

## Véhicule autonome et connecté : Localisation embarquée



Charlotte VIENNEY  
Mathias HERSENT  
Hiba HADDAR  
Yuchen MO  
Meriam KAMOUN  
Zhenchen ZHANG

Enseignant responsable du projet :  
Abdelaziz BENSRAIR

## Table des matières :

INTRODUCTION .....	4
METHODOLOGIE ET ORGANISATION DU TRAVAIL .....	5
I - Définition et concept de la voiture autonome.....	7
1) – Le véhicule autonome .....	7
i) Définition .....	7
ii) Les niveaux d'autonomie .....	7
2) Les systèmes embarqués : le cœur du véhicule autonome .....	8
a) Définition et fonctionnement.....	8
i) définition .....	8
ii) fonctionnement.....	9
b) Dans les véhicules autonomes.....	10
II- Localisation.....	10
1) Cartographie.....	10
a) Enjeux de la cartographie .....	10
b) Réalisation des cartes .....	10
c) Filtre de Kalman.....	11
d) SLAM .....	12
2) GPS .....	12
a) Historique .....	12
i) Prédécesseurs .....	12
ii) Projet GPS.....	13
iii) Fonctionnement.....	13
1. Trilatération.....	13
2. Calcul la distance satellite-récepteur.....	13
3. Théorie de la relativité .....	14
iv. amélioration .....	15
1- GPS Différentiel .....	15
2.Bi-fréquence GPS .....	15
v. Erreurs et limitation du GPS .....	15
3) Localisation relative.....	16
a) Lidar .....	16
b) Capteur vision (vision par ordinateur) .....	18
c) Capteur Inertiel (IMU) .....	19
d) Odomètre.....	20
III- Conclusion : véhicule autonome vis-à-vis la société : .....	22
1) les bienfaits et les méfaits de ce véhicule (challenges).....	22
a) les bienfaits : .....	22
b) les méfaits:.....	22
2) Existence en France .....	22
Bibliographie .....	24
Sources des images .....	26

**Type de projet :** Veille

**Objectifs du projet :**

Notre projet s'intitule Véhicule Autonome et Connecté : Localisation Embarqué. L'objectif principal est d'étudier diverses technologies permettant de localiser les véhicules autonomes. En premier lieu, il est nécessaire de comprendre les caractéristiques de ces derniers. Ensuite, nous devons étudier la technologie de la cartographie, la localisation absolue (GPS) et la localisation relative (capteurs) utilisées dans ces véhicules. De cette manière, nous pouvons avoir une idée générale du mode et du principe de fonctionnement du système de localisation embarqué dans ces véhicules. Enfin, nous nous concentrerons sur son application dans la société. Nous devons alorsH- prêter attention aux avantages et aux limites de chaque technologie afin d'apprendre quelques intégrations de technologies de localisation.

**Mots-clefs du projet :** VAC, Localisation, GPS

# INTRODUCTION

De nos jours, nous pouvons utiliser différents moyens de transport pour nous déplacer. Quel que soit le mode de déplacement utilisé, une intervention humaine est requise.

Cette situation est en train de changer. En effet, ces dernières années ont vu l'avènement de ce qui paraissait futuriste à l'instant, il s'agit du véhicule autonome.

Un véhicule autonome est une voiture qui peut conduire seule sans action d'un être humain. Il est donc clair que ce type d'automobile doit pouvoir connaître son emplacement très précisément pour pouvoir savoir où il est et où il se trouve sur la route. En effet, avec un système de pilotage, la conduite d'un véhicule autonome est automatisée. Ce système lui permet de circuler et de prendre des décisions sans le soutien du conducteur.

Notre projet se concentre sur l'étude de la localisation du véhicule autonome. Dans un premier temps, une étude sur le principe du fonctionnement et sur la conception d'un véhicule autonome est réalisée. Une attention particulière est faite pour les systèmes embarqués utilisés pour ce type de voiture.

A la suite de ce travail, et grâce à des recherches bibliographiques, nous avons présenté les différents systèmes permettant aux véhicules de se localiser dans son environnement ainsi que leurs fonctionnements.

Nous avons clôturé ce travail par une conclusion générale en mettant l'accent sur les bienfaits et les méfaits de ce véhicule autonome de même que son existence et son avenir en France.

# METHODOLOGIE ET ORGANISATION DU TRAVAIL

Pour mener à bien ce projet, nous avons commencé par désigner Charlotte Vienney comme chef du projet. Elle a été chargée de faire la mise au point ainsi que l'organisation du travail tout au long de ce projet.

En effet, chaque membre du groupe a effectué de son côté des vastes recherches sur l'ensemble des aspects qui touchent à notre sujet. En se basant sur ces recherches primaires, un plan détaillé a été fixé contenant les différentes parties et sous-parties envisagées dans notre projet.

Après avoir validé le plan de travail par notre encadreur, Monsieur le Professeur BENSRAHAI, les tâches ont été réparties entre les membres comme suit :

## - Organigramme des tâches -

Membre du groupe	Plan	Recherches	Rédaction	Organisation du rapport
Hiba Haddar		-Véhicule Autonome : les systèmes embarqués - Conclusion		-Introduction
Mathias Hersent		-Localisation : cartographie	Chacun	-Tables des matières - -Relecture du rapport
Meriam Kamoun		-Localisation relative : Lidar et Capteur Inertiel	Rédige	-Méthodologie et organisation du travail
Yuchen Mo	Recherches	-Localisation : GPS	Sa	-Objectifs du projet
	Superficielles			
Charlotte Vienney		-Véhicule Autonome : définition et niveaux d'autonomie -Localisation relative : capteur vision et odomètre	Partie	-Mise en page du rapport -Bibliographie -Tables de figures
Zhenchen Zhang		-Localisation : GPS		-Mots clefs -Types de projet
Semaine	1	2 à 10	11 à 23	11

Sur une période de dix semaines, chaque membre du groupe a effectué des recherches (illustration et recherche bibliographiques) sur sa propre partie. Les résultats collectés ont été mis en commun au fur et à mesure dans un Google doc qui a été partagé entre les membres du groupe dès le début.

Après avoir terminé la rédaction de nos parties, une relecture a été effectuée et chacun a commencé à rédiger sa partie orale.

La rédaction des parties globales du rapport : introduction, bibliographie... a été réalisée en respectant la répartition indiquée dans l'organigramme des tâches, présenté ci-dessus.

L'assemblage des différentes parties rédigées et la mise en page du rapport ont été accomplis par le chef du projet.

Durant ces semaines de travail, un échange avec notre encadreur, Professeur BENSRAHAI Abdelaziz, a été effectué pendant le créneau de P6. La communication entre les membres a été assurée d'une manière continue tout au long du projet via un groupe Messenger afin de permettre la planification et l'état d'avancement des différentes tâches.

# I - Définition et concept de la voiture autonome

## 1) – Le véhicule autonome

### *i) Définition*

La voiture autonome est un véhicule capable de rouler sans l'intervention d'un humain. [1] Elle est équipée de plusieurs capteurs et d'un logiciel de calcul géré par une intelligence artificielle pour pouvoir se déplacer dans le trafic routier de façon précise, en respectant les limitations de vitesses et en ne créant pas d'accidents. On note que les véhicules autonomes ne sont pas forcément électriques.



Figure 1 : Tesla Model 3-2020 [A]

Parmi les différentes voitures autonomes sur le marché, on compte les marques suivantes : Audi, Tesla, Renault...

