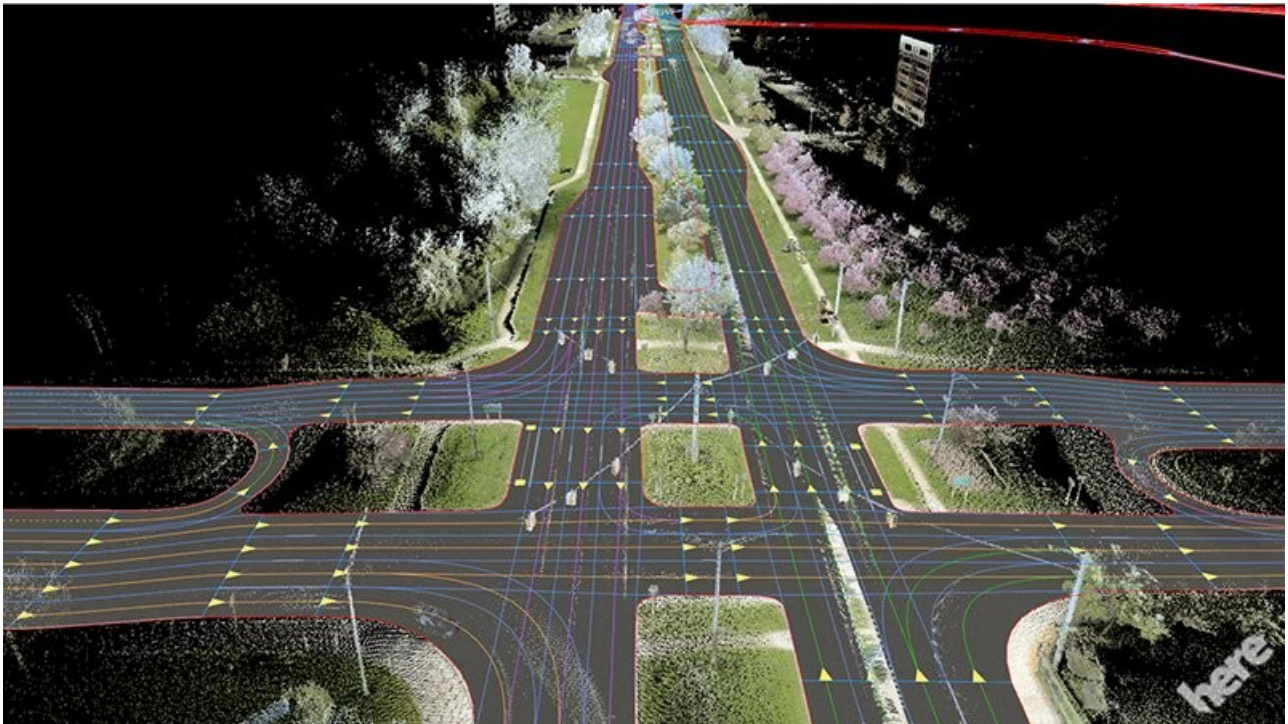


*Projet de Physique P6*

*STPI/P6/2020 - 04*

# Cartographie pour la perception du véhicule autonome



## **Étudiants :**

Sophie Allais  
Solène Le Goadec

Juliette Darnal  
Samuel Legrand

Charlélise Fouasse  
Marie Salabert

## **Enseignant Responsable du projet :**

Abdelaziz Bensrhair



- **Date de remise du rapport** : 15 juin 2020
- **Référence du projet** : STPI/P6/2020 – 04
- **Intitulé du projet** : Cartographie pour la perception du véhicule autonome
- **Type de projet** : Recherche documentaire
- **Objectif du projet** :

Ce projet proposé par Mr Bensrhair est une étude documentaire des systèmes de cartographie utilisés par les véhicules autonomes. Nous avons réalisé chacun un travail de documentation sur des points différents du projet tels que l’histoire précédant la cartographie moderne, les technologies actuelles et leurs utilisations ainsi que les futurs projets. Au-delà du caractère informatif, il s’agissait aussi de gérer un projet de groupe, d’organiser le travail et de gérer des situations imprévues.

- **Mots-clefs du projet** :
  - Cartographie
  - Voiture autonome
  - GPS

## Table des matières

Introduction.....	5
Méthodologie et organisation du travail.....	6
I. État de l’art.....	7
1. Concept global.....	7
1. La voiture autonome.....	7
2. La cartographie.....	7
2. Histoire de la voiture autonome.....	8
3. Histoire de la cartographie.....	8
4. Affiliation de la carte numérique avec la carte implémentée en temps réel.....	9
5. L’enjeu de la cartographie.....	9
1. Avantage.....	9
2. Limites.....	9
Limites de l’automatisation des véhicules :.....	9
Limites de la cartographie et améliorations :.....	11
II. Une technologie entre ingéniosité et rivalité.....	12
1. L’arrivée des systèmes civils de positionnement par satellite.....	12
2. L’utilisation du GNSS aujourd’hui.....	12
3. Les Cartes HD.....	13
III. Aspects techniques.....	14
1. Le GNSS.....	14
2. La carte HD.....	16
Conclusion.....	18
Rapport d’étonnement.....	18
Bibliographie.....	20
Annexes.....	21

## Index des figures

Figure 1 : Tableau de la répartition du travail.....	6
Figure 2 : Les différents niveaux d'autonomie d'un véhicule dit autonome.....	7

## Introduction

Au XXème siècle, on pensait que dès l'an 2000, l'industrie automobile serait révolutionnée, avec notamment des voitures volantes qui ne nécessiteraient aucun carburant ou même une disparition de ces véhicules entièrement remplacés par les transports en commun. Vingt ans plus tard, on remarque que certaines de ces idées ont été en partie développées avec l'arrivée des voitures électriques et la progression des transports en commun dans les grandes villes. Cependant, une autre innovation est en pleine expansion depuis les années 2000. Il s'agit de l'automatisation des véhicules. Cette révolution est encore en phase de test mais une fois sur le marché, cette avancée permettra aux propriétaires de se déplacer sans avoir à conduire. Bien sûr, tout ceci ne serait pas possible sans de grandes avancées technologiques. En effet, les voitures autonomes ont besoin de nombreux capteurs toujours plus performants, d'une intelligence artificielle et d'un système de cartographie qui leurs permettent de se déplacer. Nous nous intéresserons dans ce rapport à ce dernier point : la cartographie.

Tout d'abord, nous ferons l'état de l'art de la cartographie et des véhicules pour lesquels elle est indispensable. Nous verrons le concept global de ces innovations ainsi que l'histoire des voitures autonomes, de leur début jusqu'à aujourd'hui. Nous nous intéresserons ensuite au lien entre la carte numérique et la carte implémentée sur place puis nous ferons un point sur les avantages mais aussi sur les limites de telles technologies.

