 3- contrôleur de courant: NPN transistor BC547 4- WPT charger: H-bridge circuit inverseur 5- Pour l'énergie : 2 piles AA 	<ul style="list-style-type: none"> 1- Très modulaire, facile à implémenter si le projet évolue 2- Le choix d'antenne n'est pas important dans les résultats, bonne communication à moins de 5m 3- Détecte correctement le champ magnétique mais faire attention à celui de la terre 4- Marche parfaitement 5- Facile à changer 	<ul style="list-style-type: none"> 1- Portée mais pas plus de précision 2- Au dessus de 5m la communication n'est plus fiable 3- Dépend beaucoup de l'orientation du capteur 4- Aucun 5- Nécessite un remplacement, taille importante vu le projet miniature
"Système intelligent de transmission d'énergie sans fil" pour véhicule autonome	<ul style="list-style-type: none"> 1- ICEDB 2- Carnet, CTL(layer), MAL (Mule adaptation layer), CNL (network) 3- Wi-Fi, Bluetooth, GPS, camera, la mémoire flash du téléphone et les clés usb 4- SOL queries 5- OBD-II, on-board diagnostic 6- marche sur linux 2.4.31 7- node hardware: Soekris net4801, 586-class processeur, 802.11b mini PCI Wi-Fi card 	<ul style="list-style-type: none"> 1- moins cher en maintenance des infrastructures qu'un système de chargement filaire 2- début du chargement rapide, 15ms 	<ul style="list-style-type: none"> 1- ancien système présent dans des voitures non automatisées 1- influencé par l'environnement embarqué, peu fiable 2- la précision diminue quand le nombre de personnes augmente
CarTel	<ul style="list-style-type: none"> 1- Wifi embarquée 2- CSI 	<ul style="list-style-type: none"> 1- radio bon marché pour reconnaître le conducteur 2- analyse les changements subtils de la respiration pour vérifier l'état de santé, plus de sécurité 3- indique le nombre de personnes présentes dans la voiture 4- indique la présence d'un enfant seul dans une voiture car c'est dangereux 	<ul style="list-style-type: none"> -Si la route est complexe, le LIDAR peut avoir plus de mal à différencier les véhicules gérés des autres objets - Actuellement, si le haut d'un véhicule géré est visible tout au long d'une occlusion par un véhicule plus court qui circule, on ne peut pas encore en déduire qu'un noggap s'est produit dans la voie de stationnement lors de l'occlusion.
Wireless AI in Smart Car: How Smart a Car Can Be?	<ul style="list-style-type: none"> 1- a vertically scanning LIDAR sensor on the driver's side 2- a differential global positioning system receiver (DGPS) 3- speedometer measurements via the on-board diagnostics port (OBD) 4- a yaw gyroscope 	<ul style="list-style-type: none"> 1- Robuste, bon temps de réaction, étanche, faible sensibilité à la lumière du soleil, détecte bien les obstacles 2- Protégé de la poussière, assez bonne résolution, aide bien à détecter les objets 3- Donne bien la géolocalisation et de manière précise 4- Très bonne précision avec un bon taux de rafraichissement et ne compte pas le champ magnétique de la terre 5- Waterproof, bonne fréquence de rafraichissement 	<ul style="list-style-type: none"> 1- Véhicules à jour sur le trafic, les accidents et dangers potentiels
Automated parking surveys from a LIDAR equipped vehicle	<ul style="list-style-type: none"> 1- connexion a un large réseau alimenté par des informations sur le trafic 2- Récepteurs GPS 	<ul style="list-style-type: none"> 1- Robuste, bon temps de réaction, étanche, faible sensibilité à la lumière du soleil, détecte bien les obstacles 2- Protégé de la poussière, assez bonne résolution, aide bien à détecter les objets 3- Donne bien la géolocalisation et de manière précise 4- Très bonne précision avec un bon taux de rafraichissement et ne compte pas le champ magnétique de la terre 5- Waterproof, bonne fréquence de rafraichissement 	<ul style="list-style-type: none"> 1- A besoin de plusieurs caméras pour avoir un bon angle de vision 2- Peu d'images par seconde 3- Moins précis si le signal est plus faible (GPS uniquement) 4- Aucun 5- Peu adapté à faible vitesse car trop peu précis, champ magnétique très impacté si le véhicule est proche de partie métallique
Big Data	<ul style="list-style-type: none"> - Laser scanner sensors (SICK LMS291-S05) - Camera (Sony/ XCD-SX910CF) - Differential GPS system (Omnistar Fugo 8300HP) - Optical gyroscope (KVH DSP3000) - Inertial measurement unit (Crossbow NAV420) 	<ul style="list-style-type: none"> 1- Robuste, bon temps de réaction, étanche, faible sensibilité à la lumière du soleil, détecte bien les obstacles 2- Protégé de la poussière, assez bonne résolution, aide bien à détecter les objets 3- Donne bien la géolocalisation et de manière précise 4- Très bonne précision avec un bon taux de rafraichissement et ne compte pas le champ magnétique de la terre 5- Waterproof, bonne fréquence de rafraichissement 	<ul style="list-style-type: none"> 1- A besoin de plusieurs caméras pour avoir un bon angle de vision 2- Peu d'images par seconde 3- Moins précis si le signal est plus faible (GPS uniquement) 4- Aucun 5- Peu adapté à faible vitesse car trop peu précis, champ magnétique très impacté si le véhicule est proche de partie métallique
Mapping with an Autonomous Car	<ul style="list-style-type: none"> - Laser scanner sensors (SICK LMS291-S05) - Camera (Sony/ XCD-SX910CF) - Differential GPS system (Omnistar Fugo 8300HP) - Optical gyroscope (KVH DSP3000) - Inertial measurement unit (Crossbow NAV420) 	<ul style="list-style-type: none"> 1- Robuste, bon temps de réaction, étanche, faible sensibilité à la lumière du soleil, détecte bien les obstacles 2- Protégé de la poussière, assez bonne résolution, aide bien à détecter les objets 3- Donne bien la géolocalisation et de manière précise 4- Très bonne précision avec un bon taux de rafraichissement et ne compte pas le champ magnétique de la terre 5- Waterproof, bonne fréquence de rafraichissement 	<ul style="list-style-type: none"> 1- A besoin de plusieurs caméras pour avoir un bon angle de vision 2- Peu d'images par seconde 3- Moins précis si le signal est plus faible (GPS uniquement) 4- Aucun 5- Peu adapté à faible vitesse car trop peu précis, champ magnétique très impacté si le véhicule est proche de partie métallique

Figure 15: Tableau récapitulatif des avantages/inconvénients en fonction de l'hardware utilisé

Nous avons remarqué qu'il existe beaucoup d'applications des réseaux de capteurs dans la voiture mais que pour mieux les comprendre il faut également se pencher sur les capteurs en eux-même et leur intégration dans le réseau et la voiture. En effet, chaque capteur a une utilité et les informations qu'il renvoie doivent être triées par le réseau de capteur. Aujourd'hui il existe de nombreux ordinateurs ou micro-ordinateurs capables de trier les informations essentielles et de les transmettre. L'intelligence artificielle est notamment un point clé de l'avancée technologique pour la voiture autonome. Son intégration dans la voiture est surtout un défi de puissance car l'IA a besoin de beaucoup d'énergie et sa seule solution serait de la décentraliser dans le cloud. Se pose alors la question de l'échange de données entre la voiture et le cloud (Figure 16), l'arrivée de la 5G pourrait alors permettre cette transmission rapide.