### *ii) Les niveaux d'autonomie*

Il existe six niveaux d'autonomie du véhicule autonome mis au point en 2014 par Society of Automotive Engineers. [2]

**Niveau 0** : aucune assistance électronique ou informatique. Le fonctionnement du véhicule n'est que mécanique .

**Niveau 1** : il ne s'agit que d'une aide à la conduite. Le conducteur a encore le contrôle sur la majorité de sa voiture. En effet, le véhicule gère qu'une seule action à la fois. Il peut s'agir de signal sonore au recul d'une voiture par exemple. [3] L'exemple le plus courant d'une autonomie de niveau 1 est le régulateur de vitesse. Lors de long trajet à vitesse constante, ce système permet de reposer les jambes et d'éviter de fatiguer le conducteur. Il reste important d'avoir tout de même un conducteur derrière le volant qui peut alors agir en cas de dysfonctionnement.

**Niveau 2** : Ce niveau est le plus répandu dans les voitures de nos jours. Il s'agit d'une assistance à la conduite qui renforce la sécurité comme un centrage sur la voie si le conducteur dévie de trop [3]. Le conducteur a toujours accès aux principales commandes de sa voiture et il doit impérativement garder ses mains sur le volant. [2] Comme exemple d'autonomie de niveau 2 nous retrouvons le 'Park Assist'. Il s'agit d'une aide à la conduite qui se développe de plus en plus afin de faciliter le stationnement. Cette aide évite les différents risques liés au stationnement et enlève les appréhensions lorsqu'il s'agit d'effectuer un créneau par exemple, que seuls 29 % des français réalisent du premier coup. Cette fonctionnalité évalue la largeur de la place par rapport à celle du véhicule puis le conducteur indique

quel type de stationnement il souhaite réaliser et le Park Assist effectue la manœuvre [4]. Il existe des Park Assist ‘feet on’ où le conducteur appuie sur les pédales pour déplacer le véhicule et des systèmes dits ‘feet off’ où le conducteur n’a pas besoin d’appuyer sur les pédales. Il s’agit bien d’un système d’assistance pour le conducteur et non d’un système sans conducteur.

Les niveaux suivants ne sont pas commercialisés pour faute de législations et font encore l’objet de recherche et d’innovation. On note qu’à partir du niveau 3, les véhicules autonomes sont capables d’analyser l’environnement dans lequel ils se trouvent et d’agir en fonction de ce dernier [2].

**Niveau 3 :** Il s’agit du niveau ‘Limited Self-Driving Automation’ [5]. Le mode autonome est activé dans des cas simples, comme sur l’autoroute, et est désactivé pour les situations plus complexes comme en ville. Le conducteur n’est dans le véhicule que pour superviser la conduite et peut reprendre le contrôle en cas de situations complexes. Parmi les possibilités qu’offre le niveau 3, on compte un dépassement lors de l’enclenchement du clignotant, ou garder les distances de sécurité.

**Les niveaux 4 et 5 :** De nos jours, la voiture est de plus en plus utilisée pour effectuer des trajets. En 2019 54 % des français utilisaient la voiture tous les jours [6]. Il est donc important pour les conducteurs que leur conduite soit de plus en plus agréable. A partir du niveau 4, l’assistance du conducteur n’est pas obligatoire. Cependant, il doit remplir un certain nombre de critères pour que le véhicule soit totalement autonome dans certaines conditions. Si le véhicule ne répond plus aux critères – par exemple, lorsqu’il quitte une zone de conduite automatisée – le conducteur doit reprendre le contrôle de son véhicule [2].

Au niveau 4, le véhicule n’est totalement autonome que sur certaines routes. Le véhicule est capable de surveiller lui-même la route et il n’a pas besoin qu’un conducteur reprenne le contrôle en cas de problèmes. Le véhicule est muni de différents capteurs qui servent à enregistrer la position et la vitesse des différents usagers de la route.

Au niveau 5, le véhicule exécute toutes ces actions sur toutes les routes [2].

## **2) Les systèmes embarqués : le cœur du véhicule autonome**

### ***a) Définition et fonctionnement***

#### **i) définition**

Un système embarqué fait référence à du matériel électronique qui comprend un ou plusieurs microprocesseurs (ou microcontrôleurs) et un logiciel pour le gérer.



Le terme «embarqué» fait référence à la mobilité et à l'autonomie des systèmes interactifs dans l'environnement dans lequel il exécute une tâche spécifique.

Le terme «système» fait référence à tous les éléments qui composent le système embarqué, ces systèmes sont généralement composés de sous-systèmes, complexes.

En effet, ce système est un ensemble de composants informatiques et électroniques coopérant les uns avec les autres de manière autonome et complémentaire. Ces systèmes sont conçus de manière à pouvoir répondre spécifiquement à leurs besoins en environnement approprié [7].

## ii) fonctionnement

Un système embarqué est susceptible d'exécuter des actions en temps réel par exemple : pilote automatique d'avion, gestion alimentation moteur d'une voiture, smartphone, etc... Pour cela, il est équipé d'actionneurs, de capteurs et d'une interface [8].

On note plusieurs types de fonctionnement :

a) Le fonctionnement événementiel qui est basé sur le principe de l'activation du système à chaque événement, on parle de concept d'interruption. A chaque interruption, ce système lit l'information qui arrive, active le traitement qui convient et émet finalement les ordres issus de ce traitement.

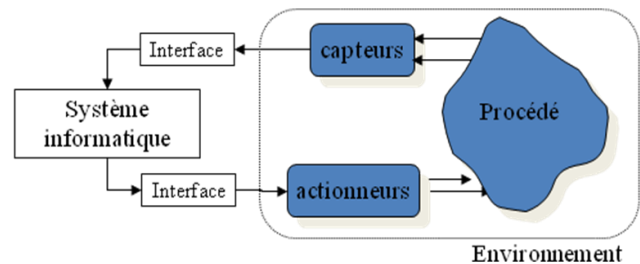


Figure 2 : Fonctionnement d'un système embarqué [C]

b) Le fonctionnement cyclique qui consiste à interroger périodiquement la mémoire d'entrée, échantillonner des entrées sur l'horloge du système et activer le système à chaque 'tick' d'horloge. L'horloge interne est le processus qui sert à fournir la date et l'heure en temps réel aux logiciels qui en ont besoin. Ainsi à chaque 'tick' d'horloge, l'algorithme lit la mémoire des entrées, calcule des ordres à envoyer au procédé et émet des ordres [8].

Exemple de systèmes embarqués : Un système embarqué tel qu'un interrupteur domestique. Le capteur intégré détecte les contacts, un signal qui amène un moteur à ouvrir ou fermer le portail.

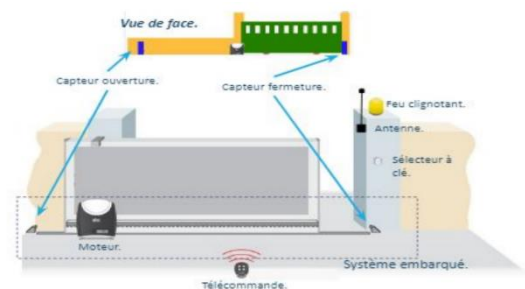


Figure 3 : Exemple de système embarqué sur un portail automatique [B]

### ***b) Dans les véhicules autonomes***

Les experts en ingénierie automobile utilisent les nouvelles technologies et les systèmes embarqués pour produire des véhicules intelligents. Actuellement, le véhicule contient une grande quantité d'électronique et de traitement de données : plus de 100 capteurs, 30 à 50 ordinateurs selon le type de véhicule, et parfois près d'un million de lignes de codes pour les véhicules de dernière génération[7].

