



**HAL**  
open science

# Aide à la conduite et véhicule autonome en intersection

Julien Moreau

► **To cite this version:**

Julien Moreau. Aide à la conduite et véhicule autonome en intersection. Automatique. Université de Bordeaux, 2020. Français. NNT : 2020BORD0297 . tel-04007542

**HAL Id: tel-04007542**

**<https://theses.hal.science/tel-04007542>**

Submitted on 28 Feb 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE PRÉSENTÉE  
POUR OBTENIR LE GRADE DE

**DOCTEUR DE**  
**L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX**

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR SPÉCIALITÉ :  
AUTOMATIQUE, PRODUCTIQUE, SIGNAL ET IMAGE

par

**Julien MOREAU**

**AIDE À LA CONDUITE ET VÉHICULE AUTONOME EN INTERSECTION**

Sous la direction de : Pierre MELCHIOR

Co-encadrant : Stéphane VICTOR

Encadrants industriels : Mathieu MOZE et François AIOUN

*Soutenue le 15/12/2020*

**Membres du jury :**

Mme	TALJ KFOURY, Reine	Chargé de recherche CNRS	Laboratoire Heudiasyc	Rapporteur
M	BIDEAUX, Eric	Professeur des Universités	INSA de Lyon	Rapporteur
M	MAMMAR, Said	Professeur des Universités	Université d'Evry Val-d'Essonne	Examineur
M	BASSET, Michel	Professeur des Universités	Université de Haute-Alsace	Président
M	MELCHIOR, Pierre	Professeur	Bordeaux INP	Directeur
M	VICTOR, Stéphane	Maître de Conférences	Université de Bordeaux	Co-encadrant
M	MOZE, Mathieu	Ingénieur de recherche	Groupe PSA	Co-encadrant
M	GUILLEMARD, Franck	Ingénieur de recherche	Groupe PSA	Co-encadrant

# Abstract

The main goal of this thesis is to help removing a scientific barrier in urban environment navigation. Thus, the trajectory planning must allow the generation of reference to be followed by the autonomous vehicle respecting the constraints of the road infrastructure, while guaranteeing a capacity to react to potential obstacles. Therefore, the trajectory planning must allow reference generation to be followed by the autonomous vehicle respecting road infrastructure constraints, while guaranteeing a capacity to react to potential obstacles.

After a brief history on autonomous driving, the specificities of the urban environment are listed. It is shown that the urban environment is an uncertain environment, with high curvature roads and low speed traffic. The objectives and constraints associated with trajectory planning are outlined and a path and speed decomposition approach combined with a complementarity between predictive and reactive methods is proposed.

Predictive Path Planning is concerned with determining the path to be followed by the autonomous vehicle within a number of known constraints in advance. A reference path, reachable by the nonholonomic vehicle and guaranteed in the free space at all time, is generated. The generated path does not take into account the variation of the environment and the vehicle is then led to avoid obstacles preventing the follow-up of this planned path. These obstacles can be dynamical or static, for example a parked vehicle encroaching on the track.

In the case of static obstacles, a new path to be followed by the vehicle is generated through a path rescheduling algorithm. A speed profile is associated with the reference path, taking into account the safety, passenger comfort and vehicle limitations, including the actuator ones.

The autonomous vehicle may also have to avoid a number of dynamic obstacles. In this case, the speed of the ego-vehicle is adapted according to the situation is then paramount in order to avoid a possible collision.

Finally, a simulation platform developed with the SCANeR Studio driving simulation software and Matlab/Simulink software is used to test these algorithms in complex situations.

## Keywords

**Automatic control, Vehicle Dynamics, Autonomous Vehicle, Path Planning, Speed Profile**

# Résumé

L'objectif de cette thèse est de contribuer à lever un verrou scientifique que constitue la navigation en milieu urbain avec notamment un enjeu de manœuvrabilité du véhicule autonome en environnement réduit et dynamique. Ainsi, la planification de trajectoire doit permettre la génération de référence à suivre par le véhicule autonome respectant les contraintes de l'infrastructure routière, tout en garantissant une capacité de réaction vis-à-vis d'obstacles éventuelles.

Après un bref historique de la conduite autonome, les spécificités du milieu urbain sont énumérées. Il est montré que le milieu urbain est un environnement incertain, possédant des routes à fortes courbures et une circulation à faible vitesse. Les objectifs et contraintes associés à la planification de trajectoire sont exposés et une approche par décomposition du chemin et de la vitesse combinée à une complémentarité entre prédictif et réactif est proposée.

La planification de chemin prédictif s'intéresse à déterminer le chemin à suivre par le véhicule autonome respectant un certain nombre de contraintes connues à l'avance. Un chemin atteignable par le véhicule et garantissant que celui-ci reste à tout instant dans l'espace libre appelé chemin de référence est généré. Le chemin obtenu ne prend pas en compte la variation de l'environnement et le véhicule est alors amené à éviter un certain nombre d'obstacles empêchant le suivi de ce chemin planifié. Ces obstacles peuvent être dynamiques ou statiques par exemple un véhicule garé empiétant sur la voie.

Dans le cas des obstacles statiques, un nouveau chemin à suivre par le véhicule est généré au travers d'un algorithme de re planification de chemin. Une consigne de vitesse est associée au chemin de référence en tenant compte de la sécurité, du confort des passagers et des limites du véhicule, notamment celles de ses actionneurs.

Le véhicule autonome peut également être amené à éviter un certain nombre d'obstacles dynamiques. Dans ce cas, la vitesse de l'égo-véhicule est adaptée en fonction de la situation est alors primordiale afin d'éviter une éventuelle collision.

Finalement, une plateforme de simulation développée avec le logiciel de simulation de conduite SCANeR Studio et le logiciel Matlab/Simulink est utilisée afin de tester ces algorithmes dans des situations complexes.

## Mots-clés

**Automatique, dynamique du véhicule, véhicule autonome, planification de chemin, planification de vitesse**



# Table des matières

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>5</b>
CONTEXTE DE LA THESE .....	5
CONTEXTE INDUSTRIEL .....	5
OBJECTIFS DE LA THESE .....	6
CONTRIBUTIONS SPECIFIQUES ET ORGANISATION DE LA THESE .....	6
<b>CHAPITRE 1 DE L'AIDE A LA CONDUITE AU VEHICULE AUTONOME EN MILIEU URBAIN : CONTEXTE ENJEUX ET PROBLEMATIQUES ACTUELLES</b> .....	<b>8</b>
1.1 LA CONDUITE AUTONOME .....	9
1.2 LE MILIEU URBAIN .....	26
1.3 OBJECTIFS ET CONTRAINTES DE LA PLANIFICATION DE TRAJECTOIRE .....	40
1.4 OBJECTIFS, PROBLEMATIQUES ET POSITIONNEMENT DE LA THESE .....	56
<b>CHAPITRE 2 PLANIFICATION PREDICTIVE DE CHEMIN</b> .....	<b>66</b>
2.1 CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE .....	67
2.2 ÉTUDE DES METHODES CHOISIES.....	78
2.3 ÉTUDE COMPARATIVE ET SELECTION .....	128
2.4 CONCLUSION.....	131
<b>CHAPITRE 3 REPLANIFICATION REACTIVE DE CHEMIN</b> .....	<b>133</b>
3.1 INTRODUCTION .....	134
3.2 ÉTUDE DES METHODES CHOISIES.....	167
3.3 ÉTUDE COMPARATIVE ET SELECTION .....	182
3.4 CONCLUSION.....	184
<b>CHAPITRE 4 PLANIFICATION DE VITESSE</b> .....	<b>185</b>
4.1 INTRODUCTION .....	186
4.2 PARAMETRISATION DE LA VITESSE A PARTIR D'UN CHEMIN PLANIFIE .....	186
4.3 REPARAMETRISATION DE LA VITESSE .....	201
4.4 CONCLUSION.....	215
<b>CHAPITRE 5 APPLICATION SUR PLATE-FORME DE SIMULATION</b> .....	<b>216</b>
5.1 INTRODUCTION .....	217
5.2 PRESENTATION DE LA PLATEFORME DE SIMULATION .....	217
5.3 INTEGRATION, SIMULATION ET EVALUATION DE LA PLANIFICATION DE TRAJECTOIRE EN MILIEU URBAIN.....	220
5.4 CONCLUSION.....	241
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES</b> .....	<b>242</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>247</b>
<b>ANNEXE : PLACEMENT DES POINTS DE CONTROLE DANS UN ROND POINT</b> .....	<b>252</b>
A1. PARAMETRISATION ET REPERAGE DANS UN ROND POINT .....	252
A2. ALGORITHME DE PLACEMENT DE POINTS DE PASSAGE .....	253

# Introduction générale

## Contexte de la thèse

Cette thèse a été menée dans le cadre d'une Convention CIFRE « Convention Industrielle de Formation par la Recherche ». Elle s'est déroulée dans l'équipe CRONE du groupe Automatique du laboratoire IMS de l'Université de Bordeaux, Bordeaux INP, UMR 5218 CNRS, pour le côté académique et au sein de l'équipe SD2T/SIEP de la DRIA (Direction de la Recherche et de l'Ingénierie Avancée) du Groupe PSA, pour le côté industriel. Cette thèse entre dans le cadre de l'OpenLab « Electronics and systems for Automotive » entre le laboratoire IMS et le Groupe PSA.

Les travaux ont été effectués sous la direction de Pierre MELCHIOR, Professeur à Bordeaux INP, co-encadré par Stéphane VICTOR, Maître de Conférences à l'Université de Bordeaux, et sous la responsabilité en entreprise de Mathieu MOZE, François AIOUN et Franck GUILLEMARD, Docteurs et Ingénieurs de la DRIA.

## Contexte industriel

Depuis l'apparition de la Google Car en 2009, la voiture autonome est passée du « concept car » futuriste à la réalité. Elle n'a pas pas seulement été un bouleversement technologique mais aussi industriel. En étant le premier à annoncer une voiture autonome fonctionnelle, le géant du web a devancé tous les constructeurs automobiles historiques. La course à la mobilité autonome fut lancée.

La conduite autonome est devenu un enjeu majeur pour les transports publics. Le véhicule autonome a le potentiel d'améliorer la sécurité et le confort des passagers, tout en réduisant le temps de trajet. Par conséquent, les fabricants d'automobiles investissent dans la conception et l'équipement de leurs nouveaux véhicules avec des systèmes avancés d'aide à la conduite (ADAS). Dans les zones urbaines, les intersections sont considérées comme des goulots d'étranglement. En 2004, plus de 43 % des accidents de la route reportés en Europe ont lieu en intersection ; 21% des morts sur les routes ainsi que 34% des blessés graves [1]. De plus, les retards dus au trafic en intersection conduisent à une énorme perte de ressources. L'utilisation des véhicules autonomes est une solution à ces problèmes.

Dans l'industrie automobile, la plupart des recherches actuelles sur le véhicule autonome se concentrent sur les secteurs protégés tels que les autoroutes. Cependant, dans

l'optique d'obtenir un véhicule complètement autonome, il est nécessaire de s'intéresser aux zones urbaines. Or, la zone urbaine est une zone délicate à gérer du fait de la présence de nombreux éléments fixes (feux tricolores, panneaux de signalisation, marquages au sol, ...) et mobiles (piétons, cyclistes, autres véhicules, changement de voie, ...) influençant la trajectoire du véhicule. Le véhicule autonome doit alors être adaptatif vis-à-vis des situations de vie, du trafic et des différents obstacles. Cette problématique atteint son paroxysme lors du franchissement d'intersection, car elle constitue une zone de rencontre entre tous les usagers de la route.

## **Objectifs de la thèse**

C'est dans ce contexte que le Groupe PSA développe sa propre technologie de véhicule autonome. Au début de ces travaux de thèse en Novembre 2016, les fonctions d'automatisation de la conduite sur autoroute étaient déjà bien avancées. L'objectif était, est reste encore, l'amélioration des fonctions existantes et leur enrichissement pour la conduite autonome en environnement urbain.

Le passage à l'urbain est complexe car le nombre de situations de vie augmente considérablement. Cette thèse se focalise sur les fonctions de planification de trajectoire du véhicule en milieu urbain. Les solutions proposées doivent être capable de fonctionner en temps réel dans les calculateurs des prototypes. L'apport de cette thèse doit donc être théorique et pratique.

Une ambition de cette thèse est ainsi de contribuer à lever un verrou scientifique que constitue la navigation en milieu urbain, avec notamment une problématique de manœuvrabilité du véhicule autonome en environnement réduit et dynamique. Ainsi, la planification de trajectoire doit permettre la génération d'une référence à suivre par le véhicule autonome, respectant les contraintes de l'infrastructure routière, tout en garantissant une capacité de réaction vis-à-vis d'obstacles éventuels.

## **Contributions spécifiques et organisation de la thèse**

Ce mémoire concerne donc la planification de trajectoire en intersection et le développement de modules nécessaires à la conduite autonome en environnement urbain. Il est organisé en cinq chapitres.

Le **chapitre 1** a pour objectif d'explicitier les thématiques abordées dans cette thèse. Pour ce faire, un bref historique de la conduite autonome est présenté dans un premier temps. Ensuite les spécificités du milieu urbain sont énumérées. Il est montré que le milieu urbain est un environnement incertain, possédant des routes à fortes courbures et une circulation à faible vitesse et à forte variation relative. Enfin les objectifs et contraintes associés à la planification de trajectoire sont exposés avant de finalement mettre en avant les objectifs, les problématiques et le positionnement de la thèse.

Le **chapitre 2** étudie la planification de chemin prédictif qui s'intéresse à déterminer le chemin à suivre par le véhicule autonome respectant un certain nombre de contraintes connues à l'avance. La problématique de cette partie est de trouver un chemin atteignable par le véhicule et garantissant que celui-ci reste à tout instant dans l'espace libre. Le chemin ainsi obtenu est appelé chemin de référence.

Le chemin obtenu ne prenant pas en compte la variabilité de l'environnement, le véhicule est alors amené à éviter les obstacles qui l'empêche de suivre de ce chemin planifié. Ces obstacles peuvent être dynamiques ou statiques, comme par exemple un véhicule garé empiétant sur la voie. Dans le cas des obstacles statiques, un nouveau chemin à suivre par le véhicule doit être généré au travers d'un ou de plusieurs algorithme(s) de replanification de chemin, tandis que dans le cas des obstacles dynamiques, une solution supplémentaire consiste à adapter la vitesse sans modifier le chemin pour laisser le passage à ces obstacles. Ces algorithmes de replanification de chemin doivent être utilisables en temps réel. Le **chapitre 3** a pour objet la prise en compte de cette contrainte.

Une consigne de vitesse doit alors être associée au chemin de référence en tenant compte de la sécurité, du confort des passagers et des limites du véhicule, notamment celles de ses actionneurs. Dans le cas où le véhicule autonome est amené à éviter des obstacles dynamiques, l'adaptation de la vitesse de l'égo-véhicule en fonction de la situation est primordiale afin d'éviter une éventuelle collision. Les méthodes décrites dans le **chapitre 4** présentent des algorithmes permettant à un véhicule autonome de planifier un profil de vitesse cohérent vis-à-vis d'un chemin préalablement planifié ou d'adapter un profil de vitesse déjà existant afin d'éviter une éventuelle situation conflictuelle.

Enfin le **chapitre 5** cherche à évaluer dans un environnement réaliste, les algorithmes de planification de trajectoire développés dans cette thèse. Pour ce faire, une plateforme de simulation développée avec le logiciel de simulation de conduite SCANeR Studio et le logiciel Matlab/Simulink est utilisée.

# Chapitre 1

## De l'aide à la conduite au véhicule autonome en milieu urbain : contexte enjeux et problématiques actuelles

1.1 LA CONDUITE AUTONOME .....	9
1.1.1 <i>Historique</i> .....	10
1.1.2 <i>Le véhicule autonome de nos jours</i> .....	21
1.1.3 <i>Le véhicule autonome de demain</i> .....	24
1.2 LE MILIEU URBAIN.....	26
1.2.1 <i>Un environnement incertain</i> .....	27
1.2.2 <i>Variabilité de la vitesse en milieu urbain</i> .....	28
1.2.3 <i>Des routes à fortes courbures</i> .....	30
1.2.4 <i>Architecture associée au milieu urbain</i> .....	33
1.3 OBJECTIFS ET CONTRAINTES DE LA PLANIFICATION DE TRAJECTOIRE .....	40
1.3.1 <i>Modélisation de l'environnement</i> .....	40
1.3.2 <i>Modèles du véhicule</i> .....	45
1.3.3 <i>Tour d'horizon de la planification de trajectoire</i> .....	49
1.3.4 <i>Limitations des méthodes actuelles de l'état de l'art</i> .....	56
1.4 OBJECTIFS, PROBLÉMATIQUES ET POSITIONNEMENT DE LA THESE.....	56
1.4.1 <i>Approche par décomposition chemin/vitesse</i> .....	56
1.4.2 <i>Complémentarité entre prédictif et réactif</i> .....	64

Ce premier chapitre a pour objectif d'explicitier les thématiques abordées dans cette thèse, ainsi que son contenu. Pour ce faire, un bref historique de la conduite autonome est présenté dans la première partie. Il retrace le parcours de la conduite autonome à travers le temps, des premiers balbutiements à ce qui est commercialisé de nos jours. Une projection dans les prochaines décennies est également présentée. Cette vision de l'avenir nous amène à la problématique du véhicule autonome en milieu urbain.

Ainsi, le milieu urbain fait l'objet de la deuxième partie de ce chapitre. Il est montré que le milieu urbain est un environnement incertain, possédant des routes à fortes courbures et une circulation à faible vitesse. Pour répondre à ces particularités, une architecture générique est choisie. De chaque étage de cette architecture dérive un certain nombre de verrous techniques et technologiques, particulièrement pour la partie planification de trajectoire qui fait l'objet de la troisième partie.

Dans cette avant-dernière partie de ce chapitre, les objectifs et contraintes associés à la planification de trajectoire sont exposés. Un état de l'art sur le sujet est ensuite proposé afin de mettre en lumière ses limites.

Enfin, la dernière partie permet de mettre en avant les objectifs, les problématiques et le positionnement de la thèse.

## **1.1 La conduite autonome**

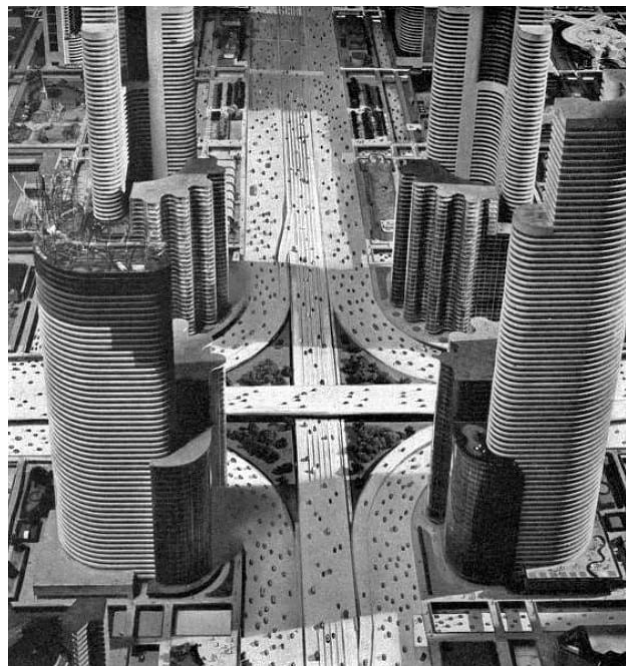
Un véhicule autonome est un véhicule automobile apte à rouler sur route ouverte, sans intervention d'un conducteur. Le concept vise à terme à développer et produire un véhicule pouvant réellement circuler sur la voie publique dans le trafic sans intervention humaine en toutes situations. C'est une application typique du domaine de la robotique mobile dans laquelle de nombreux acteurs sont engagés. Néanmoins de nombreuses questions techniques, légales, psychologiques et juridiques restent non résolues.

Dans cette partie, la genèse de ce récent domaine de l'automobile est présentée. Une attention particulière est également apportée à ce qui est fait de nos jours et à ce que pourrait être le véhicule autonome de demain.

### **1.1.1 Historique**

Si l'on remonte le fil de l'histoire du véhicule autonome, l'idée de son invention semble germer de la vision du futur proposée par General Motors sur son stand appelé « Futurama » de l'exposition universelle de 1939-1940 à New York. Une des maquettes exposées à ce stand est présentée à la figure 1.1. Cette maquette présente un futur où chaque citoyen possède un véhicule, véhicule pouvant être piloté à distance par signal radio [2].

Cette vision du monde de demain contribue à l'accélération de la démocratisation du véhicule personnel, si bien qu'en 1960, le nombre de véhicules en circulation passe désormais le cap des 75 millions aux États-Unis [3]. Dans les décennies qui suivront, à mesure que la vitesse et les embouteillages augmenteront, les accidents deviendront de plus en plus fréquents et violents. Pour des raisons de sécurité, des normes commencent à être mises en place par les agences du gouvernement des États-Unis, donnant naissance au développement de nouvelles technologies comme les ceintures de sécurité ou les airbags par exemple. General Motors développe DAIR (Driver Aided Information and Routing System) en 1966, un système connecté intégré dans une voiture, permettant à la fois de recevoir des informations sur la direction à prendre, d'obtenir des informations sur les conditions routières ou bien d'envoyer des messages d'urgence à une centrale. Cependant, en raison du manque de ressources pour déployer les infrastructures, le projet est abandonné.



**Figure 1.1** - *Maquette présente sur le stand Futurama de General Motors lors de l'exposition universelle de 1939/1940 à New York*

Durant la fin des années 1960, vient ensuite le projet du Bureau des voies publiques (Federal Highway Administration), ERGS (Experimental Route Guidance System) [4]. Ce système permet la communication entre plusieurs véhicules en vue d'effectuer du téléguidage (platooning). Plusieurs constructeurs automobiles américains, comme General Motors ou Philco-Ford se penchent sur le sujet. Il y a des tentatives d'essais avec des prototypes, mais sans grand succès. En 1970, le projet est abandonné car les infrastructures associées auraient coûté trop cher.

Dans les années 1970, avec l'avancée technologique et les progrès mathématiques, des algorithmes peuvent être utilisés pour modéliser les routes et les stocker dans des bases de données. Robert L. French développe alors l'ARCS (Automatic Route Control System), le premier système de guidage autonome [5]. Ce système utilise des voix pré-enregistrées pour donner des indications routières au chauffeur, mais comme le système est loin d'être parfait, la deuxième version de ARCS inclue un écran affichant les informations.

En 1977 le laboratoire de robotique de Tsukuba au Japon fait fonctionner une automobile automatique sur un circuit dédié. Le suivi de trajectoire est réalisé par reconnaissance du marquage au sol et la vitesse de 10 km/h est atteinte [6].

Dans les années 1980, la sécurité et l'environnement sont au cœur de la politique des transports aux États-Unis. La cause de ce changement est notamment le nombre élevé de dysfonctionnements de véhicules en 1980 et la diminution des ressources pétrolières depuis 1970, au point qu'un mandat est mis en place pour que les nouveaux véhicules respectent une certaine norme sur la consommation de carburant. L'automobile devient cependant meilleure et plus accessible, permettant l'émergence de plus d'applications dans le domaine des transports. Pendant cette période, des programmes de recherche concernant le développement technologique des transports font leur apparition, tel que PATH (the California Program on Advanced Technology for the Highway) qui est encore actif et un des leaders concernant les projets associés aux systèmes de transports intelligents [7].

En 1984, Mercedes-Benz teste une camionnette automatique équipée de caméras (figure 1.2), dont le logiciel de reconnaissance a été développé par une équipe de l'université de la Bundeswehr à Munich sous la direction d'Ernst Dickmanns. Le véhicule atteint 63 km/h sur un réseau routier sans trafic [8].





**Figure 1.2-***Van Mercedes VaMoRs de Ernst Dickmanns*

En 1986 le projet ALVINN (Autonomous Land Vehicle In a Neural Network (présenté sur la figure 1.3) financé par l'Agence américaine pour les projets de recherche avancée de défense (DARPA) et mené par le laboratoire de robotique de l'université Carnegie-Mellon de Pittsburgh, aboutit à un démonstrateur autonome capable de suivre une route à 30 km/h [9]. Cette même université démarre également le développement des véhicules automatiques Navlab (figure 1.4).



**Figure 1.3-***Projet ALVINN (Autonomous Land Vehicle In a Neural Network)*



**Figure 1.4-** *Véhicules automatiques Navlab*

En 1987 la Commission européenne finance le programme européen Prometheus, à hauteur de 800 millions d'euros, qui contribue, entre autres, au développement d'outils technologiques dédiés à la conduite automobile automatique [10]. Le Groupe PSA a été un des partenaires de ce projet.

L'association ITS America est fondée en 1991 par l'American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), le Transportation Research Board (TRB) et l'Institute of Transportation Engineers. Son principal but est de faciliter la collaboration de compagnies privées ou d'agences publiques pour le développement des systèmes de transports intelligents.

En 1994, à l'occasion d'une conférence scientifique sur le thème, Daimler-Benz réalise une démonstration, en situation réelle de trafic sur l'autoroute A1 à partir de Paris, de deux véhicules autonomes (VaMP et Vita-2) pilotés par logiciels de l'équipe de Dickmanns et capables de réaliser la conduite en file, le changement de file et le dépassement avec une vitesse de pointe à 130 km/h.



**Figure 1.5** – *VaMP (à gauche) et VITA-2 (à droite) lors de la démonstration en situation réelle de trafic sur l'autoroute A1*

En 1995, un de ces véhicules réalise le trajet Munich-Copenhague aller-retour (1600km) avec une vitesse maximale atteinte de 175 km/h. La plus longue distance parcourue en conduite automatique est alors de 158 km. La même année un véhicule Navlab réalise l'opération No Hands Across America sur le trajet de Washington D.C. à San Diego.

En août 1997 a lieu à San Diego une importante démonstration du « consortium américain de l'autoroute automatisée » National Automated Highway System Consortium (NAHSC) où divers véhicules autonomes peuvent être comparés. À cette occasion une infrastructure spécifique a été préparée par l'insertion de plots magnétiques servant au guidage dans certaines sections d'autoroutes (figure 1.6) [11]. La même année l'INRIA lance le projet CyCab qui consiste à développer un prototype de véhicule automatique sans pédale ni volant, mais avec un écran plat pour interagir. De 1997 à 1999, une expérimentation a même eu lieu à Saint-Quentin-en-Yvelines pour mettre en place une flotte de véhicules automatiques en libre-service [12].



**Figure 1.6 – Test d'automatisation d'un peloton en août 1997 à San Diego**

En 2004, l'agence américaine de défense DARPA organise le DARPA Grand Challenge, un concours réservé aux voitures autonomes avec 1 million de dollars à la clé. Le circuit fait 240 km et se trouve dans le désert. Le but est d'arriver à destination en moins de dix heures. Cette année-là, aucun véhicule n'est arrivé à destination. Celui qui est allé le plus loin, «Sandstorm», s'est arrêté au bout de douze kilomètres.

L'année suivante, une nouvelle édition de ce challenge a lieu, avec cette fois une récompense doublée. Cinq équipes arrivèrent à destination dont quatre sous la limite des 10 heures. L'équipe de Stanford Racing remporta le prix avec un temps record de 6 heures et 53 minutes (figure 1.7) [13].

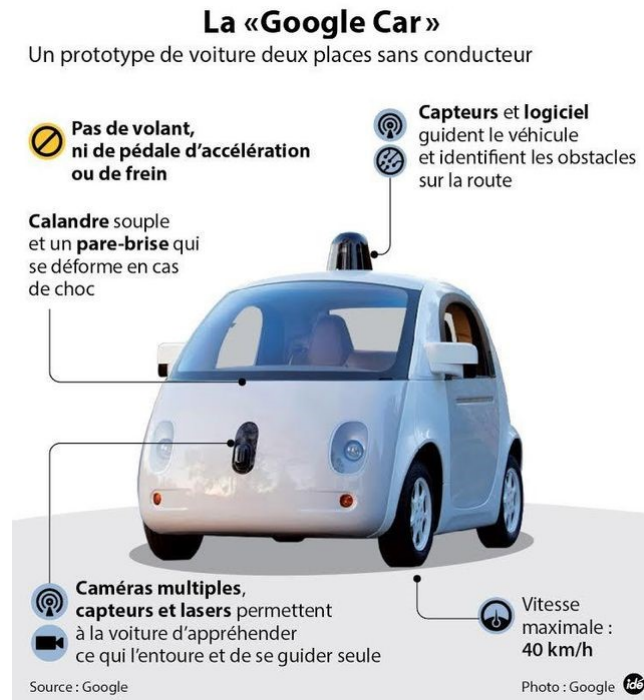




**Figure 1.7** – Véhicule de l'équipe Stanford Racing, vainqueur de l'édition 2005 du DARPA Grand Challenge

En 2009, le projet Auto-Driving Car de Google débute. À l'origine, ce projet équipait des véhicules existants, comme la Toyota Prius et la Lexus RX 450h. Cependant, Google a aussi conçu son propre prototype qui a notamment comme particularité d'abandonner le volant et les pédales (figure 1.8) [14].

En 2010, un véhicule de l'université de Parme participe au VisLab Intercontinental Challenge : elle relie Parme à Shanghai. Elle est équipée de caméras, capteurs et calculateurs très puissants. Le conducteur présent (pour des raisons de sécurité) n'a repris le contrôle uniquement lorsque les conditions de circulation étaient épouvantables. En 2012, la voiture s'est déplacé de façon totalement automatique dans le centre de Parme.



**Figure 1.8** – *Prototype «Google Car» conçu par Google en 2014*

De 2012 à 2013 à Ann Arbor, au Michigan a lieu un test grandeur nature de la technologie des véhicules connectés (figure 1.9) [15]. Cet événement rassemble environ 2700 véhicules. Chaque véhicule est équipé de la technologie aidant à éviter les accidents pouvant survenir au cours de son parcours. Les conducteurs reçoivent des alertes telles que le freinage des véhicules environnants, ceux dans les angles morts et les non-respects des feux de signalisation.