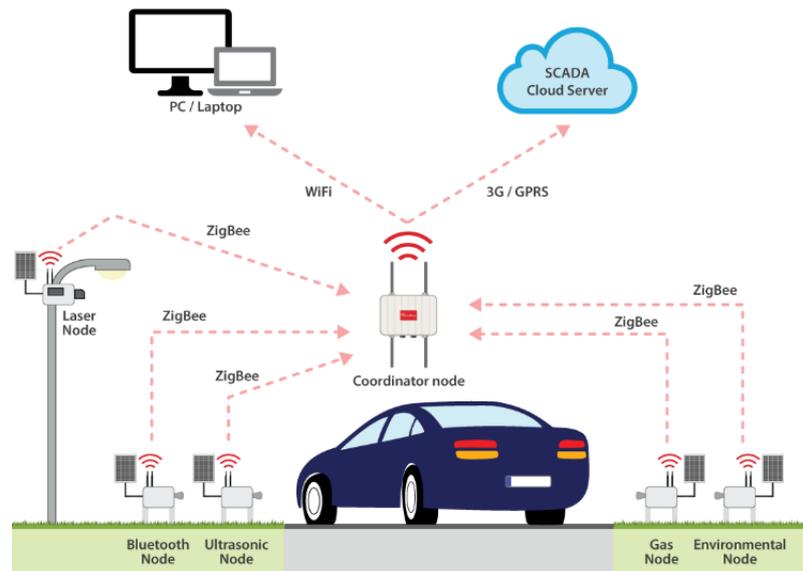


Figure 16: Potentielle décentralisation des données sur le cloud et connexion avec le coordina-teur

3.2 Caméra

Maintenant que nous avons défini et classé selon différents types les voitures autonomes, nous allons nous intéresser aux capteurs utilisés dans des voitures autonomes et dans quelques parties précisément. Dans le but de devenir de plus en plus autonome, l'un des problèmes majeurs auquel la voiture autonome doit faire face est l'amélioration de la perception de son environnement. Pour détecter et interpréter les informations environnantes (route, autres véhicules, piétons, signalisation) de manière la plus fiable possible, la voiture autonome doit s'équiper d'un nombre important de capteurs employant des technologies disposant chacune d'avantages et d'inconvénients.

La caméra est un élément essentiel dans le fonctionnement des voitures autonomes. Les caméras, de la même manière que les yeux pour l'Homme permettent de filmer, elle est utile dans un grand nombre de situation. Cependant, les yeux humains sont moins performants que la caméra pour plusieurs raisons :

- Les yeux n'arrivent pas observer simultanément la totalité de ce qui se trouve dans son champ de vision alors que la caméra n'a pas de problème pour l'observer de manière précise.
- La caméra ne rencontre pas de problèmes de coexistence avec les transmissions des autres véhicules, c'est un système « passif »

- Lorsque que la caméra a au moins 2 objectifs côte à côte, elle peut calculer les distances et la profondeur entre les objets, on parle alors de vision 3D stéréoscopique
- Le temps n'altère pas les performances de la caméra

3.2.1 Fonctionnement

L'appareil prend un nombre élevé d'images par seconde (25 pour la norme française). Un algorithme s'occupe, par la suite, d'analyser les images afin que les informations soient transmises à la voiture autonome. Les caméras sont utiles dans la détection de l'environnement (obstacles, route, signalisation) et l'aide au stationnement. Elles permettent notamment de détecter les autres usagers de la route comme par exemple les cyclistes ou les motos.

3 types de caméra se distinguent, en fonction du nombre de lentilles. Premièrement la caméra monoculaire, où les distances sont évalués seulement avec une très faible précision, mais qui a l'avantage d'être stable. La caméra binoculaire qui à défaut d'être un peu moins stable permet de très bien détecter les distances. Enfin, la caméra trinoculaire, qui fournit encore d'avantages d'informations à l'aide de la combinaison des 3 lentilles. Cependant, il faut noter que le fusionnement du signal devient plus compliqué si le nombre de données augmente.

L'inconvénient des caméras est la manque de fiabilité lorsque que la météo se dégrade, en effet par temps de neige ou de pluie la caméra aura des difficultés à détecter les obstacles ce que l'on détaillera plus dans les limites.

3.3 Radar et les capteurs ultrasons

Les radars et les capteurs ultrasons sont également des systèmes présents quasiment dans la totalité des voitures autonomes. La fonctionnalité majeure de ces systèmes est de mesurer la distance entre le capteur et les objets environnants et donc de détecter la présence d'obstacles. Les radars sont utilisés dans le but d'alerter l'ordinateur central en cas de détection d'un obstacle sur le chemin de la voiture. Les véhicules autonomes sont équipés de plusieurs capteurs de ce type dans le but de vérifier si l'information détectée n'est pas erronée.

3.3.1 Fonctionnement

Les radars et sonar ultrasons sont dotés d'un capteur et d'un émetteur laser, l'émetteur envoie des ondes. Si elles rencontrent un obstacle, elles sont renvoyées et par le même chemin, en sens inverse, le capteur peut ainsi les détecter. En fonction du temps entre l'émission et la réception et connaissant la vitesse de l'onde, le système calcule la distance séparant le radar de l'obstacle. Les radars et les capteurs ultrasons se basent sur le même fonctionnement, la différence entre les 2 systèmes réside dans la nature des ondes qu'ils utilisent. En effet, le radar émet des ondes électromagnétiques (Figure 17) et le capteur ultrason comme son nom l'indique émet des ondes sonores.

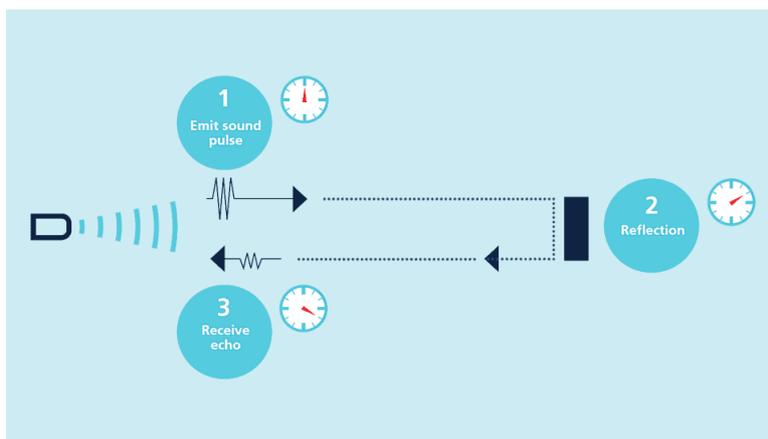


Figure 17: Fonctionnement d'un radar

De par la nature de l'onde qu'il émet, le sonar ultrasons est utilisé pour détecter des obstacles à très courte distance, il est donc notamment utilisé lors du stationnement pour détecter les voitures adjacentes et le trottoir. Le radar, quant à lui, a une portée pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres, il sera moins précis que le sonar ultrasons pour les objets à courte distance. Le radar utilise des ondes du domaine des radiofréquences c'est-à-dire qu'elles sont comprises entre 300MHz et 15GHz.

Un avantage de ce système par rapport à la caméra ou encore au lidar est le temps de réaction qui est plus faible pour le radar. En effet, le radar récupère des données bien plus abstraites notamment de par le fait qu'il ne filme pas l'espace environnant. La masse de données à traiter est largement moins importante ce qui lui permet d'avoir un temps de réaction plus intéressant.