Dans un deuxième temps, nous nous focaliserons sur la concurrence qui existe dans ce domaine. Pour cela, nous dresserons l'histoire qui a mené à la cartographie telle que nous la connaissons, puis nous étudierons l'utilisation actuelle du GNSS. Enfin, nous nous intéresserons plus particulièrement aux cartes HD. Nous finirons par une étude détaillée des aspects techniques liés à la cartographie. Pour cela, nous traiterons dans un premier temps le fonctionnement du GNSS avant de découvrir celui des cartes HD.

## Méthodologie et organisation du travail

Dans le cadre de notre projet de physique, le thème qui nous a été attribué a été « La cartographie pour la perception du véhicule autonome ». Nous avons donc étudié ce sujet en groupe de six et avec l'encadrement de Monsieur BENSRAIR Abdelaziz avec qui nous nous réunissions chaque lundi à 16h45. De plus, nous avons désigné une capitaine de groupe, Charlélise Fouasse, dont le rôle était d'être en communication directe avec notre professeur afin de solliciter son aide en cas de besoin ou bien de le tenir au courant de notre progression.

Lors de nos deux premières séances, l'objectif a été de recueillir un maximum d'informations sur le véhicule autonome, son mode de fonctionnement, le vocabulaire associé mais aussi plus précisément sur la cartographie. Cela a constitué une tâche importante puisque nous étions en partie étrangers à ce sujet. A la suite de cela, nous avons élaboré un plan qui a été validé par notre professeur puis nous avons séparé le travail en trois axes selon lesquels nous nous sommes répartis, par groupe de deux.

Charlélise	Solène	Marie	Samuel	Juliette	Sophie
<u>Chef de projet</u> Technologie : GPS Poster	Bibliographie Technologie : Carte HD	Limites : VA <sup>i</sup> et de la cartographie	Industrie de la VA et de la cartographie	Histoire : GNSS et de la cartographie	Description, histoire et avantages de la VA

*Figure 1 : Tableau de la répartition du travail.*

Pendant les séances suivantes, chaque binôme a donc poursuivi ses recherches en se focalisant sur les parties qu'il devait traiter. Au fur et à mesure de nos avancées, nous complétons un document partagé afin que tout le monde puisse voir la progression des autres et aussi s'assurer qu'il n'y avait pas de redondance d'une partie à l'autre. Cette méthode de travail nous a d'ailleurs été très utile lorsque la période de confinement a débuté puisque nous avions déjà l'habitude de travailler en petits effectifs, sans forcément avoir besoin de communiquer avec l'ensemble des membres du projet. Pour faciliter notre collaboration à distance, nous avons également utilisé le logiciel Discord qui nous permettait de faire le point oralement. Ainsi, chaque semaine au moment de notre créneau habituel, nous faisons une mise en commun de l'avancement de nos recherches et du rapport. Nous pouvions également discuter avec Monsieur Benshrair au sujet de nos différentes interrogations et sur d'éventuelles incompréhensions liées au véhicule autonome et à la cartographie. Cet horaire nous permettait aussi de progresser dans la rédaction de notre propre partie même s'il nous arrivait souvent de reporter cela à un autre moment de la semaine.

Durant ce projet, nous avons rencontré diverses difficultés. La première, évidente, a été le travail à distance puisque nous avions l'habitude de se voir régulièrement, au minimum une fois par semaine. Il a donc fallu apprendre à s'organiser et à travailler différemment, en utilisant de nouveaux outils notamment. Un autre problème a été la recherche de documentation. En effet, il a souvent été compliqué de trouver des documents fiables, complets, récents mais qui restaient abordables et compréhensibles. Lorsque nous avons rencontré cette difficulté, l'aide de notre professeur nous a été utile puisqu'il a pu nous fournir rapidement des thèses en rapport avec notre sujet. Enfin, il a fallu savoir extraire les informations les plus pertinentes de l'ensemble des articles, des thèses, des rapports ou encore des vidéos que nous avons pu voir et réussir à les transmettre de manière claire et intelligible.

<sup>i</sup>VA: Véhicule Autonome

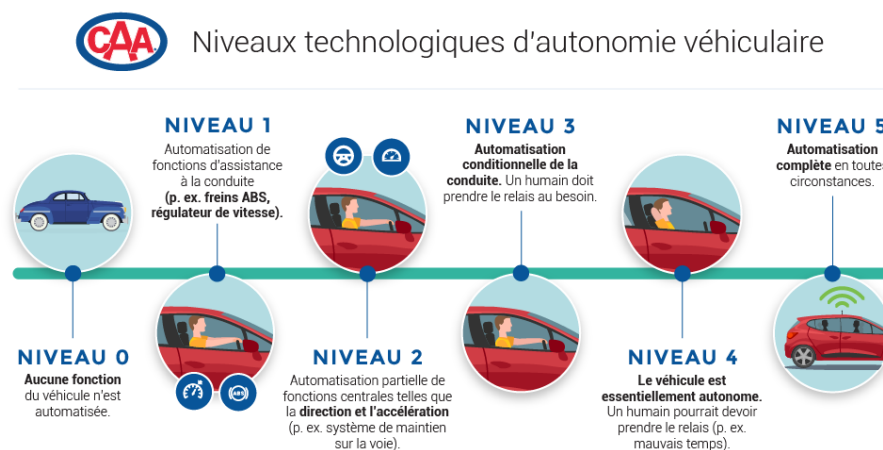
# I. État de l'art

## 1. Concept global

### 1. La voiture autonome

Une voiture dite autonome est équipée d'un système de pilotage automatique qui lui permet de circuler sans intervention humaine dans des conditions de circulation réelles. Grâce à de nombreux capteurs, elle est capable de modéliser son environnement en trois dimensions, d'identifier les éléments qui le composent tels que les marquages au sol, la signalisation, les bâtiments, les autres véhicules ou encore les piétons. Cela lui permet d'éviter les obstacles, de respecter les règles de circulation et d'effectuer des manœuvres de rangement. Le système de géolocalisation lui permet de déterminer le chemin à parcourir pour aller d'un point à un autre. Tout ceci est coordonné grâce à une intelligence artificielle intégrée qui décide des manœuvres telles que la direction, le freinage, l'accélération ou encore les clignotants<sup>6</sup>.

Il existe plusieurs niveaux d'autonomie, le dernier correspondant au véhicule totalement autonome décrit ci-dessus. A l'heure actuelle, de nombreuses voitures semi-autonomes et accessibles au public sont en circulation. Selon leur niveau, elles peuvent inclure des fonctionnalités telles que l'aide au rangement ou la rectification de trajectoire. Cependant, les voitures totalement autonomes sont encore en phase de test et ne sont pas encore commercialisées. De nombreux projets sont mis en place tels que le test de voitures autonomes à Saint-Étienne-du-Rouvray ou encore des navettes sans chauffeurs à Rennes ainsi que des taxis aux États-Unis.



*Figure 2 : Les différents niveaux d'autonomie d'un véhicule dit autonome*

## 2. La cartographie

La technique de la cartographie, définie par l'établissement du dessin et de l'édition des cartes, a pour principe majeur la représentation d'un espace tenu pour réel sur un support plan et réduit. Ainsi, le principal

objectif de cette science géographique est de fournir au lecteur un maximum d'informations concernant l'espace géographique qui l'intéresse et cela avec clarté, efficacité et concision.