**Figure 1.9** – *Circuit utilisé pour tester les technologies de véhicules connectés entre 2012 et 2013 à Ann Arbor au Michigan*

En août 2013, retraçant un trajet historique, Mercedes-Benz est le premier constructeur au monde à montrer que la conduite autonome est aussi possible en trafic urbain et interurbain avec le véhicule expérimental S 500 INTELLIGENT DRIVE. En choisissant ces 100 km entre Mannheim et Pforzheim, il s'agissait de suivre les traces de la pionnière Bertha Benz qui a osé se lancer dans le premier trajet longue distance en automobile entre ces deux villes il y a de cela 125 ans.

En août 2014, la National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) a publié un rapport de recherche sur la technologie de communication entre véhicules V2V [16]. On trouve dans ce rapport les résultats de recherches menées par les ministères américains de la faisabilité technique, la vie privée et la sécurité. Ces recherches montrent que deux applications de sécurité : « *Left Turn Assist* » et « *Intersection Movement Assist* », pourraient empêcher jusqu'à 592 000 accidents et sauver 1083 vies par an.

En 2015, le groupe PSA Peugeot Citroën a fait circuler une voiture autonome entre Paris et Bordeaux pendant 580 km sur autoroute. Le constructeur automobile est le premier en France à avoir obtenu les autorisations nécessaires pour ce type d'expérimentation sur la voie publique.

Le tableau 1-1 résume l'ensemble des faits marquants présentés dans cette partie. Il est notable de constater que la majorité des faits présentés ici relatent des événements ayant eu lieu sur le territoire des États-Unis d'Amérique.

**Chapitre 1 : De l'aide à la conduite au véhicule autonome en milieu urbain : contexte enjeux et problématiques actuelles**

Dates clés	Faits marquants
1939-1940	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Exposition universelle à New York, présentation du stand "Futurama" de General Motors</li> </ul>
Années 1960	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Émergence des systèmes intelligents</li> <li>• General Motors développe DAIR (« <i>Driver Aided Information and Routing System</i> »)</li> </ul>
Fin des années 1960	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Projet ERGS (« <i>Experimental Route Guidance System</i> »)</li> </ul>
Années 1970	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Robert L. French développe l'ARCS (« <i>Automatic Route Control System</i> »), le premier système de guidage autonome</li> </ul>
1977	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le laboratoire de robotique de Tsukuba au Japon fait fonctionner une automobile automatique sur un circuit dédié</li> </ul>
Années 1980	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lancement du programme de recherche PATH (« <i>the california Program on Advanced Technology for the Highway</i> »)</li> </ul>
1984	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'université de la Bundeswehr à Munich et Mercedes-Benz teste une camionnette automatique équipée de caméras</li> </ul>
1986	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Projet ALV (« <i>Autonomous Land Vehicle</i> ») financé par l'Agence pour les projets de recherche avancée de défense américaine (DARPA)</li> <li>• Le Laboratoire de Robotique de l'université Carnegie-Mellon de Pittsburgh démarre le développement des véhicules automatiques Navlab</li> </ul>
1987	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Programme européen Prometheus permettant le développement d'outils technologiques dédiés à la conduite automobile automatique</li> </ul>
1991	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'association ITS America est fondée par « <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i> » (AASHTO), le « <i>Transportation Research Board</i> » (TRB) et « <i>Institute of Transportation Engineers</i> ». Son principal but est de faciliter la collaboration de compagnies privées ou d'agences publiques pour le développement des systèmes de transports intelligents.</li> </ul>
1994	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Daimler-Benz réalise une démonstration, en situation réelle de trafic sur l'autoroute A1 à partir de Paris, de deux véhicules</li> </ul>



	<p>autonomes (VaMP and Vita-2) capables de réaliser une conduite en file, un changement de file et des dépassements avec une vitesse de pointe de 130 km/h</p>
1995	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Daimler-Benz réalise le trajet Munich-Copenhague aller/retour (1600 km) avec une vitesse maximale atteinte de 175 km/h dans un véhicule automatisé</li> </ul>
1997	<ul style="list-style-type: none"> <li>• À San Diego une importante démonstration du « <i>National Automated Highway System Consortium</i> » (NAHSC) est organisée, où divers véhicules autonomes peuvent être comparés</li> <li>• Projet CyCab de l'INRIA</li> </ul>
2004	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Première édition du « <i>DARPA Grand Challenge</i> »</li> </ul>
2005	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deuxième édition du « <i>DARPA Grand Challenge</i> »</li> </ul>
2007	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Troisième édition du « <i>DARPA Grand Challenge</i> » nommé « <i>Urban Challenge</i> »</li> <li>• Premiers échanges entre Uber et le gouvernement d'Arizona pour autoriser les premières voitures autonomes Uber</li> </ul>
2009	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Projet Auto-Driving Car de Google</li> </ul>
2014	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La « <i>National Highway Traffic Safety Administration</i> » (NHTSA) publie un rapport de recherche sur la technologie de communication entre véhicules V2V. On trouve dans ce rapport les résultats de recherches menées par les ministères américains de la faisabilité technique, la vie privée et la sécurité. Ces recherches montrent que deux applications de sécurité : « <i>Left Turn Assist</i> » et « <i>Intersection Movement Assist</i> », pourraient empêcher jusqu'à 592000 accidents et sauver 1083 vies par an aux États-Unis</li> </ul>

**Tableau 1-1 – Synthèse des faits marquants de la conduite autonome**

En résumé, le véhicule autonome semble être un concept issu de l'industrie automobile américaine afin de répondre à une vision du futur où le trafic des véhicules motorisés exploserait. Cette vision s'est ensuite avérée réalité, conduisant l'état américain à financer la recherche dans ce domaine. Cependant, cette technologie étant en avance sur son temps, et donc trop coûteuse, la recherche industrielle laisse peu à peu la place à la recherche académique [2]. Les avancées en termes de technologie de capteurs et de puissance de calculs permettent à l'industrie de relancer, plus tard, des projets de véhicule autonome. C'est le cas pour le projet Auto-Driving Car de Google qui est le signal de départ de la course au véhicule autonome que l'on connaît aujourd'hui.

### **1.1.2 Le véhicule autonome de nos jours**

De nos jours de nombreux acteurs travaillent sur des projets de voiture autonome : constructeurs automobiles Audi, Toyota, Renault, Nissan, Groupe PSA, General Motors, Mercedes-Benz, ou encore Tesla, mais aussi des équipementiers comme Valeo, Continental ou Bosch.

Toutes les technologies de conduite autonome n'offrent pas le même niveau d'autonomie. La « *Society of Automotive Engineers* » (SAE) et « *US National Highway Traffic Safety Administration* » (NHTSA) ont tous deux publié il y a quelques années des lignes directrices pour clarifier les différents niveaux d'autonomie dans les voitures.

Après des tentatives pendant plusieurs années de la SAE et la NHTSA pour définir les différents niveaux d'automatisation de façon standardisée, le DOT (Department Of Transportation) et la NHTSA les ont finalement normalisés le 22 septembre 2016 au travers d'un document destiné aux fabricants de voitures autonomes. Ce document a pour but de gérer les enjeux sécuritaires et d'offrir un cadre en matière de conception et de fabrication de véhicules autonomes. A ce titre, la NHTSA demande aux constructeurs de concevoir leurs véhicules en utilisant ce référentiel, appelé SAE J3016 [17]. Une version simplifiée de ce référentiel est présentée en figure 1.10. Il comporte six niveaux d'automatisation :

- Le niveau 0 où aucune autonomie du véhicule n'est présente. Le conducteur a un contrôle total sur les fonctions principales du véhicule (direction, accélération, freinage...) et ne dispose d'aucune assistance excepté les avertissements visuels ou sonores du tableau de bord pour le prévenir d'un danger potentiel (radar de recul, alerte de franchissement de ligne, détecteur d'angle mort...);

- Le niveau 1 où l'autonomie du véhicule est de type assistance à la conduite. Le conducteur dispose d'une aide momentanée et limitée de la part du véhicule, soit latéralement, soit longitudinalement, mais demeure responsable de la conduite. Le régulateur adaptatif (Adaptative Cruise Control) ou le freinage automatique d'urgence sont des exemples de fonctionnalité de niveau 1;
- Le niveau 2 où l'autonomie du véhicule est limitée et surveillée par le conducteur. Le véhicule, qui prend en charge les axes longitudinaux et transversaux, peut se conduire seul mais reste sous la surveillance constante et la responsabilité du conducteur. Ce dernier devient alors un simple superviseur, mais il peut reprendre le contrôle à tout moment. Le « Traffic Jam Assist » ou le « Highway Assist », permettant une conduite automatisée sur autoroute respectivement dans des conditions d'embouteillages ou dans des conditions normales, sont des exemples de fonctionnalité de niveau 2 ;
- Le niveau 3 où l'autonomie du véhicule est presque totale. Selon les conditions environnementales et de trafic, le conducteur peut relâcher son attention lors de phases de conduite, qu'il délègue, tout en devant être prêt à reprendre le volant quand la situation l'exige dans un délai de 5 à 10s ;
- Le niveau 4 où l'autonomie du véhicule est totale. Le conducteur, s'il le souhaite, peut laisser faire le véhicule et ne plus porter d'attention à quoi que ce soit. Le véhicule est conçu pour assurer pleinement toutes les fonctions de conduite, pour circuler partout en toute autonomie et sans difficultés. Cette autonomie est activée/désactivée par l'homme ;
- Enfin, le niveau 5 où l'autonomie du véhicule est totale et hors contrôle des passagers. Le véhicule est autonome, en toutes circonstances et n'a plus besoin de l'homme pour prendre des décisions.



Figure 1.10 – Illustration des différents niveaux d'autonomie possibles d'un véhicule

Pour le moment, les véhicules autonomes commercialisés dans le monde sont limités au niveau 3 d'autonomie avec, par exemple, la nouvelle Audi A8 [18] ou encore l'Autopilot 2.0 de Tesla [19] qui possèdent tous les deux une fonction de conduite automatisée sur autoroute. Cependant, en France, la législation interdit l'utilisation d'un véhicule ou d'une fonction permettant d'obtenir une autonomie de niveau 3 ou supérieur, sauf dérogation spécifique de l'état afin de réaliser des tests par exemple. Le conducteur reste responsable de son véhicule et doit toujours avoir les mains sur le volant. Il subsiste cependant des zones floues dans ces définitions de niveau d'automatisation, notamment avec les niveaux 4 et 5. En effet, les navettes autonomes sont déjà déployées pour des expérimentations ou des besoins spécifiques [20]. Les constructeurs de ces navettes revendiquent un niveau 5 d'autonomie de part l'absence de volant. Cependant, leur utilisation n'est possible que dans une zone protégée et dédiée à leur circulation, les rapprochant donc d'un niveau 4 d'automatisation.

Le 14 avril 2016, la Déclaration d'Amsterdam, portée par les ministres des transports des vingt-huit États membres de l'Union européenne affirme une ligne politique commune au sujet du développement des véhicules autonomes. Les États membres soutiennent le développement d'une conduite automatisée et connectée à travers une gamme d'initiatives telles que les convois de camions, le pilote automatique sur l'autoroute et l'établissement de corridors de systèmes de transport intelligents. Il est aussi soutenu qu'au début de cette transition, une concurrence ouverte entre différents modèles et initiatives est nécessaire pour susciter la créativité et l'innovation. Cependant, l'industrie et les utilisateurs exigent que les nouveaux services et systèmes puissent fonctionner sans contraintes liées au franchissement des frontières.

Les États membres reconnaissent aussi que, malgré quelques incertitudes concernant la technologie, la société, le droit, la confidentialité et la sécurité, les technologies de véhicules connectés et automatisés offrent un grand potentiel pour améliorer la sécurité routière, les flux de trafic, l'efficacité globale et la performance environnementale du système de transport.

Pour résumer, un consensus a pour le moment été trouvé autour de la définition du véhicule autonome au travers de 6 niveaux d'automatisation allant de 0 à 5. Cette définition permet de structurer la recherche et le développement du véhicule autonome, ainsi que de situer à quel niveau intervient la barrière juridique. Pour le moment, cette dernière ne permet pas la circulation en Europe d'un véhicule de niveau d'automatisation supérieur à 2. Ainsi, la circulation du véhicule autonome de demain sur nos routes devra passer par le fait de repousser cette limite juridique.

### **1.1.3 Le véhicule autonome de demain**

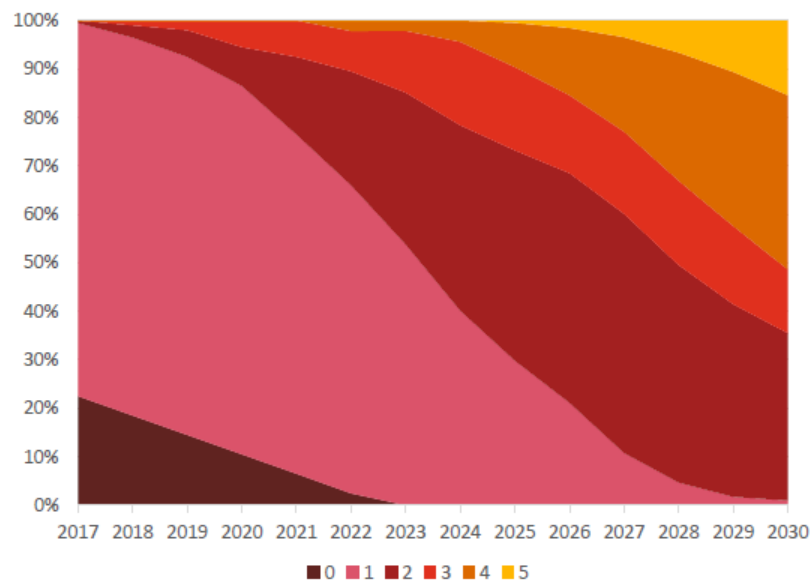
En 2015, les débuts de la commercialisation étaient attendus dès 2017 et sa généralisation à la fin de la décennie des années 2020. Selon l'INRIA, les voitures autonomes n'arriveront qu'en 2025 sur voie privée et en 2040 sur voies publiques.

D'après une étude d'IHS Automotive, les ventes de voitures autonomes vont décoller au début des années 2020, puis fortement croître d'ici 2035. Le cabinet d'audit et de conseil PwC a quant à lui conduit une étude sur l'évolution de la répartition du niveau d'automatisation des véhicules en circulation de 2017 à 2030 en Europe. Le résultat de cette étude est présenté en figure 1.11. D'après ces résultats, les véhicules de niveau d'automatisation 0 devraient disparaître de la circulation aux alentours de 2023, tandis que les véhicules de niveau 1 devraient quant à eux ne plus circuler à l'horizon 2030. À l'inverse, les véhicules de niveaux 3

et 5 devraient atteindre 15% chacun des véhicules en circulation lorsque ceux de niveaux 2 et 4 représenteraient chacun 30%. Cependant, cette étude ne fait pas état du cadre d'utilisation des fonctionnalités associées au niveau d'utilisation. En effet, un véhicule peut très bien être équipé de fonctionnalités de niveau 4 sur autoroute et de niveau 2 en milieu urbain. Ainsi, les différentes études de marché sur le véhicule autonome sont à nuancer. En ce qui concerne son utilisation, la voiture autonome de demain devra :

- offrir plus de liberté au conducteur pour utiliser son temps différemment et s'affranchir des contraintes de conduite (en cas de conduite monotone, d'embouteillage, de manœuvres de stationnement, ...);

- contribuer à diminuer le nombre d'accidents et garantir encore plus de sécurité ;
- fluidifier le trafic ;
- contribuer à réduire la consommation et les émissions du véhicule ;
- permettre une mobilité pour tous et partout ;
- réduire le nombre de places de parking dans les villes.



**Figure 1.11** –Évolution de la répartition du niveau d'automatisation des véhicules en circulation de 2017 à 2030 en Europe selon PwC

Afin d'atteindre un tel résultat, le véhicule autonome doit être capable de circuler en toute sécurité notamment en milieu urbain. Or, le véhicule autonome est pour le moment conçu pour un fonctionnement sur autoroute. La question qui se pose alors est : quelles sont les spécificités du milieu urbain par rapport au milieu autoroutier ? Le paragraphe suivant permet d'apporter des éléments de réponse à cette question.

## **1.2 Le milieu urbain**

Malgré une vitesse faible, limitée à 50 km/h dans les villes, le milieu urbain reste une zone délicate. Il y a des facteurs spécifiques présents simultanément qui expliquent en partie le risque :

- une circulation marquée par la présence d'usagers ayant des pratiques diverses (véhicules lourds, transports en commun, deux-roues motorisés, vélos, piétons, ...) ;
- une grande densité d'objets en bord de voie propres à la ville, dont une part peut devenir un obstacle ;
- une fréquence élevée de carrefours, dont les formes sont très diverses, et donc de manœuvres multiples ;
- peu d'espace pour des manœuvres d'urgence.

Ces constatations permettent de résumer le milieu urbain à :

- un environnement incertain,
- où les courbures des routes sont parfois importantes, notamment en présence d'intersections,
- où la circulation s'effectue à faible vitesse (50 km/h maximum)
- et où la vitesse des véhicules est très variable (vitesse variant de 0 à 50 km/h).

### **1.2.1 Un environnement incertain**

La première caractéristique du milieu urbain réside dans la difficulté de son interprétation. En effet, la présence de marquage vertical (panneaux de signalisation, feux tricolores, ...) ou horizontal (ligne de stop, délimitation de la voie, ...), d'obstacles statiques (véhicule stationné, ...) ou dynamiques (véhicules lourds, transports en commun, deux roues motorisés, vélos, piétons, ...) rendent les situations difficilement lisibles et prédictibles.

De plus, les usagers de la route n'ont pas tous les mêmes potentiels d'accélération et de changement de direction. En effet, un véhicule lourd, de part son inertie, possède une accélération plus faible qu'un deux roues motorisé par exemple. De même, une voiture peut changer de direction plus lentement qu'un piéton.

L'ensemble de ces caractéristiques conduit à considérer le milieu urbain comme un environnement incertain. Un exemple est proposé en figure 1.12 au travers d'une zone de rencontre. Ce type de zone est, comme son nom l'indique, un lieu où sont amenés à se croiser l'ensemble des usagers de la route cités ci-dessus. Afin de naviguer dans un tel environnement, le véhicule autonome doit :

- détecter et interpréter la signalisation,
- détecter, interpréter et prédire le comportement des autres usagers de la route, tout en fournissant un degré de confiance,
- et être capable de réagir aux changements de situations.





**Figure 1.12** – *Illustration du caractère incertain du milieu urbain : cas d'une zone de rencontre*

### **1.2.2 Variabilité de la vitesse en milieu urbain**

La vitesse est reconnue comme étant l'une des principales causes d'accidents de la route. Ainsi, on estime que, sur tous les types de route en milieu urbain et rural, une réduction de 10 % de la vitesse moyenne pratiquée entraînerait une réduction de 32% des collisions mortelles et de 15 % du nombre de collisions avec blessures graves et légères [21].

Afin de comprendre les enjeux de la vitesse des véhicules sur les accidents de la route, il est nécessaire d'introduire la notion de distance d'arrêt. Cette dernière correspond à la distance parcourue par un conducteur entre le moment où il aperçoit un obstacle et le moment où le véhicule s'immobilise, comme illustrée en figure 1.13 pour un freinage confortable de 0.3g. Cette distance dépend du temps de réaction et du temps de freinage. Pendant le temps de réaction, c'est-à-dire le moment entre lequel le conducteur prend la décision de freiner et celui où il pose le pied sur la pédale de frein, le véhicule parcourra une certaine distance. Pour la conception d'une route, le temps de réaction est majoré à 2,5 secondes. Dans le cas d'un véhicule autonome, ce temps de réaction devient alors négligeable par rapport au temps de freinage.

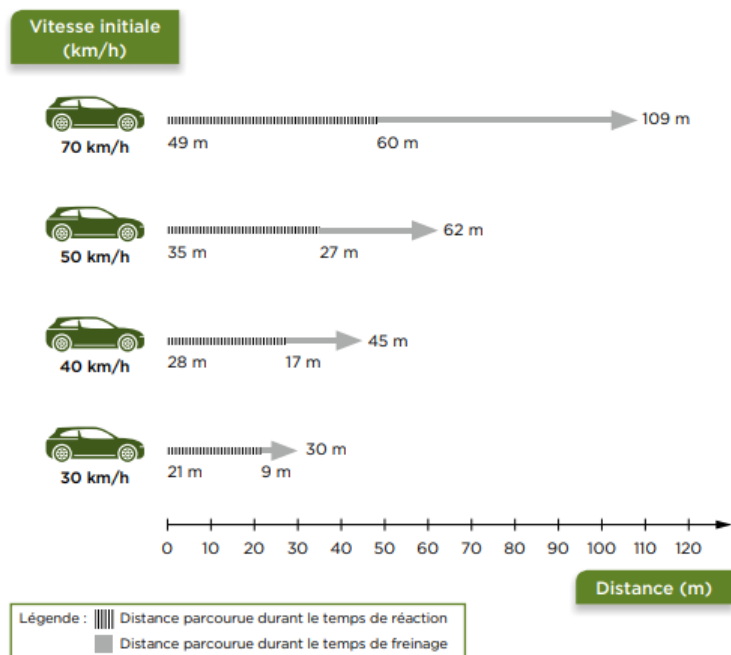


Figure 1.13 – Distance d'arrêt nécessaire en fonction de la vitesse pour un conducteur [21]

L'usure des freins et des pneus, le poids du véhicule ainsi que le mauvais état de la chaussée sont des éléments qui peuvent contribuer à augmenter la distance de freinage. Les valeurs indiquées ici correspondent à une chaussée mouillée et des pneus usés, conditions retenues pour la conception d'une route dans les normes de conception routière [21].

Les conséquences sont importantes pour les piétons victimes de collisions ; lorsque la vitesse d'impact lors d'une collision est de 30 km/h, la probabilité du décès d'un piéton est de l'ordre de 10 % ; à 50 km/h, elle dépasse 75 %. Cela est illustré sur la figure 1.14, présentée ci-après.

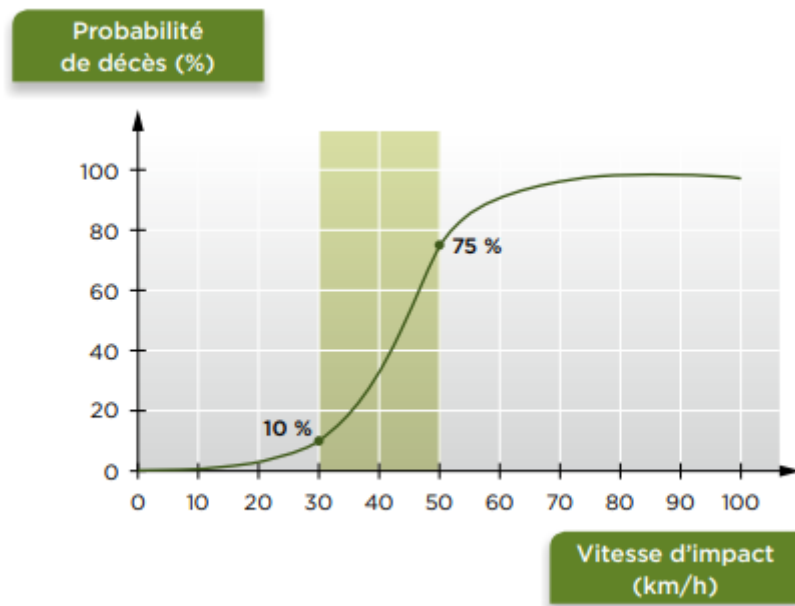


Figure 1.14 – Probabilité de décès des piétons selon la vitesse d'impact [22]

Ces données indiquent également que, en milieu urbain, de faibles réductions de vitesse peuvent avoir un effet significatif sur la gravité des blessures résultant de collisions. Les recherches montrent par ailleurs que les différences de vitesse entre les usagers augmentent le risque d'accident.

Enfin, il est à noter que si la réduction des vitesses améliore les conditions de sécurité routière en milieu urbain, elle ne dégrade pas forcément les temps de parcours. En effet, en milieu urbain, les ralentissements sont principalement liés à la congestion, au nombre de carrefours et à leur mode de gestion, plutôt qu'aux vitesses entre les carrefours ou à la limite de vitesse

Ainsi, la vitesse doit être adaptée à l'environnement, dans le respect des contraintes dynamiques du véhicule.

### 1.2.3 Des routes à fortes courbures

Le milieu urbain est également caractérisé par une concentration d'intersections plus élevée qu'en milieu péri-urbain ou rural. Il est important de signaler que les formes d'intersection sont en nombre très élevé. Toutefois, la grande majorité des intersections rencontrées dans la vie courante peuvent se ramener à deux types : celles qualifiées dans cette thèse de « droites », et celles qualifiées de « circulaires ».

### 1.2.3.1 Les intersections droites

Les intersections droites se classent en 5 catégories dont 4 sont représentées en figure 1.15:

1. les carrefours en T sont à trois branches dont l'une de ces branches est à peu près dans le prolongement d'une autre branche et dont la troisième coupe ce prolongement avec un angle compris entre  $75^\circ$  et  $105^\circ$  ;
2. les carrefours en Y sont à trois branches dont les angles formés par celles-ci sont inférieur à  $75^\circ$  ou supérieur à  $105^\circ$ ;
3. les carrefours en croix simple sont à quatre branches dont deux sont à peu près dans le prolongement des deux autres et dont l'angle de ces prolongements est compris entre  $75^\circ$  et  $105^\circ$  ;
4. les carrefours en X sont à quatre branches dont deux branches sont à peu près dans le prolongement des deux autres et pour lesquelles l'angle d'intersection est inférieur à  $75^\circ$  ou supérieur à  $105^\circ$  ;
5. les carrefours en étoiles sont à cinq branches ou plus.



**Figure 1.15** – *Typologie non exhaustive des carrefours et intersections*

En France, sans signalisation, la priorité à droite doit s'appliquer selon le code de la route. Une voiture qui souhaite couper la route pour tourner à gauche n'est pas prioritaire. Les usagers peuvent rencontrer deux types de panneaux indiquant la priorité, à savoir le "STOP" et le "Cédez-le-passage" et si le second panneau n'oblige pas l'arrêt systématique du véhicule, il fait néanmoins appel à la prudence de l'utilisateur.

### **1.2.3.2 Les intersections circulaires**

Les intersections circulaires désignent simplement les giratoires (priorité aux véhicules circulant dans l'intersection), tels qu'illustrés en figure 1.16, et les ronds-points (priorité aux véhicules s'engageant dans l'intersection).



**Figure 1.16** – Exemple d'intersection circulaire de type giratoire

Les intersections circulaires peuvent se composer d'une ou plusieurs voies, la grande majorité comportant cependant une ou deux voies. Le nombre de voies dépend du rayon de l'intersection circulaire :

- si le rayon est inférieur à 15 m il s'agit souvent d'un mini-giratoire (rayon inférieur à 12 m) ou d'un giratoire compact urbain (rayon compris entre 12 m et 15 m) qui disposent d'une seule voie ;
- si le rayon est supérieur ou égal à 15 m il s'agit d'un giratoire moyen ou grand qui dispose de deux voies.

La circulation sur ces chaussées en France se fait dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (dans les pays où on roule à gauche, la circulation s'effectue dans le sens des aiguilles d'une montre).

### **1.2.3.3 Enjeux des intersections pour la conduite autonome**

En résumé, les intersections sont des infrastructures complexes de par leur diversité, la signalisation qui y est présente, ainsi que par la présence d'un ensemble d'usagers variés. Afin de franchir de manière autonome une intersection, les algorithmes de conduite automatisée doivent répondre à deux enjeux majeurs :

1. la gestion des priorités,
2. et la manoeuvrabilité du véhicule autonome en environnement réduit et dynamique.

Afin de répondre au premier enjeu, la perception du véhicule autonome doit permettre :

- de détecter la signalisation ainsi que les autres usagers
- et d'interpréter les intentions des autres usagers de la route.

À partir de cette perception, le véhicule autonome doit prendre la décision de s'engager ou non dans l'intersection en se référant, lorsque cela est possible, au code de la route.

Afin de répondre au 2<sup>ème</sup> enjeu, le véhicule autonome doit :

- planifier une trajectoire prenant en compte son propre encombrement, la présence des autres usagers ainsi que les contraintes dynamiques du véhicule
- et être capable de suivre la trajectoire ainsi générée alors même que sa courbure est importante.

### **1.2.4 Architecture associée au milieu urbain**

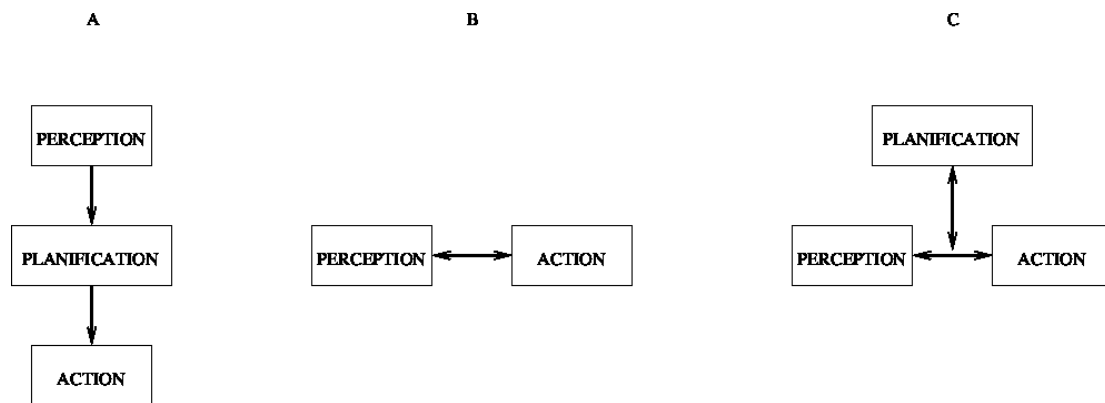
Afin de répondre aux enjeux du véhicule autonome en milieu urbain, présentés dans la partie précédente, une architecture de contrôle doit être définie. Pour ce faire, un bref état de l'art sur de telles architectures est présenté, permettant ainsi d'introduire l'architecture fonctionnelle choisie dans cette étude. Enfin, à partir de cette dernière, une liste non exhaustive des verrous techniques et technologiques sera établie.