Sur cette image (Figure 18) qui analyse le même environnement avec (à gauche) un lidar et (à droite) un radar on peut voir que la précision des radars est plus faible que celle du Lidar mais que la quantité d'information à traiter est moindre.

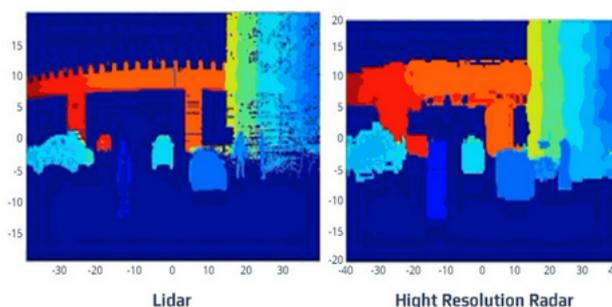


Figure 18: Différence de précision entre un radar et un lidar

Un désavantage que l'on peut constater dans l'utilisation du radar est la puissance des ondes utilisées. En effet, les ondes émises par ces derniers peuvent avoir des effets nocives sur le corps humain. De plus, les radars dotés d'une grande puissance peuvent également interférer avec les autres ondes électromagnétiques présentes à proximité. La puissance de ces ondes et l'impact qu'elles pourraient avoir sur notre santé vient poser naturellement une question dans un futur où l'on envisage de plus en plus le développement des voitures autonomes. Nous compléterons cela dans les limites

3.4 Lidar

Le rôle du lidar est assez similaire à celui du radar, en effet il est utilisé dans la voiture autonome pour détecter les obstacles et mesurer les distances entre ces derniers et la voiture.

Le lidar fonctionne de la même manière que le radar, en effet il possède également un capteur et un émetteur d'onde (Figure 19). Tout comme le radar, l'émetteur émet une onde qui, si elle rencontre un obstacle, sera réfléchiée et captée par le capteur. En connaissant la vitesse de l'onde émise (vitesse de la lumière) on peut alors calculer la distance entre la voiture et l'obstacle détecté. Les ondes émises ont des longueurs d'ondes comprises entre 10nm et 0.1mm. La différence majeure avec le radar est que le lidar ne peut faire des mesures sur un seul objet en même temps. Lorsqu'on l'utilise au sein de la voiture autonome, on cherche à percevoir l'environnement dans son intégralité c'est pourquoi on effectue donc des rotations sur le lidar. Dans un espace en 3 dimensions, il positionne chaque point rencontré par l'onde lors de la rotation. Il est possible de réaliser un nuage de points modélisant la réalité en envoyant un nombre élevé d'ondes à intervalle de temps très rapproché.

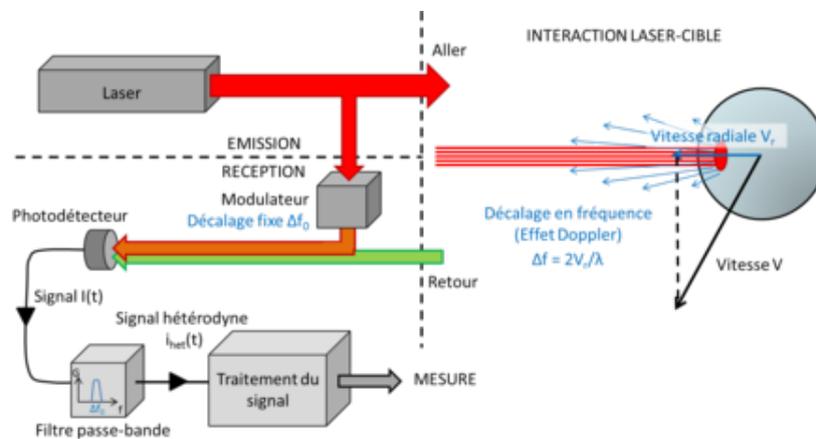


Figure 19: Fonctionnement d'un lidar

Le atout majeur du lidar est qu'il permet de cartographier de manière très précise les données topographiques environnantes. Contrairement à la caméra, cette technologie fonctionne également de nuit et sur des endroits non visibles dans le champ de vision humain.

Le principal défaut du lidar est son prix, en effet, c'est un système très onéreux. De plus, le fait que le lidar puisse analyser avec une grande précision son entourage ralenti le temps de traitement de ces données. En effet, la quantité de données recueillies est tellement importante que ce système est bien plus long que le radar au niveau du temps de réaction mais nous y reviendrons dans les limites.

3.5 Divers capteurs

Voici maintenant quelques systèmes moins essentiels au fonctionnement de la voiture autonome mais que l'on peut quand même retrouver dans la voiture autonome.

- Odomètre ou codeur rotatif : En comptant le nombre de tours qu'effectue une roue en fonction du temps, l'odomètre peut mesurer la vitesse ou la distance parcourue par une voiture. Ces informations sont utilisées, par la suite, par l'ordinateur central (réguler la vitesse, géolocalisation).

- Centrale à inertie : Une centrale à inertie est composée de 6 capteurs : 3 gyromètres, mesurant la vitesse et la position de la voiture, et 3 accéléromètres, utilisés pour déterminer les déplacements selon les 3 axes orthogonaux. Le GPS peut déterminer les mêmes informations mais ce dernier nécessite une connexion à un satellite.
- Système anti-franchissement de lignes (Figure 20) : Deux systèmes différents existent :
 - o Des capteurs infrarouges détectent des potentielles variations au sol
 - o Une caméra recherche les zones de couleur blanche en forme de ligne

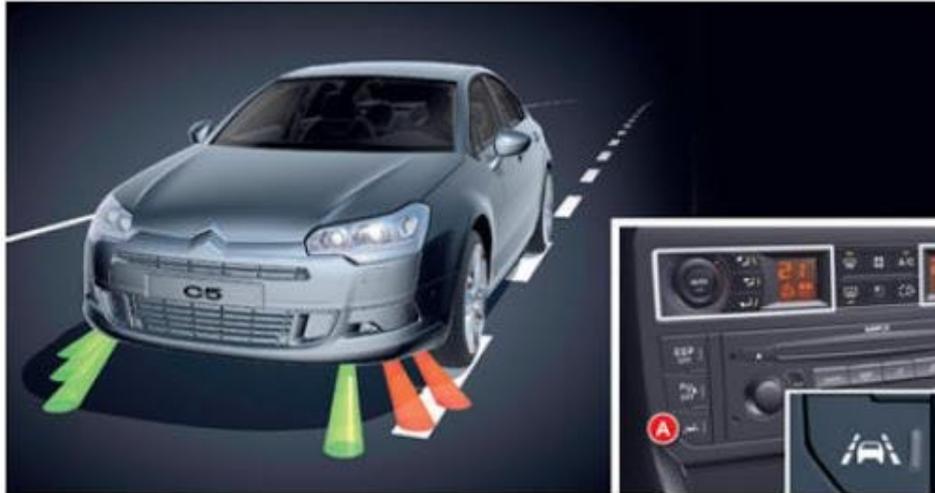


Figure 20: Système anti-franchissement de lignes

Ce système permet soit d'avertir le conducteur d'un changement de file ou peut directement modifier la trajectoire de la voiture. La détection peut être altérée dans les cas où les capteurs sont sales, notamment, avec la présence de boue ou de neige ou alors si les marquages au sol sont usés.