En effet, si depuis l'antiquité l'Homme cherche à comprendre l'espace qui l'entoure, il a aujourd'hui davantage le désir, et de plus en plus le besoin, de connaître précisément son positionnement spatial en temps réel. Ce que nous recherchons depuis quelques décennies est une représentation et une diffusion de nos territoires urbains ou ruraux, avec les dernières mises à jour pertinentes, de manière instantanée.

## 2. Histoire de la voiture autonome

La première voiture sans chauffeur a été testée à New York en 1921. Il s'agit de la Linrrican Wonder créée par la société Houdina Radio Control. Cependant, cette voiture ne peut pas être considérée comme autonome car elle était dirigée grâce à des ondes radio par une voiture la suivant. C'est à partir de 1935 que des innovations permettent de tendre vers l'autonomie de ces véhicules. On retrouve notamment l'invention de la transmission automatique (1935), du régulateur de vitesse (1945) ou encore de l'ABS, le système antiblocage des roues (1936). Au Japon, en 1977, est testée avec succès la première voiture capable de suivre une voie de signalisation grâce à des capteurs optiques. Puis en 1986, Ernst Dickmanns, informaticien allemand, met au point le camion VaMoRs, premier véhicule à pouvoir circuler en toute autonomie grâce à des capteurs dans un environnement contrôlé. Cependant, il n'était pas très fiable notamment à cause des capacités des ordinateurs de l'époque. Au début des années 2000, le GPS devient accessible et on assiste alors à une course vers l'autonomie.<sup>13</sup> De grands groupes tels que Google ou Tesla créent des voitures totalement autonomes qui, bien qu'elles soient toujours en test, représentent une grande avancée vers la commercialisation de ces nouveaux véhicules tant attendus.

## 3. Histoire de la cartographie

L'histoire de la cartographie rassemble les avancées techniques ayant permis de l'Antiquité à nos jours, la réalisation de cartes 2D. Au départ, ce sont essentiellement les explorateurs et les cartographes qui permettaient l'établissement de cartes en délimitant les espaces explorés et les territoires nationalisés.

Si la cartographie depuis l'ère Antique référençait symboliquement des espaces bien particulier comme les forêts, les chaînes de montagnes, les cours ou étendues d'eau et délimitait simplement des parcelles. Au cours du temps, la cartographie a du devenir plus précise et réactive. En effet, elle sert aujourd'hui majoritairement aux citoyens pour se déplacer sur de petites échelles. Or, les cartes imprimées ne pouvant évoluer aussi vite que les modifications quotidiennes de l'urbanisation, il a fallu trouver d'autres solutions contemporaines pour remédier à ce problème. C'est pourquoi ce type de cartographie maintenant moins utilisé que les systèmes civils de positionnement par satellite permettant de communiquer des plans de cartes mis à jour ainsi que la position précise de l'utilisateur, par le biais d'Internet, et ceci de manière instantanée.



## 4. Affiliation de la carte numérique avec la carte implémentée en temps réel

De nos jours, l'automobile est un bien auquel on tend à donner toujours plus de fonctionnalités. De plus en plus intelligente, la voiture est devenue autonome. Bien qu'elle ne soit pas encore sur le marché, la voiture autonome est déjà là et ne cesse d'évoluer. Ainsi, elle doit se déplacer dans l'espace d'un point de départ jusqu'à un point d'arrivée tout en respectant les piétons, signalisations, autres usagers de voies routières.

C'est pourquoi la voiture autonome est équipée d'un système de localisation géographique alimenté par les signaux des systèmes de positionnement par satellites, mais aussi de capteurs de mouvements, de lasers (lidars) et d'une ou plusieurs caméras. Tous ces éléments sont reliés à un ordinateur central permettant la modélisation en trois dimensions d'une carte prenant en compte la signalisation, la position précise des autres usagers, des piétons et de l'espace entourant le véhicule. De cette manière, la carte numérique fournie par les constructeurs est affiliée à la carte implémentée en 3D à l'intérieur de la voiture afin que le véhicule puisse réagir de manière rapide et sécuritaire.

## 5. L'enjeu de la cartographie

### 1. **Avantage**

L'utilisation de voitures autonomes présente de nombreux avantages. Elle permet d'améliorer la sécurité routière en réduisant le nombre d'accidents graves, en limitant le nombre d'accidents liés à l'alcool, les drogues ou la fatigue. Elle permet également de diminuer le nombre d'infractions au code de la route, la gestion de ces dernières étant remise à une intelligence artificielle. Grâce à ce type de conduite, le trafic peut être fluidifié grâce à la communication inter-véhicules ce qui permet ainsi de minimiser le temps de transport mais aussi de libérer de l'espace en ville. En effet, des parkings pourraient être créés à l'extérieur de celle-ci afin que les véhicules aillent s'y garer en toute autonomie, rendant ainsi les centres-villes plus agréables et accessibles. Pour les utilisateurs, les avantages d'un tel véhicule ne sont pas négligeables non plus. Les interventions humaines étant inutiles voire impossible dans le cas de voitures sans volants ni pédales, l'utilisateur est libéré du stress de la route et peut s'adonner à d'autres activités. Les personnes pour qui la conduite d'un véhicule est impossible pourront plus facilement se déplacer, notamment les personnes âgées, handicapées ou mineures. De plus, le passage du permis et même du code de la route n'auraient plus lieu d'être ce qui faciliterait l'accès à ce moyen de transport.

### 2. **Limites**

#### Limites de l'automatisation des véhicules :

Cependant l'utilisation de voitures autonomes présente également des inconvénients. En effet, pour les produire il faudra revoir une partie importante des chaînes de fabrication, ce qui impactera notamment le coût d'acquisition. De plus, ce coût sera certainement beaucoup plus élevé que le prix des voitures actuelles car de nombreux capteurs et autres éléments techniques y seront intégrés. D'autres problèmes peuvent

survenir, notamment en cas de panne où il sera difficile de déplacer la voiture par soi-même et où des spécialistes devront être formés afin de réparer des pannes qui seront de nature électronique.