#### **1.2.4.1 Etat de l'art des architectures de contrôle en robotique**

La réflexion d'un choix d'architecture adaptée à une certaine application a déjà été traitée dans le domaine de la robotique mobile.

Un robot est un système complexe qui doit satisfaire des exigences variées et parfois contradictoires. Un exemple typique pour un robot mobile est l'arbitrage qui doit être fait entre l'exécution la plus précise possible d'un plan préétabli pour atteindre un but et la prise en compte d'éléments imprévus tels que les obstacles mobiles. Cet arbitrage, que ce soit au niveau du choix de stratégie ou au niveau de l'utilisation des capteurs, des actionneurs ou des ressources de calcul, est réglé par un ensemble logiciel structuré selon une architecture de contrôle. Elle permet donc d'organiser les relations entre les trois grandes fonctions que sont la perception, la décision et l'action.

D'après Ronald Arkin [23], une architecture doit être conçue et adaptée à un robot particulier en utilisant des modules génériques. De manière plus générale, il existe des règles de conception génériques permettant de réaliser cette architecture. En fonction de ces règles, les architectures de contrôle peuvent être classées en trois grandes catégories qui seront détaillées par la suite: les architectures hiérarchiques, les architectures réactives et les architectures hybrides, illustrées en figure 1.17. Selon cette catégorisation, ces architectures ne diffèrent pas forcément par les méthodes élémentaires employées, mais plutôt par leur agencement et leurs relations internes.



**Figure 1.17** – *Illustration des architectures classiques de contrôle des robots mobiles : architecture hiérarchique (A), réactive (B) et hybride (C)*

#### 1.2.4.1.1 Architectures hiérarchiques

Historiquement, les premiers robots mobiles utilisaient des contrôleurs hiérarchiques dont le fonctionnement reposait essentiellement sur une prise de décision à partir d'un modèle du monde supposé quasiment-parfait et connu, c'est-à-dire sans erreurs de modèles. Ces

architectures fonctionnaient selon un cycle rigide de perception de l'environnement, planification des actions au sein de cette représentation, puis exécution du plan, comme illustré en figure 1.17A. Ces architectures ont montré leurs limites et leur incapacité à fonctionner dans un environnement qui ne soit pas statique et simplifié à l'extrême [24].

L'essentiel des problèmes de ces architectures provient de l'utilisation d'un modèle de l'environnement qui est pris en compte pour guider le robot [24].

Ces architectures supposent qu'un modèle de l'environnement puisse représenter toutes les informations pertinentes pour le déplacement du robot. Or, un tel modèle ne peut être suffisant dans un environnement dynamique, car au moment de la réalisation de l'action, l'environnement peut avoir suffisamment changé pour que la décision ne soit plus valide. Ce problème était particulièrement crucial au début de la robotique mobile où les capacités de calcul limitées entraînaient des temps de planification de l'ordre de plusieurs dizaines de minutes. Mais l'augmentation des capacités de calcul ne suffit pas à résoudre ce problème qui ne permet pas de gérer un environnement réaliste.

#### **1.2.4.1.2 Architectures réactives**

Rodney Brooks [25] a proposé une solution à tous ces problèmes sous la forme d'une architecture réactive. Dans cette architecture, un ensemble de comportements réactifs, fonctionnant en parallèle, contrôle le robot sans utiliser en temps réel de modèle de l'environnement. Cette architecture supprime évidemment les problèmes dus aux différences entre la réalité et le modèle de l'environnement du robot, mais limite clairement les tâches que peut effectuer le robot (cf. [26]). En effet, sans représentation interne de l'état de l'environnement, il est très difficile de planifier une suite d'actions en fonction d'un but à atteindre. Les robots utilisant cette architecture sont donc en général efficaces pour la tâche précise pour laquelle ils ont été conçus, dans l'environnement pour lequel ils ont été prévus, mais sont souvent difficiles à adapter à une tâche différente.

Les réussites de ces architectures sont liées au couplage direct entre la perception et l'action, comme illustré en figure 1.17B, qui permet une prise en compte très rapide des phénomènes dynamiques de l'environnement. Ces solutions présentent donc une bonne robustesse dans des environnements complexes [25].



Comme mentionné, ces architectures sont en général basées sur plusieurs comportements : évitement d'obstacles, déplacement aléatoire, déplacement vers un but, fuite d'un point... Pour guider le robot, il faut donc choisir à chaque instant lequel de ces comportements activer. Ce problème est connu dans la littérature scientifique sous le nom de sélection de l'action. La solution proposée par Brooks, l'architecture de subsomption, [25] est devenue un classique et utilise une classification des comportements qui se déclenchent selon un ordre de priorité en fonction des perceptions du robot.

### **1.2.4.1.3 Architectures hybrides**

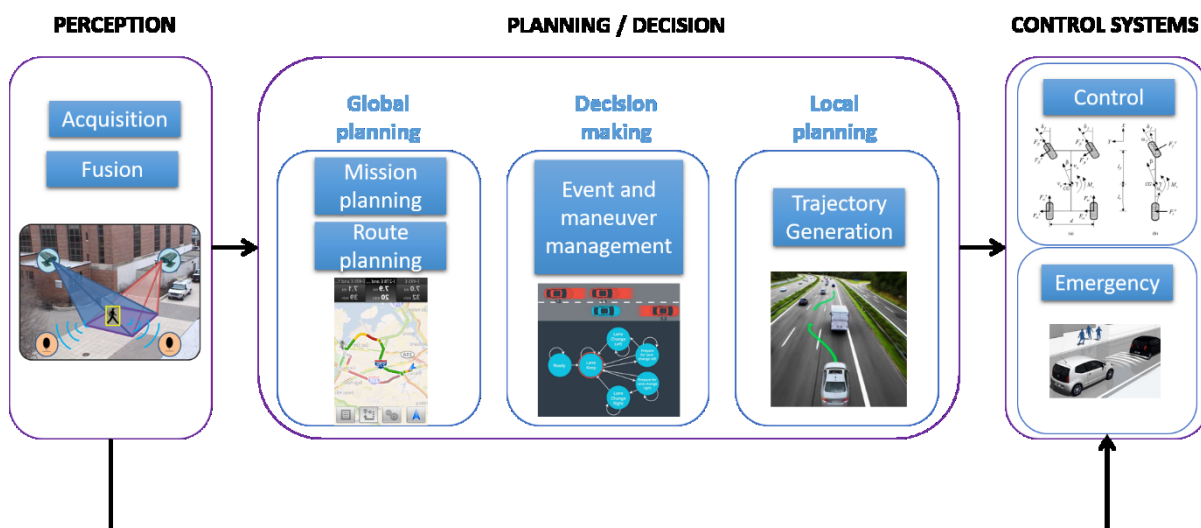
La plupart des architectures actuellement utilisés choisissent une solution intermédiaire entre ces deux approches sous la forme d'une architecture hybride [24] comme illustré en figure 1.17C. Cette architecture se compose de deux niveaux. Le premier est chargé de faire fonctionner le robot conformément à la modélisation de l'environnement choisie (architecture hiérarchique) tandis que le second niveau (architecture réactive) est chargé de gérer les éléments non modélisés de l'environnement, tels que les obstacles inconnus ou dynamiques. L'action conjointe de ces deux niveaux permet de réagir rapidement face aux variations imprévues de l'environnement, tout en permettant la réalisation d'actions planifiées à plus long terme.

Le bas niveau de ces architectures est similaire aux architectures réactives. Ces comportements sont des boucles sensorimotrices qui relient les actions aux perceptions avec une phase de décision très courte, qui assure la réactivité. Dans le même temps, les informations sensorielles sont utilisées par le haut niveau dans une boucle sensorimotrice à une échelle de temps beaucoup plus longue. C'est la mise en parallèle de ces deux échelles de temps qui fait la force de ces architectures.

### **1.2.4.2 Architecture de contrôle retenue**

Comme indiqué dans le paragraphe précédent, les architectures hybrides combinent les avantages des architectures hiérarchiques et réactives. Naturellement, celle-ci est retenue dans le cadre de cette thèse. Cette architecture fonctionnelle se décompose en trois parties présentées en figure 1.18:

- la perception, regroupant l'acquisition des données par le biais des capteurs ainsi que leur fusion;
- la partie planification/décision, comprenant la planification globale, la prise de décision et la planification locale ;
- la partie système de contrôle, regroupant les contrôles longitudinal et latéral du véhicule ainsi que le contrôle d'urgence des actionneurs.



**Figure 1.18 – Architecture de contrôle retenue**

Tant que la trajectoire planifiée du véhicule n'est pas remise en question par l'environnement, l'architecture de contrôle du véhicule se comporte comme une architecture hiérarchique. Si l'évolution de l'environnement est tel que la trajectoire du véhicule ne répond plus aux objectifs fixés a priori, la décision demande une replanification. Enfin, si l'évolution de l'environnement induit une situation d'urgence, l'architecture adopte alors un comportement réactif, court-circuitant ainsi la partie planification/décision, pour directement enclencher une manœuvre d'urgence telle que le freinage d'urgence. Cette description du fonctionnement global de l'architecture est idéale. Cependant des verrous techniques et technologiques subsistent et ne permettent pas un tel fonctionnement. Une liste non exhaustive de ces verrous est dressée dans le paragraphe suivant.

### **1.2.4.3 Verrous techniques et technologiques**

L'objectif de ce paragraphe est de présenter un tour d'horizon des différentes problématiques techniques que rencontre le véhicule autonome en milieu urbain. Elles sont énumérées pour chaque partie de l'architecture de contrôle.

### **1.2.4.3.1 La perception**

Le premier enjeu rencontré par la perception est le traitement et le stockage temps réel de la grande quantité de données engendrée par les multiples capteurs du véhicule. Cette problématique rejoint celles du domaine du « Big data », c'est-à-dire la gestion de masse de données hétérogènes.

Le deuxième enjeu est la fusion multicapteur. Tous les capteurs présentent des limitations qui les rendent inutilisables dans certaines conditions : masquages, portée réduite, biais, imprécisions... De plus, la défaillance d'un capteur peut surgir à tout moment. La fusion multicapteur, qui combine des données fournies par les différents capteurs pour obtenir une information globale pertinente, est un moyen de remédier à ce problème.

La détection et la reconnaissance d'objets font également parties des enjeux majeurs pour la perception. Pour comprendre son environnement, le véhicule autonome doit d'abord savoir reconnaître les objets et les obstacles. Quels que soient les objets à détecter (piétons, véhicules, panneaux, ...), ce sont les techniques d'apprentissage automatique qui donnent actuellement les meilleurs résultats [27]. Cependant la robustesse n'étant pas démontrée, la certification de tels algorithmes pose problème notamment dans l'industrie automobile.

Il est également nécessaire de prédire les trajectoires et le comportement des autres usagers de la route afin d'alimenter la décision/planification.

Enfin, les techniques de localisation globale sont aujourd'hui bien maîtrisées. La fusion des données du GNSS (localisation par satellite), de la centrale inertielle, et de l'odométrie et/ou d'un compas magnétique est une technique actuellement assez répandue. Des méthodes ont été développées en vue de raffiner la localisation en s'appuyant sur les capteurs embarqués. La localisation dans des environnements urbains est un problème désormais presque résolu grâce à des méthodes de type SLAM (Simultaneous Localization And Mapping), qui consiste à construire ou améliorer une carte de son environnement et, simultanément, à s'y localiser. Cependant, l'enjeu est de fournir une solution de localisation avec une précision à l'échelle du décimètre conduisant les fournisseurs de cartographie tels que TomTom ou Here à investir dans la recherche de cartographie haute définition. La cartographie HD offre l'intérêt de pallier au manque de capacité d'interprétation du véhicule, par exemple savoir identifier les feux de circulations correctement liés à telle ou telle voie de circulation ou savoir identifier les limites de voie et de route.

### **1.2.4.3.2 Le contrôle**

La partie contrôle est la partie avec le plus d'antécédents dans le domaine de l'automobile notamment au travers des ADAS (Advanced Driver Assistance Systems), que ce soient les systèmes de contrôle longitudinal tels que l'anti-blocage des roues ABS (« *Antiblockiersystem* ») et le régulateur de vitesse adaptatif ACC (« *Adaptative Cruise Control* »), ou bien encore les systèmes de contrôle latéral tels que l'aide au maintien dans la file de circulation LKA (« *Lane Keeping Assist* ») et le correcteur électronique de trajectoire ESP (« *Electronic Stability Program* »). Cependant, le passage d'un ensemble d'ADAS à un système complètement autonome et donc entièrement contrôlé, n'est pas simple. En effet, pour les stratégies de contrôle/commande où les contrôles longitudinal et latéral sont découplés, apparaît alors le problème de synchronisation entre la vitesse du véhicule et la courbure de la trajectoire. Les stratégies de commande couplées sont une piste de résolution d'un tel problème, cependant ces approches sont plus complexes.

### **1.2.4.3.3 La planification / décision**

La planification globale est aujourd'hui fondée sur des techniques bien maîtrisées avec l'émergence dans les années 90, de systèmes de navigation implementant des algorithmes de ce type. Mais il est désormais nécessaire de prendre en compte de nouveaux critères d'optimisation :

- le modèle du trafic, pour une meilleure estimation et prévision des temps de trajets ;
- la consommation de chaque véhicule en fonction de la topologie de chaque segment du trajet et de l'état du trafic, afin d'optimiser la consommation énergétique et l'émission de polluants ;
- le confort des passagers, en minimisant par exemple la circulation dans des lieux « à risque », des chemins accidentés, ou comportant beaucoup d'intersections et de ronds-points.

Le véhicule autonome doit décider des manœuvres à entreprendre en fonction de l'itinéraire planifiée et de la situation routière courante. Il décidera par exemple s'il faut, ou s'il est possible de réaliser un dépassement et sera garant de la gestion des priorités. Plusieurs approches existent pour la prise de décision. La logique floue, par exemple, est souvent utilisée pour élaborer des arbres de décision, en général fondés sur des règles établies ou apprises [28]. Des schémas de décision peuvent également être élaborés par des techniques d'optimisation

multicritères [29]. Les travaux sur la planification des manœuvres commencent à donner des résultats intéressants même s'ils restent encore limités. Ainsi, ils ne s'adressent généralement qu'aux routes multivoies présentant une direction unique. Sur des routes à double sens, il convient de prendre en compte les profils des véhicules arrivant dans l'autre sens et, par conséquent, de les ajouter au calcul de l'évaluation des risques. Il est nécessaire également de travailler sur des configurations routières encore plus contraignantes, tels que les intersections et les ronds-points, qui nécessitent des schémas de décision plus élaborés.

Enfin, le dernier enjeu est la manoeuvrabilité du véhicule autonome en environnement réduit et dynamique en prenant en compte son propre encombrement et en tenant compte de la présence des autres usagers ainsi que des contraintes dynamiques du véhicule.

Le prochain paragraphe se concentre exclusivement sur la partie décision/planification de l'architecture.

### **1.3 Objectifs et contraintes de la planification de trajectoire**

La planification de trajectoire consiste à déterminer une trajectoire que doit suivre un objet mobile pour aller d'un point à un autre dans un environnement complexe. Elle est contrainte, d'une part, par la représentation de l'environnement fournie par la perception et d'autre part, par les limites dynamiques du véhicule.

#### **1.3.1 Modélisation de l'environnement**

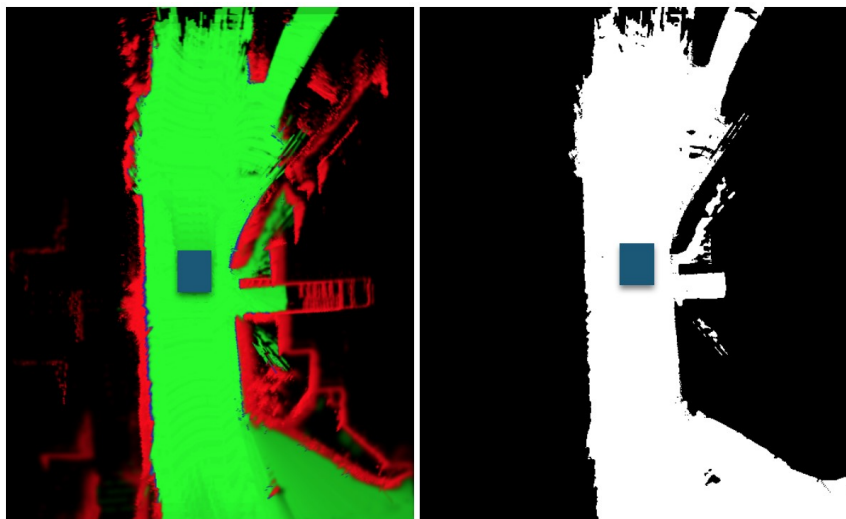
Le véhicule autonome a besoin d'une représentation de l'environnement pour se localiser et y naviguer. Cette représentation est appelée cartographie. Les cartographies sont classifiées en trois catégories, les cartographiques métriques, les cartographiques topologiques et les cartographies hybrides et hiérarchiques [30] [31].

##### **1.3.1.1 Cartographie métrique**

Les premières classes de cartographie à avoir émergé sont les cartographies métriques. Elles représentent l'environnement par sa géométrie avec un point de vue géocentré, c'est-à-dire que l'ensemble des données est repositionné par rapport à un même référentiel global, souvent le point de départ de l'objet mobile. Il s'agit sans doute de la représentation la plus

intuitive de l'espace. Une très grande variété de représentations métriques a été proposée que l'on peut regrouper en deux familles : celle des méthodes utilisant une description statique des objets mobiles dans l'espace, le plus souvent sous forme de nuages de points ou de primitives géométriques et celles des méthodes qui utilisent une description statique de l'espace, le plus souvent par une discrétisation de celui-ci, telles que les grilles d'occupation.

Cette dernière, proposée dans [32], comme pour beaucoup d'algorithmes de cartographie, repose sur le filtrage bayésien. L'espace est représenté par une grille 2D dont chaque cellule possède une probabilité d'occupation dépendant des observations et qui peut être mise à jour au fur et à mesure de l'exploration. Du fait de sa relative simplicité et de sa robustesse, ce modèle a été très largement utilisé, notamment avec des LiDARs et radars [33]. Un exemple est présenté pour illustration en figure 1.19. La grille d'occupation peut être déterministe (grille de droite) ou probabiliste (grille de gauche).



**Figure 1.19** – *Exemple de grille d'occupation*

### **1.3.1.2 Cartographie topologique**

Un second paradigme pour la modélisation spatiale de l'environnement a été développé en parallèle de la cartographie métrique. Il s'agit de la cartographie topologique. Dans ce type de modélisation, la géométrie exacte de l'environnement n'est plus représentée directement mais l'espace est découpé en lieux qui forment les nœuds d'un graphe. Chaque arête reliant deux nœuds peut être associée à une relation de connectivité entre ces lieux, à une action unique

de l'objet mobile pour circuler entre ces lieux ou une particularité topologique de l'espace, comme une porte marquant la limite entre deux zones. A la différence des cartes métriques, les données ne sont pas mises en relation dans un référentiel global. De ce fait, le problème de l'estimation métrique de la position ne se pose plus. Par ailleurs de vastes zones peuvent n'être représentées que par un unique nœud dans le graphe, permettant d'obtenir un modèle très compact. Ces cartes se prêtent donc particulièrement bien à la modélisation d'espaces de grande dimension. Elles offrent aussi de sérieux avantages par rapport aux cartes métriques pour la planification de chemin globale, la complexité algorithmique de la recherche dans un graphe étant moindre que dans un espace continu. Il existe là encore de nombreuses formes de cartes topologiques qui peuvent être regroupées en fonction de multiples critères, notamment la manière dont sont définis les nœuds et les arêtes. On peut distinguer les techniques qui définissent des lieux de manière supervisée de celles où les lieux sont définis automatiquement par le robot.

### **1.3.1.3 Cartographies hybrides et hiérarchiques**

Les deux paradigmes présentés, cartes métriques et topologiques, ont chacun des avantages et des inconvénients pour la navigation. Les cartes métriques proposent une description précise et complète de la géométrie de l'environnement mais au prix d'une consommation importante de ressources. Elles nécessitent par ailleurs une excellente odométrie pour une reconstruction correcte de l'environnement et un moyen de corriger la dérive inévitable de l'estimation de la position. Les cartes topologiques quant à elles offrent une approche différente, modélisant la structure de l'environnement sans représenter l'aspect local. Cette vision permet des représentations plus compactes, mieux adaptées aux vastes environnements, mais nécessite l'utilisation en parallèle d'un moyen de détecter les obstacles pour la navigation. Rapidement, les idées issues de chacune des approches ont été utilisées simultanément pour proposer des modèles alternatifs, bénéficiant des avantages des deux méthodes. Ces cartes sont dites hybrides ou hiérarchiques, car elles mêlent des informations de nature différentes, organisées sur plusieurs niveaux.

#### **1.3.1.3.1 Cartographies par superposition**

En premier lieu on peut citer les cartes par superposition, c'est-à-dire où les données métriques et topologiques recouvrant la même surface sont accumulées en parallèle. Il s'agit de la simple superposition de deux cartes métrique et topologique qui sont utilisées suivant les

besoins. Ce type de représentation est le plus exigeant en terme de ressources puisque deux représentations s'ajoutent, et sont plus sensibles aux erreurs puisqu'elles cumulent les inconvénients des deux représentations. Dans [34] et [35], la carte topologique y est construite directement à partir de la représentation métrique en utilisant la segmentation. Les contraintes métriques sont donc implicitement prises en compte dans la carte topologique puisque cette dernière en est extraite. Bien que modélisant simultanément la géométrie et la topologie d'un environnement, ces modèles sont d'un intérêt moindre puisqu'ils nécessitent une carte métrique préalablement acquise.

### **1.3.1.3.2 Cartographies pyramidales**

Un second type de carte hybride est constitué des structures pyramidales, c'est-à-dire d'un empilement de couches de même nature modélisant l'environnement à différentes échelles. La topologie est modélisée par l'approximation grossière de l'occupation spatiale. Par exemple, [36] propose une structure hiérarchique dans laquelle le premier niveau est occupé par une grille d'occupation de dimension 4 par 4. Lorsqu'une cellule est occupée elle est découpée en 16 pour affiner la représentation. Ce modèle est à rapprocher des méthodes de cartographie spatiale utilisant des kd-tree [37] dans la mesure où la discrétisation de l'espace plus ou moins fine est directement imposée par le contenu. Cependant, ici il s'agit bien d'une hiérarchie de cartes à différentes échelles. Ce type de représentation a l'intérêt d'offrir différentes échelles d'analyse de l'environnement, mais nécessite d'avoir une odométrie idéale. En ce sens, elles ne tirent pas partie des avantages des cartes topologiques.

### **1.3.1.3.3 Assemblage de cartes locales**

D'autres approches présentent une meilleure synergie entre les différents niveaux de la carte. Ces cartes hybrides sont constituées d'un ensemble de cartes métriques locales connectées via un graphe topologique global. Elles ont été proposées à plusieurs reprises dans la littérature [38], [39] et [40]. L'idée est de combiner la précision de la représentation métrique, utile pour la navigation locale, tout en s'affranchissant des contraintes dues à la dérive de l'odométrie, en utilisant les principes des cartes topologiques pour connecter les cartes locales. Ce type de représentation résout partiellement le problème des ressources mémoires importantes requises par les cartes métriques en permettant de n'utiliser que des cartes locales de plus petite taille pour la navigation. Dans ce type de représentation chaque couche contribue à l'ensemble de façon à améliorer les performances globales dans la construction et l'utilisation



de la carte. Un modèle hybride nommé Atlas hiérarchique, a été proposé dans [39]. La représentation topologique est assurée par un graphe de Voronoï dont les nœuds sont des ensembles de cartes métriques locales. Un modèle basé sur la mémorisation d'images sphériques augmentées de la profondeur et constituant un ensemble de cartes locales, globalement connectées dans un graphe, a été proposé dans [40]. Il permet de bénéficier à la fois des avantages des cartes métriques en reconstruisant l'aspect géométrique de l'environnement local, tout en s'affranchissant des contraintes de la reconstruction de grands environnements en offrant naturellement un moyen de découper la carte en zones d'intérêt.

#### **1.3.1.3.4 Cartographies sémantiques**

Aujourd'hui, un changement de paradigme profond est en train de s'opérer dans le domaine de la cartographie. L'objectif n'est plus uniquement de construire une représentation simulant l'apparence et l'étendue spatiale de l'environnement, ce qui s'est avéré être insuffisant pour permettre aux robots d'évoluer en totale autonomie. Le but est de modéliser le contenu sémantique de l'environnement en représentant les objets qu'il contient, pour rendre compte de phénomènes qui ne pouvaient être modélisés par les cartes précédentes. La cartographie sémantique, qui intègre des informations quant à la nature des objets observés, offre de nombreux avantages sur les méthodes purement spatiales. C'est un moyen très naturel de partager des représentations avec l'être humain, permettant une interaction homme-machine simple et efficace, essentielle pour envisager le déploiement des robots dans notre environnement quotidien. La connaissance de la nature des objets permet aussi de modéliser les interactions possibles avec ceux-ci et de prendre en compte la dynamique de l'environnement en associant à chaque objet un comportement. Par exemple, on peut définir les classes d'objets pour la navigation, identifier des panneaux de signalisation ou encore caractériser les zones de danger où la navigation sera plus ou moins contrainte. Le recours à l'information de haut niveau permet aussi d'améliorer l'efficacité des algorithmes en modélisant l'environnement de manière compact. La cartographie sémantique est donc une voie très prometteuse pour l'amélioration des représentations de l'environnement, notamment pour la navigation dans le contexte du véhicule autonome.

L'exploitation conjointe des informations des différentes couches d'une carte hybride sémantique a fait l'objet de recherches significatives pour la construction de modèles évolués de l'environnement. Dans la majorité des cas, l'information métrique est utilisée pour inférer la

sémantique, mais certains travaux utilisent ensuite l'information sémantique pour corriger l'information métrique à grande échelle.

#### **1.3.1.4 Cartographie retenue**

Dans le cadre de la thèse, il est considéré que la cartographie fournit :

- la délimitation de l'espace roulant ;
- la position, la vitesse et l'accélération des obstacles ;
- l'encombrement des obstacles sous forme de Bounding Box (plus petit rectangle contenant l'obstacle).

#### **1.3.2 Modèles du véhicule**

Dans le domaine de la planification de trajectoire, l'utilisation d'un modèle du véhicule permet d'évaluer l'atteignabilité de la trajectoire.

L'atteignabilité désigne ici la possibilité d'une trajectoire à être suivie par un véhicule. Cette atteignabilité dépend de la géométrie du véhicule (rayon de braquage), ainsi que de ses propriétés dynamiques (accélération, vitesse de braquage, inertie,...).

Pour des considérations de temps de calculs, il est préférable d'utiliser des modèles de véhicules simplifiés. En effet, l'utilisation du modèle véhicule a pour vocation de garantir une génération de trajectoire par la partie planification qui ne soit pas aberrante. Ainsi si les approximations du modèle ne sont pas trop importantes, l'étage de contrôle/commande doit être capable de compenser ces approximations. Il y a donc un compromis à trouver entre qualité et temps de calculs de la planification de trajectoire.

Deux types de modèles sont distingués dans cette thèse :

- les modèles cinématiques permettant d'évaluer l'atteignabilité d'une trajectoire d'un point de vue géométrique ;
- les modèles dynamiques permettant d'évaluer l'atteignabilité d'une trajectoire d'un point de vue dynamique.

Dans le reste du document, l'atteignabilité d'une trajectoire d'un point de vue géométrique sera également appelée atteignabilité du chemin.

### 1.3.2.1 Modèles dynamiques du véhicule

Les modèles bicyclettes sont les plus utilisés pour l'élaboration des lois de commande pour le contrôle du véhicule [41], [42].

Ce modèle est utilisé pour représenter le comportement latéral du véhicule (accélération latérale, vitesse de lacet, angle de dérive), suppose que le véhicule est symétrique, et les angles de dérive sur le même essieu sont égaux, le centre de gravité étant considéré au niveau du sol. Les dynamiques du roulis et du tangage sont négligées et les angles sont supposés être faibles.

Avec un modèle linéaire de forces pneumatiques, un modèle Linéaire à Paramètre Variant (LPV) peut être obtenu, la vitesse longitudinale étant le paramètre variant. Un tel modèle LPV, constitué du déplacement latéral et du lacet, est présenté dans [43] et [41].

Il représente de façon assez satisfaisante le comportement latéral du véhicule dans des situations de conduite normale [44]. Cependant, la complexité calculatoire d'un tel modèle reste importante pour la planification de trajectoire.

### 1.3.2.2 Modèle cinématique du véhicule

Pour les besoins de la thèse, un modèle cinématique permettant d'évaluer le lacet  $\theta_\tau(\tau)$  et le braquage  $\varphi_\tau(\tau)$ , où  $\tau$  est la variable spatiale, en fonction du chemin suivi par le véhicule est introduit. Ces grandeurs peuvent être exprimées en fonction des coordonnées de l'essieu arrière  $P_\tau(\tau) = \begin{bmatrix} X_\tau(\tau) \\ Y_\tau(\tau) \end{bmatrix}$  et de ses dérivées ce qui amène à un système plat [45].

En considérant le schéma de paramétrage du repère véhicule présenté sur la figure 1.20 et sous l'hypothèse de roulement sans glissement (RSG), la vitesse de l'essieu arrière ( $\vec{V}_p$ ) est alors parallèle à la direction du véhicule ( $\vec{PQ}$ ) et la vitesse de l'essieu avant ( $\vec{V}_Q$ ) est quant à elle parallèle à la direction des roues avant.