## **II- Localisation**

### **1) Cartographie**

#### **a) Enjeux de la cartographie**

Un véhicule autonome est équipé de nombreux capteurs lui permettant de modéliser son environnement proche. Cependant, il faut nécessairement lui associer un système performant de cartographie pour que la voiture puisse anticiper sa trajectoire en prenant en compte des éléments situés plus loin que la simple portée permise par ses capteurs [9].

En effet, connaître le tracé des routes permet au véhicule autonome de calculer son itinéraire comme le ferait un GPS classique. Cependant les systèmes de cartographie ne se contentent plus aujourd'hui de simplement fournir des données sur le tracé des routes, beaucoup d'autres informations sont collectées, on peut citer, en autre, les informations liées à la signalisation (sens de circulation, limites de vitesse, priorité, etc.) et les données en temps réel du trafic autoroutier [9]. Toutes ces informations sont essentielles pour le véhicule autonome, elles lui permettent de mieux anticiper et d'avoir un comportement qui s'approche de celui d'un humain.

Le système GPS peut ne pas être suffisant quand le niveau d'autonomie de la voiture est supérieur à 2. Les principaux acteurs de la cartographie sont TomTom, Here et Google. OpenStreetMap est une alternative libre [10].

#### **b) Réalisation des cartes**

Les premières cartes connues datent de 16 500 ans avant J.-C, trouvées sur les murs de la grotte de Lascaux, elles représentent les étoiles et non la terre. C'est vers 150 après J.-C que les premières mises en forme dites « rigoureuses » de cartes émergent, avec le projet du Grec Ptolémée de faire une carte générale du monde connu [11]. De nos jours, nous avons recours à la géomatique pour obtenir les données nécessaires à la confection de cartes. Le mot « géomatique » est issu de la contraction des termes géographie et informatique. Cette discipline consiste en trois activités

principales : collecte, traitement et diffusion des données géographiques. En géomatique il existe plusieurs outils et techniques permettant de collecter et traiter des données afin de réaliser des cartes.

Il y a le SIG (Système d'Information Géographique) qui est un logiciel permettant de gérer des données géographiques. En 1989, la Société française de Photogrammétrie et de télédétection définissait le SIG comme étant « un système informatique permettant, à partir de diverses sources, de rassembler et d'organiser, de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement » [12]. On se sert donc de ce système pour mettre en correspondance des images satellitaires, photos aériennes, cartes, bases de données, etc...

Les entreprises de cartographie comme Google, Here ou TomTom disposent de flottes de véhicules équipées de nombreux capteurs comme des caméras, des lidars ou des centrales à inertie. Ces véhicules sillonnent les routes du monde entier pour effectuer des relevés et obtenir une multitude de données géographiques. Les véhicules passent régulièrement aux mêmes endroits pour faire des mises à jour des données [9].

### c) Filtre de Kalman

Un filtre de Kalman est un algorithme utilisé pour fusionner les données (souvent bruitées ou incomplètes) provenant des différents capteurs d'un véhicule autonome afin d'estimer sa vitesse et sa position en réduisant les incertitudes de mesures [13].

Le filtre de Kalman fonctionne selon une alternance de prédiction et de mise à jour successives. La phase de prédiction se base sur l'état estimé précédent pour calculer un nouvel état estimé à l'instant  $t$ . On appelle ce nouvel état estimé, l'état *a priori* car pour le moment on ne s'est pas encore servi des véritables mesures des capteurs de la voiture autonome. Dans la phase de mise à jour, on combine l'état *a priori* avec les données mesurées pour affiner cet état, on appelle alors cet état, l'état *a posteriori* [14].

Le filtre de Kalman est en réalité un cas particulier de filtre de Bayes.

Il existe plusieurs types de filtre de Kalman (étendu, haut gain) chacun possédant des avantages et des inconvénients [15].

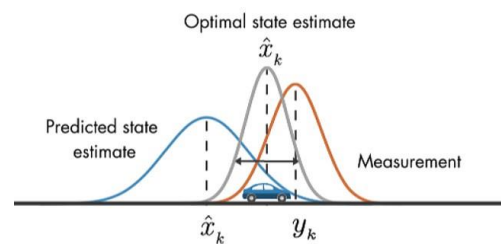


Figure 4: Estimation de la position par filtre de Kalman [D]

## d) SLAM

Le SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) est une technique qui consiste pour un véhicule autonome à simultanément construire ou améliorer une carte de son environnement et de s'y localiser [16]. Pour cela le SLAM utilise plusieurs types de capteurs tels que le lidar, le sonar, etc...

Le SLAM fonctionne en complémentarité avec le GPS, il permet d'affiner la localisation du véhicule. Bien que son utilisation à l'extérieur soit de moins en moins nécessaire grâce à la précision du GPS, il est cependant très utile lorsque le GPS n'est plus disponible dans des zones fermées ou en temps de conflit militaire.

### L'exemple de la caméra ZED 2 :

Un ancien élève de l'INSA Rouen, Aymeric Dujardin, a travaillé chez StereoLabs sur un projet de caméra utilisant la technique SLAM et dotée d'une intelligence artificielle pour modéliser son environnement en 3D. La caméra est capable de faire de la cartographie 3D, de la stéréo vision, de la détection d'objet et de détecter la position des corps humains. Son domaine d'application est très large, elle peut être par exemple utilisée sur des robots autonomes qui ont besoin de se localiser dans l'espace ou pour faire de la détection d'objets dans certains lieux (locaux d'entreprise, ville, etc.) [17].



Figure 5: Détection d'objets dans l'espace [E]



Figure 6: Cartographie de l'environnement par Slam [F]

## 2) GPS

### a) Historique

#### i) Prédecesseurs

L'historique du GPS est basé sur des systèmes de radionavigation terrestres similaires. L'inspiration supplémentaire pour le système GPS est venue d'un groupe de scientifiques américains. Ils ont réalisé que, comme ils connaissaient leur emplacement exact sur la Terre, ils pouvaient localiser des satellites le long de leurs orbites en mesurant la distorsion Doppler.

L'US Navy a utilisé le premier système de navigation par satellite, Transit, et l'a testé avec succès pour la première fois en 1960. En 1967, l'US Navy a développé le satellite Timation, qui a prouvé sa capacité à placer des horloges précises dans l'espace, et le système GPS était basé sur cette technologie.

Au même moment, en 1960, l'US Air Force proposa un système de radionavigation appelé MOSAIC (Mobile System for Precise ICBM Control) et le concept de GPS est né. Un autre prédécesseur important du GPS vient d'une autre branche de l'armée américaine. En 1964, l'armée américaine a mis son premier satellite SECOR (Sequence Check of Flight) en orbite pour des levés géodésiques. Son principe est similaire au GPS utilisé actuellement [18].

## ii) Projet GPS

Le projet GPS a été lancé aux États-Unis en 1973. Le département américain de la Défense a développé le système, qui utilisait à l'origine 24 satellites. Le premier satellite est lancé en 1978. En 1995, le déploiement des 24 satellites opérationnels (plus 4 en réserve) est achevé. Le système devient alors fonctionnel. Les 24 satellites sont répartis uniformément sur 6 plans orbitaux, c'est-à-dire qu'il y a 4 satellites sur chaque plan orbital. L'inclinaison du plan orbital du satellite par rapport au plan équatorial de la Terre est de  $55^\circ$ . Le but de cette disposition est de garantir qu'au moins 4 satellites peuvent être observés à tout moment dans le monde. Deux autres systèmes ont été mis dans deux autres pays, le GLONASS à partir de 1980, et par la Chine, le Beidou initié en 2000 [18].

