

## Véhicule Autonome et Connecté : les systèmes de localisation embarqués

**Etudiants :****Flavien ARMANGEON****Mathieu GRIMAL****Lucas CHAVANON****Maxence DAVID****Nathan CÉLIÉ****Viktor RASKOVIC****Nathan FUENTES****Enseignant-responsable du projet :****Abdelaziz BENSRAIR**



Date de remise du rapport : **17/06/2019**

Référence du projet : **STPI/P6/2019 – 006**

Intitulé du projet : **Véhicule Autonome et Connecté : les systèmes de localisation embarqués**

Type de projet : **Bibliographie, Veille Technologique**

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

**Étudier les principes et les enjeux du véhicule autonome et plus particulièrement les technologies utilisées par ce dernier afin de connaître sa position et se placer sur la voie.**

Mots-clefs du projet (4 maxi) :

**Autonomie**

**Localisation**

**Positionnement**

## TABLE DES MATIERES

1.	Introduction .....	6
2.	Méthodologie / Organisation du travail .....	6
3.	Notre projet : la localisation embarquée sur la voiture autonome .....	7
3.1.	État de l'art.....	7
3.1.1.	Présentation de la voiture autonome .....	7
3.1.1.1	La vraie voiture autonome, c'est quoi ? .....	7
3.1.1.2	L'histoire de la voiture autonome.....	7
3.1.1.3	Comment ça marche ? .....	8
3.1.2.	Présentation et évolution des systèmes de positionnement par satellite .....	8
3.1.2.1	Définition et historique.....	8
3.1.2.2	Evolution et différents systèmes de localisation .....	9
3.2.	Aspects Techniques.....	11
3.2.1.	Cartographie .....	11
3.2.2.	Fonctionnement du GPS .....	13
3.2.2.1	Trilatération .....	13
3.2.2.2	Théories de la Relativité.....	14
3.2.2.3	Autres types d'erreurs et limites du GPS .....	14
3.2.2.4	Corriger ses erreurs et améliorer la précision .....	15
3.2.3.	Localisation proche et dynamique .....	16
3.2.3.1	Le Lidar .....	16
3.2.3.2	Les systèmes complémentaires .....	18
3.2.3.3	La combinaison des capteurs.....	18
3.3.	Voiture autonome et localisation au cœur de la société.....	19
3.3.1.	Avantages et limites du véhicule .....	19
3.3.2.	Une éthique et une législation non définie .....	20
3.3.3.	Un test grandeur nature .....	21
4.	Conclusion et perspectives .....	23
5.	Rapport d'Étonnement .....	24
6.	Bibliographie .....	25

## NOTATIONS, ACRONYMES

**DGPS** : Differential Global Positioning System  
**LIDAR** : Light Detection And Ranging  
**GNSS** : Global Navigation Satellite System  
**GPS** : Global Positioning System  
**RADAR** : RAdio Detection And Ranging  
**RTK** : Real Time Kinematic  
**SLAM** : Simultaneous Localization And Mapping  
**SONAR** : SOund Navigation And Ranging

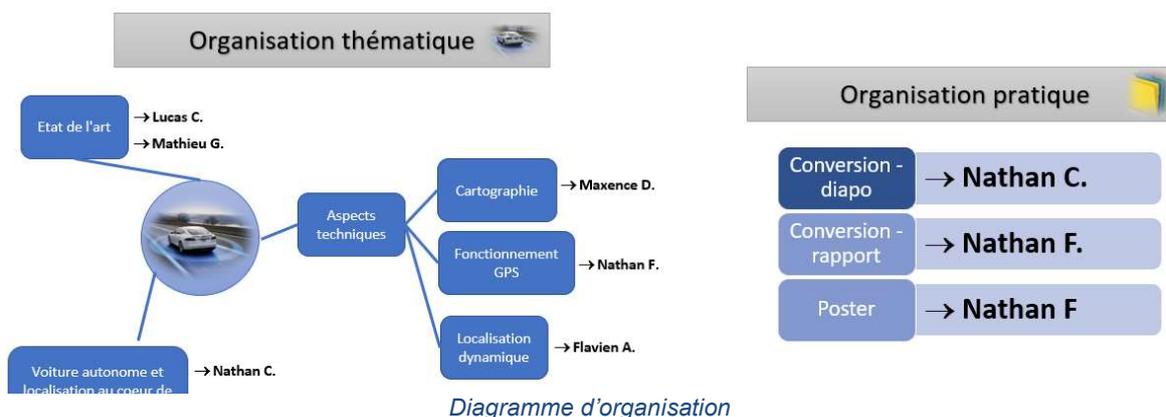
# 1. INTRODUCTION

Le domaine des transports est une préoccupation majeure de notre époque : Nombre assez élevé d'accidents de la route qui sont mortels dans certains cas, pollution de l'air et de l'environnement en général, pollution sonore, etc. Autant de problèmes qu'il va falloir régler si l'on veut que le transport de demain soit sûr et écologique.

Jusqu'à aujourd'hui, se déplacer d'un point A à un point B a toujours nécessité l'intervention humaine quel que soit le moyen de transport. Ceci est en train de changer et ces dernières années marquent l'arrivée sur le marché d'une technologie qui semblait alors futuriste, tout-droit sortie de la science-fiction et des films hollywoodiens, il s'agit de la voiture autonome. Mais confier sa vie à un véhicule nécessite une grande confiance et une fiabilité extrême. Celui-ci devra donc prouver aux utilisateurs potentiels qu'une utilisation quotidienne est possible. Pour cela le système doit se baser sur des technologies de pointe et des logiciels très poussés. Notre projet cible en particulier la localisation du véhicule autonome. Cet aspect est fondamental pour la voiture car sa position se doit d'être connue avec une grande précision pour que celle-ci puisse savoir où elle est et où se positionner sur la voie. Nous allons voir qu'il existe une multitude de moyens mis en place et qui ont chacun leurs particularités ainsi que leurs faiblesses.

# 2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Lors de nos premières séances, nous avons entamé quelques recherches pour rentrer dans le sujet. Nous avons plusieurs ébauches de plans. Nous avons fait un brainstorming pour récolter à la volée toutes nos idées pour trouver les différentes parties et les choses qu'il faut aborder. Ensuite nous avons tout assemblé pour créer notre plan actuel et nous sommes répartis les tâches rapidement. Pour ce qui est de la communication nous avons créé un groupe de discussion sur Messenger afin de se fixer des objectifs sur le court terme. Pour travailler en groupe, nous avons utilisé l'outil Google Doc avec un dossier partagé pour tout le projet. Chacun utilisait son propre brouillon pour sa partie. Ceci permet de s'entraider facilement et d'avoir une vision instantanée de l'avancée du projet. Nous avons ensuite fusionné le travail de chacun dans un même document pour qu'une personne se charge ensuite de convertir le fichier Google en un document officiel en se basant sur une maquette donnée par l'INSA. Nous avons procédé de la même manière pour le diaporama.



## 3. NOTRE PROJET : LA LOCALISATION EMBARQUEE SUR LA VOITURE AUTONOME

### 3.1. État de l'art

#### 3.1.1. Présentation de la voiture autonome

##### 3.1.1.1 La vraie voiture autonome, c'est quoi ?

Une voiture totalement autonome, avance, adapte sa vitesse, freine devant un piéton qui traverse, s'arrête au feu, se gare, tout cela sans aucune intervention humaine. Il est cependant nécessaire d'être plus précis car un véhicule est classé depuis le niveau 0 jusqu'au niveau 5 selon son autonomie.

Le niveau 0 est une voiture qui ne fait rien toute seule. Le conducteur contrôle l'accélération, le freinage ou la direction. L'environnement autour de la voiture doit aussi être contrôlé en permanence par le conducteur. Cela correspond aux anciennes voitures sans électronique.

Au niveau 1, le conducteur confie certaines tâches au véhicule mais uniquement dans un seul axe de direction : l'axe longitudinal ou latéral. Par exemple, le régulateur de vitesse qui permet au véhicule de gérer l'accélération mais toujours sous la direction du conducteur.

Les systèmes d'aide à la conduite s'affinent dans les véhicules de niveau 2, en contrôlant la voiture à la fois sur l'axe longitudinal et latéral. Par exemple, la voiture peut se garer automatiquement. Mais le chauffeur doit toujours garder un œil sur la route.