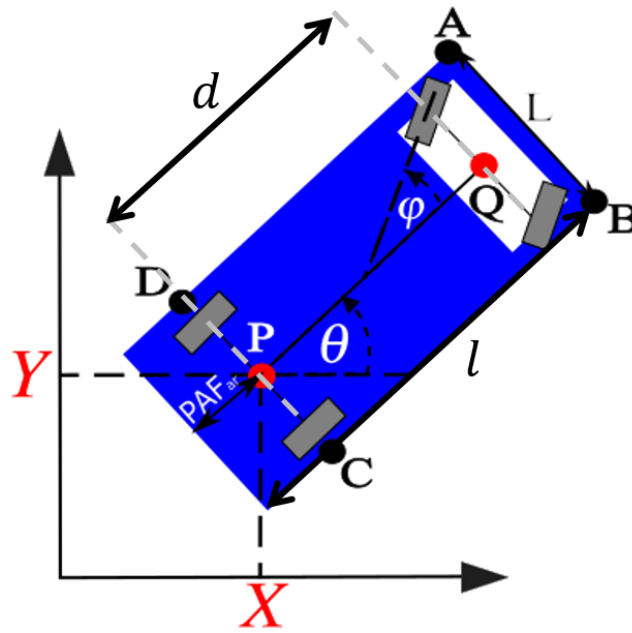
Le roulement sans glissement signifie qu'il n'y a pas de mouvement de translation entre la roue et la route. Ce mouvement de translation apparaît lorsque les taux de glissement des roues du véhicule sont trop importants et/ou lorsque l'adhérence diminue (verglas, route mouillée). Selon [44], le modèle cinématique est acceptable lorsque l'accélération latérale  $a_y$  du véhicule respecte la condition suivante :

$$a_y \leq 0.5\mu g, \quad (1.1)$$

où  $\mu$  est le coefficient d'adhérence de la route et  $g$  est l'accélération de la pesanteur.

Ainsi dans le cadre d'étude de l'environnement urbain, l'hypothèse RSG est justifiée par :

- une vitesse du véhicule faible (inférieure à 50 km/h),
- des accélérations supposées modérées
- et des conditions d'adhérence supposées suffisantes, de telle sorte que le coefficient d'adhérence reste proche de 1.



**Figure 1.20** – Schéma de paramétrage du repère véhicule utilisé pour la définition des contraintes

Par conséquent, il est possible d'exprimer les relations liant  $\theta_\tau(\tau)$  et le braquage  $\varphi_\tau(\tau)$  aux coordonnées de l'essieu arrière et à leurs vitesses et accélérations :

$$\tan(\theta_\tau(\tau)) = \frac{dY_\tau(\tau)/d\tau}{dX_\tau(\tau)/d\tau} \quad (1.2)$$

et

$$\tan(\varphi_\tau(\tau)) = d \cdot \frac{\frac{d\theta_\tau(\tau)}{d\tau}}{V_\tau(\tau)}, \quad (1.3)$$

où  $d$  est l'empattement,

$$V_\tau(\tau) = \sqrt{\left(\frac{dX_\tau(\tau)}{d\tau}\right)^2 + \left(\frac{dY_\tau(\tau)}{d\tau}\right)^2}, \quad (1.4)$$

conformément à la relation (1.3), et

$$\frac{d\theta_\tau(\tau)}{d\tau} = \frac{\frac{d^2Y_\tau(\tau)}{d\tau^2} \frac{dX_\tau(\tau)}{d\tau} - \frac{dY_\tau(\tau)}{d\tau} \frac{d^2X_\tau(\tau)}{d\tau^2}}{\left(\frac{dX_\tau(\tau)}{d\tau}\right)^2 + \left(\frac{dY_\tau(\tau)}{d\tau}\right)^2}, \quad (1.5)$$

d'où

$$\tan(\varphi_\tau(\tau)) = d \frac{\frac{d^2 Y_\tau(\tau)}{d\tau^2} \frac{dX_\tau(\tau)}{d\tau} - \frac{dY_\tau(\tau)}{d\tau} \frac{d^2 X_\tau(\tau)}{d\tau^2}}{\left(\left(\frac{dX_\tau(\tau)}{d\tau}\right)^2 + \left(\frac{dY_\tau(\tau)}{d\tau}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}. \quad (1.6)$$

Ces relations sont utilisées pour exprimer les coordonnées de quatre points particuliers A, B, C et D du polytope modélisant le véhicule conformément à la Figure 1.20:

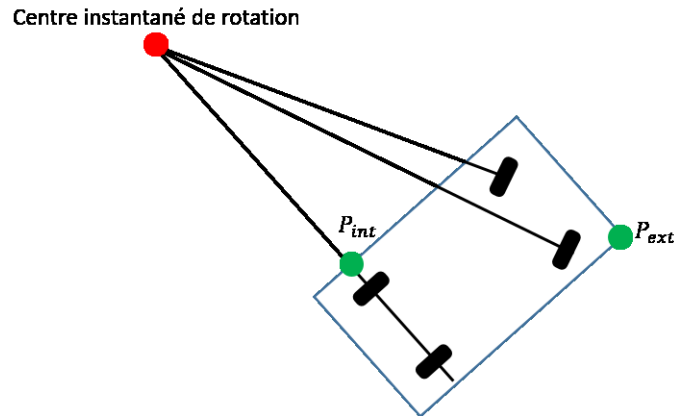
$$\begin{bmatrix} X_{A,\tau}(\tau) \\ X_{B,\tau}(\tau) \\ X_{C,\tau}(\tau) \\ X_{D,\tau}(\tau) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_\tau(\tau) \\ X_\tau(\tau) \\ X_\tau(\tau) \\ X_\tau(\tau) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (l - PAF_{ar})\cos(\theta_\tau(\tau)) \\ (l - PAF_{ar})\cos(\theta_\tau(\tau)) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{L}{2}\sin(\theta_\tau(\tau)) \\ \frac{L}{2}\sin(\theta_\tau(\tau)) \\ \frac{L}{2}\sin(\theta_\tau(\tau)) \\ -\frac{L}{2}\sin(\theta_\tau(\tau)) \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

et

$$\begin{bmatrix} Y_{A,\tau}(\tau) \\ Y_{B,\tau}(\tau) \\ Y_{C,\tau}(\tau) \\ Y_{D,\tau}(\tau) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_\tau(\tau) \\ Y_\tau(\tau) \\ Y_\tau(\tau) \\ Y_\tau(\tau) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (l - PAF_{ar})\sin(\theta_\tau(\tau)) \\ (l - PAF_{ar})\sin(\theta_\tau(\tau)) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{L}{2}\cos(\theta_\tau(\tau)) \\ -\frac{L}{2}\cos(\theta_\tau(\tau)) \\ -\frac{L}{2}\cos(\theta_\tau(\tau)) \\ \frac{L}{2}\cos(\theta_\tau(\tau)) \end{bmatrix}, \quad (1.8)$$

avec  $l$  et  $L$  les longueur et la largeur du véhicule et  $PAF_{ar}$  le porte-à-faux arrière (distance entre l'arrière du véhicule et le milieu de l'essieu arrière).

L'encombrement du véhicule le long du chemin est caractérisé par son gabarit d'encombrement. Ce dernier décrit le phénomène de surlargeur survenant lorsque le véhicule est formé d'une enveloppe extérieure et d'une enveloppe intérieure. L'enveloppe extérieure est décrite par le point du véhicule possédant le plus grand rayon de courbure tandis que l'enveloppe intérieure est celui possédant le plus petit. Or, le centre instantané de rotation est situé sur l'essieu arrière à l'intersection des axes de rotation des roues avant [46]. Ainsi comme illustré à la figure 1.21, l'enveloppe supérieure  $P_{ext}(\tau) = \begin{bmatrix} X_{ext}(\tau) \\ Y_{ext}(\tau) \end{bmatrix}$  est décrite par le point situé à l'extrémité avant du véhicule et à l'extérieur du virage soit le point  $A$  lorsque le véhicule tourne à droite, ou le point  $B$  si le véhicule tourne à gauche. De la même manière, la l'enveloppe inférieure  $P_{int}(\tau) = \begin{bmatrix} X_{int}(\tau) \\ Y_{int}(\tau) \end{bmatrix}$  est décrite par le point situé à l'extrémité de l'essieu arrière et à l'intérieur du virage, soit le point  $C$  lorsque le véhicule tourne à droite ou le point  $D$  si le véhicule tourne à gauche.



**Figure 1.21** – Schéma illustrant le centre instantané de rotation (en rouge) et les points décrivant les enveloppes du gabarit d'encombrement (en vert)

### 1.3.3 Tour d'horizon de la planification de trajectoire

La planification de trajectoire pour le véhicule autonome est un sujet vaste et la littérature est particulièrement abondante dans ce domaine.

Dans [47], les auteurs présentent les questions essentielles auxquelles la recherche actuelle tente de répondre :

- Comment les véhicules autonomes doivent décider où aller ?
- Comment les véhicules autonomes utilisent les mesures issues des capteurs pour prendre des décisions à court et long terme ?
- Comment les interactions avec les autres usagers de la route affectent leur décision ?
- Comment les véhicules autonomes peuvent apprendre à conduire à partir de leur historique et de la conduite humaine ?
- Comment assurer que les modules de planification et de contrôle ont un comportement correct et sécurisé ?
- Comment assurer que l'ensemble des véhicules d'une route se coordonnent de la manière la plus efficace ?

Il peut être remarqué que ces questions ne sont pas nouvelles et déjà en 2012 dans [48], les auteurs soulignaient que les quatre principaux enjeux de la conduite autonome sont la sécurité, la faisabilité, l'optimalité et l'efficacité. Alors que la sécurité (habilité d'un véhicule à éviter des collisions) est selon eux plutôt associée à la perception et la compréhension de

l'environnement pour identifier les régions dangereuses et les régions saines, la faisabilité, l'optimalité et l'efficacité sont plutôt liées à la planification de trajectoire :

- la faisabilité est associée à la qualité de la correspondance entre la variation de l'environnement et la réponse, c'est-à-dire la trajectoire effectuée ;
- l'optimalité est une métrique qui mesure la qualité de la trajectoire planifiée et qui en réalité ne peut être estimée en condition réelle qu'au travers d'un coût calculatoire important ;
- l'efficacité est le coût calculatoire de la planification d'une trajectoire.

A cette époque, les auteurs considéraient alors une certaine hiérarchie dans ces trois derniers enjeux, le dernier étant en fait à la base des deux autres, en particulier dans le cas de la robotique mobile au sens plus large que la conduite autonome, cette dernière n'en étant considérée que comme un cas particulier.

Ils promouvaient alors l'idée d'une navigation hiérarchique, dans laquelle une planification précise locale était combinée à une planification globale plus grossière, en particulier lorsque l'objectif est au-delà de l'horizon des capteurs, ou lorsque l'horizon est dynamique ou encore lorsque les ressources calculatoires sont limitées. En effet, une planification précise dans le cas où l'environnement est peu ou pas connu n'est pas plus adaptée qu'une planification grossière.

De nos jours cette approche est encore adaptée malgré l'avancée de la technologie : si l'environnement statique distant peut être connu à l'avance au travers de cartes haute-définition et si la dynamique de l'environnement est prédite de manière de plus en plus précise au travers du développement d'algorithmes de prédiction de trajectoire, l'équilibre entre efficacité et ressources calculatoires est encore une priorité, surtout de la part des constructeurs pour lesquels ces ressources sont directement associées à un coût.

Deux revues récentes donnent un état de l'art de la planification de trajectoire pour le véhicule autonome. Trois catégories de méthodes sont couramment utilisées selon [47].

- les méthodes à base de discrétisation (souvent de l'espace), encore appelées méthodes combinatoires dans [49],
- les méthodes à base d'exploration probabilistes de l'espace, encore appelées méthodes à échantillonnage,

- et les méthodes à base d'optimisation et d'horizon glissant (type Model Predictive Control).

Dans [50], l'auteur ajoute à cette liste les méthodes à bases d'interpolation, qui étaient dans la liste précédente considérées en tant que méthode à base d'optimisation.

Il est également possible de trouver dans la littérature [48] les méthodes à base de champs de potentiel.

Finalement, une nouvelle catégorie a émergé ces dernières années avec l'arrivée de l'Intelligence Artificielle et la prise de conscience que les méthodes précédentes nécessitaient une prédiction des trajectoires des véhicules environnants : les méthodes de planification prenant en compte les comportements des autres usagers (Behavior-Aware Motion Planning). Ces méthodes sont décrites dans [47], état de l'art le plus récent rencontré dans la littérature. Elles combinent la plupart du temps les fonctions « Perception de l'environnement », « Parcours planning », « Behavior planning » et « Trajectory planning », allant même parfois jusqu'à proposer des approches end-to-end. Ces méthodes ne seront pas décrites dans la suite de ce document car leur analyse nécessiterait une étude complète qui sort du cadre proposé ici.

### **1.3.3.1 Méthodes à base de discrétisation de l'espace**

Ces méthodes visent à trouver une solution complète au problème de la planification de trajectoire par l'utilisation d'une représentation discrète du problème adaptée à l'algorithme de résolution et non pas au problème. Le plus souvent, cette discrétisation est celle de l'espace géométrique.

Dans le cas de la recherche de solution par un découpage géométrique, [49] explique que ces techniques se basent sur l'utilisation de graphes de visibilité, de diagrammes de Voronoï, ou plus simplement d'un découpage en grille d'occupation. Le principal problème selon lui de ces techniques est qu'elles nécessitent une capacité calculatoire importante lorsque le nombre de points considérés augmente. Finalement, ces techniques ne pourraient être utiles que pour une planification globale (par opposition à locale telle qu'expliqué ci-dessus). Néanmoins, elles facilitent grandement la recherche d'une solution exhaustive, c'est-à-dire prenant en compte tout l'espace.



D'autre part la recherche d'une trajectoire optimale peut être réalisée par une étude plus approfondie de l'espace lui-même dans laquelle des zones particulières, hors discrétisation uniforme, sont proposées : il s'agit alors de l'espace de configuration [51].

De même, une technique plus récente a été développée pour la prise de décision, qui consiste à découper l'espace en fonction des règles de conduite, au travers d'algorithmes LTL (Linear Temporal Logic) [52], allant même jusqu'à prendre en compte le non-respect volontaire de ces règles pour débloquer des situations figées [53].

Cette stratégie de discrétisation a également été appliquée pour la prédiction des intentions des véhicules environnants en prenant en compte l'incertitude de l'environnement. Il s'agit des méthodes POMDP (*Partially Observable Markov Decision Processes*) et MOMDP (*Mixed Observability Markov Decision Processes*). Ces approches ont été rendues possibles par le développement d'algorithmes permettant leur résolution.

De manière générale, ces approches reposent sur l'utilisation d'algorithmes de parcours d'arbres ou de graphes. Les algorithmes les plus utilisés sont présentés dans les parties qui suivent de par leur usage fréquent. Ainsi, lors des épreuves mythiques des *DARPA Grand* (2004 et 2005) et *Urban* (2007) *Challenges*, plusieurs équipes ont utilisé une méthode à base de discrétisation des trajectoires dynamiquement faisables associée à une recherche en fonction de la géométrie de la route.

### **1.3.3.2 Méthodes à base d'échantillonnage (aléatoire) de l'espace**

Ces méthodes reposent sur un échantillonnage aléatoire de l'espace permettant de générer des trajectoires et, en vérifiant la faisabilité a posteriori, la génération associée d'un graphe de trajectoires faisables. Voir à ce sujet la thèse de Léonard Jaillet [54]. Elles sont souvent décrites par le terme anglais « *sampling* » à la différence d'un échantillonnage non aléatoire, alors référencé par le terme anglais « *discrete* ». En français, la notion d'échantillonnage recouvre celle de discrétisation.

Ces approches permettent alors de lever la difficulté calculatoire associée aux méthodes à base de discrétisation tout en garantissant la complétude probabiliste, c'est-à-dire le fait que « la trajectoire optimale sera nécessairement trouvée, si le temps le permet » [49]. La complexité calculatoire est alors transférée par une forte demande de temps calculatoire pour la garantie d'une couverture suffisante de l'espace.

Suite à la création du graphe, son parcours est ensuite réalisé par l'utilisation d'algorithmes classiques tels que Dijkstra ou A\*.

Les variantes sont surtout associées aux méthodes qui permettent de générer l'arbre. Deux types d'algorithmes se rencontrent : les PRM (*Probabilistic Road Maps*) et les RRT (*Rapidly exploring Random Trees*) :

- des PRM construisent plusieurs graphes simultanément et sont efficaces pour la planification dans des espaces à de nombreuses dimensions [55] ;
- les RRT, à l'inverse, cherchent une extension rapide et sont plutôt adaptés lorsque l'environnement n'est pas bien connu a priori (environnement dynamique ou horizon de perception limitée).

Alors que le RRT apparaît plus adapté à un environnement automobile urbain, les deux approches ont fait l'objet d'améliorations importantes, pour donner le PRM\* et le RRT\*, et d'autres algorithmes rapides de ce type ont récemment vu le jour, le FMT\* (Fast Marching Trees) et SST\* (Stable Sparse Trees).

### **1.3.3.3 Méthodes à base d'optimisation et horizon glissant**

Ces méthodes ont été appliquées dans un premier temps au contrôle (en particulier de la dynamique latérale) du véhicule autonome [56]. L'avancée des solveurs d'optimisation non linéaire sous contrainte a permis l'élargissement de ces méthodologies à la planification de trajectoire, ce qui permet l'obtention de trajectoires lisses (c'est-à-dire à dérivées par rapport au temps continu).

Dans [48], il apparaît que ces méthodes utilisent en règle générale une discrétisation des paramètres d'entrée afin de poser le problème sous la forme d'un contrôle optimal qu'il est possible de résoudre en temps réel.

A ce sujet, [57] écrit que l'avenir de la commande optimale repose sur la simulation et la sélection en temps réel de paramètres optimaux, cette technique étant rendue possible par l'avancée technologique des moyens de simulation (logiciels et matériels).

### **1.3.3.4 Méthodes à base d'interpolation**

Ces méthodes sont souvent utilisées pour la planification locale de la trajectoire, c'est-à-dire en supposant qu'une première planification a permis la définition d'un certain nombre de points de passage. Elles permettent alors une interpolation entre ces points par la définition d'une trajectoire vérifiant certaines contraintes (faisabilité de la trajectoire par un véhicule, confort des occupants, encombrement etc).

Elles présentent également l'avantage de permettre une replanification en cas d'environnement dynamique imprévu ou statique mal connu.

Elles sont présentées particulièrement dans [50] qui définit cinq catégories principales :

- Les lignes et les cercles : cette catégorie a l'avantage d'une approche mathématique simple, répondant à une capacité calculatoire réduite et n'est finalement pas représentative de la conduite réelle. Elle a été utilisée par exemple pour la planification d'un demi-tour dans [58].
- Les clothoïdes : Leur utilisation permet l'obtention de trajectoires dans lesquelles le rayon de courbure varie linéairement par rapport à l'abscisse curviligne (donc par rapport au temps dans le cas d'une vitesse constante). Il est intéressant de remarquer que cette approche permet souvent de se rapprocher au mieux du profil de la route puisque celui-ci doit règlementairement suivre ce type de géométrie.
- Les courbes polynomiales : elles sont définies par l'utilisation d'un polynôme géométrique dans le repère global ou dans le repère de Frenet à origine fixe la position initiale du véhicule. Elles permettent l'obtention facilitée de trajectoires respectant certaines contraintes sur la position et la dynamique du véhicule au point de départ et d'arrivée de la trajectoire par la définition de leurs paramètres par résolution directe d'équation. Il s'agit d'une méthode alors peu coûteuse d'un point de vue calculatoire.
- Les courbes paramétrées et cas particulier des courbes de Bézier : elles dérivent de l'approche polynomiale mais s'en distinguent par le fait que les deux dimensions du repère global sont des polynômes d'un paramètre, souvent le temps. Comme dans le cas

de l'approche polynomiale, elles permettent une définition des paramètres par résolution d'équations et le respect intrinsèque de certaines contraintes dynamiques et de continuité. Un cas particulier est celui des courbes de Bézier qui permet une paramétrisation intuitive par le positionnement de points particuliers et qui ne nécessite qu'une faible puissance calculatoire. Une approche similaire est celle qui utilise, plus généralement, des splines dont les courbes de Bézier n'en sont qu'un cas particulier.

### **1.3.3.5 Méthodes à base de champs de potentiels**

Ces méthodes étaient largement utilisées dans le cadre de la robotique mobile mais leur application au cas du véhicule autonome est plutôt anecdotique. Deux raisons principales peuvent expliquer ce fait. Tout d'abord, si elles sont adaptées au cas d'une masse ponctuelle, elles sont difficilement exploitables directement dans le cas d'un système non holonome pour lequel la composante normale d'une force qui lui serait appliquée ne génère pas de déplacement directement compréhensible. Ensuite, leur application à un environnement dynamique dans lequel les obstacles se déplacent n'est pas immédiat et gourmand en ressources calculatoires [59]. Un état de l'art plus complet sur ce sujet est présenté au chapitre 3.

### **1.3.3.6 Discussion sur les méthodes de planification de trajectoire présentées**

Finalement, à la vue des méthodes présentées précédemment, il est possible de distinguer deux grandes familles de méthodes : celles basées sur la création d'un graphe (méthodes à base de discrétisation et d'échantillonnage) cherchant alors à optimiser la trajectoire représentée comme une succession discrète de points, et celles basées sur une approche continue (méthode à base d'optimisation sur un horizon glissant et d'interpolation) cherchant alors à optimiser la trajectoire représentée par une paramétrisation particulière. Alors que l'approche par discrétisation de l'espace permet de diminuer le nombre de points pris en compte au détriment de la précision, l'approche continue permet une forte précision au détriment de l'horizon spatial pris en compte.

De même, il apparaît que les méthodes reposant sur un horizon glissant se distinguent des autres essentiellement par le fait que la trajectoire est recalculée en temps réel, pendant son parcours. Il paraît envisageable, sous contraintes calculatoires, d'appliquer ce principe sur la plupart des autres méthodes.

Ainsi, avec ces distinctions, les différences entre méthodes reposent essentiellement sur leur puissance calculatoire nécessaires entraînant un domaine d'application dédié, à savoir une application globale, à l'aide des outils de parcours de graphe, et une application locale, à l'aide des outils de l'optimisation de fonctions continues, sous contraintes.

### **1.3.4 Limitations des méthodes actuelles de l'état de l'art**

Une grande partie de l'état de l'art traite de méthodes discrètes. L'avantage de ces méthodes est leur implantation, cependant les trajectoires ainsi générées nécessitent souvent une étape de lissage ainsi qu'une discrétisation de l'environnement. À l'inverse, les méthodes à base d'interpolations permettent une génération de trajectoire lisse et continue. De plus, ces trajectoires peuvent être utilisés avec un modèle de véhicule lui-même continu.

L'encombrement du véhicule est également souvent négligé dans l'état de l'art. Lorsque cet encombrement est pris en compte, il est sous-estimé et le phénomène de surlargeur n'est pas considéré ce qui peut poser problème lorsque les voies de circulation sont étroites comme cela est le cas dans certaines villes européennes.

Enfin, les solutions de planification de trajectoires se doivent d'être génériques et modulables. Pour ce faire, une approche par interpolation continue combinée à une décomposition chemin/vitesse et une complémentarité planification prédictive/réactive est explorée dans cette thèse. Ces notions seront développées dans le paragraphe suivant.

## **1.4 Objectifs, problématiques et positionnement de la thèse**

### **1.4.1 Approche par décomposition chemin/vitesse**

#### **1.4.1.1 Chemin**

##### **1.4.1.1.1 Définition d'un chemin**

Un chemin  $\mathcal{C}$ :  $(P_\tau, \tau_{min}, \tau_{max})$  est défini dans ce mémoire de thèse comme l'association d'une fonction  $P_\tau \in \mathbb{R}^2$  d'un scalaire réel  $\tau \in \mathbb{R} \cup [\tau_{min}, \tau_{max}]$ , appelée variable spatiale, et des bornes de son domaine de variation  $\tau_{min}$  et  $\tau_{max}$ .

Les coordonnées de  $P_\tau$  représentent alors les coordonnées d'un point dans un référentiel  $(O, \vec{X}_G, \vec{Y}_G)$  terrestre fixe (repère galiléen fixé à la terre et considéré comme invariant, la surface étant supposée plane), encore appelé global ou absolu. Sous cette forme, et de manière abusive, le chemin  $\mathcal{C}$  est alors également défini par deux fonctions  $X_\tau(\tau)$  et  $Y_\tau(\tau)$  du même scalaire réel  $\tau$ , de telle sorte que

$$P_\tau(\tau) = \begin{bmatrix} X_\tau(\tau) \\ Y_\tau(\tau) \end{bmatrix}, \quad (1.9)$$

sous la notation  $\mathcal{C}: (X_\tau(\tau), Y_\tau(\tau), \tau_{min}, \tau_{max})$ .

#### 1.4.1.1.2 Vitesse spatiale d'un chemin

Dans ce mémoire, la vitesse spatiale  $V_\tau(\tau)$  associée à un chemin  $\mathcal{C}: (P_\tau, \tau_{min}, \tau_{max})$  est définie comme étant la norme de la dérivée de  $P_\tau(\tau)$  par rapport à la variable spatiale du chemin considéré :

$$V_\tau(\tau) = \frac{dP_\tau(\tau)}{d\tau}, \quad (1.10)$$

ou encore, en utilisant la notation de la relation (1.9),

$$V_\tau(\tau) = \sqrt{\left(\frac{dX_\tau(\tau)}{d\tau}\right)^2 + \left(\frac{dY_\tau(\tau)}{d\tau}\right)^2}. \quad (1.11)$$

Il s'agirait de la vitesse du point  $P_\tau$  si la variable spatiale  $\tau$  était le temps.

#### 1.4.1.1.3 Empreinte d'un chemin

L'empreinte  $\mathcal{E}(\mathcal{C})$  d'un chemin  $\mathcal{C}: (P_\tau, \tau_{min}, \tau_{max})$  est définie comme l'ensemble des points  $P_\tau(\tau)$  parcouru sur le chemin, c'est-à-dire :

$$\mathcal{E}(\mathcal{C}) = \{P_\tau(\tau), \tau_{min} \leq \tau \leq \tau_{max}\}. \quad (1.12)$$

Il peut être remarqué qu'une même empreinte de chemin  $\mathcal{E}$  peut être associée à une infinité de chemins : toute fonction  $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  strictement croissante peut en effet permettre de redéfinir l'empreinte du chemin  $\mathcal{E}(\mathcal{C})$  où  $\mathcal{C}: (P_\tau, \tau_{min}, \tau_{max})$ , par utilisation d'un chemin  $\mathcal{C}': (P_{\tau'}, \tau'_{min}, \tau'_{max})$  de même empreinte  $\mathcal{E}(\mathcal{C}') = \mathcal{E}(\mathcal{C})$ , grâce à la relation :

$$\tau' = g(\tau). \quad (1.13)$$

Dans ce cas,

$$P'_\tau(\tau') = P'_\tau(g(\tau)), \quad (1.14)$$

c'est-à-dire :

$$P_\tau = P'_\tau \circ g, \quad (1.15)$$

$$\tau'_{min} = g(\tau_{min}) \quad (1.16)$$

et

$$\tau'_{max} = g(\tau_{max}). \quad (1.17)$$

Afin de garantir que  $\tau'_{min} < \tau'_{max}$ , conformément à la définition (1.12), la fonction  $g$  est supposée strictement croissante. Le renforcement d'une contrainte qui aurait pu être la bijectivité implique qu'une empreinte est orientée. Une empreinte  $\mathcal{E}(\mathcal{C})$  d'un chemin  $\mathcal{C}: (P_\tau, \tau_{min}, \tau_{max})$  est un fermé sur  $\mathbb{R}$ , dont la frontière est alors constituée des points  $P_\tau(\tau_{min})$  et  $P_\tau(\tau_{max})$ . Ces points sont alors respectivement qualifiés de départ et d'arrivée.

Ces deux points étant associés aux bornes du domaine de variation de la variable spatiale, ils sont parfois utilisés abusivement pour la référence à un chemin à la place des bornes du domaine de variation, sans perte de cohérence néanmoins lorsque le contexte est clair et que les variables spatiales  $\tau_{min}$  et  $\tau_{max}$  ont été définies.

Finalement, un chemin est donc une définition particulière d'une empreinte, cette dernière pouvant être définie par une infinité de chemins différents reliés par des fonctions (bijectives) strictement croissantes de leurs variables spatiales vérifiant la relation (1.14).

#### **1.4.1.1.4 Paramétrisations classiquement utilisées d'un chemin**

##### **1.4.1.1.4.1 Représentation du chemin par une forme cartésienne explicite**

La forme cartésienne explicite d'un chemin dans le repère absolu passe par la définition d'une empreinte de la forme  $Y_X = f(X)$ . Un cas particulier des formes cartésiennes explicites et classiquement rencontré dans la littérature est le type polynômial. Cette représentation permet de définir la position d'un point du véhicule autonome par son abscisse, l'ordonnée est alors déduite conformément à la relation :

$$Y_X(X) = \sum_{k=0}^n a_k X^k, \quad (1.18)$$

avec  $a_k$  paramètres du polynôme et  $k$  le degré du polynôme.

Le choix des paramètres  $a_k$  permet de définir la forme de l'empreinte.

La vitesse  $V(t)$  de parcours de l'empreinte  $Y_X(X)$  devient alors, en considérant  $Y(t) = Y_X(X(t))$ ,

$$V(t) = \sqrt{\left(\frac{\partial X(t)}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y_X(t)}{\partial t}\right)^2}, \quad (1.19)$$

or

$$\frac{\partial X(t)}{\partial t} = \frac{\partial Y_X(t)}{\partial t} / \frac{\partial Y_X(t)}{\partial X}, \quad (1.20)$$

d'où,

$$V(t) = \frac{\partial Y_X(t)}{\partial t} \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\partial Y_X(t)}{\partial X}\right)^2} + 1}, \quad (1.21)$$

finalement,

$$V(t) = \frac{\partial Y_X(\tau(t))}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial t} \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\partial Y_X(t)}{\partial X}\right)^2} + 1}, \quad (1.22)$$

Définir la vitesse  $V(t)$  à chaque instant  $t$  revient alors à définir  $\tau(t)$  et  $Y_X(\tau(t))$  telle que la relation (1.22) soit vraie pour tout  $t$ .