4 Intégration des réseaux de capteurs dans la voiture autonome

4.1 Comment implémenter ces capteurs dans une voiture autonome

Comme nous l'avons vu, chaque capteur possède ses avantages mais également des limites que l'on détaillera dans la partie qui leur sont dédiées. On ne peut faire fonctionner une voiture autonome avec un seul type de capteur pour l'instant, voire pour toujours. En revanche, la combinaison de capteurs est intéressante afin de résoudre toutes les problématiques.

Chaque capteur a un rôle ou plusieurs (Figure 21) :

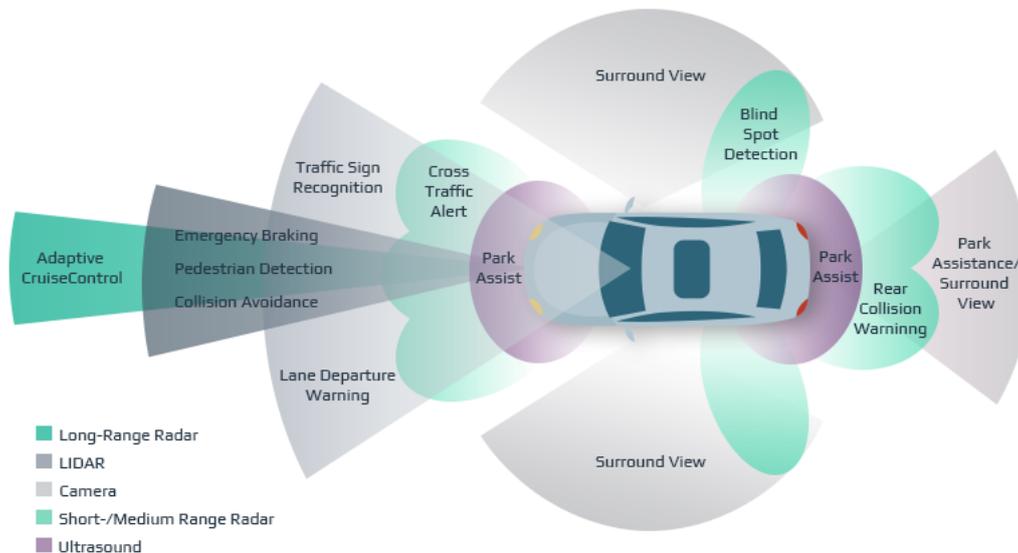


Figure 21: Rôle des différents capteurs

On peut voir donc la complémentarité de tous les capteurs en œuvre.

Les lidars étant généralement volumineux, on les place à l'extérieur de la voiture. Voilà à quoi pourrait ressembler une intégration de ces capteurs :

Il existe d'autres capteurs mais cela est un schéma des capteurs les plus essentiels et ceux que l'on décrit (Figure 22).

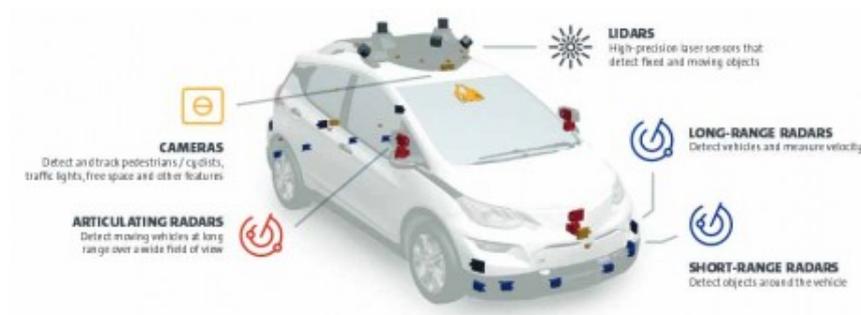


Figure 22: Exemple d'emplacement des différents capteurs sur une voiture autonome

4.2 Etude de cas : Stationnement d'un véhicule autonome grâce aux parking connectés

Intéressons-nous maintenant à une étude de cas concrète de l'utilisation de capteurs sans fils pour la voiture autonome : le stationnement du véhicule et plus précisément, la recherche d'une place libre.

Comme nous l'avons vu dans les parties précédentes, bon nombre de capteurs sont intégrés aux véhicules autonomes pour assurer son fonctionnement optimal. Cependant, la question se pose quant aux capteurs à utiliser quand l'utilisateur souhaite se garer.

Le système ici étudié, se base sur le concept de Vehicular Sensor Networks (VSN) qui consiste à considérer les véhicules connectés et véhicules autonomes comme des nœuds d'un réseau de capteurs géant. Les véhicules d'un tel système communiquent grâce à réseau de communication de courte distance appelé VANET (Vehicular ad hoc network) (Figure 23). Il fonctionne grâce

à la communication entre les véhicules qui possèdent des OBU (Onboard Units) et des points relais appelés RSU (Roadside Units).

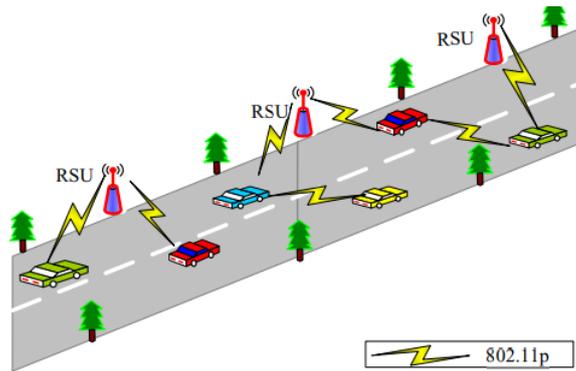


Figure 23: Vehicular ad hoc network

Les méthodes les plus utilisées pour détecter des places de parking libres fonctionnent pour la plupart grâce à différents capteurs, que ce soient des capteurs à ultrasons qui utilisent l'écholocation, des magnétomètres ou encore des capteurs optiques (typiquement une caméra). C'est le cas de la technologie ParkNet développée par des chercheurs de l'Université de New Jersey. Elle utilise tout d'abord la technologie bien connue du GPS afin de déterminer l'emplacement de places de parking disponibles puis une fois la place trouvée, un capteur à ultrasons placé sur le côté du véhicule vérifie que l'espace disponible est suffisant pour la voiture puis le véhicule réalise la manœuvre.

La détection de la place par le capteur à ultrasons est représentée sur ce schéma (Figure 24) :

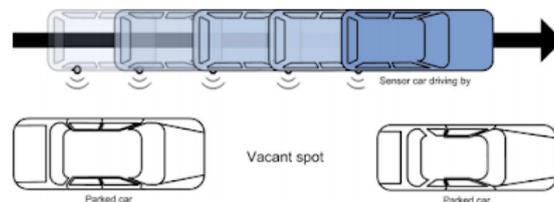


Figure 24: Détection de la place par le capteur à ultrasons

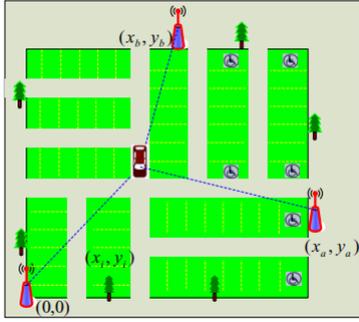
Un problème de ce type de détection est qu'il n'est fonctionnel qu'à courte distance typiquement quand l'automobile est déjà dans le parking en question et qu'il est plutôt coûteux, surtout quand la taille du parking commence à devenir grande. Grâce au système de communication VANET basé sur le concept de VSN, des « parking-intelligents » pourraient communiquer avec les voitures autonomes et les voitures connectées afin de donner des informations supplémentaires.