La mise sur le marché du véhicule autonome amène aussi des questions techniques notamment sur la précision de la cartographie, des capteurs et des radars<sup>10</sup>. En effet, il est souvent mis en avant que l'acuité visuelle de l'œil humain grâce à sa capacité d'adaptation biologique ne peut être égalée par la technologie. De plus, la capacité de réflexion d'un être humain dans certaines situations de conduite peut être nécessaire. Par exemple, une société américaine nommée McAfee a réussi à tromper le système d'une Tesla grâce à une attaque ciblée appelée "model hacking" pour qu'elle accélère jusqu'à 136 km/h alors que la limitation de vitesse était de 56 km/h. Pour faire cela, ils ont modifié un panneau de limitation de vitesse en agrandissant de quelques centimètres la barre du milieu du « 3 » grâce à un autocollant noir. Alors que l'œil humain n'aurait sûrement pas vu de différence, l'algorithme utilisé par le véhicule a détecté un « 8 » et a donc dépassé la vitesse autorisée. D'autre part, certaines conditions météorologiques peuvent fausser les données. En effet, si le temps est pluvieux ou s'il y a trop de reflets sur la route, la détection laser de l'environnement n'est pas totalement fiable et peut conduire à des erreurs de positionnement ou à des accidents plus importants. C'est ce qui a eu lieu en Mai 2016, en Floride, lorsque « l'Autopilot », c'est-à-dire l'assistance d'aide à la conduite permettant aux voitures Tesla d'effectuer seules certaines manœuvres, n'a pas détecté un camion qui coupait la route à la voiture en raison de la météo et de la luminosité. Cette erreur a alors provoqué la mort de l'automobiliste. Même si ces accidents sont assez fréquents pour le constructeur Tesla, la faute est souvent rejetée sur le manque de discernement et d'attention des conducteurs puisque la fonctionnalité « Autopilot » est simplement une aide à la conduite et non une conduite totalement autonome. Cependant, cela nous amène à nous demander comment la conduite autonome pourra, elle, être fiable, précise et efficace.

Enfin, on peut soulever certains problèmes éthiques liés à l'automatisation de la conduite et des véhicules. Tout d'abord, la disparition de certains métiers tels que chauffeurs de taxi ou de certains transports en commun puisque la technologie pourra permettre de transporter des personnes d'un lieu à un autre sans avoir besoin d'un conducteur dans le véhicule. D'autres points importants sont à traiter comme par exemple la responsabilité en cas d'accidents. Faudra-t-il mettre en cause le propriétaire du véhicule ou non ? De même, si une infraction est commise comme par exemple un excès de vitesse ou une priorité non respectée. Mais la question la plus importante que pose l'utilisation de tels véhicules reste celle de la sécurité. En effet, la sécurité est un critère important dans le choix d'un véhicule et il peut être assez inquiétant de confier sa sécurité et celle de son entourage à une intelligence artificielle. Cette question inquiète d'autant plus lorsqu'un accident est inévitable est que le choix des vies à sauver revient à l'intelligence artificielle. Il faudra déterminer la réponse à de nombreuses interrogations comme par exemple savoir si en cas de situation dangereuse, la conduite autonome doit privilégier la sécurité des passagers ou celles des personnes et des véhicules aux alentours.

### Limites de la cartographie et améliorations :

La cartographie est donc un élément indispensable du véhicule autonome. Cependant, il reste encore de nombreuses interrogations au sujet de l'utilisation et de la performance de celle-ci.

Tout d'abord, la question de la gestion des données. En effet, l'ensemble des données recueillies afin d'obtenir des informations sur la route telles que la présence de panneaux de signalisation, de piétons ou de bâtiments vont devoir être partagées d'un véhicule à l'autre ou d'une infrastructure à un véhicule. Ces échanges de données vont donc nécessiter la mise en place d'un système de communication fiable et sécurisé. Un défi va donc être de protéger ces données contre les piratages informatiques, les cyber-attaques et les virus. Outre la protection des données contre des menaces extérieures, il va falloir également protéger les données des usagers des véhicules autonomes. En effet, certaines données récoltées peuvent être perçues par les utilisateurs comme faisant partie de leur vie privée<sup>11</sup>. Effectivement, il ne faudrait pas que des lieux ou des points d'intérêts soient utilisés afin de connaître les habitudes de vie et notamment les habitudes de consommation des conducteurs, dans le but de les revendre à d'autres entreprises par exemple. Une réelle question juridique va donc devoir être traitée afin de proposer un encadrement précis de la collecte de données des véhicules autonomes ainsi que leur utilisation. D'autre part, le recueil des données lié à la conduite peut être utilisé à diverses fins. Tout d'abord, à destination des autorités routières afin de sanctionner d'éventuelles infractions au code de la route. Mais aussi pour les assureurs afin de résoudre toute question de responsabilité en cas d'accident impliquant une voiture autonome puisqu'il suffira de vérifier l'activation ou non du mode autonome lors de l'accident. Mais il ne faudrait pas que ces informations soient utilisées par les assureurs afin de déduire les modes de conduite de leurs clients. Ces utilisations devront donc être légiférées afin de garantir les droits et libertés des usagers.

De plus, même si à première vue les systèmes utilisés semblent ne présenter aucunes failles, des études ont montré que le nombre de capteurs et de caméras disponibles actuellement sur les véhicules autonomes ne suffisait pas pour que la voiture se repère de manière totalement fiable<sup>12</sup>. En effet, la voiture autonome utilise un guidage par satellite pour s'orienter, alors que ce système de positionnement lui confère une précision maximale de sept mètres, ce qui est insuffisant pour permettre la mise en circulation d'une voiture autonome car excédant la vingtaine de centimètre réglementaire. Qui plus est, la précision collectée par les technologies comme par exemple les capteurs laser peut être diminuée ou même pratiquement supprimée par les aléas météorologiques.

C'est pourquoi la seule technologie actuelle qui pourrait conférer tous ses atouts à l'automobile autonome est la cartographie haute définition. En effet, cette dernière est dotée d'une précision de l'ordre du centimètre, ce qui est idéal pour le fonctionnement d'un véhicule autonome. Nous étudierons plus en détail cette technologie dans la suite de notre dossier. Néanmoins, cette cartographie mise à jour en temps réel ne pourra être optimal sans la généralisation du réseau 5G sur l'ensemble du territoire.

## II. Une technologie entre ingéniosité et rivalité

### 1. L'arrivée des systèmes civils de positionnement par satellite

Un système de positionnement par satellites ou GNSS<sup>ii</sup> est un système de géo-positionnement caractérisé par sa couverture mondiale, permettant de fournir à un utilisateur, par l'intermédiaire d'un récepteur portable de petite taille, sa position 3D, sa vitesse 3D et l'heure. Le GPS<sup>iii</sup> tout comme TRANSIT, Galiléo, ou encore GLONASS sont des GNSS tous développés à partir de la fin du XX<sup>ème</sup> siècle<sup>b</sup>. C'est la mise en orbite par l'Union soviétique du premier satellite artificiel Spoutnik 1 en 1957 qui a été le déclencheur d'une course sans relâche de la conquête de l'Espace.

C'est aux États-Unis que le premier système de positionnement par satellites fut mis au point, celui-ci nommé TRANSIT a été conçu exclusivement pour la marine du pays en 1964. Néanmoins le système TRANSIT fut suivi très succinctement par le GPS. Ce dernier conçu par le département de la défense des États-Unis au début des années 1970 était dédié à l'usage de l'armée américaine. Néanmoins, suite à la mort des 269 passagers du vol 007 Korean Airlines, en 1983 le président Ronald Reagan demanda que la technologie GPS soit accessible gratuitement par les civils. Une dizaine d'année plus tard, grâce un nombre croissant de satellites disponibles, le GPS fut opérationnel sur toute la planète.