#### 1.4.1.1.4.2 Représentation du chemin par un polynôme paramétré

L'inconvénient de la représentation du chemin par une forme cartésienne explicite réside dans le fait que la dépendance de  $Y_X$  à  $\tau(t)$  est implicite. Il est alors nécessaire d'expliciter cette dépendance avant de s'intéresser au problème de planification de vitesse. À l'opposé, les courbes paramétrées ne sont pas soumises à cette problématique puisque la dépendance de  $X_\tau$  à  $\tau(t)$  est imposée. Cette représentation permet de définir la position d'un point du véhicule autonome par son abscisse et son ordonnée conformément à la relation suivante :



$$X_{\tau}(\tau) = \sum_{k=0}^n a_{x_k} \tau^k, \quad (1.23)$$

$$Y_{\tau}(\tau) = \sum_{k=0}^n a_{y_k} \tau^k, \quad (1.24)$$

avec  $a_k$  paramètres du polynôme et  $k$  le degré du polynôme.

#### **1.4.1.1.4.3 Cas particulier de représentation du chemin par un polynôme paramétré : les courbes de Bézier**

Dans ce document, le terme courbe de Bézier fait référence à une courbe de Bézier à deux dimensions. Les courbes de Bézier sont des courbes paramétrées polynômiales qui s'expriment comme combinaison linéaire de points appelés points de contrôle. La définition de ces courbes est assez simple et utilise les polynômes de Bernstein. La courbe de Bézier associée à  $n + 1$  points  $P_0, \dots, P_n$  de  $\mathbb{R}^2$  est la courbe paramétrée  $P_{\tau}: [0,1] \rightarrow \mathbb{R}^2$  donnée pour tout  $\tau \in [0,1]$  par :

$$P_{\tau}(\tau) = \sum_{i=0}^n B_i^n(\tau) P_i, \quad (1.25)$$

où  $B_i^n$  est le polynôme de Bernstein  $B_i^n : \tau \rightarrow C_i^n \tau^i (1 - \tau)^{n-i}$  et  $C_i^n$  sont les coefficients binomiaux.

La courbe de Bézier a des propriétés particulières:

- elle a pour extrémités les points  $P_0$  et  $P_n$  c'est à dire ( $P(0) = P_0$  et  $P(1) = P_n$ ),
- le vecteur  $\overrightarrow{P_0 P_1}$  est tangent à la courbe de Bézier au point de paramètre  $\tau = 0$ ,
- le vecteur  $\overrightarrow{P_{n-1} P_n}$  est tangent à la courbe de Bézier au point de paramètre  $\tau = 1$ ,
- les points  $P_0, \dots, P_n$  sont appelés points de contrôles de la courbe de Bézier,
- la courbe de Bézier ne dépend pas du repère choisi. Un déplacement des points de contrôle, les maintenant à distances identiques les uns des autres, n'entraîne pas de déformation de la courbe.

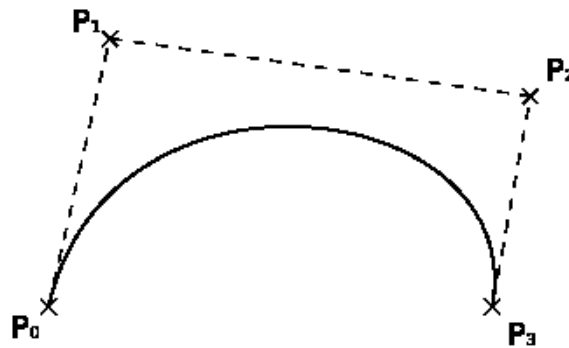
Les courbes de Bézier forment un outil de base qui est utilisé pour définir d'autres notions utiles en modélisation. C'est le cas par exemple des courbes B-splines, beaucoup utilisées dans les logiciels de dessin, qui sont des courbes obtenues en mettant "bout à bout" des courbes de Bézier.

L'algorithme de Casteljau utilise un calcul récursif et rapide de ces courbes permettant ainsi la manipulation en temps réel de ces dernières [60].

Dans le reste du mémoire, seules les courbes de Bézier cubiques sont utilisées. En effet, de nombreux algorithmes et outils théoriques de Bézier tel que le plan canonique (2.1.1.4, ne sont pas utilisables pour des ordres plus élevés. Dans ce cadre, l'équation (1.25) devient alors dans le cas cubique :

$$P(\tau) = P_0(1 - \tau)^3 + 3P_1\tau(1 - \tau)^2 + 3P_2\tau^2(1 - \tau) + P_3\tau^3. \quad (1.26)$$

La figure 1.22 présente un exemple de tracé d'une courbe de Bézier cubique.



**Figure 1.22 – Courbe de Bézier cubique**

## 1.4.1.2 Trajectoire

### 1.4.1.2.1 Définition d'une trajectoire

Lorsque  $\tau$  représente le temps, c'est-à-dire lorsque  $\tau = t$ , le chemin est appelé trajectoire. Il peut alors être remarqué que :

- à une empreinte donnée peut correspondre une infinité de trajectoires puisqu'il suffit de considérer comme temps la variable spatiale de l'un de ses chemins de définition et qu'il en existe une infinité,
- à une trajectoire ne correspond qu'une seule empreinte.

Une trajectoire est alors définie par son empreinte (unique) et par la dépendance au temps de son chemin. Cette dépendance est classiquement définie par la vitesse de parcours de l'empreinte et la position à son temps initial  $P_t(t_{min})$ .

Une trajectoire  $P_t(t)$  est composée d'un ensemble ordonné par le paramètre  $t$ , à savoir le temps, de points  $\begin{bmatrix} X(t) \\ Y(t) \end{bmatrix}$  dans le repère absolu (repère galiléen fixé à la terre et considéré comme invariant). Cette trajectoire est décomposable en un chemin  $P_\tau(\tau) = \begin{bmatrix} X_\tau(\tau) \\ Y_\tau(\tau) \end{bmatrix}$  et une fonction croissante  $\tau(t)$  selon :

$$P_\tau(\tau(t)) = P_t(t). \quad (1.27)$$

#### 1.4.1.2.2 Vitesse d'une trajectoire

Le vecteur vitesse de parcours de l'empreinte  $\mathcal{E}(P_t(t))$ , appelé vecteur vitesse de la trajectoire  $P_t(t)$ , est donné par

$$\vec{V}_t(t) = \frac{dP_t(t)}{dt}, \quad (1.28)$$

a pour norme :

$$V_t(t) = \sqrt{\left(\frac{dX_t(t)}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dY_t(t)}{dt}\right)^2} \quad (1.29)$$

et pour direction, définie par l'angle entre la direction du vecteur vitesse et l'axe  $X_G$  du repère absolu :

$$\theta_t(t) = \text{atan} \frac{dY_t(t)/dt}{dX_t(t)/dt}. \quad (1.30)$$

qui se simplifie pour donner :

$$\theta_t(t) = \text{atan} \frac{dY_t(t)}{dX_t(t)}. \quad (1.31)$$

#### 1.4.1.2.3 Relation entre une trajectoire et les différents chemins de son empreinte

En considérant les relations (1.28) et (1.29), il apparaît

$$t = g_t(\tau), \quad (1.32)$$

et

$$V_t(t) = \sqrt{\left(\frac{dX_t(g_t(\tau))}{d\tau} \frac{d\tau}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dY_t(g_t(\tau))}{d\tau} \frac{d\tau}{dt}\right)^2}, \quad (1.33)$$

ou encore, en notant

$$X_{\tau}(\tau) = X_t(g_t(\tau)) \quad (1.34)$$

et

$$Y_{\tau}(\tau) = Y_t(g_t(\tau)) \quad (1.35)$$

et d'après la définition de la vitesse spatiale (1.11), il vient que :

$$V_t(t) = V_{\tau}(\tau) \cdot \frac{d\tau}{dt}. \quad (1.36)$$

En remarquant que la vitesse spatiale ne dépend que du chemin, cette relation met en évidence que la connaissance

- d'un chemin quelconque de l'empreinte d'une trajectoire
- ainsi que de la dérivée de la fonction  $g_t$  reliant la variable spatiale et le temps

permet de reconstruire la norme du vecteur vitesse de la trajectoire.

#### **1.4.1.2.4 Relation entre planification de chemin, planification de vitesse et planification de trajectoire**

En prenant en compte la conclusion de la partie précédente, il apparaît alors qu'une trajectoire est complètement définie par, simultanément :

- son empreinte,
- la fonction associant la variable spatiale d'un chemin de son empreinte au temps
- et le temps initial.

L'approche considérée dans ce document décompose alors le problème de la recherche d'une trajectoire optimale, la planification de trajectoire, en deux tâches :

- la première associée à la recherche d'une empreinte optimale, il s'agit de la planification de chemin,
- et la seconde associée à la recherche de la fonction optimale associant au temps la variable spatiale du chemin de l'empreinte optimale.

Le temps initial sera normalisé et alors considéré nul dans la suite du document sans perte de généralité.

Ce principe de décomposition de la trajectoire permet de découpler le problème de planification de chemin du problème de planification de vitesse [61]. Dans le contexte de la conduite autonome, la planification de chemin s'intéresse alors à définir l'empreinte à suivre par le véhicule, soumise aux contraintes géométriques de l'environnement, alors que la planification de vitesse s'intéresse à définir la vitesse de référence du véhicule à chaque instant  $t$ , la planification de trajectoire s'intéresse aux planifications conjointes de chemin et de vitesse.

### **1.4.2 Complémentarité entre prédictif et réactif**

Dans cette thèse, deux types de planification sont distinguées :

- la planification prédictive, dont l'objectif est de déterminer la trajectoire de référence en avance, par l'utilisation des données de cartographie statiques
- et la planification réactive, dont l'objectif est de mettre à jour la trajectoire de référence par rapport à la réalité terrain mesurée en temps réel, afin par exemple de s'adapter à l'environnement dynamique.

Ainsi, si la cartographie est suffisamment représentative de la réalité et qu'aucun obstacle n'entre en conflit avec la trajectoire de référence, seule la planification prédictive est utilisée. Dès lors que des imprévus surviennent dans l'environnement et que la situation n'est pas considérée comme urgente, la planification réactive se charge d'ajuster la trajectoire de référence afin de s'adapter à l'environnement.

### **1.4.3 Conclusion**

En résumé, la recherche sur la conduite autonome sur autoroute commence à porter ses fruits avec la commercialisation de fonction, permettant une autonomie partielle dans ce milieu. Cependant, afin de répondre à l'évolution de la demande de mobilité actuelle, la conduite autonome en milieu urbain semble être une nécessité.

Le milieu urbain est quant à lui caractérisé par un environnement à la fois dynamique et incertain, avec une circulation à faible vitesse et la présence de routes à fortes courbures.

L'intersection et son environnement proche concentrent une grande partie des problématiques du milieu urbain.

Comparativement à l'autoroute, le milieu urbain nécessite alors une contribution de la planification de trajectoire plus importante.

Pour ces raisons, cette thèse se concentre sur la planification de trajectoires en intersection et plus précisément à la planification locale. Elle cherche à résoudre le problème de manoeuvrabilité du véhicule autonome en milieu restreint et dynamique que constitue l'intersection.

Pour répondre à cette problématique, la notion de trajectoire est décomposée en celles de chemin et de vitesse. De plus, le problème de planification est divisé en une partie prédictive et une partie réactive. La première partie consiste à calculer un chemin et une vitesse à partir des données de cartographie, afin d'obtenir une trajectoire de référence. La deuxième quant à elle, consiste à ajuster le chemin et la vitesse afin de réagir à l'environnement.

Ainsi, le Chapitre 2 de cette thèse traite de planification prédictive, tandis que le Chapitre 3 développe la planification de chemin réactive. Le Chapitre 4 propose une méthode de planification et de replanification de vitesse. Enfin, l'ensemble de la chaîne de planification proposée est validée à l'aide d'un simulateur de conduite au Chapitre 5.

# Chapitre 2

## Planification prédictive de chemin

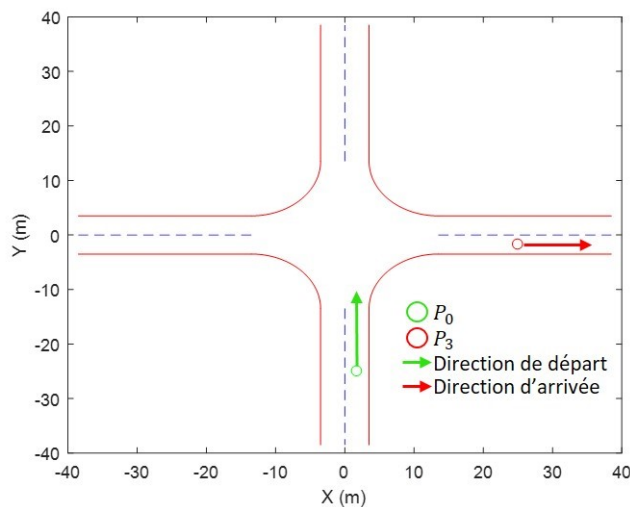
2.1 CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE.....	67
2.1.1 Définition des repères.....	68
2.1.2 Formalisation générique du problème de planification prédictive .....	75
2.2 ÉTUDE DES METHODES CHOISIES .....	78
2.2.1 Méthode 1 : Optimisation linéaire.....	78
2.2.2 Méthode 2 : Interpolation de Bézier.....	91
2.2.3 Méthode 3 : Planification d'une enveloppe d'encombrement de l'ego-véhicule.....	106
2.2.4 Méthode 4 : Méthode par analyse de l'espace autorisé.....	116
2.3 ÉTUDE COMPARATIVE ET SELECTION .....	128
2.3.1 Evaluation des performances des algorithmes sur le scénario « tourner à gauche dans une intersection en croix ».....	129
2.3.2 Evaluation des performances des algorithmes sur le scénario « tourner à droite dans une intersection en T » .....	130
2.4 CONCLUSION .....	131

## 2.1 Contexte et problématique

La planification de chemin prédictif s'intéresse à déterminer le chemin à suivre par l'égo-véhicule respectant un certain nombre de contraintes connues à l'avance. Il est supposé dans ce chapitre qu'elles sont issues de données de cartographie haute définition (HD) et que l'atteignabilité §1.3.2 du chemin recherché est évaluée par l'intermédiaire du modèle cinématique du véhicule décrit au paragraphe §1.3.2.2 notamment par la prise en compte d'une contrainte sur l'angle de braquage.

La problématique de cette partie est de trouver un chemin atteignable par le véhicule et garantissant que celui-ci reste à tout instant dans l'espace libre. Le chemin ainsi obtenu est appelé chemin de référence.

Ce chemin décrit le déplacement du milieu de l'essieu arrière de l'égo-véhicule dans le plan. De plus, les points d'entrée  $P_0$  et de sortie  $P_3$  de l'intersection et leurs directions sont supposés connus car fournis par une cartographie HD ou par un premier algorithme de planification globale. Une telle configuration est représentée sur la Figure 2.1 dans le cas d'une manœuvre de type tourner-à-droite dans une intersection en croix par exemple.



**Figure 2.1** – Arguments d'entrées de la fonction de planification de chemin prédictive en contexte sur l'exemple d'une intersection en croix et d'une manœuvre de type tourner-à-droite



Les hypothèses suivantes dérivent directement de l'utilisation d'une telle cartographie :

- les points de contrôle  $P_0 = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{bmatrix}$  et  $P_3 = \begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 \end{bmatrix}$ , définissant respectivement le début et la fin du chemin dans l'intersection, sont supposés connus ;
- les directions d'arrivée et de départ du véhicule dans l'intersection sont déduites des directions de voies ;

Dans ce paragraphe, une formalisation mathématique du problème de planification de chemin prédictive est établie. Elle donne par la suite lieu à une proposition de quatre méthodes différentes de résolution du problème. Leur comparaison est ensuite effectuée afin de déterminer la plus pertinente, permettant ainsi d'apporter un certain nombre de conclusions et de perspectives à ce chapitre.

## 2.1.1 Définition des repères

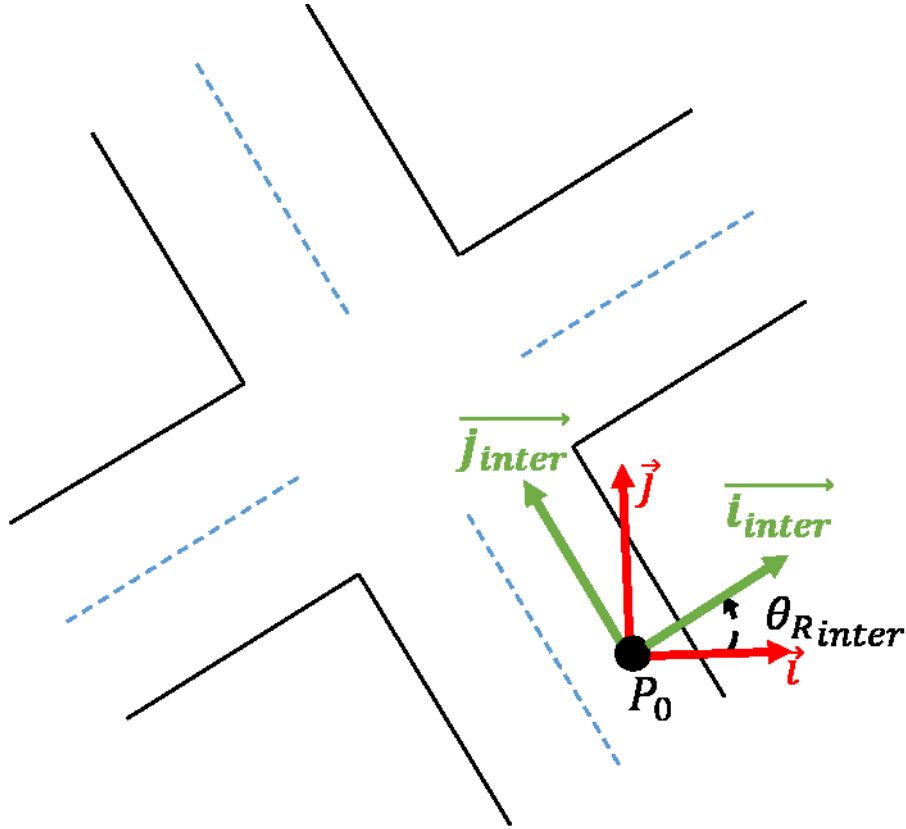
### 2.1.1.1 Repère global

Soit un repère  $R_0(O, \vec{i}, \vec{j})$  où  $O$  est le point d'origine,  $\vec{i}$  et  $\vec{j}$  sont des vecteurs unitaires orthogonaux. Tous les repères du document seront considérés directs, de telle sorte que le produit vectoriel  $\vec{i} \wedge \vec{j} > 0$ . Lorsque le contexte est clair,  $R_0$  sera utilisée à la place de  $R_0(O, \vec{i}, \vec{j})$  par souci de simplicité de lecture.

Dans ce document, un vecteur  $\vec{V}$  sera écrit sous la forme  $\vec{V} = (a, b)_{R_0}$ , considérée équivalente à  $\vec{V} = a\vec{i} + b\vec{j}$ . Les variables  $a$  et  $b$  seront appelées respectivement première et deuxième composantes de  $\vec{V}$  dans le repère  $R_0$ . La référence au repère sera éventuellement omise lorsque le contexte est clair, par souci de simplicité de lecture.

### 2.1.1.2 Repère intersection

Soit un repère  $R_{inter}(P_0, \overrightarrow{i_{inter}}, \overrightarrow{j_{inter}})$  où  $P_0: (X_0, Y_0)_{R_0}$  est le point d'origine,  $\overrightarrow{j_{inter}}$  et  $\overrightarrow{i_{inter}}$  sont des vecteurs unitaires orthogonaux. Le premier est un vecteur unitaire de même direction que la voie de départ de l'intersection et de sens pointant l'intérieur de l'intersection. Le second est un vecteur unitaire orthogonal à  $\overrightarrow{j_{inter}}$ . De plus, l'angle entre  $\vec{i}$  et  $\overrightarrow{i_{inter}}$  est noté  $\theta_{R_{inter}}$  conformément à la figure 2.2.



**Figure 2.2** – Schéma de paramétrisation du repère intersection

Par conséquent, les coordonnées d'un point dans le repère intersection s'exprime alors :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}_{R_{inter}} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{R_{inter}}) & \sin(\theta_{R_{inter}}) \\ -\sin(\theta_{R_{inter}}) & \cos(\theta_{R_{inter}}) \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}_{R_0} - \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{bmatrix}_{R_0} \right). \quad (2.1)$$

En pratique, ce repère est utilisé pour interpréter une situation localisée sur une intersection.

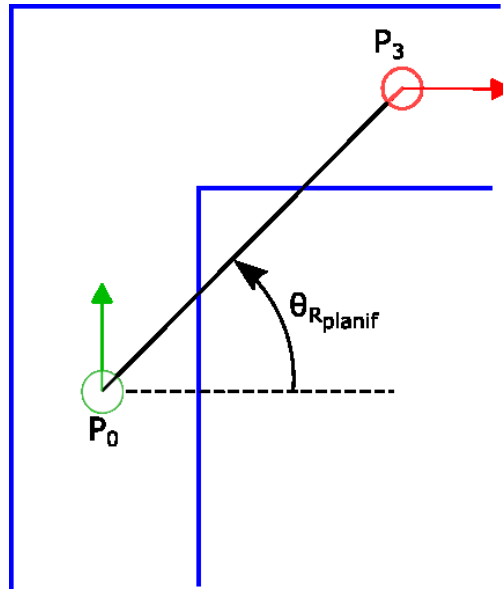
### 2.1.1.3 Repère de planification

Soit  $R_{planif}(P_0, \overrightarrow{l_{planif}}, \overrightarrow{J_{planif}})$  où  $P_0$  est le point d'origine,  $\overrightarrow{J_{planif}}$  et  $\overrightarrow{l_{planif}}$  sont des vecteurs unitaires orthogonaux.. Le premier est un vecteur unitaire qui vérifie  $\overrightarrow{l_{planif}} = \frac{\overrightarrow{P_0P_3}}{\|\overrightarrow{P_0P_3}\|}$ , avec  $P_3: (X_3, Y_3)_{R_{inter}}$ , tandis que le deuxième est un vecteur unitaire orthogonal au premier. De plus, l'angle entre  $\overrightarrow{l_{inter}}$  et  $\overrightarrow{l_{planif}}$  est noté  $\theta_{R_{planif}}$ . Par conséquent, les coordonnées d'un point dans le repère intersection s'exprime alors :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}_{R_{planif}} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{R_{planif}}) & \sin(\theta_{R_{planif}}) \\ -\sin(\theta_{R_{planif}}) & \cos(\theta_{R_{planif}}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}_{R_{inter}} \quad \forall \theta_{R_{planif}} < \frac{\pi}{2}. \quad (2.2)$$

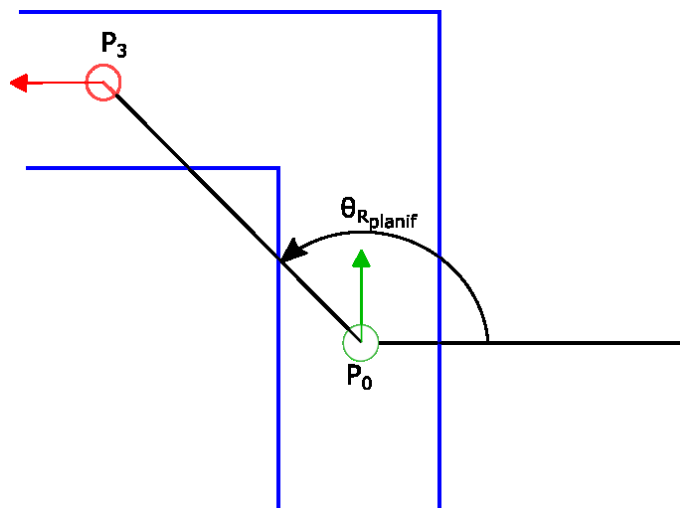
Deux cas apparaissent en fonction de la valeur de  $\theta_{R_{planif}}$  :

- Cas n°1 : l'égo-véhicule doit tourner à droite, c'est-à-dire  $\theta_{R_{planif}} < \frac{\pi}{2}$  conformément à la figure 2.3. ;



**Figure 2.3** – Illustration du cas n°1 : le repère intersection avec  $\theta_{R_{planif}} < \frac{\pi}{2}$

- Cas n°2 : l'égo-véhicule doit tourner à gauche c'est-à-dire  $\theta_{R_{planif}} > \frac{\pi}{2}$  conformément à la figure 2.4. Dans ce cas, une symétrie horizontale est appliquée après rotation afin se ramener au cas n°1.



**Figure 2.4** – Illustration du cas n°2 : le repère intersection avec  $\theta_{R_{planif}} > \frac{\pi}{2}$

En résumé, le repère de planification permet une représentation de l'environnement indépendante du type de manœuvre (« tourner à droite » ou « tourner à gauche ») devant être planifiée par l'égo-véhicule.

**Remarque :** le cas où l'égo-véhicule doit aller tout droit ( $\theta_{R_{plani\ f}} = \frac{\pi}{2}$ ) n'est pas traité dans ce paragraphe car il est considéré comme trivial.

### 2.1.1.4 Plan canonique de Bézier

Le plan canonique de Bézier  $R_C$  est un plan où une courbe de Bézier cubique est représentée par quatre points dont trois fixes et respectivement égaux à  $(0,0)$ ,  $(0,1)$  et  $(1,1)$ . La position du dernier point est représentative de la courbe originale. Elle permet alors son analyse [62].

#### 2.1.1.4.1 Définitions

Soit  $R(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  un repère quelconque et  $P_i: (X_i, Y_i, 1)_R$  un point de contrôle d'une courbe de Bézier cubique quelconque avec  $i \in \{1, 2, 3, 4\}$ . L'utilisation d'un repère en trois dimensions pour représenter une courbe plane est nécessaire à l'application des différentes transformations permettant d'aboutir à la représentation du plan canonique de Bézier. L'expression du point  $P_i$  dans le plan canonique de Bézier s'obtient par l'intermédiaire de quatre transformations notées  $T_1, T_2, T_3$  et  $T_4$  et permet le passage du repère  $R$  au repère du plan canonique de Bézier  $R_C$  via le passage par les repères intermédiaires  $R_1, R_2$  et  $R_3$ . Ces étapes sont décrites selon :

$$P_i: (X_i, Y_i, 1)_R \xrightarrow{T_1} P_i: (U_{X_i}, U_{Y_i}, 1)_{R_1} \xrightarrow{T_2} P_i: (V_{X_i}, V_{Y_i}, 1)_{R_2} \xrightarrow{T_3} P_i: (W_{X_i}, W_{Y_i}, 1)_{R_3} \xrightarrow{T_4} P_i: (X_{C_i}, Y_{C_i}, 1)_{R_C} \quad (2.3)$$

Soit une courbe de Bézier cubique définie par ses points de contrôle  $P_0: (X_0, Y_0, 1)_R$ ,  $P_1: (X_1, Y_1, 1)_R$ ,  $P_2: (X_2, Y_2, 1)_R$ , et  $P_3: (X_3, Y_3, 1)_R$ . Les transformations  $T_1$  à  $T_4$  sont alors explicitées de la manière suivante:

- la première transformation  $T_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -X_0 \\ 0 & 1 & -Y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$  permet d'obtenir  $P_0: (0,0,1)_{R_1}$ ;

- la deuxième transformation  $T_2 = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{U_{X_1}}{U_{Y_1}} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$  permet d'obtenir  $P_0: (0,0,1)_{R_2}$  et

$$P_1: (0, V_{y_1}, 1)_{R_2};$$

- la troisième transformation  $T_3 = \begin{pmatrix} \frac{1}{V_{X_2}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{V_{Y_1}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$  permet d'obtenir  $P_0: (0,0,1)_{R_3}$  et

$$P_1: (0,1,1)_{R_3};$$

- enfin, la dernière transformation  $T_4 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{1-W_{Y_2}}{W_{X_2}} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$  permet d'obtenir  $P_0: (0,0,1)_{R_c}$ ,

$$P_1: (0,1,1)_{R_c} \text{ et } P_2: (1,1,1)_{R_c};$$

**Remarque:** dans les cas où la courbe de Bézier cubique est initialement exprimée soit dans le repère intersection  $R_{inter}$  soit dans le repère de planification  $R_{planif}$ , la première transformation  $T_1$  est déjà réalisée. Dans ce cas, les transformations successives de  $T_2$  à  $T_4$  appliquées à  $P_3: (U_{X_3}, V_{Y_3}, 1)$  permettant l'expression de ses coordonnées dans le repère du plan canonique, peuvent être résumées par la relation suivante :

$$P_3: \left( \frac{U_{X_3} - \frac{U_{X_1} V_{Y_3}}{V_{Y_1}}}{U_2 - \frac{U_{X_1} V_{Y_2}}{V_{Y_1}}}, \frac{V_{Y_3}}{V_{Y_1}} + \left( 1 - \frac{V_{Y_2}}{V_{Y_1}} \right) \left( \frac{U_{X_3} - \frac{U_{X_1} V_{Y_3}}{V_{Y_1}}}{U_{X_2} - \frac{U_{X_1} V_{Y_2}}{V_{Y_1}}}, 1 \right)_{R_c} \quad (2.4)$$

#### 2.1.1.4.2 Conditions d'absence de point d'inflexion sur une courbe de Bézier cubique

Le plan canonique de Bézier est divisé en quatre zones conformément à la figure 2.5:

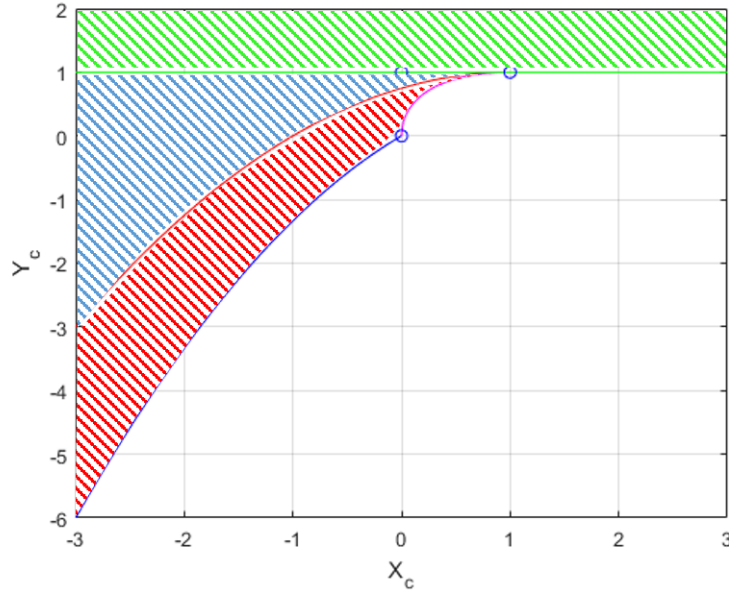


Figure 2.5 – Plan canonique de Bézier

- la zone verte représentant les courbes de Bézier possédant un point d’inflexion est définie par le demi-plan  $Y_{c_3} > 1$  ;
- la zone bleue représentant les courbes de Bézier possédant deux points d’inflexion est définie par l’intersection des demi-plans  $Y_{c_3} \geq \frac{-X_{c_3}^2 + 2X_{c_3} + 3}{4}$ ,  $X_{c_3} \leq 1$  et  $Y_{c_3} \leq 1$  ;
- la zone rouge représentant les courbes de Bézier possédant soit une boucle, soit un point de rebroussement et définie par l’intersection des demi-plans  $Y_{c_3} \geq \frac{\sqrt{3(4X_{c_3} - X_{c_3}^2)} - X_{c_3}}{2}$ ,  $Y_{c_3} \geq \frac{-X_{c_3}^2 + 3X_{c_3}}{3}$ ,  $Y_{c_3} \leq \frac{-X_{c_3}^2 + 2X_{c_3} + 3}{4}$  et  $X_{c_3} \leq 1$  ;
- la zone blanche représentant les courbes de Bézier ne possédant pas de point d’inflexion et qui est la zone complémentaire aux trois précédentes. Cette zone est la plus intéressante car elle garantit que le chemin décrit par la courbe de Bézier correspond à une manœuvre élémentaire de l’égo-véhicule puisqu’il n’y a pas de point d’inflexion. Les conditions à respecter dans le plan canonique pour rester dans la zone blanche pour  $P_3: (X_{c_3}, Y_{c_3})_{R_c}$  sont les suivantes :

$$Y_{c_3} \leq 1, \quad (2.5)$$

$$Y_{c_3} < \frac{\sqrt{3(4X_{c_3} - X_{c_3}^2)} - X_{c_3}}{2}, \forall X_{c_3}/0 \leq X_{c_3} \leq 1, \quad (2.6)$$

$$Y_{c_3} < \frac{-X_{c_3}^2 + 3X_{c_3}}{3}, \forall X_{c_3} \leq 0. \quad (2.7)$$

La définition de cette zone au travers des trois conditions précédentes, est discontinue car définie sur trois intervalles différents,  $X_{c_3} \in \mathbb{R}$  pour la condition (2.5),  $0 \leq X_{c_3} \leq 1$  pour la condition (2.6) et  $X_{c_3} \leq 0$  pour la condition (2.7). Ainsi afin de garantir un ensemble de définition continu, les conditions (2.5) à (2.7) sont simplifiées de la manière suivante :

$$Y_{c_3} \leq 1, \quad (2.8)$$

$$Y_{c_3} \leq X_{c_3}, \quad (2.9)$$

$$X_{c_3} \geq 0. \quad (2.10)$$

En utilisant les équations (2.4) et (2.5), on obtient :

$$\frac{Y_3}{Y_1} + \left(1 - \frac{Y_2}{Y_1}\right) \left(\frac{X_3 - \frac{X_1 Y_3}{Y_1}}{X_2 - \frac{X_1 Y_2}{Y_1}}\right) \leq 1, \quad (2.11)$$

$$\frac{Y_3}{Y_1} + \left(1 - \frac{Y_2}{Y_1}\right) \left(\frac{X_3 - \frac{X_1 Y_3}{Y_1}}{X_2 - \frac{X_1 Y_2}{Y_1}}\right) \leq \frac{X_3 - \frac{X_1 Y_3}{Y_1}}{X_2 - \frac{X_1 Y_2}{Y_1}}, \quad (2.12)$$

$$\frac{X_3 - \frac{X_1 Y_3}{Y_1}}{X_2 - \frac{X_1 Y_2}{Y_1}} \geq 0. \quad (2.13)$$

Dans le repère de planification,  $Y_3 = 0$ , il vient alors :

$$\frac{X_3 Y_1 - X_3 Y_2}{X_2 Y_1 - X_1 Y_2} \leq 1 \implies Y_1 \left(\frac{1}{K_1} - \frac{1}{K_2}\right) \leq X_3, \quad (2.14)$$

avec  $K_1 = \frac{Y_1}{X_1}$  et  $K_2 = \frac{Y_3 - Y_2}{X_3 - X_2}$ ,

$$\frac{Y_2}{Y_1} \geq 0 \implies \begin{cases} Y_2 \geq 0 \\ Y_1 > 0 \end{cases}, \quad (2.15)$$

$$\frac{X_3}{X_2 - \frac{X_1 Y_2}{Y_1}} \geq 0 \implies \begin{cases} X_3 \geq 0 \\ Y_2 \left(\frac{1}{K_2} - \frac{1}{K_1}\right) > -X_3 \end{cases}. \quad (2.16)$$

**Remarques :**  $Y_2 \geq 0$  et  $X_3 \geq 0$  sont toujours respectés dans le repère de planification grâce aux propriétés de ce repère.

En résumé, les conditions d'absence de points d'inflexions sur une courbe de Bézier cubique dans le repère de planification  $R_{planif}$  se résume au système suivant :

$$\begin{cases} Y_1 \left( \frac{1}{K_1} - \frac{1}{K_2} \right) \leq X_3 \\ Y_1 > 0 \\ Y_2 \left( \frac{1}{K_2} - \frac{1}{K_1} \right) > -X_3 \end{cases} . \quad (2.17)$$

### 2.1.2 Formalisation générique du problème de planification prédictive

Les limites de voies peuvent être représentées sous forme de trois suites de points définis dans un repère  $R$  notés  $P_R^{ext_1} = (P_n^{ext_1})_{n \in \{1,2,\dots,N^{ext_1}\}}$ ,  $P_R^{ext_2} = (P_n^{ext_2})_{n \in \{1,2,\dots,N^{ext_2}\}}$  et  $P_R^{int} = (P_n^{int})_{n \in \{1,2,\dots,N^{int}\}}$  avec  $N^{ext_1}$ ,  $N^{ext_2}$  et  $N^{int}$  leurs tailles respectifs ou encore le nombres de points qu'elles contiennent. Ces derniers sont définis par leurs coordonnées du repère  $R$  tel que  $P_n^{ext_1}: (X_n^{ext_1}, Y_n^{ext_1})_R$ ,  $P_n^{ext_2}: (X_n^{ext_2}, Y_n^{ext_2})_R$  et  $P_n^{int}: (X_n^{int}, Y_n^{int})_R$ . Ces suites de points sont supposées extraites de la cartographie HD par un traitement de données et sont représentées en figure 2.6 . Dans le cas où le véhicule tourne à gauche, chaque point des suites  $P_R^{ext_1'}$ ,  $P_R^{ext_2'}$  et  $P_R^{int'}$  issues de la cartographie doivent subir un décalage afin d'obtenir  $P_R^{ext_1}$ ,  $P_R^{ext_2}$  et  $P_R^{int}$  tel que :

$$(X_n^{ext_1}, Y_n^{ext_1})_R = (X_n^{ext_1'}, Y_n^{ext_1'})_R + \overrightarrow{d_{0\perp}} \quad (2.18)$$

$$(X_n^{ext_2}, Y_n^{ext_2})_R = (X_n^{ext_2'}, Y_n^{ext_2'})_R + \overrightarrow{d_{3\perp}} \quad (2.19)$$

$$(X_n^{int}, Y_n^{int})_R = (X_n^{int'}, Y_n^{int'})_R + \overrightarrow{d_{0\perp}} + \overrightarrow{d_{3\perp}} \quad (2.20)$$

où  $\overrightarrow{d_{0\perp}}$  est un vecteur normal à la direction de départ de l'intersection et de norme égale à la largeur de voie, de même,  $\overrightarrow{d_{3\perp}}$  est un vecteur normal à la direction d'arrivée et de norme égale à la largeur de voie. Ces opérations sont illustrées en figure 2.7.



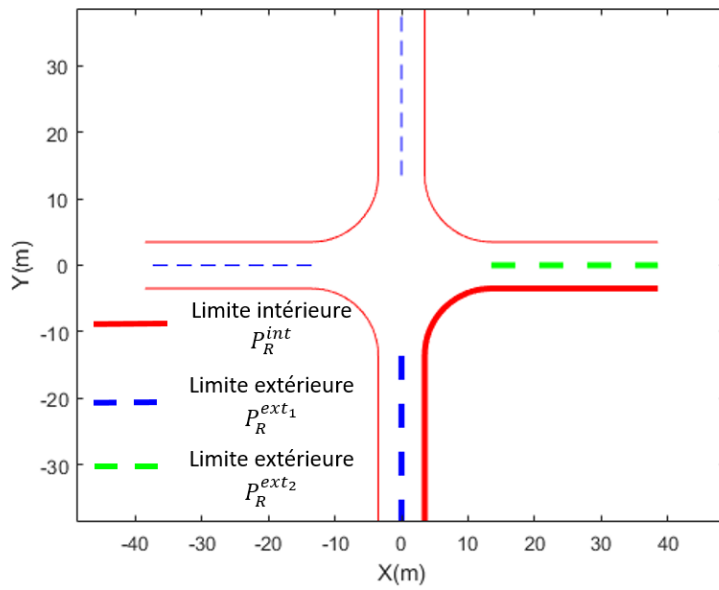


Figure 2.6 – Contraintes d’encombrement prises en compte pour la planification d’une manœuvre de type tourner à droite

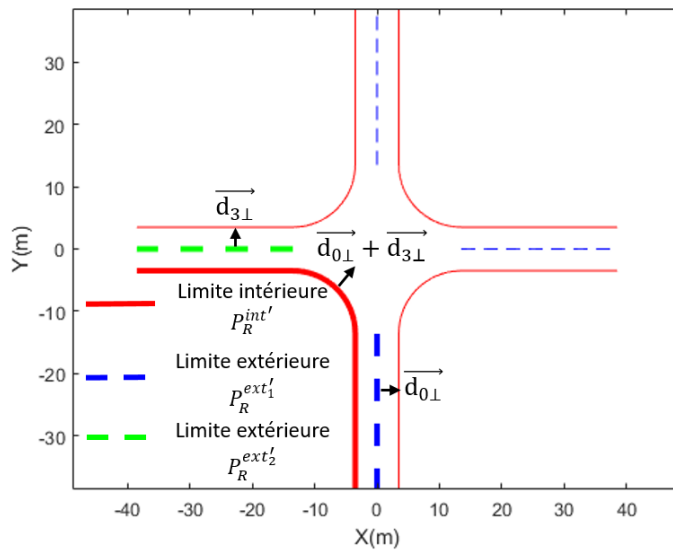


Figure 2.7 – Contraintes d’encombrement prises en compte pour la planification d’une manœuvre de type tourner à gauche

Dans le cas où les suites de points représentant les limites de voies sont insuffisantes, plusieurs interpolations peuvent être utilisées afin de les transformer en équations mathématiques  $Y = f(X)$ . Il est supposé que les données fournies par la perception sont disponibles dans le repère intersection c’est-à-dire que  $R = R_{inter}$ . Ainsi

les suites de points  $P_{R_{inter}}^{ext_1}$  et  $P_{R_{inter}}^{ext_2}$  sont interpolées par les fonctions  $f_{R_{inter}}^{ext_1}(X)$  et  $f_{R_{inter}}^{ext_2}(X)$  telles que :

$$f_{R_{inter}}^{ext_1}(X) = a_{R_{inter}}^{ext_1} X + b_{R_{inter}}^{ext_1}, X \in \mathbb{R} \quad (2.21)$$

et

$$f_{R_{inter}}^{ext_2}(X) = a_{R_{inter}}^{ext_2} X + b_{R_{inter}}^{ext_2}, X \in \mathbb{R}, \quad (2.22)$$

En ce qui concerne la limite intérieure  $P_{R_{inter}}^{int}$ , elle est interpolée par le polynôme d'ordre 3  $f_{R_{inter}}^{int}(X)$  :

$$f_{R_{inter}}^{int}(X) = a_{R_{inter}}^{int} X^3 + b_{R_{inter}}^{int} X^2 + c_{R_{inter}}^{int} X + d_{R_{inter}}^{int}, X \in \mathbb{R}, \quad (2.23)$$

Un changement de repère est utilisé afin de simplifier les calculs et de se ramener dans le repère de planification  $R_{planif}$ . Ainsi, dans ce repère, et en utilisant les notations introduites au paragraphe §1.3.2.2, les contraintes d'encombrement sont données par les équations :

$$\forall \tau, Y_{A,\tau}(\tau) \leq f_{planif}^{ext_1}(X_{A,\tau}(\tau)), \quad (2.24)$$

$$\forall \tau, Y_{A,\tau}(\tau) \leq f_{R_{planif}}^{ext_2}(X_{A,\tau}(\tau)), \quad (2.25)$$

$$\forall \tau, Y_{C,\tau}(\tau) \geq f_{R_{planif}}^{int}(X_{C,\tau}(\tau)). \quad (2.26)$$

Enfin, à ces contraintes d'encombrement, il est nécessaire d'ajouter les limites du véhicule en terme de braquage des roues, à l'aide de la relation :

$$\varphi_{inf}^{lim} \leq \varphi_{\tau}(\tau) \leq \varphi_{sup}^{lim}. \quad (2.27)$$

Où  $\varphi_{inf}^{lim}$  et  $\varphi_{sup}^{lim}$  sont des valeurs limites de braquage et intrinsèques au véhicule considéré.

Dans le reste de cette thèse,  $\varphi_{inf}^{lim} = -30^\circ$  et  $\varphi_{sup}^{lim} = 30^\circ$ .

## 2.2 Étude des méthodes choisies

### 2.2.1 Méthode 1 : Optimisation linéaire

#### 2.2.1.1 Principe

Dans ce paragraphe, il est considéré que les changements de repère permettant d'obtenir le cas n°1 décrit en Figure 2.3 ont déjà été réalisés. Il est à noter que  $P_0: (0,0)_{R_{planif}}$  par définition puisqu'il est l'origine du repère  $R_{planif}$ . De plus, la rotation permettant de passer du repère absolu au repère  $R_{planif}$  a pour but de rendre colinéaires les vecteurs  $\overrightarrow{P_0P_3}$  et  $\overrightarrow{t_{planif}}$ , c'est-à-dire que  $P_3: (X_3, 0)_{R_{planif}}$ .

Un long véhicule à deux essieux, circulant dans un virage, balaie dans un plan une bande de chaussée plus large que celle qui correspond à la largeur de son propre gabarit. Cette surlargeur est maximum lorsque le braquage  $\varphi_\tau(\tau)$  est maximum. Dans notre cas, il est supposé que  $\varphi_\tau(\tau)$  est maximum lorsque  $f_{R_{planif}}^{int}(X_{C,\tau}(\tau))$  est maximum. La valeur de  $X_{C,\tau}(\tau)$  correspondant au maximum de  $f_{R_{planif}}^{int}$  sera noté  $X_{crit}$ . Soit  $\tau_{crit}$  la valeur de  $\tau$  telle que  $X_\tau(\tau_{crit}) = X_{crit}$ . Il est supposé que  $\theta_\tau(\tau_{crit}) = 0$ ;

Les manœuvres planifiées dans cette thèse sont élémentaires c'est-à-dire que le chemin planifié ne possède pas de point d'inflexion. Ainsi la fonction  $\theta_\tau(\tau): \tau \rightarrow \theta_\tau(\tau)$  est bijective (ou strictement monotone). Si pour une quelconque raison, un chemin avec un ou plusieurs points d'inflexion doit être planifié, il est alors nécessaire de décomposer la planification en plusieurs planifications de manœuvres élémentaires entre chaque point d'inflexion. En utilisant les résultats du paragraphe §2.1.1.4.2, il est possible d'imposer une absence de point d'inflexion à une courbe de Bézier cubique par l'ajout de contraintes sur  $P_1$  et  $P_2$ . L'absence de point d'inflexion permet alors de garantir un unique extremum à la fonction  $\varphi_\tau(\tau)$  ;

Prendre en compte les contraintes de type encombrement sur l'ensemble du chemin dans l'optimisation n'est pas possible avec la méthode proposée ici : afin de rester dans un problème d'optimisation linéaire, les contraintes de type encombrement seront uniquement évaluées en  $\tau = 0, \tau_{crit}$  et 1. Évidemment tout problème de planification de chemin où les contraintes d'encombrement ne sont pas respectées en  $\tau = 0$  et  $\tau = 1$  n'est pas considéré.

La première étape de cette méthode est la détermination de  $X_{crit}$ . Comme indiqué précédemment, déterminer  $X_{crit}$  c'est rechercher le maximum de  $f_{Rplanif}^{int}$ . Pour ce faire, un simple algorithme de recherche de maximum dans un vecteur peut être utilisé dans le cas où l'on a  $P_{Rplanif}^{int}$ . Si une interpolation a été utilisée, une recherche d'optimum peut alors être effectuée de manière analytique (condition d'optimalité du premier ordre et du deuxième ordre) ou alors par récurrence (algorithme de Newton-Raphson par exemple).

La deuxième étape consiste à définir la valeur de  $\tau_{crit}$ . Cette valeur doit être choisie arbitrairement puisque sa détermination nécessite d'avoir les paramètres de la courbe de Bézier. Or, déterminer les paramètres de cette courbe de Bézier est précisément l'objet de ce chapitre. Ainsi  $\tau_{crit}$  est choisi tel que  $\tau_{crit} = \frac{X_{crit}}{X_3}$ . Ce choix permet de respecter une certaine cohérence de positionnement entre  $\tau_{crit}$  et  $X_{crit}$ . Il implique également de devoir imposer la contrainte  $X_{\tau}(\tau_{crit}) = X_{crit}$  dans l'optimisation.

La suite de cette méthode dépend du choix de la représentation des limites de voies.

### 2.2.1.1.1 Cas d'une représentation des limites de voies de type « suite de points »

Les suites de points représentant les limites de voies sont ici considérées telles que définies en §2.1.2. Les contraintes d'encombrement (2.24), (2.25) et (2.26) deviennent alors, pour  $\tau = \tau_{crit}$  :

$$\begin{cases} Y_{A,\tau}(\tau_{crit}) \leq f_{Rplanif}^{ext_1}(X_{A,\tau}(\tau_{crit})) \\ Y_{A,\tau}(\tau_{crit}) \leq f_{Rplanif}^{ext_2}(X_{A,\tau}(\tau_{crit})), \\ Y_{C,\tau}(\tau_{crit}) \geq f_{Rplanif}^{int}(X_{C,\tau}(\tau_{crit})) \end{cases} \quad (2.28)$$

c'est-à-dire, en utilisant les relations (1.7) et (1.8),

$$\begin{cases} 3Y_1(1 - \tau_{crit})^2\tau_{crit} + 3Y_2(1 - \tau_{crit})\tau_{crit}^2 \leq f_{Rplanif}^{ext_1}(X_{crit} + (l - PAF_{Ar})) - \frac{L}{2} \\ 3Y_1(1 - \tau_{crit})^2\tau_{crit} + 3Y_2(1 - \tau_{crit})\tau_{crit}^2 \leq f_{Rplanif}^{ext_2}(X_{crit} + (l - PAF_{Ar})) - \frac{L}{2} \\ 3Y_1(1 - \tau_{crit})^2\tau_{crit} + 3Y_2(1 - \tau_{crit})\tau_{crit}^2 \geq f_{Rplanif}^{int}(X_{crit}) + \frac{L}{2} \end{cases} \quad (2.29)$$

ou encore, sous forme matricielle :

$$\begin{cases} [3(1 - \tau_{crit})^2 \tau_{crit} & 3(1 - \tau_{crit}) \tau_{crit}^2] \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} \leq f_{Rplanif}^{ext_1}(X_{crit} + (l - PAF_{Ar})) - \frac{L}{2} \\ [3(1 - \tau_{crit})^2 \tau_{crit} & 3(1 - \tau_{crit}) \tau_{crit}^2] \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} \leq f_{Rplanif}^{ext_2}(X_{crit} + (l - PAF_{Ar})) - \frac{L}{2} \\ [-3(1 - \tau_{crit})^2 \tau_{crit} & -3(1 - \tau_{crit}) \tau_{crit}^2] \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} \leq -f_{Rplanif}^{int}(X_{crit}) - \frac{L}{2} \end{cases} \quad (2.30)$$

Les conditions d'absence de point d'inflexion, développées en (2.17), se traduisent alors ici par le système d'inéquations :

$$\begin{cases} Y_1 \left( \frac{1}{K_1} - \frac{1}{K_2} \right) \leq X_3 \\ Y_1 > 0 \\ Y_2 \left( \frac{1}{K_2} - \frac{1}{K_1} \right) > -X_3 \end{cases} \quad (2.31)$$

ou, sous forme matricielle,

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \left( \frac{1}{K_1} - \frac{1}{K_2} \right) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} \leq X_3 \\ [-1 & 0] \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} \leq 0 \\ \begin{bmatrix} 0 & \left( \frac{1}{K_1} - \frac{1}{K_2} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} \leq X_3 \end{cases} \quad (2.32)$$

Enfin, la contrainte supplémentaire introduite par le choix de  $\tau_{crit}$  devient alors l'équation :

$$3X_1 \tau_{crit} (1 - \tau_{crit})^2 + 3X_2 \tau_{crit}^2 (1 - \tau_{crit}) + X_3 \tau_{crit}^3 = X_{crit} \quad (2.33)$$

ou en remplaçant  $X_1$  et  $X_2$  :

$$3 \frac{Y_1}{K_1} \tau_{crit} (1 - \tau_{crit})^2 + 3 \left( \frac{Y_2}{K_2} + X_3 \right) \tau_{crit}^2 (1 - \tau_{crit}) + X_3 \tau_{crit}^3 = X_{crit} \quad (2.34)$$

ou encore, sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \frac{3}{K_1} (1 - \tau_{crit})^2 \tau_{crit} & \frac{3}{K_2} (1 - \tau_{crit}) \tau_{crit}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = X_{crit} - 3X_3 (1 - \tau_{crit}) \tau_{crit}^2 - X_3 \tau_{crit}^3 \quad (2.35)$$

L'objectif de l'optimisation est la minimisation de  $Y_1$  et de  $Y_2$ . En effet, minimiser ces deux paramètres permet de minimiser la longueur du chemin ainsi que de minimiser le maximum d'angle de braquage. En pratique, en fonction du degré de confiance dans les données des ensembles ou de la qualité de l'interpolation de la limite intérieure, il est alors plus prudent de maximiser  $Y_1$  et  $Y_2$ . Sous ces considérations, le critère d'optimisation  $J$  s'exprime :

$$J(Y_1, Y_2) = \pm [1 \quad 1] \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix}. \quad (2.36)$$

Le problème d'optimisation se resume finalement à :

$$\min_{Y_1, Y_2} f^T \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

$$\text{sous contraintes:} \begin{cases} A_{ineq} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} \leq b_{ineq} \\ A_{eq} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = b_{eq} \end{cases}, \quad (2.38)$$

avec

$$f = \pm \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2.39)$$

$$A_{ineq} = \begin{bmatrix} 3(1 - \tau_{crit})^2 \tau_{crit} & 3(1 - \tau_{crit}) \tau_{crit}^2 \\ 3(1 - \tau_{crit})^2 \tau_{crit} & 3(1 - \tau_{crit}) \tau_{crit}^2 \\ -3(1 - \tau_{crit})^2 \tau_{crit} & -3(1 - \tau_{crit}) \tau_{crit}^2 \\ \left(\frac{1}{K_1} - \frac{1}{K_2}\right) & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & \left(\frac{1}{K_1} - \frac{1}{K_2}\right) \end{bmatrix}, \quad (2.40)$$

$$b_{ineq} = \begin{bmatrix} f_{R_{planif}}^{ext1}(X_{crit} + (l - PAF_{Ar})) - \frac{L}{2} \\ f_{R_{planif}}^{ext2}(X_{crit} + (l - PAF_{Ar})) - \frac{L}{2} \\ -f_{R_{planif}}^{int}(X_{crit}) - \frac{L}{2} \\ X_3 \\ 0 \\ X_3 \end{bmatrix}, \quad (2.41)$$

$$A_{eq} = \left[ \frac{3}{K_1} \tau_{crit} (1 - \tau_{crit})^2 \frac{3}{K_2} \tau_{crit}^2 (1 - \tau_{crit}) \right] \quad (2.42)$$

et

$$b_{eq} = X_{crit} - 3X_3(1 - \tau_{crit})\tau_{crit}^2 - X_3\tau_{crit}^3. \quad (2.43)$$

Le signe des composantes de  $f$  définit si l'on souhaite minimiser, correspondant au cas où les composantes de  $f$  sont positives, ou maximiser, correspondant au cas où les composantes de  $f$  sont négatives.

Les variables d'optimisation  $Y_1$  et  $Y_2$  sont bornées afin d'accélérer la convergence de l'algorithme d'optimisation :

$$f_{R_{planif}}^{int}(X_{crit}) \leq Y_1 \leq \min(f_{R_{planif}}^{ext1}(X), f_{R_{planif}}^{ext2}(X)), \quad (2.44)$$

et

$$f_{R_{planif}}^{int}(X_{crit}) \leq Y_2 \leq \min(f_{R_{planif}}^{ext1}(X), f_{R_{planif}}^{ext2}(X)). \quad (2.45)$$

Le respect des contraintes d'encombrement sur l'ensemble du chemin est vérifié après l'optimisation. Si ces contraintes ne sont pas respectées, les bornes inférieures de  $Y_1$  et  $Y_2$  sont réévaluées à la hausse jusqu'à ce qu'il y ait respect des contraintes d'encombrement. De même, le respect des contraintes de braquage est vérifié après l'optimisation. Si ces contraintes ne sont pas respectées, les bornes supérieures de  $Y_1$  et  $Y_2$  sont réévaluées à la baisse jusqu'à ce qu'il y ait respect de ces contraintes.

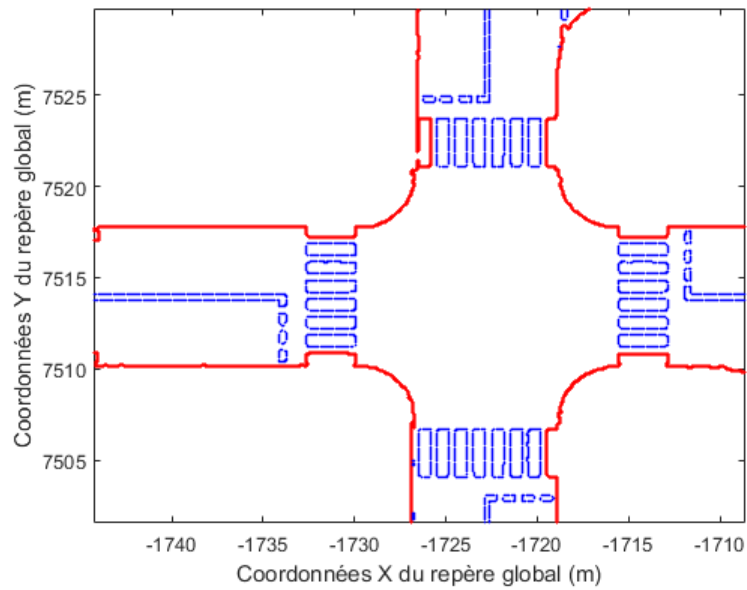
### 2.2.1.1.2 Cas particulier d'une représentation des limites de voies par interpolation

Dans ce paragraphe, il est considéré que les interpolations présentées au paragraphe 2.1.2 sont utilisées afin de représenter les limites de voies. Le principe de la méthode reste exactement le même que dans le paragraphe précédent, l'unique différence réside dans le vecteur des contraintes inégalités (2.41) conformément à l'équation qui devient :

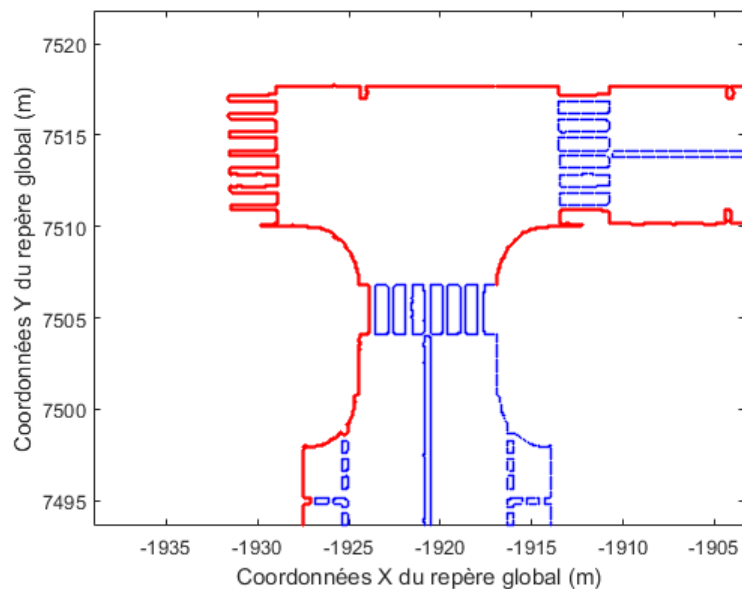
$$b_{ineq} = \begin{bmatrix} a_{R_{planif}}^{ext1}(X_{crit} + (l - PAF_{Ar})) + b_{R_{planif}}^{ext1} - \frac{L}{2} \\ a_{R_{planif}}^{ext2}(X_{crit} + (l - PAF_{Ar})) + b_{R_{planif}}^{ext2} - \frac{L}{2} \\ -a_{R_{planif}}^{int}X_{crit}^3 - b_{R_{planif}}^{int}X_{crit}^2 - c_{R_{planif}}^{int}X_{crit} - d_{R_{planif}}^{int} - \frac{L}{2} \\ X_3 \\ 0 \\ X_3 \end{bmatrix}. \quad (2.46)$$

### 2.2.1.2 Simulations

Dans ce paragraphe, la méthode 1 est testée sur deux scénarios : le premier est associé au cas « tourner à gauche en intersection en croix » tandis que le deuxième est associé au cas « tourner à droite en intersection en T ». Ces deux scénarios sont extraits d'un circuit entier de SCANeR studio qui sera présenté au chapitre 5. Les figure 2.8 et figure 2.9 représentent les cartographies utilisées pour ces deux scénarios. Une planification prédictive de chemin est présentée pour chacun dans les deux parties suivantes successivement.