Pour pouvoir rapidement quitter la route des yeux, une voiture de niveau 3 est nécessaire. Sous certaines conditions, comme les embouteillages par exemple, le conducteur confie la surveillance de la route à un logiciel informatique qui permet à la voiture d'avancer toute seule, conserver les distances de sécurité et rester dans sa voie.

Au niveau 4, on gagne encore en autonomie. Le conducteur n'a plus besoin de regarder la route. Cependant ce mode ne fonctionne que sur certaines routes telles que les autoroutes ou voies rapides. Après avoir activé le mode autonome, la voiture adapte sa vitesse, se dirige toute seule, et prendra même la bonne décision en cas de danger, comme éviter une voiture qui s'arrête brusquement devant.

Une voiture entièrement autonome est du niveau 5. Elle gère la conduite, quelles que soient les conditions climatiques et l'état des routes. Avec ce genre de voiture, on pourra non seulement se déplacer sur les autoroutes mais aussi en ville avec des cyclistes, des piétons et sans surveiller la route : il n'y aura plus besoin de conducteur.

##### 3.1.1.2 L'histoire de la voiture autonome

La première voiture sans chauffeur est présentée le 5 août 1921 aux Etats-Unis. Mais on ne peut pas réellement parler de voiture autonome. Un camion la suit de près avec une radio pour la manœuvrer. C'est le premier véhicule télécommandé. La démocratisation d'outils comme la transmission automatique dès 1939, les régulateurs de vitesse ou encore l'aide au

freinage (aussi appelé ABS 10 ans plus tard) laissent de plus en plus d'autonomie aux véhicules. En 1977, une équipe japonaise fait rouler la première voiture capable de suivre une voie de signalisation grâce à des capteurs optiques. Plus tard en 1986, l'équipe de l'ingénieur Ernst Dickmanns développe le camion Vamors. C'est le premier véhicule se déplaçant quasiment sans intervention humaine grâce à des caméras, des capteurs et un ordinateur contrôlant le volant et la vitesse. Au début des années 2000, le plus connu des systèmes de navigation, le GPS devient accessible sur les routes révolutionnant le système de navigation des voitures. Depuis, l'évolution technologique s'accélère et les prototypes développés en 2009 par Google puis Tesla, sont les pionniers des véhicules allant vers l'autonomie totale.

### **3.1.1.3 Comment ça marche ?**

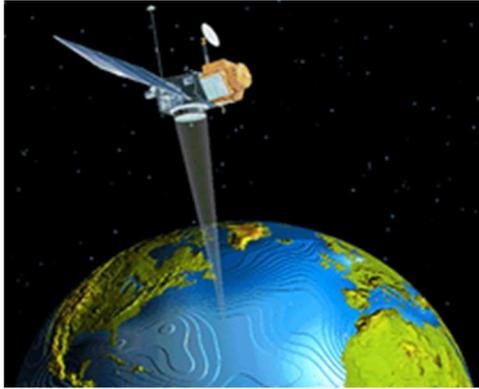
L'objectif de tous les constructeurs est d'atteindre le niveau 5 de la voiture autonome. Mais comment remplacer complètement l'humain ? La voiture doit avoir des yeux mais elle doit aussi avoir un cerveau, une intelligence artificielle infaillible pour analyser son environnement et pour prendre les bonnes décisions au bon moment.

La voiture doit avoir une multitude de capteurs comme des caméras, des radars, un laser au niveau des pare-chocs ou encore des capteurs ultrasons tout autour de la voiture. Tous ces capteurs collectent les informations extérieures utiles à la conduite comme le trafic routier ou les panneaux de signalisations. Si la voiture se maintient toute seule au centre de sa voie de circulation c'est grâce à une caméra placée au milieu du pare-brise ; elle détecte au sol les lignes à suivre. Elle repère aussi la forme, la couleur et lit les panneaux pour respecter les limitations de vitesse. Cette caméra identifie aussi les voitures, les deux roues, les piétons ou les animaux présents sur la route. Les informations recueillies par les caméras sont aussi collectées par d'autres capteurs comme les radars qui fonctionnent quelle que soit la météo. Le véhicule est aussi équipé de lasers qu'on appelle Lidar. Les Lidar reconstituent en 3D l'environnement situé à 360° autour de la voiture. En plus de détecter les lignes et les panneaux, ils apportent d'autres informations : ils mesurent précisément la distance qui sépare la voiture des autres véhicules et ils estiment leur vitesse (informations également collectées par les radars, on appelle cela de la redondance d'informations). En comparant également les informations recueillies par ces capteurs, avec des cartes routières déjà établies, le véhicule est capable de se localiser à quelques centimètres près. Il peut donc suivre un itinéraire, anticipé les prochains virages, ou bien connaître l'emplacement exact des feux tricolores par exemple. Les informations brutes collectées par les capteurs sont acheminées vers le cerveau de la voiture ; le logiciel informatique. En temps réel, il analyse, recoupe et donne un sens aux données. C'est une véritable intelligence artificielle. Le logiciel a appris à reconnaître les panneaux, à différencier les voitures, les deux-roues, les camions, les piétons, et à mémoriser une grande diversité de scénarios, comme l'arrêt brutal d'une voiture, pour être capable d'adapter la réponse dans toutes les circonstances.

## **3.1.2. Présentation et évolution des systèmes de positionnement par satellite**

### **3.1.2.1 Définition et historique**

Le tout premier Système de positionnement par satellites ou GNSS (qui signifie Global Navigation Satellite System) créé est le GPS. Par abus de langage on utilise ce dernier pour nommer l'ensemble des GNSS. Le GPS (Global Positioning System) est donc un GNSS appartenant aux Etats-Unis. C'est-à-dire que c'est un système qui permet de connaître sa position sur Terre (à l'aide d'un récepteur GPS) avec des coordonnées (latitude, longitude et altitude) grâce à des calculs de distance par rapport à des satellites via la propagation de signaux.



À la base, le GPS était un projet destiné à un usage militaire. Le projet de recherche qui a donné naissance au GPS a été lancé par le président Richard Nixon à la fin des années 60 mais celui-ci n'a été complètement achevé qu'en 1995 (envoi en orbite du dernier satellite). Le GPS a été créé en 1973, on doit le principe de fonctionnement du GPS à un physicien et ingénieur appelé Ivan A. Getting. En 1978, le premier satellite a été envoyé en orbite. Actuellement, le GPS fonctionne grâce à 24 satellites. Un groupe de satellite a été lancé à partir 1889 à la suite de la demande du président américain Ronald Reagan après un crash

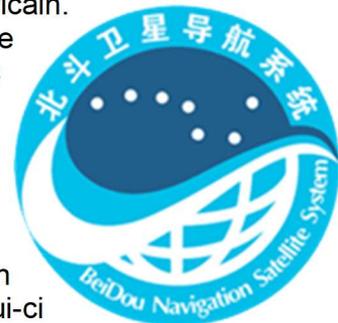
aérien (vol 007 Korean Airlines) afin de pouvoir assurer un système GPS accessible au grand public (c'est-à-dire qui fonctionne où que l'on soit sur Terre). D'avantage de satellites ont alors été envoyés en orbite. Le GPS a été commercialisé pendant les années 2000 et a eu un grand succès dès sa mise en service car celui-ci a beaucoup d'applications différentes qui sont principalement la navigation et localisation pour les véhicules terrestres mais aussi pour les bateaux et les moyens de transport aériens.

### 3.1.2.2 Evolution et différents systèmes de localisation



Aujourd'hui les GNSS sont à leur apogée car tous les smartphones sont à présent équipés de « puces GPS » mais aussi car ils sont les éléments centraux de certaines technologies comme dans notre cas la voiture autonome. Il faut pour cela des GNSS toujours plus performants et précis. La performance des GNSS est donc un enjeu important, et cela a créé de la concurrence au GPS américain.

Depuis sa création plusieurs GNSS ont vu le jour : Il y a d'abord eu GLONASS créé par les russes pendant la guerre froide pour faire face aux américains et terminé en 1996. Les performances de ce dernier sont similaires à son concurrent. Beidou-2 est le système de la Chine créée en 2000. Il y a également le QZSS au Japon et le IRNSS pour l'Inde mais ces deux derniers sont seulement à échelle régionale. Enfin, Galileo est le système de positionnement européen qui est actuellement en fin de développement, nous donnerons quelques détails sur celui-ci dans la fin de cette partie.