## iii) Fonctionnement

### 1. Trilatération

La trilatération est la base du principe de fonctionnement du GPS. C'est une méthode mathématique qui utilise la géométrie des triangles pour déterminer la position relative d'un point.

Supposons que nous connaissions la position exacte de deux satellites et la distance entre chaque satellite et l'objet à localiser ( $R_1$  et  $R_2$ ). On est capable d'en déduire que cet objet est forcément à l'intersection de la sphère bleue et la sphère jaune (représentées ci-dessus). Autrement dit, cet objet est sur le cercle rouge puisque l'intersection de deux sphères donne un cercle [19].

Si on ajoute un troisième satellite, la position se réduit à deux points car l'intersection d'un cercle et d'une sphère est deux points. En excluant le point qui n'est pas à la surface de la terre, on peut obtenir la position finale [19].

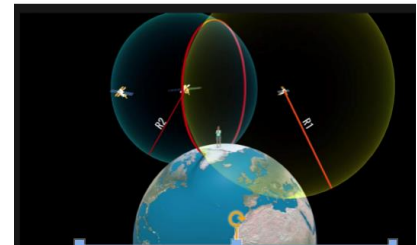


Figure 7: La méthode de Trilatération [G]

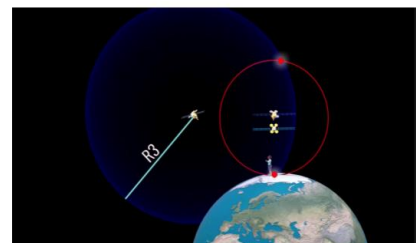


Figure 8: La méthode de Trilatération [G]

### 2. Calcul la distance satellite-récepteur

Avec la technique de trilatération, localiser un objet revient à déterminer la distance entre un satellite et cet objet. Voici est la méthode:

Le satellite envoie une onde électromagnétique dont la vitesse de propagation est égale à la vitesse de la lumière. Ce signal inclut l'heure exacte à laquelle il a été envoyé et sera reçu par le récepteur GPS. De cette façon, on connaît l'heure d'émission et l'heure de réception et la distance peut être facilement calculée par la formule:  $distance = (tréception - témission) \times c$ .

Une chose à noter est que la vitesse de la lumière est gigantesque ( $3 \times 10^8$  m/s) ce qui exige une précision de temps extrêmement élevée, puisque même une erreur de l'ordre de la microseconde causera une erreur de l'ordre du kilomètre. Pour assurer la précision de l'heure, chaque satellite est équipé d'une horloge atomique qui peut donner l'heure la plus précise [19].

Compte tenu du prix d'une horloge atomique, il n'est pas réaliste pour chaque récepteur GPS d'en avoir une. Cependant, grâce au fait que le décalage de temps d'un récepteur avec les trois satellites est le même (car les satellites ont la même heure), on peut le voir comme une quatrième inconnue en plus des trois coordonnées spatiales. Ainsi, en introduisant un quatrième satellite, nous pouvons résoudre ce système d'équations (équation de navigation) qui comporte quatre inconnues. En conséquence, on évite d'équiper les récepteurs d'une horloge atomique [18].

### ***3. Théorie de la relativité***

Cependant, même avec toutes les technologies présentées ci-dessus, le GPS est toujours incapable de donner la bonne position.

Selon la théorie de la relativité restreinte: une horloge qui se déplace rapidement ralentira. Dans notre cas, l'horloge atomique du satellite qui se déplace à une vitesse de 14 000 km/h ralentira le temps de 7 ms/jour.

De plus, les satellites qui se situent environ 20000 km au-dessus de la terre subissent le quart de la pesanteur de la terre. Ainsi d'après la théorie de la relativité générale, les horloges fonctionneront un peu plus vite (environ 45 ms/jour).

Pour résoudre ce problème, une équation de la théorie de la relativité est intégrée dans les puces informatiques pour calibrer les horloges atomiques [20].

## iv. amélioration

### 1- GPS Différentiel

Une condition préalable à l'utilisation de cette technologie est de construire un réseau de stations de référence. Ces stations et utilisateurs sont localisés par GPS en même temps. Cependant, les informations de position des stations sont fixes et connues. En comparant cette position connue et la position indiquée par le satellite, l'erreur de positionnement peut être calculée [21].

Cette erreur est diffusée localement aux véhicules équipés d'une antenne DGPS afin que ces véhicules puissent corriger leur position. De cette façon, une position de haute précision peut être obtenue: environ 1–3 centimètres dans le cas des meilleures implémentations (la précision GPS nominale est de 15 mètres).

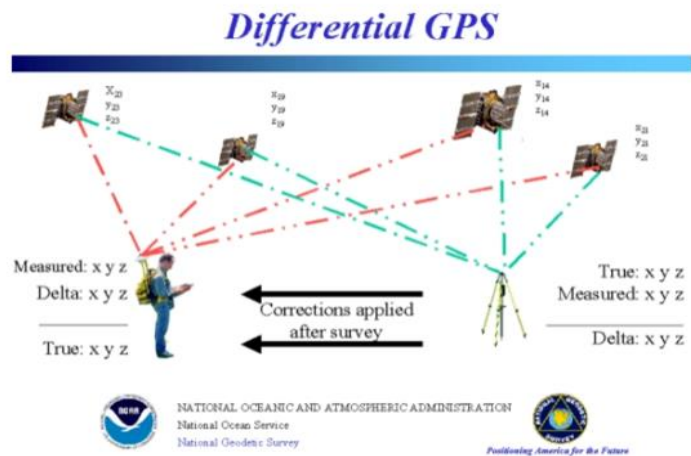


Figure 9: Fonctionnement de GPS différentiel [H]

### 2. Bi-fréquence GPS

Afin de réduire les erreurs causées par le GPS, l'armée utilise souvent deux récepteurs. L'utilisation de deux fréquences GPS peut améliorer la précision en corrigeant les distorsions du signal causées par l'atmosphère terrestre. Il existe des appareils GPS bi-fréquence sur le marché civil, mais leur coût et leur taille les rendent uniquement disponibles pour des applications professionnelles. Mais avec l'aide de certains systèmes qui peuvent augmenter la précision du GPS, les utilisateurs civils peuvent en fait obtenir une meilleure précision GPS que les utilisateurs militaires. Par exemple, WAAS (WAAS est un système de navigation extrêmement précis développé pour l'aviation civile, qui peut fournir une navigation horizontale et verticale pour les opérations d'approche pour tous les utilisateurs dans toutes les positions, CORS, IGS, etc [22]).

## v. Erreurs et limitation du GPS

### Erreur orbitale

Les satellites ne peuvent pas toujours être sur l'orbite prévue, ce qui provoque l'erreur de position du satellite. D'après ce que l'on explique dans la partie 1.1 (trilatération), la position d'un satellite est essentielle pour localiser des objets.

### Erreur de trajet multiple

Cette erreur vient du fait qu'un signal rebondit d'abord sur un objet lisse puis heurte l'antenne du récepteur. Appréhensé, cela augmente la durée pendant laquelle un signal atteint le récepteur

### **Erreur de l'ionosphère**

L'ionosphère est un milieu dispersif, ce qui signifie qu'il déforme le signal GPS et modifie la vitesse à mesure qu'il traverse les différentes couches ionosphériques pour atteindre un récepteur GPS [23]

### **D'autres erreurs**

Interférence radio ou brouillage

Tempêtes solaires majeures

Maintenance / manœuvres des satellites créant des lacunes temporaires dans la couverture

Appareils mal conçus qui ne sont pas conformes aux spécifications de l'interface GPS [22].