**Figure 2.8** – Cartographie utilisée dans le scénario « tourner à gauche dans une intersection en croix » : les limites physiques de la route sont représentées en rouge tandis que la signalisation au sol est en bleue



**Figure 2.9** – Cartographie utilisée dans le scénario « tourner à droite dans une intersection en T »: les limites physiques de la route sont représentées en rouge tandis que la signalisation au sol est en bleue



### 2.2.1.2.1 Scénario « tourner à gauche » en intersection en croix

Dans ce scénario, l'ego-véhicule arrive dans une intersection en croix et doit tourner à gauche. À partir de la cartographie, huit points sont utilisés afin de calculer les interpolations définies au paragraphe §2.2.1.1.2 :

- deux points délimitant la voie au niveau du point de départ ;
- deux points délimitant la voie à l'entrée de l'intersection ;
- deux points délimitant la voie à la sortie de l'intersection ;
- deux points délimitant la voie au niveau du point d'arrivée.

Deux cas sont ensuite présentés : le cas avec minimisation du critère d'optimisation et le cas avec maximisation du critère d'optimisation.

#### 2.2.1.2.1.1 Minimisation du critère d'optimisation

Un changement de repère est effectué pour se placer dans le repère de planification obtenu par la méthode présentée dans la partie §2.1.1.3. Les interpolations sont effectuées et présentées en figure 2.10. Le problème de minimisation présenté au paragraphe §2.2.1.1 est résolu par l'algorithme dual du simplexe. La figure 2.10 présente alors le chemin ainsi planifié. On constate que ce chemin passe au plus proche de la limite intérieure de l'intersection.

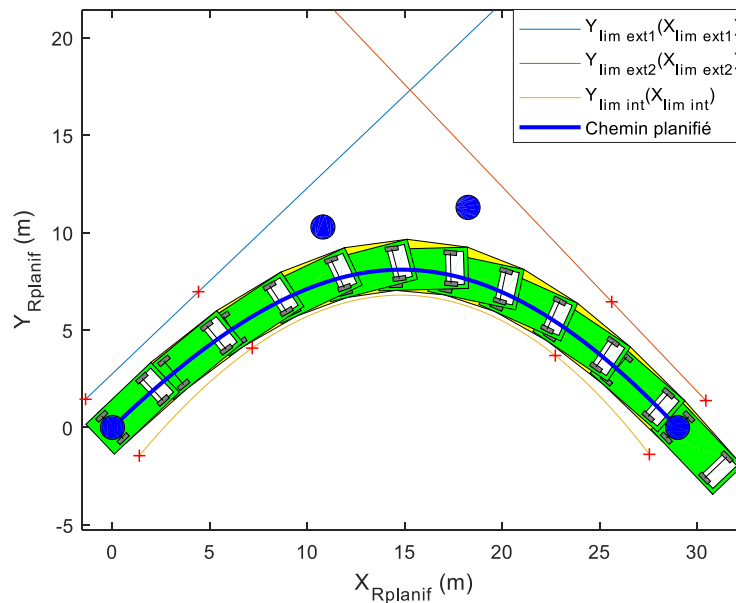
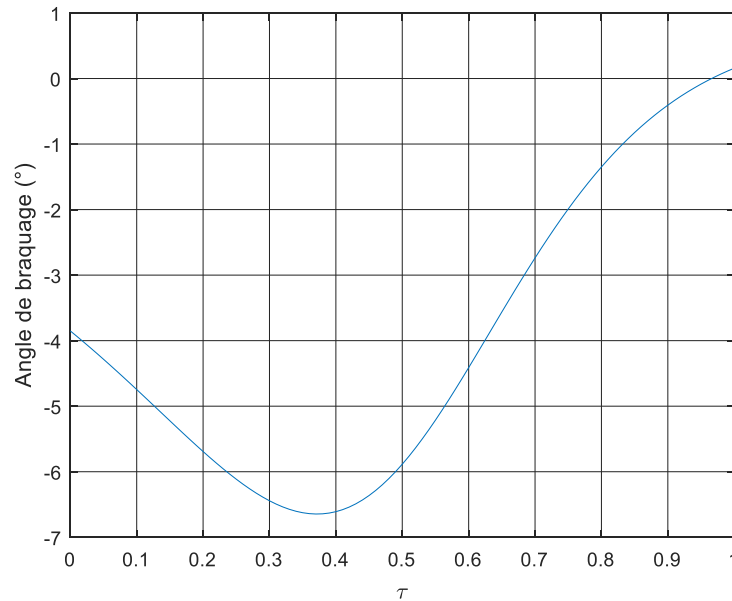


Figure 2.10 – Planification du chemin dans le repère de planification

L'angle de braquage des roues, le long du chemin obtenu, est présenté en figure 2.11. On peut constater qu'il varie entre  $0.1^\circ$  et  $-6.6^\circ$ , ce qui respecte les contraintes (2.27).



**Figure 2.11** – Angle de braquage  $\varphi_\tau(\tau)$  en fonction de la variable spatiale  $\tau$  le long du chemin obtenu

Le chemin planifié est représenté sur la cartographie à la figure 2.12. On constate qu'il permet effectivement au véhicule de rester dans sa voie de départ et sa voie d'arrivée, cependant il ne permettrait pas à un véhicule sur les voies de sens opposé de pouvoir passer sans adapter sa vitesse. Ce cas précis illustre bien l'utilité de la maximisation du critère pour une manœuvre de type tourner à gauche. En effet, maximiser le critère fait tendre la solution vers un chemin permettant de tangenter avec le véhicule l'extérieur du virage au contraire de la minimisation du critère qui fait tendre la solution vers un chemin permettant de tangenter avec le véhicule l'intérieur du virage.

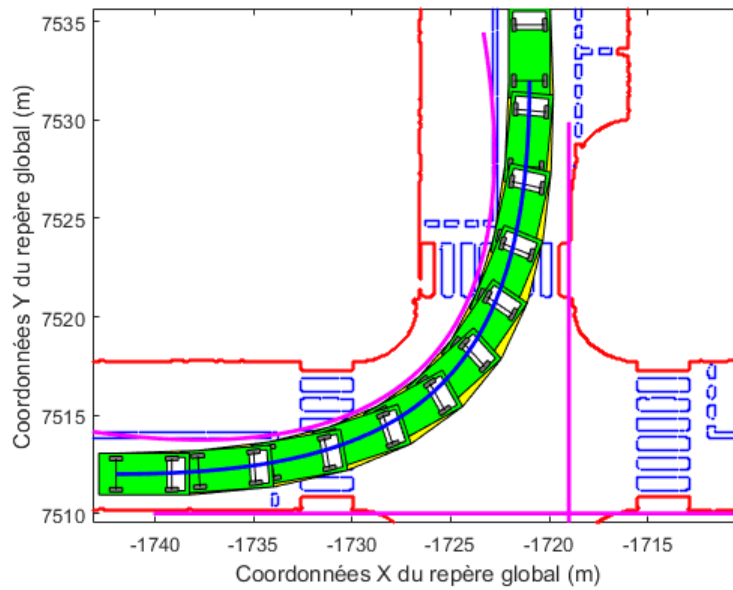


Figure 2.12 – Chemin planifié par minimisation :les interpolations des limites sont représentées en violet

### 2.2.1.2.1.2 Maximisation du critère d’optimisation

Les mêmes étapes que présentées au paragraphe précédent sont en maximisant le critère d’optimisation plutôt que de le minimiser. Le problème de maximisation est également résolu par l’algorithme dual du simplexe [Padberg, 1999]. Le chemin ainsi planifié est représenté sur la figure 2.13. On constate que le chemin obtenu passe plus loin de la limite intérieure de l’intersection que précédemment.

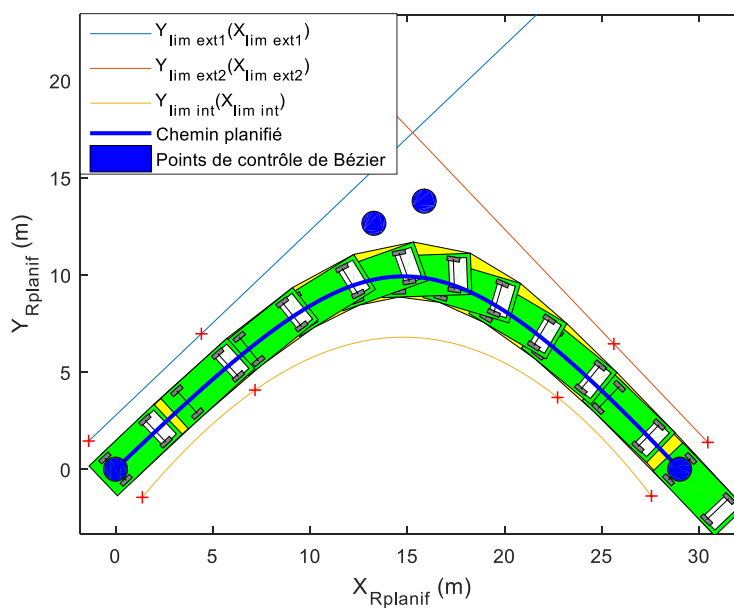


Figure 2.13 – Planification du chemin dans le repère de planification  $R_{planif}$

L'angle de braquage des roues résultant de ce chemin est présenté sur la figure 2.14. On peut constater que le maximum d'angle de braquage rencontré le long du chemin est de  $-12.3^\circ$ , ce qui est plus élevé que dans le cas précédent mais respecte les contraintes.

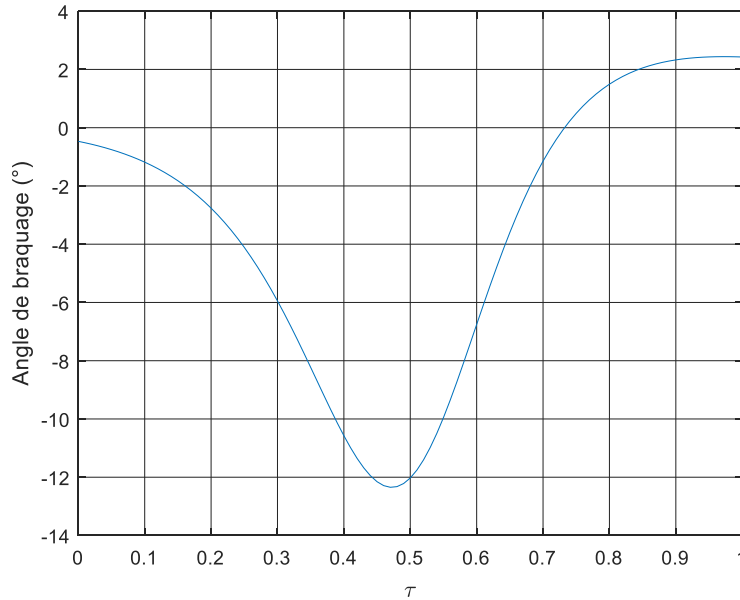
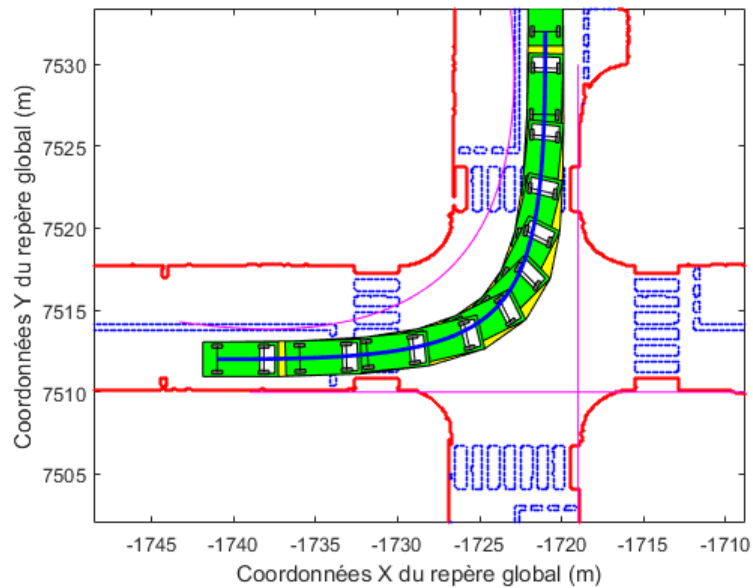


Figure 2.14 – Angle de braquage  $\varphi_\tau(\tau)$

Le chemin planifié est représenté sur la cartographie à la figure 2.15. On constate, comme dans le cas précédent, qu'il permet effectivement au véhicule de rester dans sa voie de départ et sa voie d'arrivée, à la différence, que ce chemin permet maintenant à un véhicule sur les voies de sens opposé de pouvoir passer sans adapter sa vitesse.



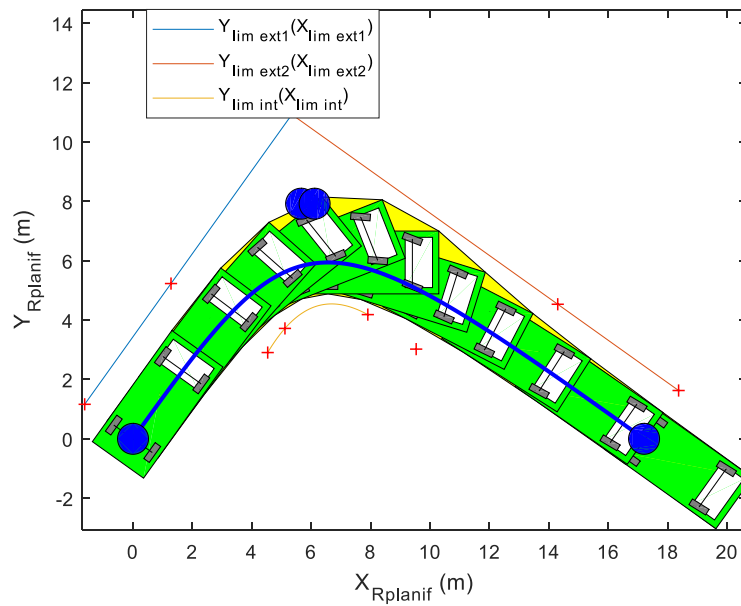
**Figure 2.15** – *Chemin planifié par maximisation du critère : les interpolations des limites sont représentées en violet*

### 2.2.1.2.2 Scénario « tourner à droite » dans une intersection en T

Dans ce scénario, l’ego-véhicule arrive dans une intersection en T et doit tourner à droite. La cartographie utilisée pour planifier le chemin dans ce scénario est celle présentée en figure 2.9. Elle permet de déduire huit points, utilisés afin de calculer les interpolations définies au paragraphe §2.2.1.1.2 :

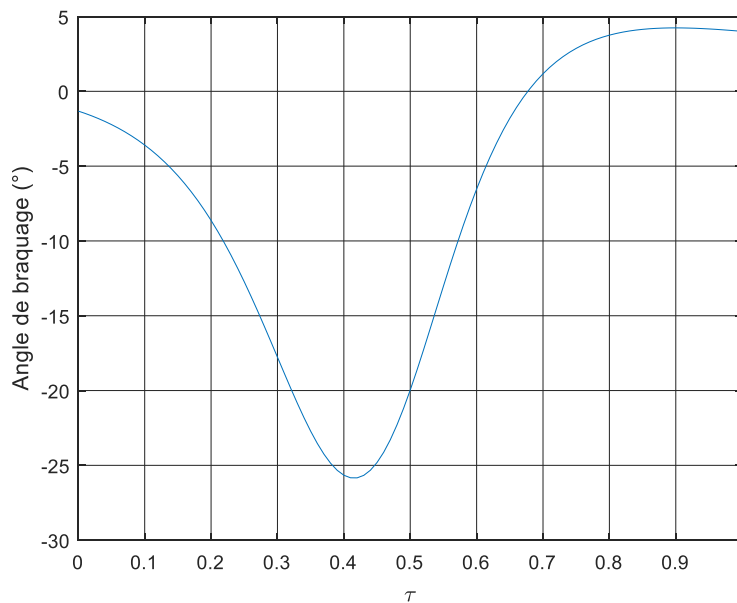
- quatre points sur les limites extérieures au virage comme précédemment ;
- quatre points répartis sur la section courbe de la limite intérieure au virage.

Un changement de repère est effectué par la méthode présentée au §2.1.1.3 pour se placer dans le repère de planification. Les interpolations obtenues sont présentées sur la figure 2.16. Le problème de minimisation présenté au paragraphe §2.2.1.1 est résolu par l’algorithme dual du simplexe. Le chemin ainsi planifié est représenté sur la figure 2.16. On constate que ce chemin passe proche de la limite intérieure de l’intersection.



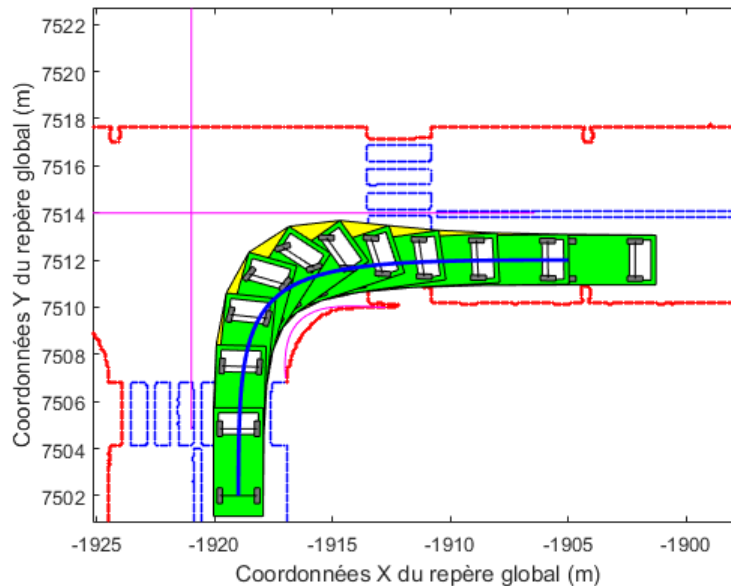
**Figure 2.16** – Planification du chemin dans le repère de planification  $R_{Rplanif}$  dans le cas d'un tourner à droite dans une intersection en T

L'angle de braquage des roues résultant de ce chemin est présenté sur la figure 2.17. On peut constater que le maximum d'angle de braquage rencontré le long du chemin est de  $-25.8^\circ$ , ce qui est le plus élevé rencontré dans ce paragraphe de simulation de part le fait que le virage est plus serré que dans les exemples précédents. Ce maximum de braquage respecte les contraintes.



**Figure 2.17** – Angle de braquage  $\varphi_\tau(\tau)$

Le chemin planifié est représenté sur la figure 2.18. On constate, comme dans le cas précédent, que le chemin planifié permet effectivement au véhicule de rester dans sa voie de départ et sa voie d'arrivée. De plus, le véhicule n'empiète ni sur le trottoir, ni sur les espaces de l'intersection dédiés aux autres voies.



**Figure 2.18** – *Chemin planifié recalculé dans le repère global dans le cas d'un tourner à droite dans une intersection en T : les interpolations des limites sont représentées en violet*

### 2.2.1.3 Limites et avantages

Cette méthode est assez simple à mettre en œuvre, elle ne demande de connaître que très peu de points sur la cartographie mais en contrepartie, les incertitudes sur ces points sont préjudiciables à cette méthode. Aucune garantie sur la robustesse de cette méthode n'est apportée.

Il est également utile de noter que cette méthode ne permet pas d'obtenir des chemins complexes c'est-à-dire avec un ou plusieurs points d'inflexion. Ainsi, il est possible de ne pas obtenir de solution dans les cas singuliers où l'intersection est trop étroite.

Enfin, l'algorithme issu de cette méthode n'est en l'état pas utilisable en temps réel avec un temps de calcul moyen sur les simulations présentées de 1.2s. Néanmoins, cet algorithme n'est pas destiné à un usage en temps réel.

## 2.2.2 Méthode 2 : Interpolation de Bézier

Dans ce paragraphe, une alternative à la méthode 1 est présentée. Cette nouvelle méthode cherche à diminuer le temps de calcul de la précédente et à améliorer la qualité de l'interpolation des données de la cartographie. Deux algorithmes de manipulations des courbes de Bézier sont utilisés : une interpolation par la méthode des moindres carrés et le décalage de courbes de Bézier.

### 2.2.2.1 Principe

#### 2.2.2.1.1 Interpolation par la méthode des moindres carrés

Comme expliqué dans le paragraphe §2.1.2, il est considéré que les limites de la route sont données par une cartographie sous forme d'un vecteur de points. L'idée est de traduire l'environnement de l'égo-véhicule en courbes de Bézier, facilitant ainsi l'analyse de la situation notamment par l'utilisation d'un algorithme de recherche d'intersection entre deux courbes de Bézier. L'algorithme d'interpolation utilisé ensuite est de type moindres carrés [63].

L'objectif est d'utiliser  $P_\tau(\tau)$ , une courbe de Bézier telle que définie au paragraphe §1.4.1.1.4.3, afin d'interpoler les  $N$  points contenus dans  $P_{data}$  le vecteur de données issues de la cartographie. La méthode proposée ici consiste à trouver les paramètres  $P_1$  et  $P_2$  de la fonction d'interpolation qui minimisent les distances quadratiques entre les points de données et des points estimés par la fonction d'interpolation, c'est-à-dire le critère :

$$J(P_1, P_2) = \sum \|P_{data} - P_\tau(P_1, P_2)\|_2^2. \quad (2.47)$$

où  $P_1$  et  $P_2$  sont les points de contrôle 1 et 2 de  $P_\tau$ , et la dépendance de  $P_\tau$  à ces derniers est mise en avant au travers de la notation particulière  $P_\tau(P_1, P_2)$ .

Un polynôme de Bézier est constitué d'une composante en  $X$  et d'une composante en  $Y$ . Ces deux composantes quasiment indépendante et seulement liées de manière implicite par la variable spatiale  $\tau$ . Ainsi, l'utilisation de la méthode des moindres carrés dans ce cas précis, revient à minimiser de manière indépendantes deux critères relatifs aux deux composantes de Bézier :

$$J_x(X_1, X_2) = \sum (X_{data} - X_\tau(X_1, X_2))^2 \quad (2.48)$$



et

$$J_y(X_1, X_2) = \sum (Y_{data} - Y_\tau(Y_1, Y_2))^2. \quad (2.49)$$

Si l'interpolation est parfaite c'est-à-dire tous les points de données sont sur la courbe et que les valeurs des variables spatiales associées  $\tau_1 \dots \tau_N$  sont connues,

$$X_{Data} = A \begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} \text{ avec } A = \begin{bmatrix} (1 - \tau_1)^3 & 3\tau_1(1 - \tau_1)^2 & 3\tau_1^2(1 - \tau_1) & \tau_1^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (1 - \tau_N)^3 & 3\tau_N(1 - \tau_N)^2 & 3\tau_N^2(1 - \tau_N) & \tau_N^3 \end{bmatrix}. \quad (2.50)$$

et

$$Y_{Data} = A \begin{bmatrix} Y_0 \\ Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{bmatrix} \text{ avec } A = \begin{bmatrix} (1 - \tau_1)^3 & 3\tau_1(1 - \tau_1)^2 & 3\tau_1^2(1 - \tau_1) & \tau_1^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (1 - \tau_N)^3 & 3\tau_N(1 - \tau_N)^2 & 3\tau_N^2(1 - \tau_N) & \tau_N^3 \end{bmatrix}. \quad (2.51)$$

Si, de plus, les points de départ et d'arrivée sont connus alors :

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = (A_{12}^t A_{12})^{-1} A_{12} (P_{data} - A_0 X_0 - A_3 X_3) \quad (2.52)$$

et

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = (A_{12}^t A_{12})^{-1} A_{12} (P_{data} - A_0 Y_0 - A_3 Y_3) \quad (2.53)$$

$$\text{où } A_{12} = \begin{bmatrix} 3\tau_1(1 - \tau_1) & 3\tau_1^2(1 - \tau_1) & \tau_1^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 3\tau_N(1 - \tau_N)^2 & 3\tau_N^2(1 - \tau_N) & \tau_N^3 \end{bmatrix}, \quad A_0 = \begin{bmatrix} (1 - \tau_1)^3 \\ \vdots \\ (1 - \tau_N)^3 \end{bmatrix} \text{ et } A_3 = \begin{bmatrix} \tau_1^3 \\ \vdots \\ \tau_N^3 \end{bmatrix},$$

ou bien encore  $A = [A_0 \ A_{12} \ A_3]$ .

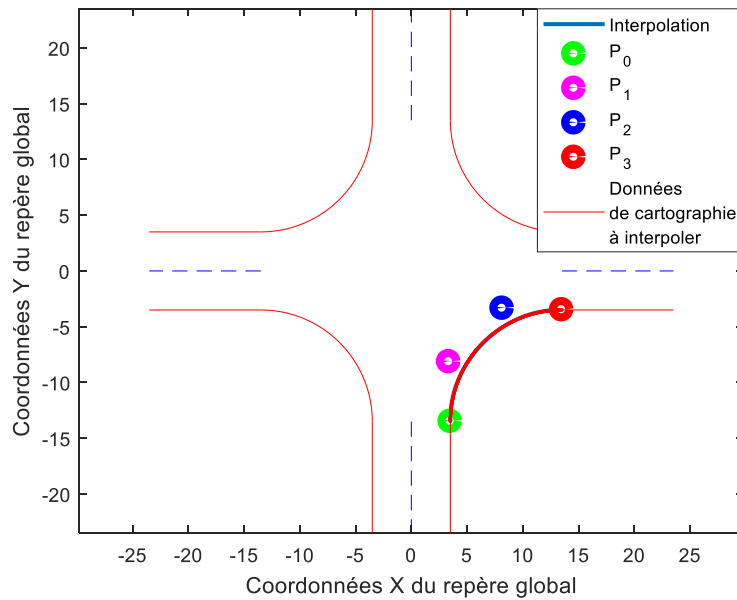
En pratique, aucune variable spatiale n'est liée aux points de la cartographie. Il est donc nécessaire d'associer à chaque point une valeur de la variable  $\tau$ . Pour cela, il est possible de lier la variable  $\tau$  à l'abscisse curviligne notée  $s_\tau(k)$  dans le cas discret. L'expression de  $s_\tau(k)$  est en effet donnée par :

$$s_\tau(k) = \sum_{j=2}^k \sqrt{(X_{data}(j) - X_{data}(j-1))^2 + (Y_{data}(j) - Y_{data}(j-1))^2}. \quad (2.54)$$

La variable  $\tau$  variant de 0 à 1 lorsque que le chemin est parcouru, il est nécessaire de normaliser  $s_\tau(k)$ . Si l'on considère un vecteur de  $N$  points à interpoler, au  $k^{i\grave{e}me}$  point de  $P_{data}$  est associé un  $\tau_k$  conformément à :

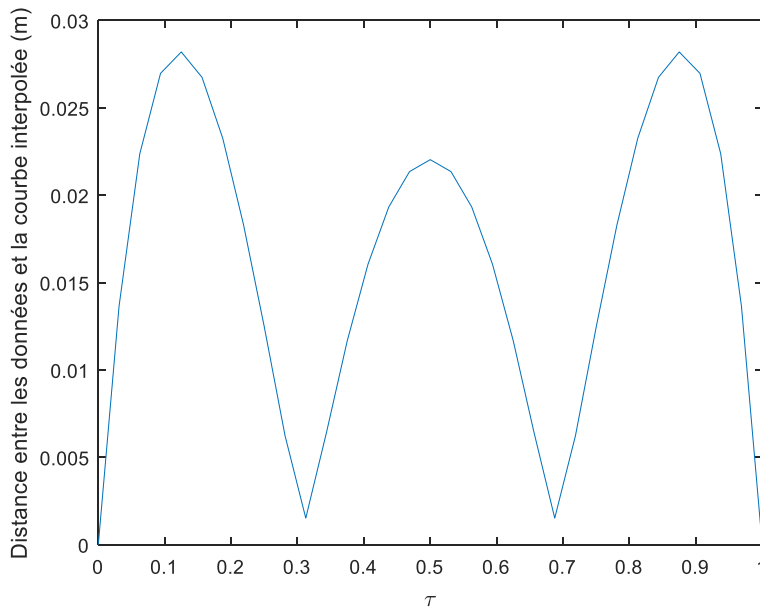
$$\tau_k = \frac{s_\tau(k)}{s_\tau(N)} \text{ avec } k \in [2, N]. \quad (2.55)$$

Pour exemple, on considère que l'on souhaite interpoler une limite de la route, donnée par une cartographie, par une courbe de Bézier. Trente points sont choisis comme données d'entrées et répartis de manière uniforme sur toute cette limite. L'interpolation telle que décrite précédemment est alors réalisée. Les résultats sont présentés sur la figure 2.19.



**Figure 2.19:** Intersection en croix générique et interpolation de la limite intérieure

À première vue, la courbe de Bézier colle parfaitement aux données de la cartographie. Cette observation est renforcée par la figure 2.20 qui représente la distance entre la courbe d'interpolation et les données pour chaque valeur de  $\tau$  calculée à l'aide de la relation (2.55). En effet, l'écart maximal est de moins de 3 cm.