En ce qui concerne la précision des GNSS, en 1995, le GPS avait initialement une précision d'une centaine de mètres. La mise orbite de satellites supplémentaires a permis dans les années 2000 une précision de l'ordre d'une dizaine de mètres. Par la suite, le GPS a connu des améliorations techniques telles que le GPS différentiel qui, via un réseau de stations fixe, permet de corriger des erreurs de positions du GPS classique. Ce dernier atteint une précision 3 à 5 mètres, ce qui est une nette amélioration. Seulement cet ordre de grandeur d'erreurs reste trop élevé pour certaines innovations comme la voiture autonome qui a besoin d'une extrême précision.



Revenons à présent sur Galiléo, le système de positionnement européen. Galileo est un projet lancé en 2003 et il est prévu qu'il soit totalement opérationnel dès l'an prochain (en 2020). La création d'un GNSS européen permet l'indépendance de l'Europe par rapport à l'utilisation du GPS américain par exemple. De plus, un contrat d'interopérabilité a été passé avec les États-Unis, cela permet à Galileo et le GPS d'être compatibles en utilisant les mêmes fréquences. Une des particularités de Galiléo est que celui-ci est sous contrôle civil plutôt que sous contrôle militaire comme les autres GNSS. En plus d'un service gratuit pour le grand public, Galileo proposera également un service payant pour des usages professionnels comme pour la voiture autonome qui permettra une très grande précision de quelques centimètres et permettra la concurrence dans ce domaine. En effet, à Saint Etienne du Rouvray par exemple, les tests qui réalisés par Autonomous Lab utilisent entre autres Galiléo.

## 3.2. Aspects Techniques

### 3.2.1. Cartographie

La cartographie est une science qui a pour but de réaliser mais aussi d'étudier des cartes de l'environnement. Ces cartes peuvent être des cartes géographiques, géologiques... Elles peuvent être représentées en 2D, comme les cartes du réseaux routiers, mais aussi en 3D. Dans ce second cas, la carte modélise avec beaucoup plus de détails l'environnement, c'est ce type de cartes qui est très prisé des véhicules autonomes.

En effet, pour qu'une voiture autonome se déplace dans le monde réel, elle nécessite des capteurs qui lui donnent une perception de l'environnement dans lequel elle évolue mais elle nécessite aussi une carte. Cette carte permet de définir un chemin et donc de fixer un point qui est l'objectif. Elle permet aussi de réduire les erreurs dues à la localisation (GPS par exemple) en utilisant des points de référence. La cartographie sous-entend donc la création d'un modèle de l'environnement. Elle peut prendre différentes formes. Elle peut en effet prendre la forme de données brutes ou bien encore être basée sur des modèles mathématiques de primitives géométriques.

Les voitures autonomes sont donc munies de cartographie 3D de leur environnement, elles peuvent donc prévoir à l'avance leur chemin, de plus grâce aux nombreux capteurs qu'elles embarquent, les voitures peuvent comparer ce qu'elles perçoivent avec les données qui leur ont été fournies. On parle de localisation et la cartographie simultanées. Cette technologie connue sous le nom de SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) est une méthode qui permet à un objet autonome (véhicule ou robot) de construire et de faire évoluer une carte de son environnement. Cela permet aussi aux véhicules de s'y localiser. La localisation est donc nécessaire à la cartographie si l'on veut que celle-ci évolue de façon permanente et direct.

En effet, Le SLAM dépend du type d'environnement, les données reçues dépendent du type de capteur utilisé. De plus, le type d'environnement rend, souvent, la cartographie plus compliquée à mettre en place. Dans un environnement ouvert (campagne) le nombre de point spécifique est réduit mais l'utilisation du GPS est puissante car plus précise alors que dans un environnement plus fermé, urbain, le nombre de point spécial (fenêtre, voiture, panneaux) est bien supérieur donc la carte créée par la technologie SLAM donne plus de détail. Le SLAM est donc un assemblage complexe de nombreux sous problèmes.

Pour résumer le SLAM est une méthode de construction simultanée d'un modèle de l'environnement et de l'estimation de l'objet (voiture dans notre cas) dans ce modèle.

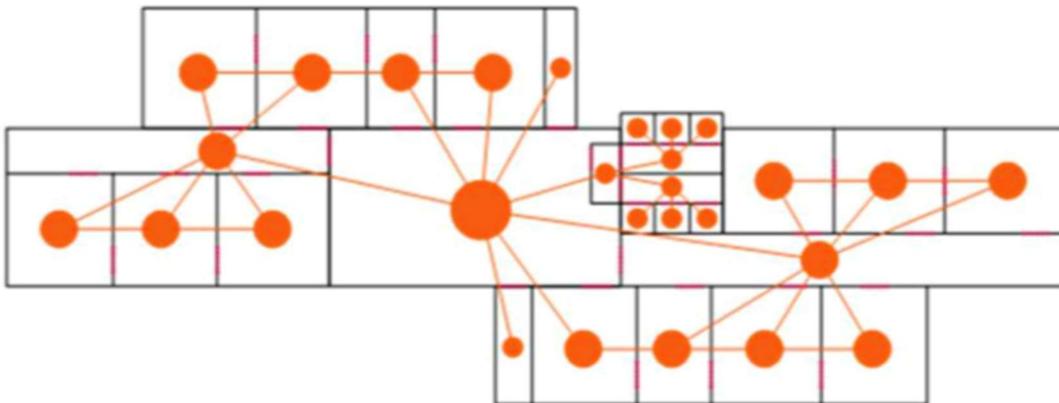
Pour utiliser le SLAM, il faut faire un choix de modélisation ce qui change mais ne modifie pas le principe de la technologie. Ce choix se fait en prenant en compte plusieurs éléments :

- les types de capteurs utilisés
- le type d'environnement
- l'objectif de la cartographie

On peut distinguer plusieurs types de cartes qui représentent cet environnement. Par exemple les cartes métriques et les cartes topologiques :

- Une carte métrique a pour but de modéliser la géométrie et la position des obstacles. C'est donc un assemblage d'éléments cartographiques dans lequel on peut toujours calculer la distance entre 2 objets.
- Une carte topologique est une représentation, par des graphes, du milieu environnant. Elle est donc composée de nœuds et d'arêtes. Les cartes

topologiques sont une liste d'éléments importants, remarquables ainsi que de leurs interconnexions. Cependant les éléments donnés par les nœuds ne sont pas précisément définis.



*Exemple Carte Topologique d'un bâtiment*

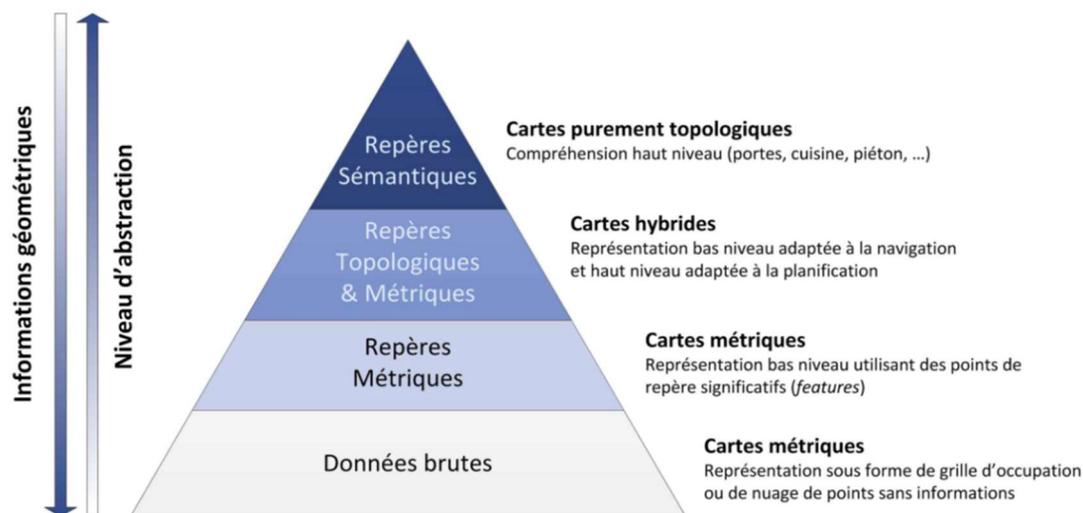
Les deux types de carte cités précédemment proposent des niveaux d'abstraction différents. En effet les cartes topologiques nécessitent un niveau de compréhension élevé de l'environnement mais doivent aussi se reposer sur des algorithmes de reconnaissance complexe. Alors que les cartes métriques fournissent une représentation précise de l'environnement mais nécessitent une grande capacité de stockage.