### **Limitations du GPS**

Le GPS ordinaire ne peut pas localiser une position avec une précision de plus de 3 m. Le GPS est généralement inutilisable dans des conditions intérieures car les ondes radio seront bloquées par des barrières physiques telles que des murs et d'autres objets. Le GPS sera également affecté de nombreuses manières, notamment les bâtiments, les viaducs, les ondes radio, etc. En général, le positionnement GPS est plus précis dans les zones ouvertes [24].

## **3) Localisation relative**

Définition localisation relative : Il s'agit de la localisation permettant de déterminer la position et l'orientation d'un véhicule à partir d'une position initiale donnée et de ses déplacements successifs [25]. Les capteurs alors utilisés permettent de mesurer les grandeurs telles que la vitesse de déplacement du véhicule ou la distance parcourue par ce dernier.

La localisation relative s'oppose à la localisation absolue qui ne tient pas compte de la position initiale du véhicule mais de sa position dans l'environnement. Il faut noter que ces capteurs utilisés, pour la localisation relative ou pour la localisation absolue, manquent de précision. Les mesures qu'ils font sont incomplètes, imparfaites et peuvent contenir des erreurs [25].

### **a) Lidar**

- Définition

Le Lidar (**L**ight **D**etection **A**nd **R**anging) est une technique de télédétection optique. Il s'agit d'un composant électronique actif (c'est-à-dire il utilise sa propre source lumineuse) faisant partie de la famille des capteurs qui émet des ondes lumineuses permettant de mesurer la distance entre le capteur et sa cible avec une grande précision (à un centimètre près) [27].



Il existe deux catégories de lidar :

- **Le lidar aéroporté** : le système est transporté par drone, avion ou hélicoptère utilisé dans l'urbanisme, l'étude des reliefs (lidar topographique) ainsi que dans la bathymétrie (lidar bathymétrique) [28].

- **Le lidar terrestre** : il peut être installé sur des appareils mobiles (véhicules autonomes) ou statiques (fixé sur des trépieds) permettant de cartographier des objets, des infrastructures... [29]

- Composition

Un capteur Lidar se compose principalement d'un émetteur d'impulsions laser, d'un télescope qui collecte les rayonnements réfléchis, d'un photodétecteur : qui permet de convertir la lumière en signal électrique et d'une unité de contrôle et d'analyse qui assure le traitement du signal reçu.

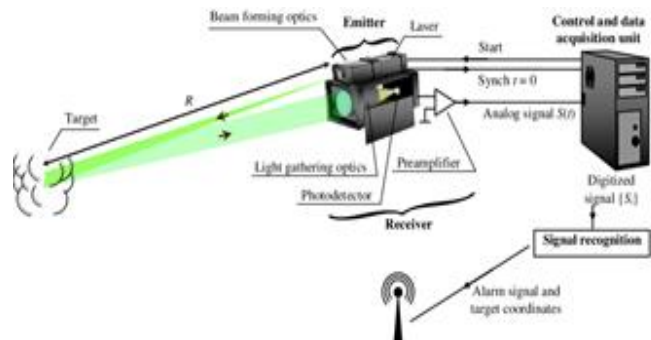


Figure 10: Les composants du système Lidar et son principe de fonctionnement [1]

Le lidar est également accompagné d'un système de positionnement et de navigation qui permet de détecter la position du capteur par un GPS [30], ainsi que sa direction et son orientation grâce à un système de navigation inertielle (INS) [28].

- Fonctionnement :

Le lidar émet des impulsions laser en direction de la cible. Ces ondes lumineuses sont ensuite réfléchies vers le capteur et détectées par le récepteur (télescope). Ce dernier permet de calculer le temps  $t$  parcouru par l'impulsion pour atteindre la cible. Connaissant la vitesse  $c$  de la lumière, la distance réelle entre le capteur et un point de la surface de l'objet peut être donc calculée à l'aide de la formule suivante :  $D = (v * t)/2$  avec  $v$  : la vitesse de la lumière [31].

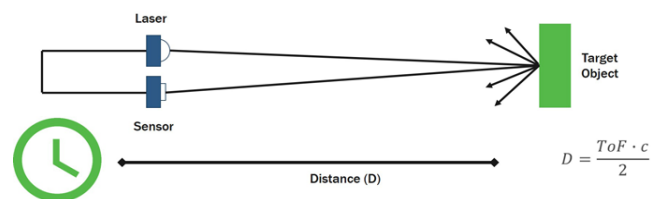


Figure 11: Principe de fonctionnement du Lidar.

ToF : temps de vol ,  $c$  : vitesse de la lumière [J]

Grâce au système de positionnement, cette distance est convertie en un point tridimensionnel dans l'espace représentant un point de la surface de cet objet [26].

Pour chaque impulsion réfléchie, ces données sont enregistrées afin de générer un nuage de point représentant une image en 3D de l'objet ainsi que son emplacement et sa direction par rapport au

capteur Lidar. Cela permet donc de construire une carte complexe de l'environnement autour du capteur [31].

- Lidar ou radar

Le fonctionnement du Lidar est semblable à celui du Radar (Radio Detection and Ranging) qui utilise des ondes radio à la place du laser [32]. Ces ondes radio ont pour longueur d'onde entre 30 cm et 3 mm et ont moins d'absorption que les ondes lumineuses, ce qui permet au Radar de détecter des objets à longues distances sans être influencé par les conditions atmosphériques (l'obscurité, le brouillard...). Or le lidar émet des impulsions laser à haute fréquence (jusqu'à 150 000 impulsions par seconde) et de longueur d'onde beaucoup plus petites, ce qui permet de détecter des objets de petites dimensions.

- Pourquoi dans la voiture autonome :

Les véhicules autonomes sont équipés d'un ensemble de lidar placés généralement sur son toit, en avant et en arrière [33]. Ce système est doté d'une technologie de balayage lui permettant de pivoter avec un angle de 360° et mesurer la distance entre la voiture et divers objets environnants [26].

Par conséquent, le véhicule peut détecter les murs, les trottoirs, l'infrastructure (les lignes de route), les panneaux de signalisation... et grâce à un logiciel spécifique, l'ensemble des points mesurés par le lidar permettent la réalisation d'une image 3D de l'environnement autour du véhicule [32]. Ce qui permet de générer des cartes de haute résolution et donc assurer une localisation précise du véhicule [34].

Le principal avantage du lidar est qu'il n'est pas affecté par les changements de lumière puisque c'est un composant actif et peut garder un fonctionnement normal dans toutes les conditions de luminosité.

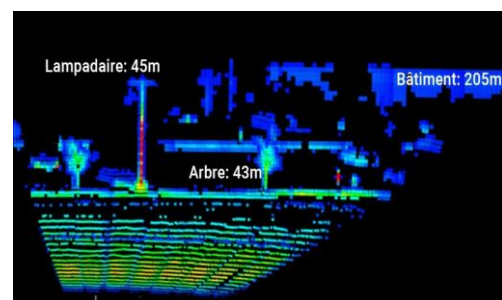
De plus, le traitement des données du Lidar est considéré facile : il permet de réaliser des mesures directes sans décryptage ni interprétation [27].

### ***b) Capteur vision (vision par ordinateur)***

- Définition :

Il s'agit d'un dispositif de localisation relative.

Pour que les différents objets ou obstacles sur la route soient détectés, il faut combiner plusieurs capteurs, un ne suffit pas, d'autant plus si nous souhaitons une détection 360° [35]. En effet, plus il y



*Figure 12: Visualisation partielle de l'environnement 3D entourant le véhicule autonome capté par le Lidar [K]*

a d'informations et plus la fiabilité du fonctionnement sera grande. On utilise des capteurs de vision, semblables à l'œil humain - quoique plus rapides et plus objectifs. Ils permettent d'avoir une acquisition de données en continu.