C'est par exemple le cas du projet « SPARK » imaginé par des chercheurs de l'université de Waterloo et de l'Ontario Institute of Technology.

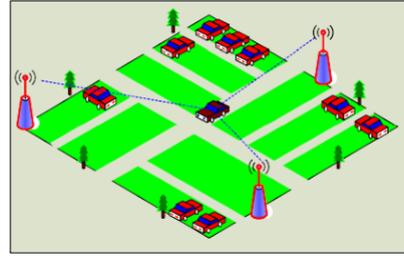
Les deux objectifs principaux de ce projet de parking « intelligent » sont la recherche d'une place dans une zone très occupée ainsi que la sécurité des véhicules pour éviter les vols.

Ce projet de parking intelligent fonctionnant en collaboration avec des voitures autonomes ou connectées équipées de technologie VANET permet donc de recevoir des informations concernant les places libres sur d'immenses parkings à coût réduit en comparaison avec l'utilisation de capteurs plus classiques.

Le RSU permet de donner immédiatement la position des places libres aux véhicules afin



(a) Modèle de parking à l'étude



(b) Vue en perspective

d'économiser le carburant habituellement utilisé quand on cherche une place. De plus, les RSU permettent d'empêcher les vols grâce à une alarme qui se déclenche et vont même jusqu'à suivre la géolocalisation des véhicules volés grâce aux émetteurs et récepteurs sans fil OBU présents dans le véhicule (a et b). De plus, il est possible de réserver une place de parking précise à l'avance toujours grâce à la technologie VANET.

Cependant, le principal problème de ces parkings « connectés » est qu'ils ne prennent souvent en compte que les véhicules autonomes ou connectés au détriment des véhicules plus « traditionnels ».

En effet, implémenter de tels systèmes du jour au lendemain serait compliqué puisqu'ils nécessitent forcément des voitures compatibles avec la technologie utilisée.

C'est pourquoi certains projets essaient d'optimiser l'aménagement de tels parkings en réservant des places choisies grâce à des algorithmes sur des arbres binaires (TBSA) prenant en considération les places qui facilitent l'accès à d'autres voitures autonomes sans pour autant gêner les véhicules traditionnels. Ainsi ce type de parking différencie les places « libres » des places « accessibles aux véhicules autonomes » pour permettre à tous les types de véhicules de collaborer (Figure 26).

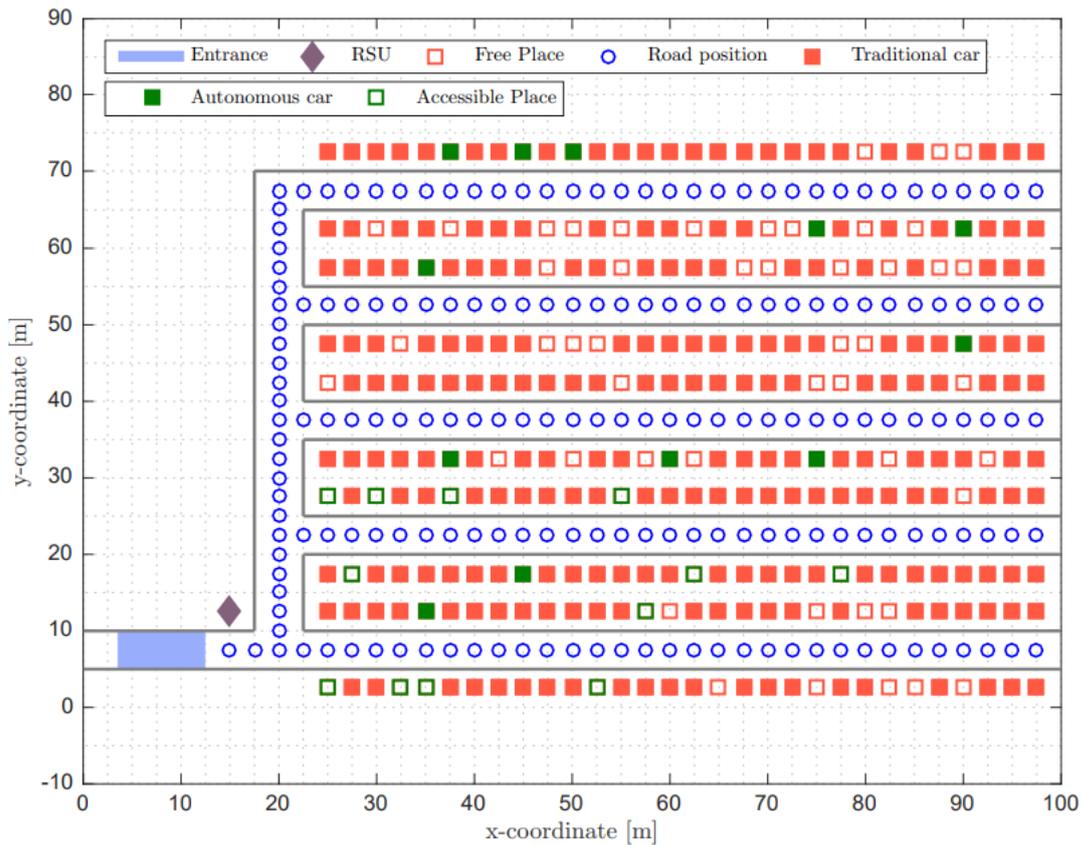


Figure 26: Modélisation du parking sur un graphe

Pour conclure, cette étude de cas nous montre donc que grâce aux réseaux de capteurs sans fil (comme les capteurs ultrasons) et à l'utilisation de communications sans fil (comme le protocole VANET), il est possible d'optimiser l'agencement de parkings pour les voitures autonomes. Cependant, il reste compliqué de trouver le juste milieu pour satisfaire à la fois les véhicules autonomes et les véhicules traditionnels.

5 Limites

Dans cette partie, nous discuterons des limites à la fois des capteurs mais également des limites plus générales à ce que l'on entend par voiture autonome.

Premièrement, les caméras présentent une limite bien connue, tel un œil humain, la qualité de perception est extrêmement réduite lorsque les conditions météorologiques sont mauvaises. Lors de brouillard, de chutes de neige, ou même d'obscurité trop prononcée, la caméra ne devient plus un outil pertinent.

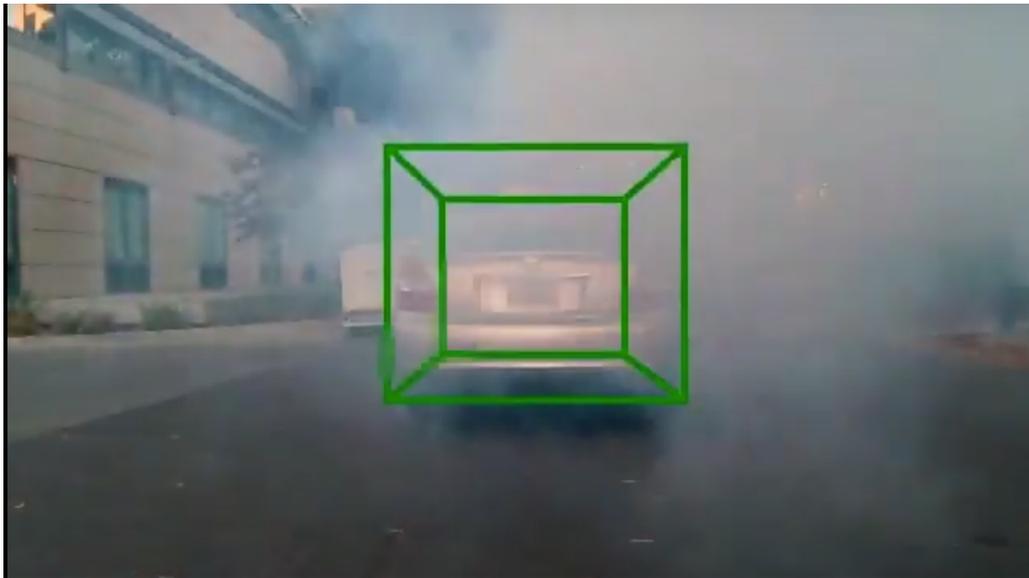


Figure 27: Vision de la caméra lors de brouillard ou de fumée

Sur cette image (Figure 27) on se rend bien compte qu'il est complexe de distinguer la voiture qui n'est pourtant qu'à quelques mètres de notre pare-brise.