Il existe des cartes dites "hybrides" qui combinent les cartes topologiques et les cartes métriques.

Enfin il existe un niveau d'abstraction encore plus haut dans la représentation de l'environnement : l'approche sémantique. Cette représentation se classe dans les cartes hybrides car elle doit être mise en relation, associée à un autre type de carte (métrique ou topologique). Ce type de carte rend possible une analyse poussée des données reçues de la part des capteurs, elle permet de reconnaître les objets perçus grâce à une base de données. Elle nécessite donc une intelligence artificielle.

Pour résumer, l'approche sémantique se base sur la connaissance et reconnaissance de forme ainsi que de l'apprentissage, tout cela basé sur des méthodes de *deep learning*.

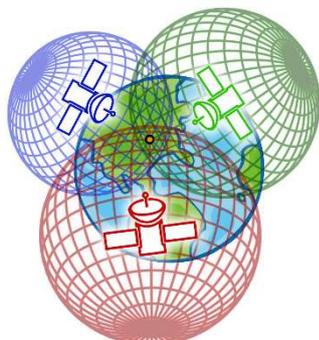
Voici un graphique qui résume les différents types de carte et leurs utilisations



*Hierarchie des représentations, traduit et adapté de Adriana Tapus, 2005*

## 3.2.2. Fonctionnement du GPS

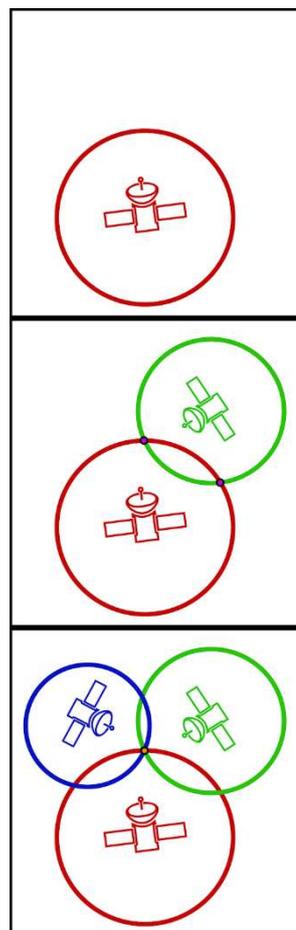
### 3.2.2.1 Trilatération



Le système repose sur le principe de la trilatération. Un satellite va émettre un signal contenant des informations. Il s'agit d'ondes électromagnétiques qui vont se propager jusqu'au récepteur GPS qui pourra connaître l'heure exacte de l'émission et la position de l'émetteur à cet instant. Notre station GPS peut alors à ce moment estimer sa position sur le périmètre d'un cercle.

*Par exemple, un calcul rapide et imprécis se basant sur la hauteur du satellite (20200 km) et la vitesse de la lumière (300 000 km/s) estime que pour une différence de temps entre l'émission et la réception de seulement 70 ms, le rayon de ce cercle est de 5741 km, soit environ la distance Rouen - New York !  $((3000000.070)^2 - 20200^2)$ .*

La réception d'informations provenant d'un deuxième satellite permet de situer l'utilisateur aux intersections des 2 cercles ce qui correspond à 2 points. Pour déterminer lequel choisir il faut coupler ses données avec celles provenant d'un troisième satellite. La constellation de satellite est faite de sorte à ce qu'il y est toujours au moins 4 satellites détectables sur Terre. Plus il y en a de disponible et plus la position du récepteur sera estimée avec précision. De plus le 4<sup>ème</sup> satellite permet l'estimation de la position en 3 dimensions, en incluant donc la hauteur du récepteur. Avoir plus de 3 satellites disponibles a aussi une autre grande utilité, on y reviendra plus loin.



### 3.2.2.2 Théories de la Relativité

La compréhension et l'application de deux fameuses théories d'Albert Einstein sont nécessaires au bon fonctionnement du GPS. En effet, les satellites, du fait de leur hauteur dans le champ gravitationnel terrestre et de leur vitesse élevée, sont confrontés à la dilatation du temps. Leur temps est accéléré de 38  $\mu$ s par jour si l'on regarde par rapport à une horloge sur Terre. Explications :

Selon la théorie de la relativité restreinte, avec une vitesse de 14000 km/h sur leur orbite, le temps est ralenti de 7  $\mu$ s ! Au contraire, se situer très haut (à environ 20000 km pour rappel) entraîne un temps accéléré de 45  $\mu$ s dû à une attraction gravitationnelle 20 fois plus faible qu'au niveau du sol. C'est une conséquence de la théorie de la relativité générale. Ce décalage dans le temps engendre une dérive égale à l'erreur spatiale multipliée par la vitesse de la lumière ce qui donne  $38 \mu\text{s} \times 3 \times 10^8 \text{ m/s} = 11,4 \text{ km/jour}$  ! Tout l'enjeu pour les satellites GPS est donc de compenser cette erreur, sinon tout le système serait inutilisable. Pour se faire chaque satellite de la constellation est équipé d'une horloge atomique lui permettant de connaître l'heure avec une très grande précision. Il s'agit soit d'une horloge au Cesium ou soit au Rubidium (en voici une utilisée dans les années 1970 sur un satellite GPS sur la photo ci-contre). Pour la première horloge, une correction est effectuée sur Terre avant l'envoi dans l'espace. Pour la seconde, la fréquence est mesurée une fois placée en orbite, mais ne pouvant être corrigée directement, les corrections nécessaires sont alors incluses dans le message transmis. Ainsi, chaque satellite connaît sa position et l'heure et peut donc envoyer ses informations en continue afin d'être reçues par les récepteurs.



Mais nos récepteurs GPS ne sont pas équipés d'horloge atomique, comment font-ils donc pour effectuer tous les calculs ? C'est là qu'interviennent les données de notre quatrième satellite ! En effet avec ce dernier nous obtenons un système de 4 équations à 4 inconnues : les 3 coordonnées spatiales ainsi que l'intervalle de temps entre l'émission et la réception. Après résolution, l'heure exacte est aussi connue par notre récepteur sans même être équipée d'horloge atomique ! Déterminer toutes les inconnues revient à résoudre ce qu'on appelle "l'équation de navigation".

### 3.2.2.3 Autres types d'erreurs et limites du GPS

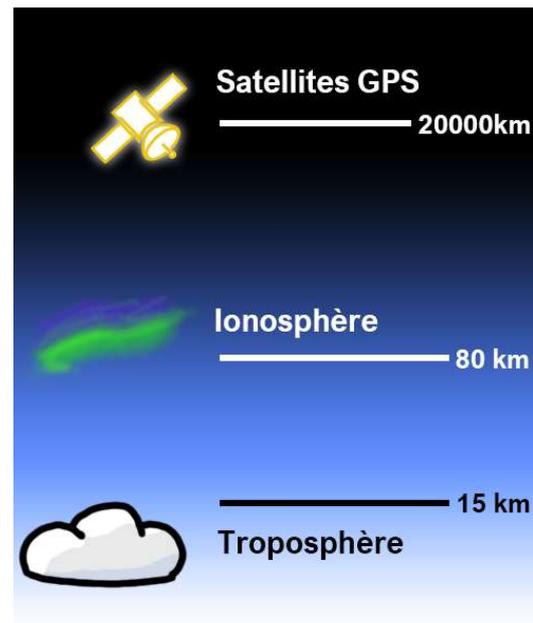
D'autres problèmes viennent compliquer la tâche de notre système GPS et diminuer sa précision. Tout d'abord au niveau des éphémérides, c'est à dire les tables astronomiques permettant de déterminer la position des satellites. Ces données, déterminées depuis le sol ne peuvent pas être 100% parfaites.

La basse atmosphère engendre aussi une erreur. En effet au niveau de la troposphère, la présence de vapeur d'eau particulièrement et les changements de pression modifient la valeur de l'indice de réfraction  $n$  du milieu. Ceci cause alors une variation de la vitesse du signal à travers cette couche et peut aussi engendrer un phénomène de réfraction des ondes

électromagnétiques. Les récepteurs GPS intègrent un modèle de correction qui est loin d'être suffisant étant donné qu'il est impossible de connaître le profil exact de l'humidité en fonction de l'altitude.