Au même moment mais de l'autre côté du globe, l'URSS développa le système GLONASS qui entra en fonction en 1996. Enfin, l'Union Européenne et la Chine, avec respectivement le système Galileo et Beidou-2 finissent encore aujourd'hui de rendre complètement opérationnel leur propre système.

Enfin d'autres pays comme le Japon avec QZSS<sup>iv</sup> et l'Inde avec l'INRSS<sup>v</sup> développent leur système de positionnement par satellites à couverture uniquement régionale et centrées chacun sur leur pays, comme l'avait fait la Chine avec le système Beidou-1 lancé au début des années 2000. Ainsi, après une utilisation uniquement militaire, les terminaux des systèmes GNSS se sont développés afin de pallier les nécessités du grand public. De plus, ces terminaux exploitent les signaux de plusieurs systèmes GNSS dans le but d'augmenter la précision et rapidité du positionnement.

### 2. L'utilisation du GNSS aujourd'hui

Depuis longtemps, cette technologie est passée du côté des technologies civiles. Un bref coup d'œil sur « l'appStore » de notre téléphone nous permet de voir apparaître des dizaines d'applications GPS : Waze, Google map, TomTom, Mapy, CityMapper, HERE WeGo, ApplePlan et bien d'autres encore. Bien sûr, ces applications ont pour première vocation de nous montrer la voie pour nous rendre d'un point A à un point B mais ce n'est pas tout. En effet, chacune d'entre elles redouble d'ingéniosité pour nous fournir toujours plus d'informations avec par exemple Google map qui est devenu un véritable couteau suisse de l'information

<sup>ii</sup> Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites

<sup>iii</sup> Global Positioning System

<sup>iv</sup> Quasi-Zenith Satellite System

<sup>v</sup> Indian Regional Navigation Satellite System

géolocalisée misant sur la diversité et l'abondance des données, nous permettant ainsi de savoir si un vendeur de chaussettes dans le Colorado est cher et bien noté par exemple. De son côté, Waze s'impose aujourd'hui comme le leader de la cartographie routière en proposant une carte détaillée grâce à la création et la mise à jour en temps réel par les autres utilisateurs de la carte utilisée. C'est donc en partant d'une feuille blanche que Waze a créé la carte la plus détaillée.

Mais la cartographie ce n'est pas seulement utile pour se déplacer, c'est aussi une technologie de positionnement et de suivi, ainsi sur Snapchat par exemple nous pouvons voir sur une carte nos contacts se déplacer et ainsi suivre leurs moindres déplacements. On peut également évoquer la ville de Nice qui a depuis peu adopté le projet « Smart City » permettant notamment aux forces de l'ordre de dresser une carte de la ville indiquant aux policiers les actes illégaux perpétrés, les zones à risque et bien d'autres informations controversées. Cette technologie est qualifiée de « Waze de la sécurité » par l'entreprise Thalès.

Le GNSS est donc un défi technologique dans lequel de nombreuses entreprises se lancent pour proposer des applications toujours plus ingénieuses les unes que les autres. Cependant, il s'agit aussi d'un défi constitutionnel car nombre de ces technologies profitent du flou judiciaire pour réaliser une utilisation invasive qui ne respectent pas les libertés fondamentales de chacun.

### 3. Les Cartes HD

La technologie prédominante dans le domaine de la cartographie appliquée à la conduite autonome est la cartographie HD, Haute Définition. Elle est développée depuis le début du siècle mais prend une ampleur phénoménale depuis quelques années. En effet, elle semble apporter les outils nécessaires à la navigation des voitures autonomes sur les routes du monde entier. C'est la triade Google, TomTom et Here qui constitue les trois leaders en ce qui concerne la cartographie, Google le géant Américain, TomTom et Here pour les européens. Ce sont les premiers à s'être lancés dans le développement d'un système de cartographie pour véhicule autonome et à avoir des résultats concluants. Aujourd'hui, ils assument leurs positions de leader en développant une technologie de cartographie générale, c'est à dire applicable à tous les axes routiers à travers le monde.

La technologie qui s'est révélée être la clef de voûte de la cartographie est la carte haute définition ou HD map. Comme expliqué précédemment, ce système permet de connaître la localisation du véhicule à quelques centimètres près et d'avoir une perception précise et complète de l'environnement du véhicule, allant de la visualisation 3D de l'environnement à la connaissance de la vitesse et de la direction des autres individus présents sur la route ou à proximité mais aussi de pouvoir planifier les futurs obstacles que le véhicule pourrait rencontrer.

D'autres entreprises se sont lancées dans cette course à la voiture autonome, la plupart sont de grands groupes formants des conglomérats d'entreprises spécialistes dans leurs domaines tels que DeepMap, NVidia, Momenta ou Carmera mais aussi des startups, en majorité, qui ont pour objectif de mettre en circulation leurs modèles le plus vite possible pour pouvoir passer à l'étape de gain d'expérience et d'auto-

apprentissage par le biais de prototypes déployés sur les routes. Parmi ces groupes on retrouve Tesla, Uber ou Renault.

Plusieurs prototypes sont déjà à l'œuvre dans certaines villes. C'est le cas par exemple de « Waymo » qui a établi sa zone d'expérimentation dans la ville de Phoenix ou « d'Optimus Ride » à Brooklyn. Mais aussi de Renault à Saint-Étienne-du-Rouvray ou à Saclay avec « l'autonomous lab » faisant circuler des Zoé cab et des minibus autonomes. Ces projets ont permis aux entreprises d'améliorer grandement leurs résultats grâce aux nombreuses données récoltées. Bien évidemment, la carte HD n'est pas en reste, puisque ses éléments sont améliorés et gagnent en justesse et en précision grâce à ces données.

### III. Aspects techniques

#### 1. Le GNSS

Le GNSS<sup>vi</sup> permet de déterminer la position d'un objet sur Terre. Chaque système dispose d'une constellation de plusieurs dizaines de satellites se situant à environ vingt mille kilomètres de la Terre permettant de localiser un objet équipé d'une puce réceptrice. Les satellites sont nombreux afin de pouvoir couvrir tous les continents. Le système le plus utilisé est le GPS qui est le système américain. Nous allons nous intéresser à son fonctionnement.

Chaque satellite envoie sur Terre des signaux contenant la position du satellite ainsi que l'heure et la date d'émission du signal. Le boîtier du système de navigation reçoit les signaux afin de faire une trilatération de la position. Pour cela le boîtier note l'heure d'arrivée du signal et détermine grâce à l'heure d'émission, la durée de parcours du signal. Celui-ci voyage à la vitesse de la lumière ( $c = 3.10^8$  m/s) et l'on détermine alors la distance  $d$  qui sépare le satellite du boîtier. Avec un seul satellite, la position du boîtier est réduite à la sphère centrée sur le satellite et de rayon  $d$ . Grâce à trois satellites, on peut ainsi obtenir la position précise du boîtier car un seul point coupe les 3 sphères autour des satellites<sup>3</sup>.