Ensuite, les radars présentent des avantages par rapport à la caméra tel que le fonctionnement en toutes situations. En revanche, les radars ont leurs défauts. Fonctionnant grâce aux ondes radios, la précision du radar n'est pas suffisante pour tous les types d'événements que l'on peut rencontrer. Si une voiture coupe devant le véhicule alors le radar n'aura pas nécessairement la précision pour en alerter le véhicule autonome. De plus, les petits véhicules, tels que les bicyclettes et les motocyclettes, ou tout autre véhicule ne roulant pas au centre de la voie ont du mal à être détectés par un radar. Les virages, l'agrégation d'objets proches les uns des autres constituent également un problème majeur pour les radars.

Maintenant, parlons des lidars. Les lidars comme nous l'avons vu précédemment fonctionnent avec la lumière des lasers plutôt que les ondes radios des radars. Ceci présente un intérêt certain pour la précision mais pose un problème similaire à la caméra, lors du mauvais temps, les lidars ne sont plus intéressants. Les lidars ont également une contrainte de coût et de place. Ils sont généralement montés à l'extérieur de la voiture car ils sont assez gros. Un autre point crucial comparé à une caméra est que les lidars ne permettent pas de différencier les couleurs ou les contrastes.

Finalement, on voit bien qu'aucun capteur n'est suffisant pour pouvoir satisfaire nos besoins. C'est donc l'association de plusieurs capteurs qu'on recherche afin de combler tous les inconvénients de chacun.

Nous pouvons également discuter des limites de l'intelligence artificielle qui devient de plus en plus importante dans ce secteur. L'un des problèmes est que les données manipulent les algorithmes. Il n'est pas possible de savoir exactement ce que le modèle a appris. Peut-être qu'un cas très pointu sera mal interprété et le véhicule autonome réagira de la mauvaise façon. Bien évidemment l'important est la balance bénéfice-risque et le cas où aucun accident n'arrivera n'est qu'une utopie. C'est donc pourquoi la voiture autonome est une solution afin d'augmenter les bénéfices en réduisant les risques.

6 Conclusion

Pour conclure, les réseaux de capteurs sans fils sont utilisés partout et sous de nombreuses formes. Présentant une communication rapide et pratique, ils vont permettre aux voitures autonomes d'être un moyen de transport sûr, efficace et agréable. Celles-ci sont en plein développement et seront sans doute présentes dans un futur plus proche qu'on ne le pense. De plus, les réseaux de capteurs sans fils sont également utilisés pour la mesure des flux de piétons ou de véhicules. Nous avons pu en étudier un exemple avec les parkings connectés, communiquant à distance avec des voitures compatibles afin d'organiser la disponibilité des places. On remarque ainsi que ces réseaux de capteurs ont un très grand potentiel d'exploitation, sûrement dans plus de domaines que ce que l'on pourrait imaginer.

A travers ce rapport, nous avons principalement appris sur les voitures autonomes et les capteurs qui leurs sont nécessaires pour évoluer dans le trafic avec les meilleures conditions possibles. Pour autant, pourrions-nous leur faire entièrement confiance pour prendre une décision si un accident devait obligatoirement se produire? Vaut-il mieux sauver le conducteur ou un piéton? Comment faire ce choix? Ces interrogations humaines font partie des limites et des questions qui concernent le développement des voitures autonomes et que nous avons été amenés à nous poser alors que nos connaissances sur ce sujet augmentaient. En effet, en tant que futurs ingénieurs, nous devons rester vigilants aux questions d'éthique que soulèvent les innovations dues au progrès.

Nous avons été ravis de faire ce projet. Il nous a permis de découvrir un peu plus le milieu de l'automobile et de ses technologies actuelles tout en nous faisant rêver au futur et à ses avancées prochaines. Travailler sur ce projet a pu confirmer nos envies de poursuivre dans les différentes filières en 3ème année d'INSA afin d'évoluer dans un milieu qui nous plaît et nous correspond au mieux.

De plus, mener ce projet en équipe avec d'autres étudiants que nous ne connaissons pas, et principalement à distance à cause de la situation sanitaire actuelle, nous a beaucoup challengés. Nous avons cependant tout de même appris à communiquer afin de partager nos idées et nos connaissances. Nous avons aussi dû nous coordonner les uns avec les autres pour travailler ensemble malgré la distance. Ce fut une expérience très enrichissante qui nous a permis d'acquérir des compétences scientifiques et humaines qui nous seront utiles en tant que futurs ingénieurs.

6.1 Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier notre enseignant encadrant Mr Idoudi MONAEM pour ses conseils et sa volonté de nous aider tout au long de ce projet.

Nous remercions également l'INSA Rouen Normandie qui nous a permis de réaliser ce projet. En effet, cela nous a permis de travailler la communication et les sens des responsabilités qu'implique la réalisation d'un projet en équipe, et de développer des connaissances variées sur le domaine qui englobe notre sujet.

7 Bibliographie

References

- [1] MBAMCI : La 5G et le futur des voitures autonomes connectées : <https://mbamci.com/la-5g-et-futur-voitures-autonomes-connectees/>, consulté le 21/05/2021
- [2] QUENTIN CAZERGUES : Commentaires - La première voiture de l'histoire maintenant en vente : <https://www.caradisiac.com/la-premiere-voiture-de-l-histoire-maintenant-en-vente-169382.htm>, consulté le 21/05/2021
- [3] WIKIPEDIA : Véhicule autonome : https://fr.wikipedia.org/wiki/V%C3%A9hicule_autonome, consulté le 21/03/2021
- [4] MATMUT : Quels sont les différents niveaux d'autonomie d'une voiture autonome : <https://www.matmut.fr/assurance/auto/conseils/vehicule-autonome-differents-niveaux-autonomie>, consulté le 07/03/2021
- [5] JEFF HECHT : Driving Tests Coming for Autonomous Cars :<https://spectrum.ieee.org/cars-that-think/transportation/self-driving/driving-tests-coming-for-autonomous-cars>, consulté le 08/03/2021
- [6] IEEE SPECTRUM : Accelerating Autonomous Vehicle Technology :<https://spectrum.ieee.org/transportation/self-driving/accelerating-autonomous-vehicle-technology>, consulté le 15/03/2021
- [7] UNIVERSITE GUSTAVE EIFFEL : Historique : <http://www-igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2002/SE/historique.html>, consulté le 21/05/2021
- [8] LYCÉE HUGO BESANCON : Les systèmes électroniques embarqués dans l'automobile : https://lyceehugobesancon.org/btssn/IMG/pdf/Syst2_emba_VictorHugo.pdf, consulté le 21/05/2021
- [9] WIKIPEDIA : Système embarqué : https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_embarqu%C3%A9, consulté le 21/05/2021
- [10] WIKIPEDIA : Unité de commande électronique : https://fr.wikipedia.org/wiki/Unit%C3%A9_de_commande_%C3%A9lectronique, consulté le 21/05/2021
- [11] (image) OBSERVATOIRE DE LA SANTE VISUELLE ET AUDITIVE : Les systèmes embarqués d'aide à la conduite au service de notre vision et audition : <https://www.observatoire-groupeoptic2000.fr/prospectives/veille-innovations-et-sante/voir-et-entendre-dans-la-voiture-de-demain/>, consulté le 21/05/2021
- [12] SOGETILABS : Sensing system and wireless communication network of vehicle. Autonomous car. Driverless car. Self driving vehicle. : <https://labs.sogeti.com/knowledge-augmentation-with-collaborative/sensing-system-and-wireless-communication-network-of-vehicle-autonomous-car-driverless-car-self-driving-vehicle/>, consulté le 21/05/2021
- [13] INTECHOPEN : Wireless Sensor Networks: Applications et Challenges : <https://www.intechopen.com/online-first/wireless-sensor-networks-applications-and-challenges>, consulté le 15/03/2021