Beaucoup plus haut, l'ionosphère perturbe aussi nos informations. Il s'agit d'une couche supérieure de l'atmosphère qui est, comme son nom l'indique, ionisée par le rayonnement solaire. Ceci une fois de plus modifie la vitesse de propagation de nos signaux. Il est plutôt compliqué de corriger cette erreur du fait que l'activité du soleil n'est pas constante, par exemple en cas de tempête solaire.]

Outre ces erreurs, le GPS n'est pas du tout utilisable dans certaines conditions. Par exemple, les signaux sont trop faibles pour pénétrer dans les bâtiments. Ou encore il suffit d'une montagne ou d'un immeuble pour cacher le signal d'un satellite se trouvant derrière, c'est "l'effet canyon". Il se peut aussi qu'il y est un écho, c'est à dire que le signal rebondisse sur différentes surfaces avant d'atteindre l'utilisateur. Ce phénomène rend totalement fausse la position affichée par le récepteur.



### 3.2.2.4 Corriger ses erreurs et améliorer la précision

Les récepteurs GPS peuvent, premièrement, améliorer leurs résultats en traitant les informations de plus de 4 satellites. En effet la constellation est faite de telle sorte qu'il y ait toujours entre environ 6 et 12 satellites disponibles pour l'utilisateur. Ceci permet d'affiner les calculs et de mettre de côté les sources peu fiables.

Comme on l'a entrevu dans l'État de l'art, une façon de corriger les erreurs et donc d'améliorer la précision est d'utiliser le système de GPS différentiel. Le principe de fonctionnement est assez simple à comprendre. Il s'agit d'un réseau de bases fixes éparpillées sur la surface Terrestre de la zone à couvrir. Chacune d'elle est équipée d'un capteur GPS qui reçoit les mêmes ondes que n'importe quel utilisateur mobile. La différence avec ce dernier est que la position de chaque base est connue avec exactitude. La station fixe va donc la comparer avec la position estimée grâce au GPS et va alors déterminer les erreurs. Ensuite la base communique localement, dans un diamètre d'une centaine de km, les corrections à effectuer soit par ondes radio soit par satellites. Tous les utilisateurs équipés d'une antenne DGPS peuvent alors profiter d'une position estimée avec une précision passant de 20 - 10 m pour un GPS standard à 5 - 3 m. On peut même atteindre une précision au centimètre voir au millimètre près avec des logiciels très poussés et des stations de référence proches entre elles de seulement 1km.

### 3.2.3. Localisation proche et dynamique

Les systèmes “larges” de localisation évoqués précédemment (cartographie et GPS) ne permettent pas à la voiture de se localiser précisément et en temps réel dans un environnement proche. C’est pourquoi l’utilisation de d’autres types d’appareils est indispensable.

Nous souhaitons ici évoquer le thème de **localisation proche et dynamique**. En effet, il s’agit de comprendre comment un véhicule se déplaçant sur un axe routier, va être en mesure de se positionner en fonction de l’environnement qui l’entoure.

Tout d’abord, il est nécessaire de percevoir les lieux. En pratique, de multiples systèmes sont combinés pour arriver à un résultat très fiable. Ces données sont ensuite analysées par un programme qui dirige la voiture en tenant compte de l’itinéraire à suivre.

#### 3.2.3.1 Le Lidar

Le Lidar est un système de reconnaissance de l’environnement en 3D. C’est de loin l’**outil de perception principal**. Il permet au véhicule de réaliser en temps réel sa propre cartographie des lieux sur un rayon de 60 m.

Créé en 1960, il a d’abord été utilisé pour des missions spatiales. Sa première application était en 1971 lors de la mission Appolo 15 pour réaliser une cartographie des reliefs à la surface de la Lune. Il a par la suite été adapté pour être utilisé sur d’autres systèmes tels que les véhicules autonomes.



Reliefs de la Lune captés par la technologie Lidar

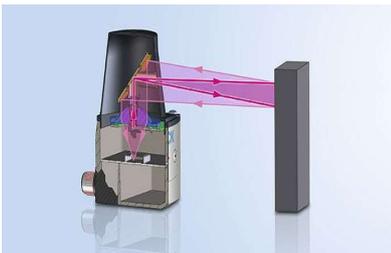
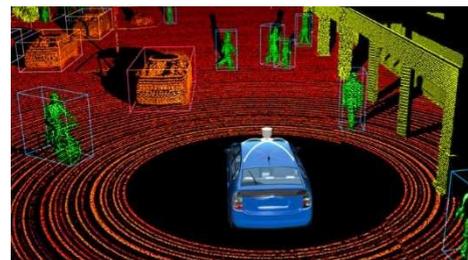


Véhicule Autonome Lab

#### A. Fonctionnement

Lidar est l’acronyme de “light detection and ranging” qui signifie détection et estimation de la distance par la lumière. Contrairement au Radar et au Sonar qui utilisent les ondes radio et sonores, le Lidar fonctionne grâce à la lumière située dans le spectre de l’Infrarouge.

Le système est constitué d’un émetteur de rayons laser et d’un récepteur. Après leur émission, certains rayons sont détournés par un obstacle et finissent par être captés. La mesure de l’intervalle de temps entre l’émission et la réception du signal lumineux permet d’en déduire la distance à laquelle se trouve un élément extérieur :  $distance = temps \times c / 2$  où  $c$  est la vitesse de la lumière.



L’émission de plusieurs millions de rayons par seconde et la rotation rapide de l’appareil permettent une vision à 360° en 3 dimensions. Le Lidar détecte instantanément tous les objets aux alentours.

#### B. Avantages

Cette technologie offre de nombreux avantages.

A l'instar d'une simple caméra qui filmerait l'extérieur, les résultats obtenus grâce au Lidar sont **indépendants de la météo**. En cas de fortes pluies les rayons lasers passent à travers l'eau et le système offre la même vision que lorsqu'il fait beau.

Le Lidar est **léger, petit, rapide, demande peu de puissance et fournit des résultats très précis**. D'entrée de gamme il a une précision d'environ 3 cm et en haut de gamme elle est de l'ordre du millimètre. Un boîtier de capteur Lidar adapté pour les voitures autonomes mesure moins de 15 cm de diamètre et pèse seulement 1 kg. Les nouvelles versions ne sont plus placées sur le toit mais incorporées directement dans l'habitacle de la voiture.

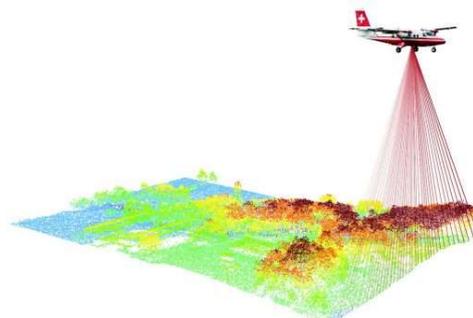


Lidar incorporé dans l'habitacle

### C. Utilisations

Ces avantages font de lui un outil privilégié pour beaucoup d'applications.

Il est utilisé pour cartographier les reliefs de sites archéologiques et de larges zones naturelles. En février 2018, il a permis de découvrir l'ampleur insoupçonnée des interconnexions entre cité Mayas dans la jungle du Guatemala. Pour cela, le Lidar est embarqué sur un appareil aérien qui survole la zone à explorer. Selon les besoins, il peut s'agir d'un drone, d'un avion, d'un hélicoptère ou même d'un satellite. Cette technique est utilisée sur des territoires où la surface du sol est masquée donc non visible depuis l'aérien. C'est le cas des territoires forestiers et des zones aquatiques comme un lac par exemple. Les rayons laser émis par le Lidar permettent de passer outre les obstacles présents sur le sol. Les données recueillies par le système sont utiles pour diverses applications. Incorporé dans un satellite il permet notamment de lutter contre le réchauffement climatique en mesurant la quantité de biomasse et de CO2 contenue dans les forêts sur de très vastes zones.



Dans le domaine du transport, suite à la récente découverte des avantages du Lidar, de nombreux géants de l'automobile ont décidé de l'intégrer sur leur modèle de véhicules autonomes. C'est le cas de Uber, Toyota, General Motors,

Ford, Delphi, BMW, Volkswagen...