- Dans le véhicule autonome :

Un capteur de vision supervise les détections [35] : il dispose d'une « grande quantité d'informations ». Ces informations sont ensuite traitées dans le véhicule autonome pour détecter les obstacles, les panneaux de signalisation. Elles sont également utiles dans des modes automatiques comme le Park Assist pour l'aide à la conduite.

Il faut noter que les différentes techniques de vision sont sensibles aux conditions météorologiques comme la pluie ou le brouillard ou aux conditions d'éclairages comme trop ou peu de luminosité. Les capteurs de vision sont donc importants pour aider le conducteur dans sa conduite s'il manque de concentration ou qu'il est fatigué par exemple [36].

- La stéréovision

On note que la stéréovision n'est pas sensible à ce genre de conditions météorologiques ou lumineuses. La stéréovision est dotée de deux caméras ou plus. Elle permet alors de localiser le véhicule dans un environnement analysé par ces caméras. Elle est pratique quand elle est couplée avec un radar. En effet, elle permet par exemple de faire un suivi des véhicules dans les courbes alors que le radar n'en est pas capable.

La stéréovision binoculaire (2 caméras) est plus utile que la vision monoculaire pour la détection d'obstacles lors du déplacement d'un véhicule : les caméras permettent une vue d'ensemble plus conséquente qu'avec une seule caméra [36]. Cela peut être intéressant quand ces dispositifs sont amenés à extraire des informations 3D de l'environnement qui entoure le véhicule.

### ***c) Capteur Inertiel (IMU)***

- Définition :

IMU (Inertial Measurement Unit ou Unité de mesure inertielle ) est un instrument de navigation permettant de mesurer le mouvement d'un objet mobile ( sa vitesse, sa direction , son accélération ..) ainsi que sa position [37].

- Composition et Fonctionnement :

Le capteur IMU est généralement équipé de plusieurs capteurs :

- 3 gyromètres : à 3 axes mesurant l'orientation et la vitesse angulaire
- 3 accéléromètres : mesurant l'accélération linéaire

Les IMU de type II ont aussi 3 magnétomètres qui mesurent l'intensité, la direction du champ magnétique. la combinaison des données collectés par ces capteurs permet d'obtenir des mesures d'orientation et de cap, c'est un angle représentant la direction d'orientation de l'objet mobile [38].

- Dans le véhicule autonome :

l'IMU est capable de déterminer la vitesse, l'angle et la direction et donc de fournir des informations sur la localisation et le mouvement du véhicule indépendamment de l'environnement qu'il l'entoure [39]. Ces données collectées sont associées aux informations géographiques du GPS ce qui permet de fournir des données détaillées sur l'emplacement du véhicule et son mouvement [40].

L'intégration d'un IMU est aussi indispensable pour rendre utilisable des données ponctuelles collectées par le Lidar : en effet ces données (les distances) sont transformées en coordonnées d'un espace orienté grâce aux mesures du roulis,  $\phi$  (qui correspond au mouvement de rotation du lidar autour de son axe longitudinal), du lacet  $\theta$  ( qui correspond au mouvement de rotation du lidar autour vertical), du tangage et de la direction de ce capteur [45].

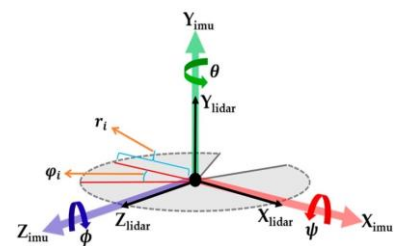


Figure 13: Superposition des bases de coordonnées du Lidar et de l'IMU [L]

#### d) Odomètre

- Définition :

L'odomètre est un capteur se plaçant sur les roues du véhicule. [41]. Ce capteur permet de calculer la distance parcourue par le véhicule en mouvement. Il permet aussi de déduire la vitesse du véhicule à un temps donné.

- Fonctionnement :

Positionné sur les roues motrices du véhicule, le capteur enregistre des informations concernant l'orientation du véhicule à chaque instant et permet ainsi de localiser plus précisément un véhicule. L'odomètre convertit un signal mécanique en un signal électrique [46].

On utilise souvent l'odomètre pour 'pallier aux déficiences du GPS'. Parmi les déficiences du GPS on note le manque de disponibilité (manque de réseau) ou manque de fiabilité [42].

Le fait de coupler le GPS et des systèmes comme l'odomètre est intéressant car ce dernier permet de toujours avoir suffisamment de mesures de distances même lorsque le GPS est défaillant par exemple [42]. De plus, l'odomètre est rapide dans sa prise de mesures.

- Les erreurs de l'odomètre :

Lorsque l'on change de roues, il faut s'assurer qu'elles soient de la même taille que les roues précédentes. En effet, l'odomètre étant fixé sur les roues motrices, si ces dernières ne conviennent pas, les mesures faites par l'odomètre peuvent être faussées : il faudrait alors faire un calibrage des roues.

- Dans un véhicule autonome :

Dans un véhicule autonome, l'intelligence artificielle de l'ordinateur principal va analyser les informations enregistrées par l'odomètre - comme la vitesse du véhicule et la distance parcourue par ce dernier - pour pouvoir les utiliser pour la géolocalisation ou pour réguler la vitesse [37].

### **III- Conclusion : véhicule autonome vis-à-vis la société :**

#### **1) les bienfaits et les méfaits de ce véhicule (challenges)**

##### **a) les bienfaits :**

Les véhicules autonomes sont programmés pour réduire les embouteillages et le nombre de situations dangereuses qui causent des accidents. Ils doivent également réduire fortement les émissions de dioxyde de carbone.

Ces voitures assurent non seulement la sécurité du conducteur et des autres passagers, mais également la sécurité de l'environnement. Qu'il s'agisse de zones urbaines complexes, de piétons, de cartes routières et d'autres véhicules.

##### **b) les méfaits:**

Bien qu'elles aient de nombreuses attractions, les voitures sans conducteur ont aussi leurs inconvénients.

Le fonctionnement des voitures autonomes est basé sur un système informatique.

Comme tout système informatique, il est sujet aux dysfonctionnements ou aux attaques de pirates.

également, en raison de sa technologie de pointe, le coût des voitures autonomes est probablement beaucoup plus élevé que celui des voitures traditionnelles. Par conséquent, ils ne seront pas disponibles pour tous les portefeuilles.

Les voitures sans conducteur font encore aujourd'hui l'objet de nombreux problèmes. Il leur faudra peut-être plusieurs années pour reprendre la route [43].

#### **2) Existence en France**

Le gouvernement a présenté sa stratégie de promotion du développement de véhicules autonomes pour 2020-2022. Une trentaine d'actions ont été identifiées comme favorisant le développement de cet écosystème. Cela passe notamment par la précision du cadre réglementaire fixé par la LOM, la mise en place de critères de cybersécurité et l'établissement de référentiels.

Comme annoncé par le président français, les véhicules autonomes de niveau 3 et 4 seront approuvés pour la circulation à partir de 2022.

À présent, le niveau 1 (régulateur de vitesse adaptatif et assistance au maintien de voie) et le niveau 2 (niveau 1 plus système de dépassement automatique, aide au stationnement) ont été approuvés. Cependant, à partir de 2020, des véhicules de niveau 3 sont apparus sur les routes françaises (vous pouvez rouler sur les autoroutes sans conduire) [44].