- [14] CEDRIC RAMASSAMY : Analyse des protocoles des Réseaux de capteurs sans-fil : thèse de doctorat, Université des antilles et de la guyane, 23 novembre 2012 : <https://www.theses.fr/2012AGUY0586.pdf>, consulté le 15/03/2021
- [15] SILICON LABORATORIES : The Evolution of Wireless Sensor Networks : <https://www.silabs.com/documents/public/white-papers/evolution-of-wireless-sensor-networks.pdf>, consulté le 21/05/2021
- [16] J. MOON; T. HA : A Car Parking Monitoring System Using Wireless Sensor Networks : <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Car-Parking-Monitoring-System-Using-Wireless-Moon-Ha/aa53088ee8fd9353dddaecf5af3a36607fef02a7>, consulté le 21/05/2021
- [17] TAREQ ALHMIEDAT : A comparison among the localization technologies used in Threats detection : https://www.researchgate.net/figure/A-comparison-among-the-localization-technologies-used-in-Threats-detection_tbl1_258650988, consulté le 21/05/2021
- [18] Mme DEMOLLIENS : Synthèses de technologie : <https://docplayer.fr/39791614-College-maryse-bastie-syntheses-de-technologie-niveau-4eme-annee-scolaire-professeur-mme-demolliens.html>, consulté le 21/05/2021
- [19] MICKAËL BAZOGE : Apple, Amazon, Google et Zigbee lancent un nouveau standard pour la domotique : <https://www.igen.fr/domotique/2019/12/apple-amazon-google-et-zigbee-lancent-un-nouveau-standard-pour-la-domotique-111939>, consulté le 21/05/2021
- [20] GERMAINE MOUNIER : Zigbee ZigBee est un protocole permettant la communication de petites radios, à consommation réduite, basée sur la norme IEEE 802.15.4 pour les réseaux : <https://slideplayer.fr/slide/3135177/>, consulté le 21/05/2021
- [21] SILVANO BERTOLDO : Operational scheme of the proposed diffused Wireless Sensor Network from the sensors : <https://www.researchgate.net/profile/Silvano-Bertoldo/publication/266023403/figure/fig1/AS:616390281142327@1523970303957/Operational-scheme-of-the-proposed-diffused-Wireless-Sensor-Network-from-the-sensors.png>, consulté le 21/05/2021
- [22] LOUIS NEVEU : Quel avenir pour l'intelligence artificielle dans l'automobile ? : <https://www.futura-sciences.com/tech/questions-reponses/voiture-avenir-intelligence-artificielle-automobile-12806/>, consulté le 21/05/2021
- [23] NATHALIE MAYER : Les IA des voitures autonomes apprennent la peur : <https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/intelligence-artificielle-ia-voitures-autonomes-apprennent-peur-76053/>, consulté le 21/05/2021
- [24] ARNAUD T. : Les principaux capteurs d'une voiture autonome : <http://tpe-voiture-autonome.kazeo.com/les-principaux-capteurs-dune-voiture-autonome-a123093210>, consulté le 21/05/2021
- [25] MICROSONIC : Capteurs à ultrasons : <https://www.microsonic.de/fr/support/capteurs-%C3%A0-ultrasons/principe.htm>, consulté le 21/05/2021
- [26] ANN NEAL : LiDAR vs. RADAR : <https://www.fierceelectronics.com/components/lidar-vs-radar>, consulté le 21/05/2021

- [27] CITROEN : Manuel du conducteur Citroën C5 II: Alerte de franchissement involontaire de ligne : http://www.c5manuel.com/alerte_de_franchissement_involontaire_de_ligne-355.html, consulté le 21/05/2021
- [28] WIKIPEDIA : Le lidar : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Lidar>, consulté le 21/05/2021
- [29] VANESSA MAZZARI : Qu'est-ce que la technologie LiDAR ? : Tutoriels en robotique, Août 2019, <https://blog.generationrobots.com/fr/qu-est-ce-que-la-technologie-lidar/>, consulté le 21/05/2021
- [30] JIM HINES : Sensor, Processor Innovations Move Autonomous Vehicles Forward : <https://www.eeworldonline.com/sensor-processor-innovations-move-autonomous-vehicles-forward/>, consulté le 21/05/2021
- [31] IHOR STAREPRAVO : How Sensor Fusion for Autonomous Cars Helps Avoid Deaths on the Road : <https://www.intellias.com/sensor-fusion-autonomous-cars-helps-avoid-deaths-road/>, consulté le 21/05/2021
- [32] DAVE WILSON : Sensors Map the Path to Fully Autonomous Vehicles : https://www.novuslight.com/sensors-map-the-path-to-fully-autonomous-vehicles_N8401.html, consulté le 21/05/2021
- [33] MATJAZ ROZMAN; AUGUSTINE IKPEHAI; BAMIDELE ADEBISI; KHALED M. RABIE; HARIS GACANIN; HELEN JI; MICHAEL FERNANDO : "Smart Wireless Power Transmission System for Autonomous EV Charging" : <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8804372> : IEEE Access, volume 7, pages 112240 - 112248, 2019, consulté le 21/03/2021
- [34] MIT Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory : CarTel: A Distributed Mobile Sensor Computing System : <http://citeseer.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.116.7786&rep=rep1&type=pdf>, consulté le 08/03/2021
- [35] QINYI XU; BEIBEI WANG; FENG ZHANG; DEEPIKA SAI REGANI; FENGYU WANG; K. J. RAY LIU : "Wireless AI in Smart Car: How Smart a Car Can Be?" : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9025048> : IEEE Access, volume 8, pages 55091 - 55112, 2020, consulté le 07/02/2021
- [36] WIKIPEDIA : Vehicular Ad-Hoc Network : https://fr.wikipedia.org/wiki/Vehicular_Ad-Hoc_Network, consulté le 21/05/2021
- [37] ALEJANDRO CORREA, GUILLEM BOQUET, ANTONI MORELL, JOSE LOPEZ VICARIO: Autonomous Car Parking System through a Cooperative Vehicular Positioning Network : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28406426/>, consulté le 21/05/2021
- [38] R. LU; X. LIN; H. ZHU; X. SHEN : SPARK: "A New VANET-Based Smart Parking Scheme for Large Parking Lots" : <https://ieeexplore.ieee.org/document/5062057/>, IEEE infocom 2009, consulté le 15/03/2021
- [39] SUHAS MATHUR, TONG JIN, NIKHIL KASTURIRANGAN, JANANI CHANDRASEKARAN, WENZHI XUE, MARCO GRUTESER, WADE TRAPPE : "ParkNet: drive-by sensing of road-side parking statistics" : <https://dl.acm.org/doi/10.1145/1814433.1814448>, MobiSys '10: Proceedings of the 8th international conference on Mobile systems, applications, and services, pages 123 - 136, Juin 2010, consulté le 15/03/2021