### 3.2.3.2 Les systèmes complémentaires

Ajoutés au Lidar, d'autres systèmes complètent la prise d'information de l'environnement. Le Radar et le Sonar (en mode actif) servent à mesurer la vitesse des objets perçus. Leur fonctionnement est basé sur le même principe en utilisant respectivement les ondes radio et sonores. Le Sonar (en mode passif) écoute les sons pour détecter des voitures par exemple.

De plus, les caméras sont indispensables. Leurs objectifs principaux sont de détecter les éléments de signalisation de la route et des éléments très proches du véhicule (aide au stationnement). Contrairement aux Radar, Sonar et Lidar, celles-ci permettent d'obtenir une image fidèle et colorée de l'environnement. Grâce à la **vision des couleurs**, les caméras détectent facilement les feux, les panneaux, les balises spéciales dédiées aux véhicules autonomes, les marquages au sol etc...

Attention, comme pour l'œil humain, la vision d'une caméra est fortement altérée par les conditions météorologiques. Les fortes pluies peuvent masquer la signalisation et les contre-jours dus au soleil aveuglent la caméra.

Elles ne fournissent qu'une image en 2D mais, la perception de l'environnement en 3D étant assurée par d'autres capteurs (ex : Lidar), cela n'est pas dérangeant.

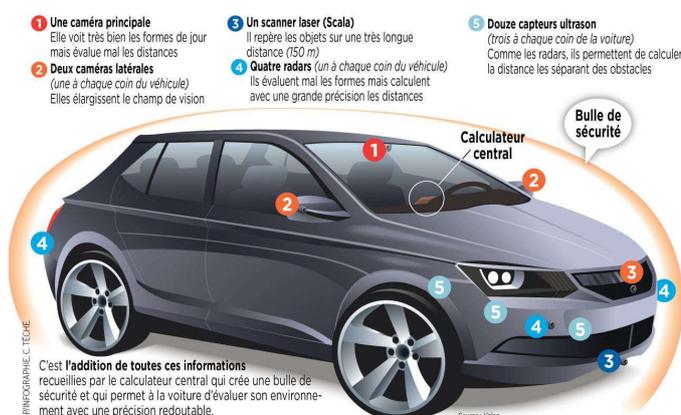
### 3.2.3.3 La combinaison des capteurs

C'est l'utilisation d'un ensemble varié de capteurs qui permet à la voiture de prendre intégralement "conscience" de son environnement dans le but d'être autonome.

Le Lidar est tellement avantageux que, mis à part Tesla, tous les grands constructeurs l'utilisent pour avoir une perception de l'environnement en 3D à 360°. Le Radar est aussi souvent utilisé pour déterminer la vitesse de certains éléments déjà détectés. C'est le cas des voitures, cyclistes, piétons, etc... Parfois le Sonar complète les résultats obtenus. Enfin, la caméra est tout le temps utilisée pour l'aide au stationnement et la signalisation. Sans elle, il serait par exemple impossible de voir la couleur d'un feu.

Voici un exemple de configuration mis en place par Valéo sur leur véhicule autonome de niveau 4 :

- 8 lidars incorporés tout autour de l'habitacle
- 2 radars : 1 à l'avant et 1 à l'arrière
- 12 sonars
- 4 caméras : 1 sur le pare-brise, 1 sur chaque rétroviseur et 1 à l'arrière.



### 3.3. Voiture autonome et localisation au cœur de la société

#### 3.3.1. Avantages et limites du véhicule

Au-delà de l'aspect technique, nous nous sommes posé la question de la place qu'aura la voiture autonome au sein de la société. Son implémentation dans la vie de tous les jours bouleversera la circulation et la manière de se déplacer en véhicule. En effet, la conduite sera plus sûre étant donné que les voitures seront connectées entre elles et pourront donc prévoir leurs trajectoires. Cela étant, il y aura moins d'embouteillage et il sera possible d'augmenter la vitesse limite pour avoir des trajets plus courts.

Actuellement, UBER souhaite développer une flotte de « taxis » autonome pour pouvoir effectuer les courses de ses clients. On peut donc imaginer un format plus généralisé où les personnes âgées pourront quand même utiliser une voiture. Il en va de même si la personne est sous l'emprise de l'alcool ou autre. Enfin, les enfants d'une famille pourront utiliser le véhicule familial pour se déplacer sans même avoir besoin du permis. De plus, comme il n'y aura plus besoin de volant pour les voitures de niveau 4, l'intérieur des véhicules sera redéfini pour que les passagers puissent avoir plus de place rendant les trajets plus agréables. Enfin, ces véhicules adopteront une conduite plus écologique et optimiseront les itinéraires.

Cependant, les voitures autonomes ne présentent pas que des avantages. Il y a en effet des inconvénients qu'il faut surmonter. On peut ainsi citer le cas du prix. En effet, le coût d'une voiture autonome sera très élevé à cause de la technologie comprise dedans, rien que le LIDAR coûte environ 75 000\$. Qui plus est, l'apparition de ces véhicules provoquera la disparition de certains métiers comme taxis, conducteur de camion ou de bus. Ainsi, cela limiterait son insertion dans la société. Il faudrait également équiper toutes les routes avec les nouveaux panneaux de signalisation pour que la voiture puisse se repérer, ce qui prend beaucoup de temps et nécessite un montant d'argent assez important. En plus de devoir les mettre à jour et assurer leur maintenance.

De plus, tout le monde ne souhaitera pas confier sa vie à une intelligence artificielle qui peut être sujette à des bugs et autres erreurs de fonctionnement. En outre, si on imagine une société où plus personne ne conduit car seuls les véhicules autonomes peuvent rouler, le plaisir lié à la conduite disparaîtra.

Enfin, comme tous ces véhicules seront connectés entre eux et à un réseau, ils seront la cible de piratages de données. Une personne ayant accès à ces informations pourrait alors savoir qu'elles sont les habitudes d'un usager et donc connaître ses trajets, l'heure à laquelle il passe sur une certaine route, combien de temps reste-t-il à un endroit etc. Tout cela à l'aide des données GPS. Cela pourra donc être utilisé à grande échelle pour revendre les informations obtenues. On peut aussi imaginer qu'en cas de « cyber guerre », arriver à paralyser de nombreux véhicules autonomes pourrait causer un grand mouvement de panique au sein du pays qui sera lui aussi paralysé. D'un autre côté, ces informations pourront également servir à espionner des personnes haut placées comme un homme politique par exemple.

Tous ces points peuvent freiner l'implémentation des voitures autonomes dans la société. Il faut donc être sûr de la fiabilité de ces machines avant de les déployer.

### 3.3.2. Une éthique et une législation non définie

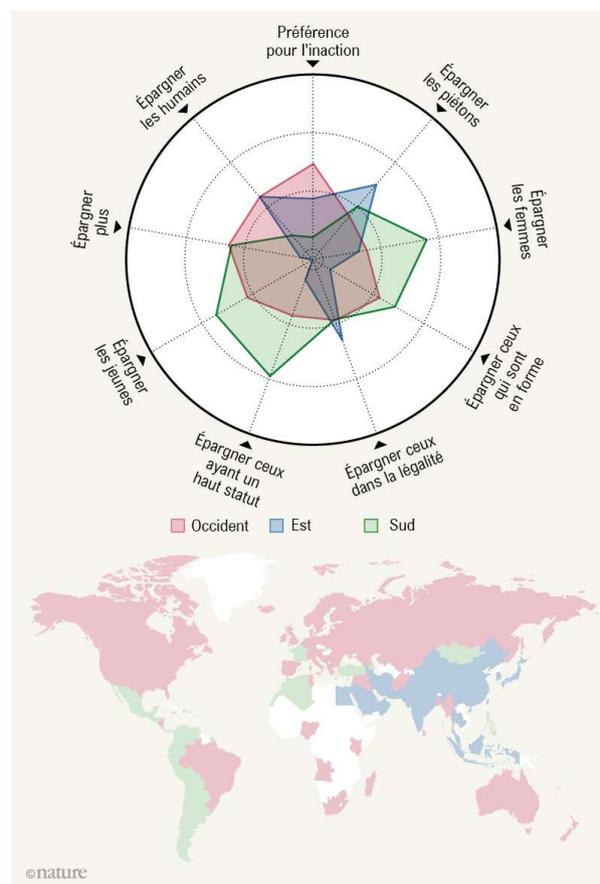
Avant de pouvoir espérer observer une implémentation complète dans la société, le véhicule autonome doit faire face à de nombreuses contraintes. Tout d'abord, sa place au sein de la législation n'est pas totalement définie. Il faut également définir l'éthique de la voiture autonome. Cet aspect divise les principaux intéressés. En-effet, selon les chercheurs du Massachusetts Institute of Technology. On se retrouve face à un véritable dilemme : « Jamais, dans toute l'histoire de l'humanité, nous n'avons permis à une machine de décider seule qui doit vivre et qui doit mourir, sans supervision. Mais nous allons franchir ce cap bientôt ; et cela (...) va arriver dans un des aspects les plus terre à terre de notre quotidien : les transports. »