Cependant, pour la synchronisation de l'horloge du boîtier GPS, il faut la précision d'une horloge atomique. Il faut donc un quatrième satellite équipé de ce type d'horloge afin d'obtenir l'heure exacte et ainsi une position précise de quelques mètres. Il faut corriger en effet quelques phénomènes relativistes. Premièrement, la vitesse de déplacement des satellites est très grande, plus de 14 000 km/h, leurs référentiels espace et temps sont différents de ceux de la Terre. Ainsi, les horloges sont retardées de 7 microsecondes par jour. De plus, à cause de leur altitude élevée, les satellites sont soumis à un champ gravitationnel différent. D'après la relativité, l'écoulement du temps est accéléré si le champ gravitationnel diminue. Pour ces satellites le temps est alors accéléré de 45 ms/jour. En combinant ces deux phénomènes, on obtient un décalage de 38  $\mu$ s/jour, ce qui pourrait entraîner une erreur de position supérieure à 11 kilomètres, ce qui est bien élevée pour que le GPS soit utilisable.

<sup>vi</sup> Global Navigation Satellite System

C'est pourquoi des solutions pour améliorer la mesure de position ont été mises au point comme par exemple le DGPS<sup>vii</sup> et le RTK<sup>viii</sup>. Le GPS différentiel est une amélioration du GPS. Il utilise un réseau de stations de référence fixes qui transmet la différence entre la position indiquée par le satellite et sa position réelle connue. Le récepteur reçoit la différence entre la pseudo-distance mesurée par le satellite et la vraie pseudo-distance pour que sa mesure de position puisse être corrigée. Dans les années 2000, ce système a perdu de son intérêt mais il reste néanmoins toujours avantageux face au GPS car il offre une précision d'un mètre.

Le GPS RTK est basé sur le même principe de correction différentiel que le DGPS mais il utilise une phase différente, c'est à dire entre l'instant où le signal est émis et l'instant où il est reçu par le récepteur. En utilisant la phase porteuse du signal, le calcul d'erreur est plus précis. La mesure de phase peut être interprétée comme une mesure précise de la variation de la distance entre le récepteur et le satellite depuis le début du signal. Cette méthode offre une précision de l'ordre du centimètre mais possède un inconvénient : le récepteur ne doit pas être à plus de dix kilomètres de la station de référence. De plus, d'autres pays proposent leur système GNSS qui constituent des alternatives au GPS américain.

Le concurrent européen, Galileo, est opérationnel depuis 2016 et compte aujourd'hui dix-huit satellites en orbites et en annonce trente d'ici fin 2020. Ce manque de satellite fait que Galileo n'est pas optimal car sa précision laisse à désirer face au GPS à l'heure actuelle, mais ce système pourrait atteindre une précision d'un mètre, voire de quelques centimètres pour sa version haute précision<sup>7</sup>. La Russie est elle aussi dotée de son propre système, nommé GLONASS, il offre une précision de cinq à huit mètres avec sept à huit satellites en vue. Ce système est d'ailleurs utilisé par des applications pour obtenir un meilleur positionnement. Par exemple, à un endroit donné, le smartphone va choisir le positionnement GLONASS s'il capte plus de satellites Russes. La Chine possède le système Beidou, en cours de développement et qui devrait être achevé courant 2020. Ce système permet de déterminer sa position uniquement en Chine et dans les régions avoisinantes avec une précision d'environ cent mètres. La deuxième version, Beidou-2, aura une couverture mondiale

Le GNSS permet donc une localisation précise mais pas suffisante dans le cadre de la voiture autonome qui requiert une précision de l'ordre du centimètre. Malgré l'apparition d'amélioration, le GPS et ses concurrents ne suffisent pas au déplacement d'une voiture sans la présence d'un chauffeur. C'est pour cela qu'un autre type de carte, les cartes HD, sont de plus en plus mises en avant.

---

<sup>vii</sup> Differential Global Positioning System

<sup>viii</sup> Real Time Kinematic

## 2. La carte HD

Les cartes que nous utilisons habituellement ne sont pas assez précises pour être utilisées par les voitures autonomes. Le GPS permet une localisation de l'ordre de quelques mètres, ce qui n'est pas suffisant pour que le véhicule se déplace sans risque. De plus, les cartes en deux dimensions utilisées par les humains ne prennent pas en compte certaines informations comme les panneaux de signalisation, les feux tricolores ou des détails importants comme la hauteur des trottoirs ou la largeur des voies.

C'est pourquoi la cartographie des voitures autonomes se base sur une nouvelle génération de cartes : les cartes HD. Elles sont en trois dimensions et permettent une localisation de haute précision, de l'ordre de quelques centimètres, ce qui est indispensable pour la conduite, surtout en ville. De plus, la carte HD permet d'accéder à plus d'informations, comme la limitation de vitesse ou l'emplacement d'un passage piéton. Ce sont aussi des cartes dynamiques qui contiennent des informations sur la météo et l'état de la circulation par exemple. L'utilisation de cette technologie est donc indispensable pour permettre aux véhicules de se déplacer sans danger.

Une carte HD est composée de différentes couches, qui, superposées, permettent au véhicule autonome de se situer et de se déplacer dans l'environnement<sup>9</sup>. L'organisation et la composition des différentes couches dépend des entreprises car cette nouvelle technologie n'a pas encore de normes clairement définies. Nous allons commencer par étudier le modèle publié par Lyft<sup>1</sup>, qui se décompose en cinq couches. Tout d'abord, il y a la carte de base, standard. A cela vient s'ajouter une carte géométrique, une carte sémantique, une couche contenant des informations préalables et enfin l'information en temps réel.

La couche de la carte « géométrique » correspond à un nuage de points 3D. Il s'agit d'une représentation de l'espace avec une très grande précision. Afin de créer cette couche, de nombreux véhicules effectuent des trajets dans les zones à cartographier. Les données acquises par la localisation GPS, les capteurs LIDAR, IMU et les caméras dont les véhicules sont équipés sont ensuite fusionnées puis traitées afin de créer un maillage précis de l'environnement. Pour obtenir un meilleur résultat, il faut que plusieurs véhicules différents passent au même endroit afin de comparer les données acquises.

Ensuite, il y a la carte « sémantique », qui donne un sens aux objets représentés par la carte géométrique en leur donnant des étiquettes<sup>5</sup>. Ainsi, le nuage de point devient une réelle interprétation de l'environnement, afin de distinguer les objets nécessaires à la navigation comme les voies de circulations, les intersections ou les panneaux de signalisation. Ces objets contiennent des informations riches comme les limitations de vitesses ou les règles de changement de voie. Ils permettent au véhicule autonome d'interpréter les données. Pour construire une carte sémantique, il faut tout d'abord utiliser un algorithme qui permet de détecter, de reconnaître un objet présent et de connaître ses coordonnées exactes. Pour cela, les différentes données acquises par les véhicules à travers les différents équipements qu'il possède sont utilisées afin de trianguler la position de l'objet. Ensuite, ses caractéristiques lui sont attribués. Par exemple pour un



panneau stop, il faut étudier entre-autres sa position exacte, son orientation et sur quelle voie il fait effet. Enfin, le résultat obtenu doit être contrôlé par des humains afin de d'éviter toute erreur d'interprétation.