- [40] DR. VAISHALI, D. KHAIRNAR, DNYANESHWAR BAVKAR, VISHWAJIT GAIKWAD : “PAV: Parking Allotment for Vehicles using VANET” : https://www.researchgate.net/publication/259087468_PAV_Parking_Allotment_for_Vehicles_using_VANET, International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology, volume 2, issue 2, pages 68 - 76, Mars 2013, consulté le 15/03/2021
- [41] DOUGLAS A. THORNTON^{AB}; KEITH REDMILL^B; BENJAMIN COIFMAN : “Automated parking surveys from a LIDAR equipped vehicle” : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X13002428> : Science Direct, volume 39, pages 23 - 35, 2014, consulté le 21/03/2021
- [42] MYOUNGGYU WON; AAWESH SHRESTHA; KYUNG-JOON PARK; YONGSOON EUN : “SaferCross: Enhancing Pedestrian Safety Using Embedded Sensors of Smartphone” : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9032194> IEEE Access, volume 8, pages 49657 - 49670, 2020, consulté le 15/03/2021
- [43] LIEZEL LABIOS : Upgraded radar could let autonomous vehicles see in bad weather : november 2020 : <https://www.therobotreport.com/upgraded-radar-autonomous-vehicles-see-bad-weather/>, consulté le 21/05/2021
- [44] MICHAELA JAMELSKA : RADAR vs. LIDAR sensors in automotive industry : Stanford University : <https://mse238blog.stanford.edu/2017/08/mj2017/radar-vs-lidar-sensors-in-automotive-industry/>, consulté le 21/05/2021
- [45] MICHAEL DORAZIO : A Difficult Drive: Autonomous Vehicle Sensor Limitations : August 2018 : <https://www.concannonbc.com/a-difficult-drive-autonomous-vehicle-sensor-limitations/>, consulté le 21/05/2021
- [46] SCIENCE4ALL : Les données manipulent les algorithmes : Avril 2021 : <https://www.youtube.com/watch?v=vYb3rB0jU70>, consulté le 30/05/2021
- [47] DAP : Capteurs multiples, divers et complémentaires sur les voitures autonomes : https://dataanalyticspost.com/sur-les-voitures-autonomes-des-capteurs-multiples-divers-et-complementaires/?fbclid=IwAR3hNsU0oc_Ma-ElFRHR-HEJm30fzeBzyqG1Ea9E3BcoYlEgip5-o5BU7aM, consulté le 15/03/2021
- [48] GUILLAUME COSTESEQUE : Modélisation du trafic routier : passage du microscopique au macroscopique : http://www-sop.inria.fr/members/Guillaume.Costeseque/premi_abertis_costeseque.pdf, consulté le 08/02/2021
- [49] HONGYE MEI; JUPENG DING; JIONG ZHENG; XIFENG CHEN; WENWEN LIU : “Overview of Vehicle Optical Wireless Communications” : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9200604> : IEEE Access, volume 8, pages 173461 - 173480, 2020, consulté le 08/02/2021
- [50] DIETER BIRNBACHER; WOLFGANG BIRNBACHER : “Fully Autonomous Driving: Where Technology and Ethics Meet” : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8070891> : IEEE Intelligent Systems, volume 32, issue 5, pages 3 - 4, 2017, consulté le 13/03/2021
- [51] AMIR RASOULI; JOHN K. TSOTSOS : “Autonomous Vehicles That Interact With Pedestrians: A Survey of Theory and Practice” : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8667866> : IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, volume 21, issue 3, pages 900 - 918, 2019, consulté le 15/03/2021

- [52] TOBIAS LAGSTRÖM; VICTOR MALMSTEN LUNDGREN : AVIP - Autonomous vehicles' interaction with pedestrians : thèse de master, Université de Technologie de Chalmers, année 2015 : http://tekniskdesign.web.pin.se/download/AVIP_MasterThesis_Lagstrom_MalmstenLundgren.pdf, consulté le 07/03/2021
- [53] Daimler : Overview: Mercedes-Benz F 015 Luxury in Motion - Daimler Global Media Site : <https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Overview-Mercedes-Benz-F-015-Luxury-in-Motion.xhtml?oid=9904624>, consulté le 13/03/2021
- [54] LAURENS HOBERT; ANDREAS FESTAG; IGNACIO LLATSER; LUCIANO ALTOMARE; FILIPPO VISINTAINER; ANDRAS KOVACS : "Enhancements of V2X communication in support of cooperative autonomous driving" : <https://ieeexplore.ieee.org/document/7355568>: IEEECommunicationsmagazine,volume53,issue12,pages64-70,2015, consulté le 15/03/2021
- [55] AHMED HUSSEIN; FERNANDO GARCÍA; JOSÉ MARÍA ARMINGOL; CRISTINA OLAVERRI-MONREAL : "P2V and V2P communication for Pedestrian warning on the basis of Autonomous Vehicles" : <https://ieeexplore.ieee.org/document/7795885> : IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation, 2016, consulté le 21/03/2021
- [56] J. BARTON, J. BUCKLEY, B. O'FLYNN, S.C. O'MATHUNA : The D-Systems Project - Wireless Sensor Networks for Car-Park Management : Tyndall National Institute : <http://citeseer.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.159.2890&rep=rep1&type=pdf>, consulté le 24/04/2021
- [57] TOM TORFS, CHRIS VAN HOOFF, STEVEN SANDERS, CHRISTOPHE WINTERS, STEVEN BREBELS : Wireless network of autonomous environmental sensors : <http://citeseer.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.468.4256&rep=rep1&type=pdf>, consulté le 20/04/2021
- [58] PIERRE LAMON, CYRILL STACHNISS, RUDOLPH TRIEBEL, PATRICK PFAFF, CHRISTIAN PLAGEMANN, GIORGIO GRISETTI, SASCHA KOLSKI, WOLFRAM BURGARD, ROLAND SIEGWART : Mapping with an Autonomous Car : Inst. of Robotics and Intelligent Systems : <http://citeseer.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.330.2976&rep=rep1&type=pdf>, consulté le 17/03/2021
- [59] BASTIEN L. : Véhicules autonomes et Big Data : une nouvelle industrie reposant sur les données : 2017 : <https://www.lebigdata.fr/vehicules-autonomes-big-data>, consulté le 08/03/2021
- [60] MARCEL MULLER, JULIAN LATEGAHN, CHRISTOF R. OHRIG : Pedestrian Localization using IEEE 802.15.4a TDoA Wireless Sensor Network : University of Applied Sciences Dortmund, 2012 : <https://www.lebigdata.fr/vehicules-autonomes-big-data>, consulté le 15/03/2021