La voiture autonome est une notion relativement nouvelle et soulève donc de nouvelles questions : qui est le responsable s'il survient un accident le conducteur, le véhicule ou encore le constructeur ? On recense déjà des accidents mortels ou non, impliquant des voitures autonomes. Par exemple, le 19 mars 2018 une femme d'une quarantaine d'années a été renversée par une voiture autonome Uber. Cette personne traversait la route en poussant un vélo et a été percutée par le véhicule à 60 km/h. On peut alors se demander qui est en tort. L'enquête a montré que la conductrice n'était pas en mesure de réagir car elle ne regardait pas la route. Elle était cependant supposée être capable d'intervenir et reprendre le contrôle du véhicule si besoin. De l'autre côté, le système de la voiture aurait dû être capable de reconnaître le piéton pour ensuite freiner. Le cas est difficile à juger.

D'autres questions se posent surtout pour les véhicules de niveau 5, complètement autonome. Par exemple, que doit faire la voiture dans le cas où ses freins sont défectueux alors qu'un piéton traverse la rue ? Devrait-elle sauver son conducteur ou privilégier la vie des passants ? Et qu'est ce qui pourrait justifier un tel choix.

Justement pour avoir une petite idée du comportement de la voiture l'université du MIT a lancé un questionnaire, la « Morale Machine », où ceux qui répondent doivent faire des choix moraux concernant les actions de la voiture. Le test retire cependant toutes nuances, c'est-à-dire qu'il faut soit préserver X soit préserver Y.

On constate alors que les résultats sont très hétéroclites et dépendent fortement du pays et de la culture de la personne ayant répondu. En effet, même si la tendance globale revient à attribuer une plus grande valeur à la vie humaine par rapport à celle des animaux, on observe tout de même des différences notables sur quelques thèmes surtout entre les pays où la culture est individualiste ou collectiviste. C'est pourquoi le choix de sauver des personnes jeunes au détriment de personnes âgées était beaucoup moins prononcé dans les pays d'Asie et du Moyen-Orient comparé à l'Europe et à l'Amérique.



Bien que les résultats de ce test ne seront en aucun cas utilisés comme une manière définitive pour guider complètement le comportement des voitures autonomes, cela pourrait, en-revanche, même aider et influencer la voiture dans ses choix.

De son côté, l'Allemagne à, en 2017, mis en place des directives concernant les voitures autonomes. Parmi ces directives, il en figure une très importante qui affirme que tous les êtres humains sont égaux et qu'aucune distinction ne devra être faite par la voiture. On voit donc que cette question soulève de nombreux débats.

Malgré le fait que cette technologie n'en est qu'à ses débuts, de nombreux pays comme la France, le Chine, des états des Etats-Unis autorisent les tests et essais de voitures autonomes sans pour autant mettre en place des lois les concernant. Il est cependant très important de fixer un cadre dans lequel les véhicules pourront pleinement se développer étant donné les changements majeurs de la société que provoquera la voiture autonome si on arrive au stade 4. Cela bouleversera énormément d'aspects actuels comme, le permis, les assurances, la manière de voyager, les données et bien d'autres.

### 3.3.3. Un test grandeur nature



Afin d'en apprendre plus sur les technologies de localisation embarquée et illustrer notre sujet par un aspect plus concret, deux membres du groupe ont pris part à un programme d'expérimentation sur les véhicules autonomes des sociétés Renault et Transdev. Rouen Normandy Autonomous Lab est un projet Rouennais, lancé en 2018, aspirant à devenir un nouveau service de mobilité pour les habitants, travailleurs ou étudiants au plateau du Madrillet, sur la commune de Saint Etienne du Rouvray (76).

Les véhicules utilisés sont des Zoé, voitures citadines électriques, développées par la marque française Renault. Plusieurs acteurs sont investis dans ce projet de mobilité urbaine (premier en Europe) dont les groupes Renault, Matmut et Transdev et la Métropole Rouen Normandie.

D'un point de vue plus concret, ces voitures constituent un mode de transport rapide, sur un circuit composé de deux boucles soit 8 arrêts. Les utilisateurs peuvent « appeler », à n'importe quel moment, un des véhicules, à l'aide d'une application mobile, le lancement du projet au grand public étant prévu courant 2020.



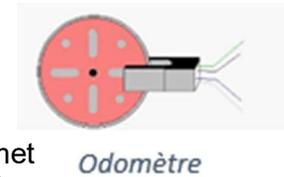
Intérieur d'un des véhicules

Lors de ces trajets, nous avons pu questionner les acteurs du projet au sujet des technologies de localisation utilisées. On nous a alors informé que les véhicules utilisent un croisement des systèmes GPS+Galileo (avec une précision de 15 à 20 cm) et SLAM lorsque la précision des GNSS seule n'est pas suffisante. Les voitures utilisent le système différentiel RTK (Real Time Kinematic) qui permet grâce à un

abonnement d'utiliser des stations fixes pour améliorer la précision.

La technologie de localisation utilisée est le Spatialite, un système open-source de gestion de données spatiales (SGBD) ; et, en prévision d'une utilisation "grand public", la création d'un canal 4g privé, viendrait enrichir la qualité des données -notamment géographiques- transmises.

Aussi, ces questionnements, nous ont amenés à connaître un autre moyen de localisation « dynamique », permettant de déterminer la position d'un véhicule en fonction du mouvement des roues. Il s'agit de l'odométrie. Le principe est de compter le nombre de tours des roues tout en connaissant l'inclinaison de la voiture ; ce qui permet d'estimer grossièrement la position. Sur le même thème de "localisation dynamique et instantanée", les véhicules d'Autonomous Lab sont équipés de capteurs de lignes permettant à la voiture d'être, à chaque instant, centrée sur sa voie. Comme évoqué précédemment dans notre rapport, 2 lidars (un à l'avant et un sur le toit du véhicule) sont aussi utilisés pour localiser la voiture dans son environnement instantané.



A l'issue de cette expérimentation, nous avons été invités à proposer des suggestions ou améliorations, à la fois pour les déplacements à proprement-dit mais aussi pour l'application permettant la réservation des trajets.

L'intérêt de ce projet est donc double :

- D'une part, proposer un nouveau service de mobilité aux locaux
- Faire évoluer notre façon de nous déplacer en comprenant les besoins actuels

Par-ailleurs, il s'agit du premier projet de ce type à l'échelle européenne (véhicules autonomes, circulant sur axes ouverts aux autres usagers). Par ce projet, la métropole rouennaise se place donc à l'avant en matière de nouvelles solutions en mobilité urbaine.

## 4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Pour conclure, nous avons vu qu'il existe une grande variété de capteurs et de méthode de localisation utilisé sur les voitures autonomes. Chacun d'eux possède des avantages et inconvénients, est utilisable ou non selon certaines conditions sur l'environnement autour du véhicule. Leurs données se compensent mais surtout s'assemblent afin de rendre la position de la voiture autonome la plus précise et fiable possible.

Nous avons découvert que les limites au véhicule autonome se situent plutôt sur le cadre social. Ce moyen de transport soulève en effet diverses questions éthiques et juridiques. Cependant, ce point est en train d'évoluer, certains pays ont d'ores et déjà mis en place des réglementations concernant ces véhicules. Il reste également à voir la perception de l'opinion publique sur les voitures autonomes puisqu'il faut accepter de mettre sa vie entre les mains du véhicule. Il reste donc de nombreux cas à traiter avant de pouvoir implémenter totalement la voiture autonome au sein de la société.

Ce projet a été très enrichissant pour chacun des membres du groupe. Il nous a amené à effectuer des recherches et à comprendre certains principes pour pouvoir ensuite synthétiser ces informations pour créer ce rapport. Il nous a aussi permis de tester le véhicule autonome en situation réelle et de poser des questions aux ingénieurs de ce projet car nous avons la chance d'avoir sur le site du Madrillet les tests d'Autonomous Lab. Nous avons aussi pu observer le travail de doctorants et leur poser des questions sur leur sujet d'étude concernant les technologies des voitures autonomes.