Vient ensuite la couche des « map priors », qui contient des informations sur le comportement des objets. Par exemple, elle peut contenir la durée d'attente moyenne à un feu tricolore particulier. De plus, cette couche permet aussi d'accéder à des données sur le comportement humain dans l'environnement étudié. On peut donc y retrouver des informations qui ne sont pas indiquées sur les panneaux mais qui sont associées à des attitudes relevées dans cette zone. On peut prendre l'exemple de voitures garées sur le bas-côté. Aucun panneau stocké dans la couche sémantique ne permet au véhicule autonome de se préparer à l'avance à cet obstacle. C'est pourquoi, si durant l'acquisition des données on a pu relever une forte probabilité de trouver une voiture garée au bord de cette route cela sera indiqué dans la couche des « map priors ». Ainsi, le véhicule adoptera une conduite plus prudente dans cette zone. C'est donc dans cette couche que l'on retrouve des informations sur les normes comportementales, comme les heures de pointes notamment.

La dernière couche est dynamique. Elle contient des données partagées en temps réel avec les autres voitures autonomes en circulation. On peut y retrouver des informations comme les embouteillages ou les nouvelles zones de travaux.

Le modèle en cinq couches de Lyft n'est qu'un exemple et n'est pas utilisé par toutes les voitures autonomes, mais on distingue une structure similaire d'un modèle à l'autre. En effet, si on étudie la carte HD utilisée par le groupe HERE<sup>4</sup>, on peut retrouver le même type de données stockées dans trois couches. La première couche regroupe les trois couches inférieures du modèle précédent c'est-à-dire base, géométrique et sémantique. Elle permet au véhicule autonome de se localiser précisément et elle contient les informations sur les objets qui l'entourent. Ensuite, il y a la couche dynamique, avec les informations en temps réel. Enfin, la dernière couche, dite « analytique », contient des données sur la conduite humaine en fonction de l'environnement, pour que la voiture ait un comportement qui se rapproche de celui d'un humain et pas celui d'un robot. Ainsi, on peut voir que les concurrents du marché des voitures autonomes utilisent des cartes HD différentes, mais qu'elles reposent sur le même principe : une base détaillée au centimètre près associée à des données en temps réel.

## Conclusion

Pour conclure, l'étude de la cartographie de la voiture autonome nous a beaucoup apporté. Les recherches que nous avons effectuées sur ce sujet nous ont permis d'acquérir de nouvelles connaissances sur cette technologie qui nous était jusqu'à lors inconnue. Ainsi, nous nous sommes très vite rendu compte que la cartographie était un élément clé, indispensable au bon fonctionnement de la voiture autonome.

De plus, le sujet "Cartographie pour la perception du véhicule autonome" est en fait beaucoup plus vaste qu'au premier abord. En effet, lors de notre documentation sur cette technologie, nous avons dû additionnellement nous renseigner sur la voiture autonome en elle-même, mais aussi sur son fonctionnement et sur les différentes technologies sur lesquelles elle s'appuie. Cette étude nous a aussi permis de prendre du recul sur cette technologie d'avenir. En effet, la cartographie, et plus généralement la voiture autonome, évoluent dans un milieu très compétitif. Leur développement est soumis à de nombreuses limites tant sur le plan économique, éthique que technique. Ce projet a donc été très enrichissant sur le plan de la méthode de recherche et de synthèse, du travail de groupe à distance et surtout sur les connaissances associées au milieu de la voiture autonome.

Pour finir nous tenions à remercier Mr. Bensrhair, qui a su nous guider et nous fournir de la documentation tout au long de nos recherches, malgré les conditions inédites.

## Rapport d'étonnement

Juliette : Ce projet a été instructeur d'une première part par les connaissances traitées dans le sujet que j'ai pu m'approprier, mais d'autre part également quant aux qualités liées au travail en groupe que j'ai pu approfondir, telles que la communication, le soutien, la répartition du travail... Bien que le thème des voitures autonomes m'ait toujours parlé et plu, il est vrai que je ne connaissais que trop peu les technologies déployées par ce nouveau mode transport. C'est pourquoi je suis plus que satisfaite d'avoir pu faire des recherches sur ce sujet tout en travaillant avec mes camarades.

Sophie : Les véhicules autonomes m'intéressaient déjà beaucoup avant ce projet mais je n'imaginai pas la complexité des systèmes permettant leur fonctionnement. J'ai donc pu approfondir mes connaissances sur ce sujet d'avenir. De plus le travail de groupe m'a permis d'acquérir de nouvelles compétences essentielles dans une formation d'ingénieur et pour tout travail en général. J'aurais évidemment préféré pouvoir rencontrer des doctorants travaillant sur ce sujet et de participer aux tests de navettes mais j'ai tout de même beaucoup apprécié de travailler sur ce projet avec les autres membres du groupe.

Marie : Ce projet a été bénéfique au niveau de deux aspects principalement. Le premier a été l'acquisition de nouvelles connaissances dans un domaine en plein essor et dans lequel de nombreuses innovations restent à concevoir. Le thème de la voiture autonome étant très vaste, ce travail de documentation a suscité chez moi un nouvel intérêt et une réelle curiosité autour des différentes technologies liées à ce sujet. D'autre part, j'ai pu une nouvelle fois expérimenter le travail de groupe mais cette fois avec des personnes que je ne connaissais pas et avec qui je n'avais pas l'habitude de travailler. Cela m'a donc permis d'améliorer mes capacités de collaboration, d'écoute, d'entraide et aussi mon sens de la communication.

Samuel : La gestion de projet est pour moi une compétence importante et qui nécessite une bonne expérience pour pouvoir être efficace et appréciable. C'est avec enthousiasme que j'ai commencé ce projet et c'est avec intérêt que lors du confinement j'ai suivi le groupe dans une improvisation fructueuse et très enrichissante de notre manière de travailler. Pour ce qui est de la cartographie dans les véhicules autonomes, le sujet m'a intéressé car il concerne les nouvelles technologies, bien que le travail n'est finalement été qu'une documentation et que l'on n'ait pu avoir accès à une touche concrète via des visites ou des test de voitures autonomes, qui auraient été enrichissant.

Charlélise : Ce projet m'a permis de découvrir un domaine que je ne connaissais que vaguement, et de m'intéresser à de nouvelles technologies. Je pense qu'avoir des connaissances dans le domaine de la voiture autonome est très utile, étant une technologie qui ne cesse de se développer. Le travail de groupe fut très enrichissant, en particulier ayant le rôle de chef de projet, j'ai dû m'occuper de la communication et faire des synthèses des séances de travail.

Solène : Ce sujet était mon premier choix et je ne suis pas déçue, car c'est un domaine qui m'intéresse particulièrement. Travailler sur la cartographie était très intéressant et j'ai appris beaucoup de choses sur le fonctionnement des voitures autonomes. La collaboration avec les différents membres du groupe a été très enrichissante, surtout dans ces conditions très particulières.