## Table des illustrations

<i>Figure 1: Tesla Model 3-2020 [A]</i> .....	7
<i>Figure 2: Fonctionnement d'un système embarqué [B]</i> .....	9
<i>Figure 3: Exemple de système embarqué sur un portail automatique Fonctionnement d'un système embarqué [C]</i> .....	9
<i>Figure 4: Estimation de la position par filtre de Kalman [D]</i> .....	11
<i>Figure 5: Détection d'objets dans l'espace [E]</i> .....	12
<i>Figure 6: Cartographie de l'environnement par Slam [F]</i> .....	12
<i>Figure 7: La méthode de Trilatération [G]</i> .....	13
<i>Figure 8: La méthode de Trilatération [G]</i> .....	13
<i>Figure 9: Fonctionnement de GPS différentiel [H]</i> .....	15
<i>Figure 10: Les composants du système Lidar et son principe de fonctionnement [I]</i> .....	17
<i>Figure 11: Principe de fonctionnement du Lidar. ToF : temps de vol , c : vitesse de la lumière [J]</i>	17
<i>Figure 12: Visualisation partiel de l'environnement 3D entourant le véhicule autonome capté par le Lidar [K]</i> .....	18
<i>Figure 13: Superposition des bases de coordonnées du Lidar et de l'IMU [L]</i> .....	20

# Bibliographie

- [1] Kidioui. Définition de « voiture autonome » : <https://voiture.kidioui.fr/lexique-automobile/voiture-autonome.html> (valide à la date du : 12/04/2021)
- [2] Mbamci. Quels sont les 6 niveaux de la voiture autonome : <https://mbamci.com/6-niveaux-voiture-autonome/> (valide à la date du 12/04/2021)
- [3] Travaux Personnels Encadrés, la voiture autonome : <https://tpegtjb.wixsite.com/voiture-autonome/copie-de-plan-i> (valide à la date du 12/04/2021)
- [4] Ornikar. Le Park Assist, ou stationnement automatique : <https://www.ornikar.com/code/cours/mecanique-vehicule/technologie-assistance/park-assist> (valide à la date du 12/04/2021)
- [5] Meilleure innovation. Comprendre les 6 niveaux d'autonomie d'un véhicule : <https://www.meilleure-innovation.com/niveaux-vehicule-autonome/> (valide à la date du 18/04/2021)
- [6] Statista. Fréquence d'utilisation de la voiture individuelle par les Français en 2019 : <https://fr.statista.com/statistiques/832033/utilisation-voiture-france/> (valide à la date du 12/04/2021)
- [7] Benkhelifa Amin. Les systèmes embarqués dans l'automobile. 08/10/2018. Genève. Haute Ecole de Gestion de Genève (HEG-GE) Microsoft Word - Les systèmes embarqués dans l'automobilee 04.10 (rero.ch) (valide à la date du 12/04/2021)
- [8] Technologue Pro. Introduction aux systèmes embarqués. : <https://www.technologuepro.com/cours-systemes-embarques/cours-systemes-embarques-introduction.htm> (valide à la date du 12/04/2021)
- [9] Clubic. Gros plan sur la cartographie et son avenir : <https://www.clubic.com/mag/transports/article-779014-1-cartographie-avenir.html> (valide à la date du 12/04/2021)
- [10] Automotive World. HD Maps – the key to autonomous driving success ? : <https://www.automotiveworld.com/articles/hd-maps-the-key-to-autonomous-driving-success/> (valide à la date du 12/04/2021)
- [11] Wikipedia. Cartographie : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Cartographie> (valide à la date du 12/04/2021)
- [12] Notre-planete.info . Système d'Information Géographique (SIG) : <https://www.notre-planete.info/terre/outils/sig.php> (valide à la date du 12/04/2021)
- [13] Medium. La fusion des capteurs. <https://medium.com/france-school-of-ai/la-fusion-de-capteurs-587f91a1423a> (valide à la date du 12/04/2021)
- [14] Wikipedia. Kalman filter. [https://en.wikipedia.org/wiki/Kalman\\_filter#Details](https://en.wikipedia.org/wiki/Kalman_filter#Details) (valide à la date du 12/04/2021)
- [15] Kenneth D. Sebesta. Optimal Observers and Optimal Control: Improving Car Efficiency with Kalman and Pontryagin. 2010. Faculty of the Graduate School of the University of Luxembourg. theses.fr – Kenneth Sebesta , Optimal observers and optimal control : improving car efficiency with Kalman et Pontryagin (valide à la date du 18/04/2021)
- [16] Wikipedia. Simultaneous localization and mapping : [https://en.wikipedia.org/wiki/Simultaneous\\_localization\\_and\\_mapping](https://en.wikipedia.org/wiki/Simultaneous_localization_and_mapping) (valide à la date du 12/04/2021)
- [17] Sterolabs. Meet ZED2 : <https://www.stereolabs.com/zed-2/> (valide à la date du 18/04/2021)
- [18] Wikipedia. Global Positioning System [https://en.wikipedia.org/wiki/Global\\_Positioning\\_System](https://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System) (valide à la date du 18/04/2021)
- [19] Youtube. Apprends l'engineering : GPS, comment ça marche. [https://www.youtube.com/watch?v=V51dGqHw\\_24](https://www.youtube.com/watch?v=V51dGqHw_24) (valide à la date du 18/04/2021)
- [20] Futura Sciences. Kézako : comment fonctionne un GPS <https://www.futura-sciences.com/sciences/videos/kezako-fonctionne-gps-659/> (valide à la date du 18/04/2021 )
- [21] Zhuanlan. Positionnement différentiel GNSS : <https://zhuanlan.zhihu.com/p/336356108> (valide à la date du 18/04/2021)
- [22] GPS.gov : GPS Accuracy : <https://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/> (valide à la date du 18/04/2021)
- [23] Ansari Kutubuddin. GPS Error. <https://www.slideshare.net/KutubuddinANSARI/03-gpserrors-59304987> (valide à la date du 18/04/2021)
- [24] Science Direct. Global Positioning System. <https://www.sciencedirect.com/topics/biochemistry-genetics-and-molecular-biology/global-positioning-system> (valide à la date du 18/04/2021)