Nous tenons à remercier tout particulièrement notre professeur M. Abdelaziz Bensrhair pour son aide et ses conseils ainsi que toute l'équipe d'Autonomous Lab d'avoir accepté nos demandes d'essais et pour de nous avoir apporté de précieuses informations sur le fonctionnement du véhicule autonome. Sans oublier les doctorants qui ont pris du temps pour nous présenter leur travail et répondre à nos questions.

## 5. RAPPORT D'ÉTONNEMENT

**Flavien A.** : Lors de la réalisation du projet, les recherches effectuées sur les véhicules autonomes m'ont permis d'enrichir ma culture scientifique. Nous avons la chance d'avoir sur le site du technopôle des prototypes de Transdev et Renault en circulation. J'ai cependant été déçu de voir notre test d'une voiture Autonomous Lab annulé. Dommage que notre travail se soit résumé à des recherches internet et à se répartir les tâches.

**Nathan C.** : Ce projet a été, pour moi, l'occasion d'en apprendre plus sur le transport de demain ; en-effet, il est très enrichissant de connaître les aspects techniques de la cartographie et de la localisation que nous utilisons chaque jour. Il s'agissait aussi d'une nouvelle expérience de travail en groupe : organisation et répartition du travail, communication, gestion des problèmes. Par-ailleurs, il a été très enrichissant, pour moi, de participer aux expérimentations proposées par *Renault* et *Transdev*.

**Lucas.C** : Un projet très enrichissant qui m'a permis d'apprendre beaucoup sur l'organisation et le travail de groupe (un aspect très important pour le futur ingénieur que j'espère devenir). La rencontre avec les doctorants et la présentation de leur travail étaient tout aussi intéressantes et m'a été très utile pour ma future orientation. Enfin, ce projet qui traite réellement de l'actualité et des technologies futures et émergentes m'a aidé à comprendre à quel point notre quotidien va être révolutionné.

**Maxence D.** : Ce projet m'a permis de découvrir plus profondément un domaine qui me passionne depuis longtemps. En effet l'automobile est un domaine en pleine mutation qu'il est important de suivre pour un futur ingénieur. Cela m'a permis de mieux comprendre le fonctionnement de *deep learning* et m'a donné envie d'orienter mes études dans l'informatique. De plus ce fut le premier projet d'envergure réalisé dans un grand groupe. Cela a donc permis de voir les avantages et les contraintes du travail en équipe.

**Nathan F.** : Ce projet m'a permis d'en apprendre davantage sur le fonctionnement du GPS et des technologies qui y sont liées mais aussi sur tous les points de notre projet grâce au travail de mes camarades. Il m'a permis aussi de monter à bord des véhicules autonomes d'Autonomous Lab ce qui fut une expérience très intéressante.

**Mathieu G.** : Grâce à ce projet, j'ai pu enrichir mes connaissances autour d'un sujet que je connaissais assez peu et qui est pourtant d'une grande actualité. Ce projet m'a donc intéressé à la fois de par le contenu du sujet mais aussi par le travail en groupe qui est très formateur.

**Viktor R.** : Personnellement, j'ai trouvé ce projet très enrichissant. En effet, il m'a permis d'en apprendre plus sur les voitures autonomes, un sujet actuel et intéressant. De plus, il m'a permis d'avoir une autre expérience de travail en groupe ce qui est important dans le travail d'un ingénieur. Surtout avec un groupe de 7 où il a fallu bien s'organiser pour la répartition des tâches et la communication.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

### Histoire et Technique GPS :

#### A. Sites web :

<http://voitureautonome-2014.kazeo.com/a-comment-fonctionne-le-gps-a124503010>  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Global\\_Positioning\\_System](https://fr.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System)  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Système\\_de\\_positionnement\\_par\\_satellites](https://fr.wikipedia.org/wiki/Système_de_positionnement_par_satellites)  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/GPS\\_diff%C3%A9rentiel](https://fr.wikipedia.org/wiki/GPS_diff%C3%A9rentiel)  
<https://sciencetonnante.wordpress.com/2013/03/04/sans-einstein-pas-de-gps/>

#### B. Images :

[https://www.challenges.fr/automobile/mondial-de-l-automobile-salon-de-l-auto/voiture-autonome-sans-mains-souleve-questions-responsabilite-securite-piratage\\_430219](https://www.challenges.fr/automobile/mondial-de-l-automobile-salon-de-l-auto/voiture-autonome-sans-mains-souleve-questions-responsabilite-securite-piratage_430219)  
[https://www.staples.com/Staples-Colored-Top-Tab-File-Folders-3-Tab-5-Color-Assortment-Letter-Size-100-Pack/product\\_875429](https://www.staples.com/Staples-Colored-Top-Tab-File-Folders-3-Tab-5-Color-Assortment-Letter-Size-100-Pack/product_875429)  
[https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/galileo\\_logo.svg.png](https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/galileo_logo.svg.png)  
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/2/29/Beidou\\_logo.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/2/29/Beidou_logo.png)  
<https://www.pulsometrosinbanda.com/wp-content/uploads/2018/02/GLONASS.jpg>  
[http://www.marketing-professionnel.fr/wp-content/uploads/2011/03/gps\\_satellites-concurrence.gif](http://www.marketing-professionnel.fr/wp-content/uploads/2011/03/gps_satellites-concurrence.gif)  
<https://banner2.kisspng.com/20180327/ghq/kisspng-earth-drawing-earth-cartoon-5aba791f15a1d7.3703879515221701430886.jpg>  
[http://cdn.onlinewebfonts.com/svg/img\\_467039.png](http://cdn.onlinewebfonts.com/svg/img_467039.png)  
<https://theivrgroup.org/images/globe-lineart-3d-11.png>  
[https://www.reddit.com/r/TechnologyPorn/comments/alutqs/rubidium\\_atomic\\_clock\\_used\\_in\\_gps\\_satellites\\_in/](https://www.reddit.com/r/TechnologyPorn/comments/alutqs/rubidium_atomic_clock_used_in_gps_satellites_in/)  
<https://www.rene-reyt.fr/wp-content/uploads/2016/01/gps-diff-leica-ctrl-768x597.jpg>

## Localisation proche et dynamique :

### A. **Sites web** : (valides à la date du 10/06/19)

- Lidar

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Lidar>

<https://www.youtube.com/watch?v=xViGdU2xz-E>

[https://www.youtube.com/watch?v=f7iaQw\\_UgbM](https://www.youtube.com/watch?v=f7iaQw_UgbM)

<https://www.valuewalk.com/2016/10/tesla-motors-autopilot-big-flaw/>

<https://news.voyage.auto/an-introduction-to-lidar-the-key-self-driving-car-sensor-a7e405590cff>

- Configuration capteurs

<https://www.youtube.com/watch?v=jmnemTP4NgY>

### B. **Images** : (valides à la date du 10/06/19)

<http://pastyme-photos.blogspot.com/2017/02/voiture-autonome.html>

## Aspect sociétal :

### C. **Sites web** : (valides à la date du 11/06/19)

<https://www.voitureautonome.net/combien-ca-coute.html>

[https://fr.sputniknews.com/sci\\_tech/201801281034918578-voiture-conducteur-responsabilite-avenir/](https://fr.sputniknews.com/sci_tech/201801281034918578-voiture-conducteur-responsabilite-avenir/)

<http://www.minutefacile.com/high-tech-auto/25231-les-avantages-et-desavantages-de-la-voiture-autonome/>

<https://www.nature.com/articles/d41586-018-07135-0>

<https://www.helloopenworld.com/dilemmes-ethiques-voitures-autonomes-8476>

<https://www.google.fr/amp/s/www.la-croix.com/amp/1200978862>

<https://www.usinenouvelle.com/article/les-obstacles-que-devra-surmonter-le-vehicule-autonome-en-2019-et-apres.N742304>

<https://m.nextinpact.com/news/105045-ethique-voitures-autonomes-premieres-lignes-directrices-au-monde-en-allemande.htm?r>

<http://lesarpenteurs.fr/quelle-ethique-pour-les-voitures-autonomes/>

<https://www.transdev.com>

<https://www.rouennormandyautonomouslab.com>