## Bibliographie

### Illustrations :

Figure 2 : niveaux d'autonomie <https://veillecarto2-0.fr/2019/06/29/la-mobilite-de-demain-simplicite-rapidite-et-securite/>

### Articles en ligne :

1. Chellapilla, K. (2018, octobre 15) *Rethinking Maps for Self-Driving*. <https://medium.com/lyftlevel5/https-medium-com-lyftlevel5-rethinking-maps-for-self-driving-a147c24758d6>, consulté le 4 avril 2020
2. Cosmo. (2018, mars 23) *Pourquoi avons-nous besoin de la voiture autonome ?* <https://medium.com/la-voiture-autonome/pourquoi-avons-nous-besoin-de-la-voiture-autonome-6cf5dd8043c7>, consulté le 9 mars 2020
3. Couleur Science. (2016, juin 2) *Quel est le principe de fonctionnement du GPS ?* <https://couleur-science.eu/?d=97791a--quel-est-le-principe-de-fonctionnement-du-gps>, consulté le 23 mars 2020
4. Delaney, I. (2017, janvier 7) *HD Live Map explained*. <https://360.here.com/2016/01/07/hd-live-map-explained/>, consulté le 4 avril 2020
5. Efland, K. [et al.] (2019, mai 1) *Semantic Maps for Autonomous Vehicles*. <https://medium.com/lyftlevel5/semantic-maps-for-autonomous-vehicles-470830ee28b6>, consulté le 4 avril 2020
6. Futura Sciences, rubrique *Voiture autonome*. <https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/voiture-voiture-autonome-15601/>, consulté le 9 mars 2020
7. Rosso, R. (2009, mai) *Le développement du positionnement par satellites* <http://www.annales.org/ri/2009/ri-mai-2009/rosso.pdf>, consulté le 28 mars 2020
8. Siméon, G. (2019, septembre 15) *Que vaut Galileo, le GPS européen* <https://www.science-et-vie.com/questions-reponses/que-vaut-galileo-le-gps-europeen-51359> consulté le 17 avril 2020

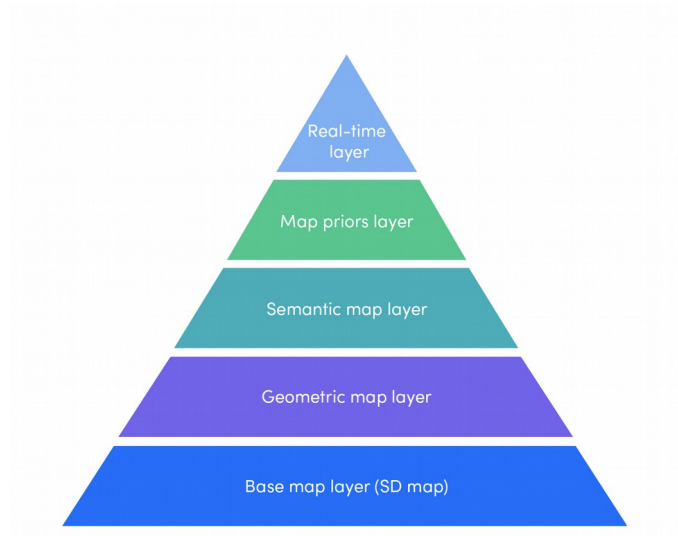
### Ouvrage, thèses :

9. Ben Salah, I. (2019) Extraction d'un graphe de navigabilité à partir d'un nuage de points 3D enrichis.
10. Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique. (2018). *Véhicules autonomes et connectés : Les défis actuels et les voies de recherche*. <https://www.inria.fr/sites/default/files/2019-10/inrialivreblancvac-180529073843.pdf>
11. Ministère de la transition écologique et solidaire - Ministère chargé des transports. (2018) *Développement des véhicules autonomes : Orientations stratégiques pour l'action publique*. [https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/2019.04.24\\_dp\\_strategie\\_nationale\\_bilan\\_0.pdf](https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/2019.04.24_dp_strategie_nationale_bilan_0.pdf)
12. Orjuela, R., Ledy, J., Lauffenburger, J., & Basset, M. (2018). *Les véhicules autonomes et le risque technologique*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01816895/document>

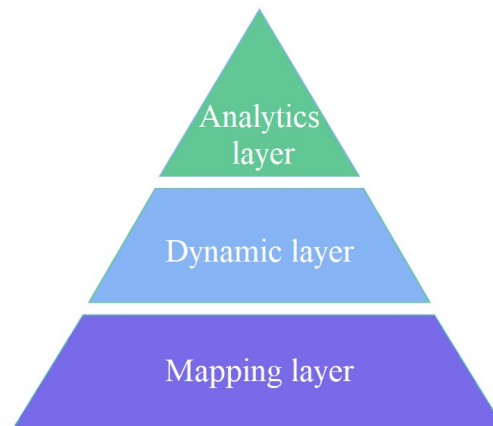
### Vidéos en ligne :

13. CEA. (2017, novembre 22) *L'histoire du véhicule autonome*. <http://www.cea.fr/multimedia/Pages/videos/culture-scientifique/technologies/histoire-vehicule-autonome.aspx>, consulté le 30 mars 2020

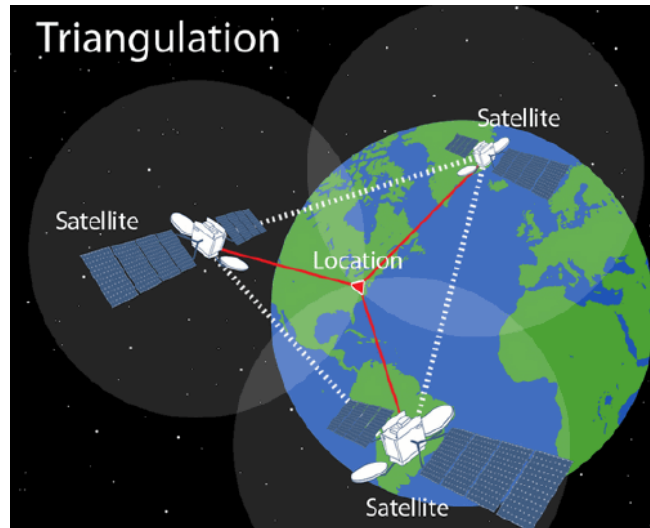
## Annexes



*Annexe 1 : Les couches d'une carte HD, modèle de Lyft*



*Annexe 2 : Les couches d'une carte HD, modèle de HERE*



*Annexe 3 : Satellites localisants par triangulation*

Annexe 1 : <https://medium.com/lyftlevel5/https-medium-com-lyftlevel5-rethinking-maps-for-self-driving-a147c24758d6>

Annexe 2 : Schéma - Solène Le Goadec

Annexe 3 : <https://www.uniquevisitor.it/images/schema-triangolazione.gif>