- [25] Chapuis Roland, Chausse Frédéric, Laneurit Jean: localisation d'un véhicule sur une carte routière précise : [http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/5827/04%20Laneurit%20\(coul\).pdf?sequence=1](http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/5827/04%20Laneurit%20(coul).pdf?sequence=1) (valide à la date du 18/04/2021)
- [26] Le Blog Génération Robots. Qu'est-ce que la technologie LIDAR ? <https://blog.generationrobots.com/fr/qu-est-ce-que-la-technologie-lidar/> (valide à la date du 18/04/2021)
- [27] LeddarTech. Pour le LiDAR ? <https://leddartech.com/fr/pourquoi-lidar/#:~:text=Les%20composantes%20LiDAR%20g%C3%A9n%C3%A8rent%20des,adapter%20la%20conduite%20en%20cons%C3%A9quence> (valide à la date du 18/04/2021)
- [28] ArcGIS Desktop. Types de LiDAR <https://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/latest/manage-data/las-dataset/types-of-lidar.htm#:~:text=Il%20existe%20deux%20types%20principaux,tr%C3%A9pi%C3%A9d%20ou%20un%20appareil%20stationnaire>. (valide à la date du 18/04/2021)
- [29] Jakarta. 4 applications du LiDAR pour les municipalités et territoires <https://www.jakarta.com/fr/blogue/domaines-application-lidar> (valide à la date du 18/04/2021)
- [30] Sentech. The revealing science behind Lidar technology. <https://www.sentech.nl/en/sensor-technology/revealing-science-behind-lidar-technology/> (valide à la date du 18/04/2021)
- [31] YellowScan. Comment fonctionne le LiDAR ? <https://www.yellowscan-lidar.com/fr/knowledge/how-lidar-works/#:~:text=Les%20syst%C3%A8mes%20LiDAR%20pulsent%20une,les%20distances%20et%20les%20angles> (valide à la date du 15/04/2021)
- [32] YellowScan. LiDAR vs. RADAR <https://www.yellowscan-lidar.com/fr/knowledge/lidar-vs-radar/> (valide à la date du 15/04/2021)
- [33] Youtube. L'Esprit Sorcier Officiel. LA VOITURE AUTONOME : laissez-vous guider sur la route du futur. <https://www.youtube.com/watch?v=aAa0FpLQTV4> (valide à la date du 18/04/2021)
- [34] Boutteau, Coru, Merriaux, Rossi, Svatier, Vauchey. Synchronisation et calibrage entre un Lidar 3D et une centrale inertielle pour la localisation précise d'un véhicule autonome. Mars 2018. Rouen. Institut de Recherche en Systèmes Electroniques Embarqués, Normandie Univ, ESIGELEC, IRSEEM. (PDF) [Synchronisation et calibrage entre un Lidar 3D et une centrale inertielle pour la localisation précise d'un véhicule autonome \(researchgate.net\)](#) (valide à la date du 15/04/2021)
- [35] Mathias Perrollaz. Détection d'obstacles multi-capteurs supervisée par stéréovision. Vision par ordinateur et reconnaissance de formes [cs.CV]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2008. Français. fftetel-00656864f (valide à la date du 18/04/2021)
- [36] Mohamed Zayed. Véhicules Intelligents : Etude et développement d'un capteur intelligent de vision pour l'attelage virtuel. domain\_other. Université des Sciences et Technologie de Lille - Lille I, 2005. Français. Fftetel-00141213. Véhicules Intelligents: Etude et développement d'un capteur intelligent de vision pour l'attelage virtuel (archives-ouvertes.fr) (valide à la date du 18/04/2021)
- [37] Eklablog. Les principaux capteurs d'une voiture autonome. [http://tpe-voiture-autonome.kazeo.com/les-principaux-capteurs-dune-voiture-autonome-a123093210?fbclid=IwAR10nTX-vJxzaHTvImPuvy-8jtk90Ua\\_Lhgi9o4gMuzccj6rncCou2jQDQE](http://tpe-voiture-autonome.kazeo.com/les-principaux-capteurs-dune-voiture-autonome-a123093210?fbclid=IwAR10nTX-vJxzaHTvImPuvy-8jtk90Ua_Lhgi9o4gMuzccj6rncCou2jQDQE) (valide à la date du 18/04/2021)
- [38] Wikipedia. Cap (navigation) [https://fr.wikipedia.org/wiki/Cap\\_\(navigation\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Cap_(navigation)) (valide à la date du 18/04/2021)
- [39] MicrocontrollerTips. Inertial measurement units will keep self-driving cars on track. Inertial measurement units will keep self-driving cars on track (microcontrollertips.com) (valide à la date du 15/04/2021)
- [40] ElectronicDesign. Choosing an IMU for Your Autonomous-Vehicle Project. <https://www.electronicdesign.com/markets/automotive/article/21807248/choosing-an-imu-for-your-autonomousvehicle-project> (valide à la date du 15/04/2021)
- [41] Le Guide de l'Auto. Comment un odomètre fonctionne-t-il ? <https://www.guideautoweb.com/articles/49734/comment-un-odometre-fonctionne-t-il/#:~:text=Ce%20capteur%20convertit%20un%20signal,distance%20parcourue%20par%20le%20v%C3%A9hicule>. (valide à la date du 15/04/2021)
- [42] Jamila Kacemi. Fusion d'Informations dans un Système de Positionnement Hybride GPS MultiPorteuses/Estime. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université du Littoral Côte d'Opale, 2006. Français. fftetel-00158238f (valide à la date du 18/04/2021)
- [43] Matmut. Voiture autonome : quels sont les avantages et inconvénients ? <https://www.matmut.fr/assurance/auto/conseils/avantages-inconvenients-voitures-autonome> (valide à la date du 18/04/2021)

[44] Capital. Quand la voiture autonome arrivera-t-elle sur nos routes ? <https://www.capital.fr/auto/quand-la-voiture-autonome-arrivera-t-elle-sur-nos-routes-1347126> (valide à la date du 18/04/2021)

[45] NCBI. A LiDAR and IMU Integrated Indoor Navigation System for UAVs and Its Application in Real-Time Pipeline Classification. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5492361/> (valide à la date du 18/04/2021)

[46] Amadou Maranga Abdoulaye. Techniques mixtes de positionnement et la navigation véhiculaire Sherbrooke (Québec) Canada. Février 2015.

[https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/6921/Amadoumaranga\\_Abdoulaye\\_MScA\\_2015.pdf;sequence=1](https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/6921/Amadoumaranga_Abdoulaye_MScA_2015.pdf;sequence=1) (valide à la date du 18/04/2021)

## Sources des images

[A] Figure 1 : Model 3-2020 de Tesla <https://www.automobile-propre.com/tesla-model-3-2020-plus-dautonomie-et-nouvelle-allure/amp/> (valide à la date du 19/04/2021)

[B] Exemple de système embarqué sur un portail automatique <https://ent2d.ac-bordeaux.fr/disciplines/sti-college/wp-content/uploads/sites/63/2019/05/IP-2-3-C4-MF-Syst%C3%A8mes-embarqu%C3%A9s.pdf> (valide à la date du 19/04/2021)

[C] Fonction du système embarqué <https://www.technologuepro.com/cours-systemes-embarques/cours-systemes-embarques-introduction.htm> (valide à la date du 19/04/2021)

[D] Estimation de la position par filtre de Kalman <https://fr.mathworks.com/videos/understanding-kalman-filters-part-3-optimal-state-estimator--1490710645421.html> (valide à la date du 19/04/2021)

[E] Détection d'objets dans l'espace <https://www.stereolabs.com/zed-2/> (valide à la date du 19/04/2021)

[F] Cartographie de l'environnement par SLAM <https://www.stereolabs.com/zed-2/> (valide à la date du 19/04/2021)

[G] La méthode de Trilatération [https://www.youtube.com/watch?v=V51dGqHw\\_24](https://www.youtube.com/watch?v=V51dGqHw_24) (valide à la date du 19/04/2021)

[H] Fonctionnement de GPS Différentiel [https://en.wikipedia.org/wiki/Differential\\_GPS](https://en.wikipedia.org/wiki/Differential_GPS) (valide à la date du 19/04/2021)

[I] Les composants du système Lidar et son principe de fonctionnement

[https://www.researchgate.net/publication/236681742\\_Fire\\_Surveillance\\_and\\_Evaluation\\_by\\_Means\\_of\\_Lidar\\_Technique](https://www.researchgate.net/publication/236681742_Fire_Surveillance_and_Evaluation_by_Means_of_Lidar_Technique) (valide à la date du 19/04/2021)

[J] Principe de fonctionnement du Lidar <https://www.electronicdesign.com/markets/automotive/article/21160813/on-semiconductor-the-engineering-essentials-behind-lidar> (valide à la date du 19/04/2021)

[K] Visualisation partiel de l'environnement 3D entourant le véhicule autonome capté par le Lidar <https://leddartech.com/fr/pourquoi-lidar/> (valide à la date du 19/04/2021)

[L] Superposition des bases de coordonnées du Lidar et de l'IMU <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5492361/> (valide à la date du 19/04/2021)