**Figure 2.20:** *Distance entre la courbe d'interpolation et les données de cartographie en fonction de  $\tau$*

La qualité de l'interpolation obtenue par la solution des moindres carrés dépend de la qualité des données de la cartographie notamment associée à leur précision, ainsi que du ratio précision/complexité souhaité. Plus l'ordre du polynôme de Bézier utilisé pour l'interpolation est élevé, plus l'erreur d'interpolation est faible. Cependant, et comme expliqué précédemment, l'interpolation par courbe de Bézier cubique est utilisée pour sa simplicité de manipulation, notamment due aux nombreux algorithmes disponibles pour cela.

### 2.2.2.1.2 Décalage d'une courbe de Bézier

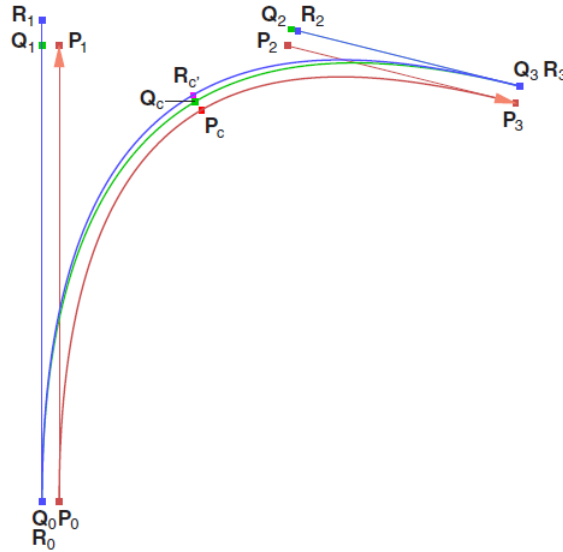
Maintenant qu'une interpolation de la limite intérieure de la voie est disponible, il est possible, de la décaler afin de la faire coïncider avec les milieux de voie. Ce décalage est appelé « offsetting » et consiste à décaler chaque point qui la compose d'une distance fixe donnée, dans la direction des vecteurs normaux à la courbe en ces points.

L'interpolation par courbe de Bézier permet de « recopier » la courbure de la route. Les routes étant construites afin de faciliter la circulation des véhicules, les courbures de route respectent des limites de braquage d'un véhicule moyen. Si l'on s'intéresse aux différents rapports du Service d'Étude Techniques des Routes et Autoroutes [64] sur l'aménagement des carrefours interurbains, il peut être constaté que la SETRA préconise que le rayon de courbure de la voie en entrée de l'intersection soit égale à deux fois la largeur de la route. Les largeurs de la route variant entre 7 m et 5 m, le rayon de courbure peut donc varier entre 10 m et 14 m. Or l'angle de braquage  $\varphi$  est égale à  $\text{atan}\left(\frac{d}{R}\right)$ , où  $d$  est l'empattement du véhicule et  $R$  le rayon de courbure de la route. En prenant le rayon de courbure minimale de 10m et la limite de braquage fixée à  $30^\circ$ , on obtient un empattement de 5.8 m ce qui est caractéristique des poids lourds. Ainsi, si les préconisations de la SETRA sont respectées, les rayons de courbures des routes permettent effectivement à la majorité des véhicules de respecter leurs limites de braquage.

S'il existe au moins une courbe de Bézier permettant de respecter les contraintes d'encombrement, alors la courbe issue de l'offsetting respectant la forme de la limite intérieure et positionnée au milieu de la voie respecte ces contraintes ;

Si les deux hypothèses précédentes sont vérifiées alors les contraintes définies au paragraphe §2.1.2 sont toutes vérifiées.

Le principe est d'exprimer les tangentes aux points paramétrés par  $\tau = 0, 0.5$  et  $1$ . Ensuite il suffit d'exprimer les vecteurs normaux à ces tangentes de normes égales à l'offset désiré. Il suffit enfin de résoudre un système d'équations afin d'obtenir les paramètres de la nouvelle courbe. Cependant, il est à noter que l'offsetting d'une courbe de Bézier n'est pas une courbe Bézier. Néanmoins, il est possible d'approximer cette courbe par une courbe de Bézier. Afin d'obtenir la meilleure approximation possible, il est nécessaire de résoudre un autre système d'équations afin d'ajuster les nouveaux paramètres de la courbe de Bézier. Cette démarche est expliquée au travers de la figure 2.21 et le détail des calculs est présenté dans [65].

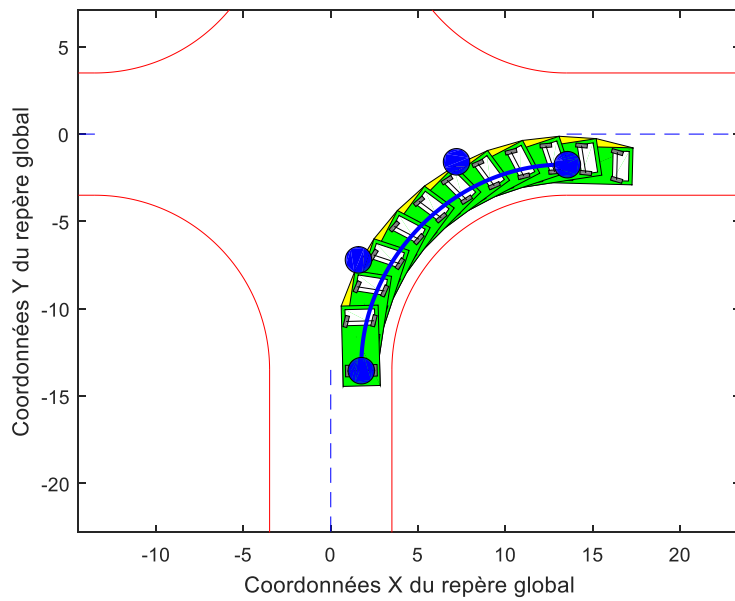


**Figure 2.21:** *Offsetting d'une courbe de Bézier : en rouge la courbe originale ( $P_0, P_c, P_3$ ), en bleu l'approximation de la courbe de Bézier après offset ( $R_0, R_c, R_3$ ) et en vert la courbe de Bézier finale après ajustement ( $Q_0, Q_c, Q_3$ )*

Ainsi, avec un tel algorithme, il est possible, à partir de l'interpolation de Bézier des données des limites de route issues de la cartographie, d'obtenir une trajectoire de l'essieu arrière dont la courbure est approximativement égale à la courbure de la route. Cet algorithme est appliqué à deux exemples de scénario avec utilisation de données de cartographie (déjà utilisées au paragraphe §2.2.1.2).

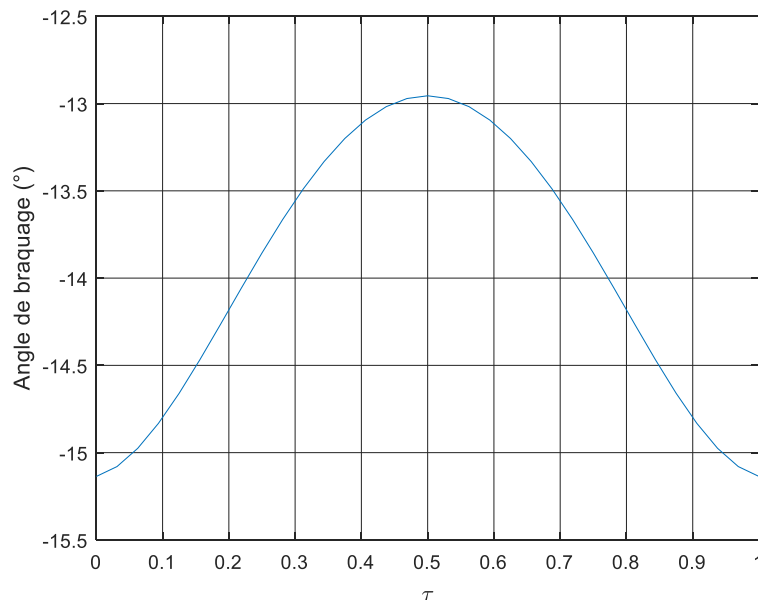
### 2.2.2.1.2.1 Exemple : « tourner à droite dans une intersection en croix »

Ce premier exemple est la continuité de celui présenté en paragraphe §2.2.2.1.1. À partir de l'interpolation de la limite intérieure du virage, l'algorithme d'offsetting est utilisé afin de décaler la courbe obtenue d'une distance égale à la demi largeur de voie. Le sens de décalage dépend du sens des vecteurs normaux de la courbe. Si le sens de décalage est opposé au sens des vecteurs normaux, il faut alors utiliser un offset négatif en entrée de la fonction. Dans notre cas, les vecteurs normaux sont dirigés vers l'extérieur de la courbe, c'est-à-dire dans le même sens que le décalage souhaité. Le résultat de ce décalage est présenté en figure 2.22.



**Figure 2.22:** *Chemin à suivre planifié par la combinaison de l'interpolation de la limite de la voie et l'offsetting de la courbe au milieu de voie*

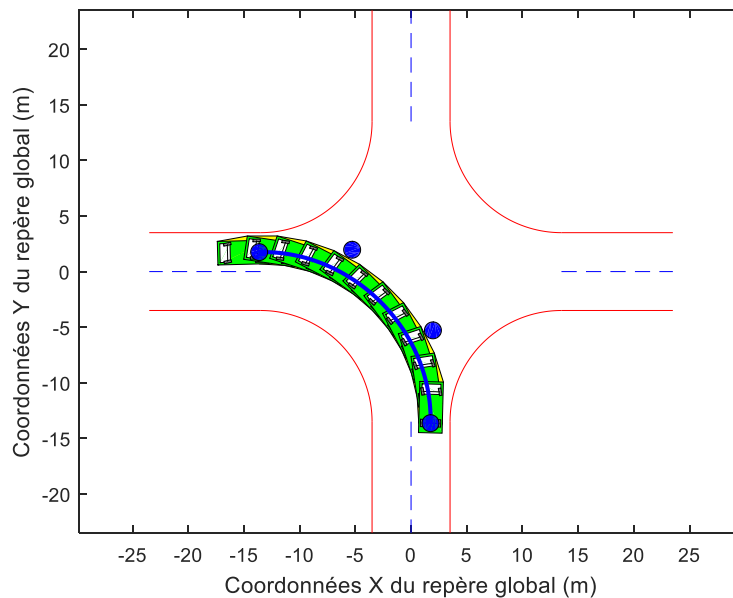
On constate que l'égo-véhicule reste effectivement dans sa voie, cependant la marge sur la limite extérieure dans la voie d'arrivée n'est que de 12 cm. De plus, la figure 2.23 présente le profil de braquage résultant du chemin planifié. Le braquage respecte les limites de la contrainte associée.



**Figure 2.23 :** *Braquage résultant du chemin à suivre planifié par la combinaison de l'interpolation de la limite de la voie et l'offsetting de la courbe au milieu de voie*

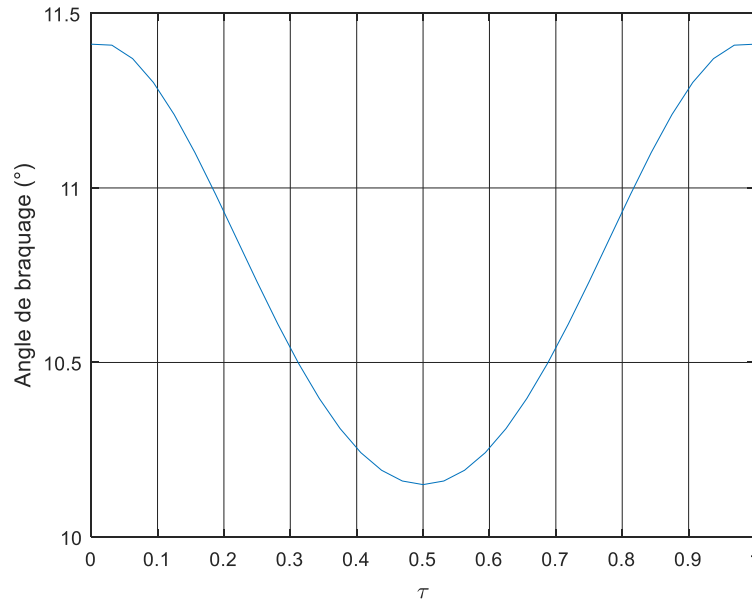
### 2.2.2.1.2.2 Exemple : « tourner à gauche dans une intersection en croix »

Le deuxième exemple consiste à utiliser cette méthode afin de tourner à gauche dans une intersection en croix. Cet exemple est en tout point identique à l'exemple précédent, la seule différence réside dans la valeur de la distance de décalage. En effet, à partir de l'interpolation de la limite intérieure du virage, l'algorithme de décalage est utilisé afin de décaler cette interpolation d'une distance égale à trois fois la demi-largeur de voie. Comme précédemment, les vecteurs normaux sont dirigés vers l'extérieur de la courbe, c'est-à-dire dans le même sens que le décalage souhaité. Le résultat de ce décalage est présenté sur la figure 2.24.



**Figure 2.24:** *Chemin à suivre planifié par la combinaison de l'interpolation de la limite de la voie et le décalage de la courbe au milieu de voie*

On constate que l'égo-véhicule reste effectivement dans sa voie et cette fois la marge sur la limite extérieure dans la voie d'arrivée est supérieure puisqu'elle est de 30 cm. La figure 2.25 présente le profil de braquage résultant du chemin planifié. Le maximum de braquage est de  $11.41^\circ$  ce qui correspond à environ 30% de l'amplitude de braquage limite et respecte ainsi la contrainte associée.



**Figure 2.25 :** Braquage résultant du chemin à suivre planifié par la combinaison de l'interpolation de la limite de la voie et l'offsetting de la courbe au milieu de voie pour le scénario « tourner à gauche dans une intersection en croix »

### 2.2.2.2 Simulations

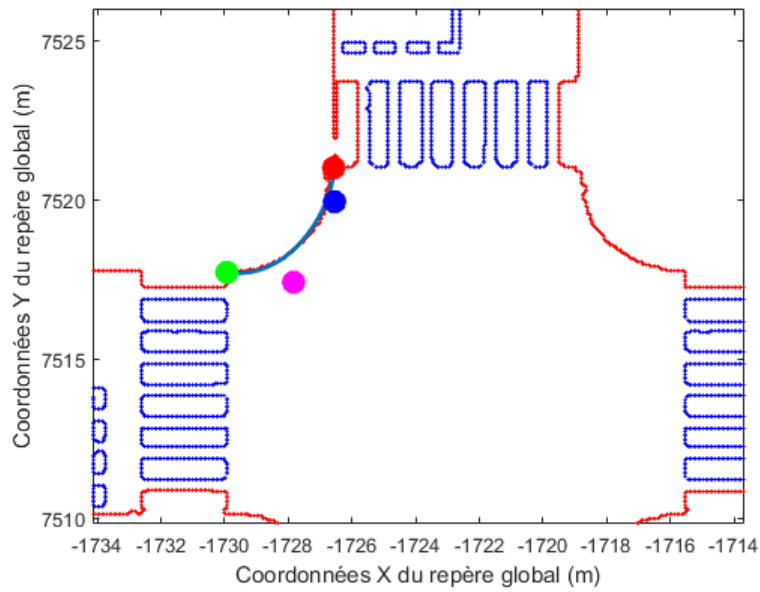
Les exemples précédents ont permis d'illustrer l'utilisation de cette méthode pour la planification de chemin. Les contraintes d'encombres et de braquage sont respectées dans les exemples traités. Cependant, les données d'entrées issues de la cartographie sont idéalisées et peu représentatives de la réalité. Les deux scénarios réalistes présentés au paragraphe §2.2.1.2, avec leurs cartographies respectives, sont réutilisés dans cette partie. Les cartographies utilisées sont imparfaites dans le sens où les limites de la route ne sont pas lisses, ce qui s'approche plus d'un contexte de données bruitées par rapport aux exemples précédents.

#### 2.2.2.2.1 Scénario « tourner à gauche dans une intersection en croix »

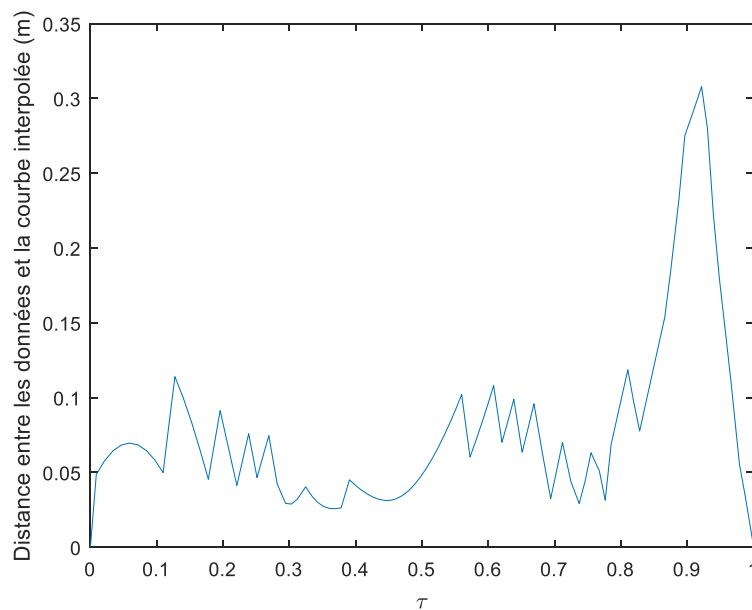
La méthode est appliquée au scénario « tourner à gauche dans une intersection en croix ». La limite intérieure de la route est interpolée par une courbe de Bézier cubique. Afin d'améliorer la qualité de l'interpolation, seule la partie de la limite présentant une courbure est interpolée. La figure 2.26 présente le résultat de l'interpolation sur la



cartographie tandis que la figure 2.27 présente l'erreur d'interpolation au travers de la distance entre les données et la courbe interpolée.

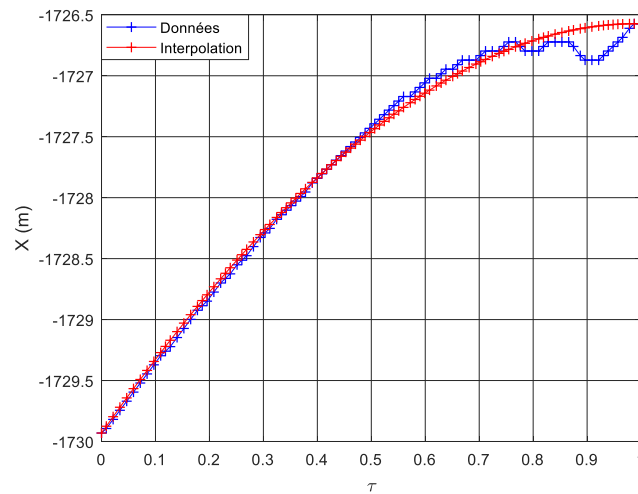


**Figure 2.26:** Résultats de l'interpolation de Bézier cubique sur le scénario « tourner à gauche dans une intersection en croix »

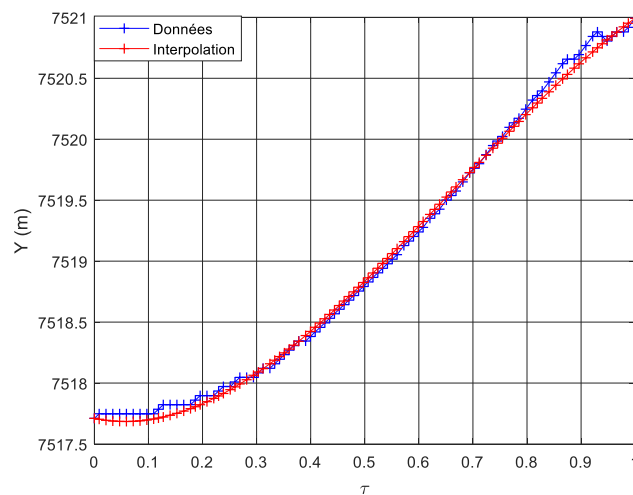


**Figure 2.27:** Distance entre interpolation et données de cartographie

L'erreur d'interpolation maximale est de 30 cm. Or si l'ego-véhicule suit parfaitement le milieu de voie, on peut espérer une marge sur les contraintes de limites de voies d'environ la demi largeur de voie moins la demi-largeur du véhicule. Dans le cas présenté ici, cette marge est de 60 cm, par conséquent, dans le pire des cas, l'erreur d'interpolation peut réduire notre marge de moitié. Cette erreur d'interpolation est essentiellement due à la qualité des données de cartographie. En effet, les figure 2.28 (a) et (b) permettent de comparer, d'une part les composantes en X des données avec les composantes en X de l'interpolation et d'autre part, les composantes en Y des données avec les composantes en Y de l'interpolation. On constate des variations rapides sur les données qui ne peuvent être captées par une courbe de Bézier.



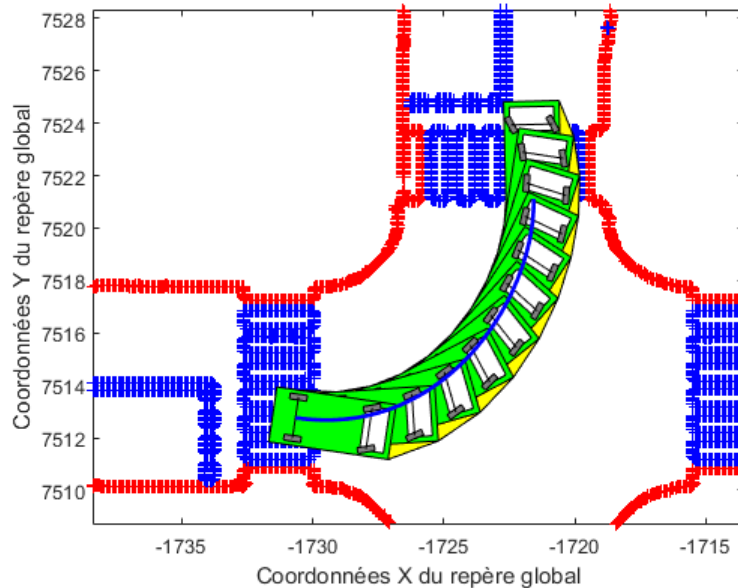
(a)



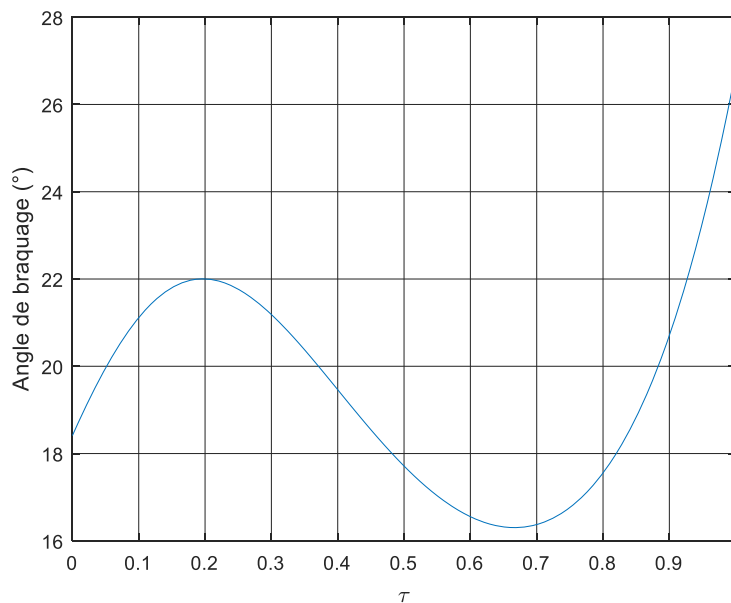
(b)

**Figure 2.28:** *Différence entre données et interpolation pour la composante en X (a) et la composante en Y (b) dans le cas du scénario « tourner à gauche dans une intersection en croix »*

Enfin les figure 2.29 et figure 2.30 représentent respectivement le chemin planifié dans la cartographie et le profil de braquage associé. Il peut être constaté que la direction de départ de l'égo-véhicule n'est pas parallèle à la voie de départ. De plus, la contrainte d'encombrement intérieure n'est pas respectée à l'arrivée. Finalement, le braquage maximal est de  $26.7^\circ$  soit 89% du maximum de braquage autorisé.



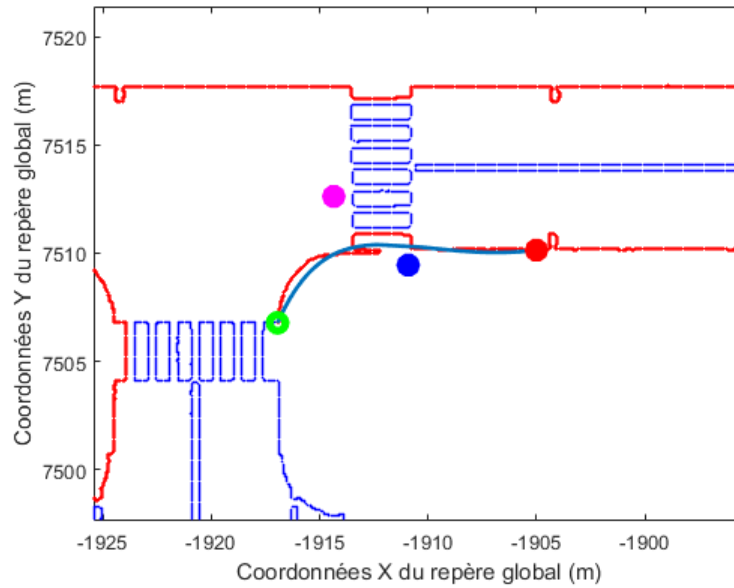
**Figure 2.29:** *Chemin à suivre planifié par la combinaison de l'interpolation de la limite de la voie et le décalage de la courbe au milieu de voie*



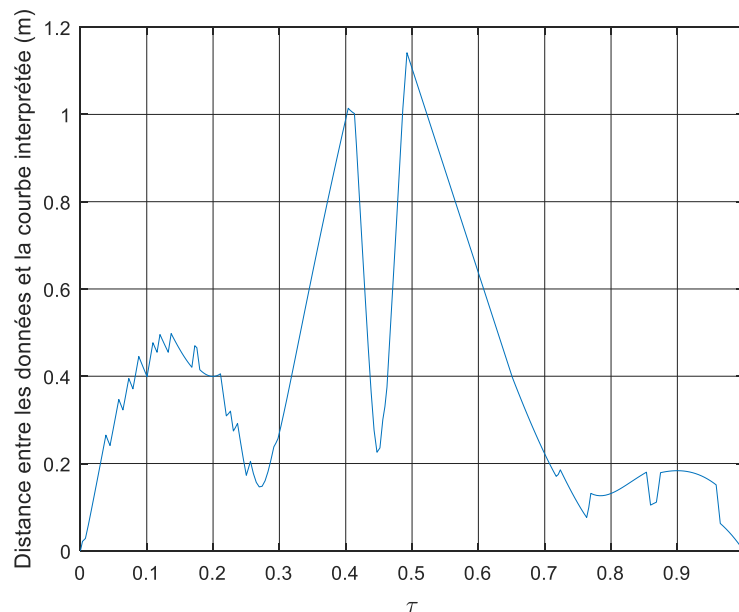
**Figure 2.30:** *Braquage résultant du chemin à suivre planifié par la combinaison de l'interpolation de la limite de la voie et le décalage de la courbe au milieu de voie*

### 2.2.2.2.2 Scénario « tourner à droite » en intersection en T

De la même manière que précédemment, la méthode est appliquée au scénario « tourner à droite dans une intersection en T ». La limite intérieure de la route est interpolée par une courbe de Bézier cubique. La figure 2.31 présente le résultat de l'interpolation sur la cartographie tandis que la figure 2.32 présente l'erreur d'interpolation au travers de la distance entre les données de la cartographie et la courbe d'interpolation.

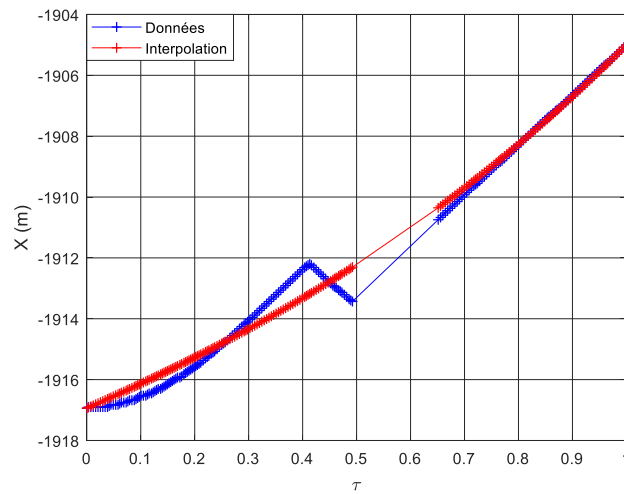


**Figure 2.31:** Résultats de l'interpolation de Bézier cubique pour le scénario « tourner à droite dans une intersection en T »

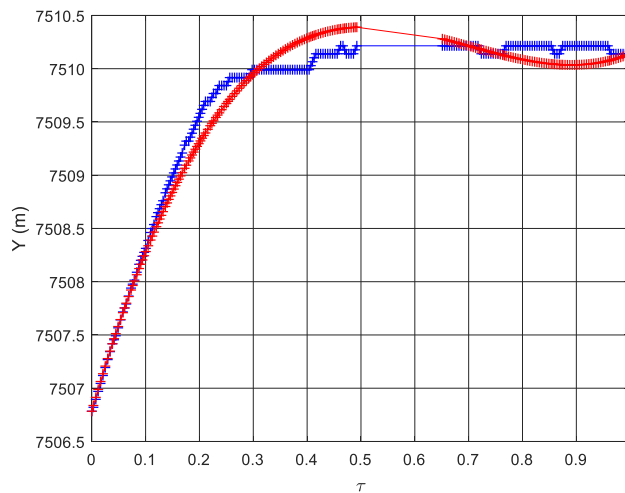


**Figure 2.32:** Distance entre l'interpolation et les données de cartographie pour le scénario « tourner à droite dans une intersection en T »

L'erreur d'interpolation maximale est de 1.1 m, une telle erreur ne permet pas de satisfaire par la suite les contraintes d'encombrement. Cette erreur d'interpolation est essentiellement due à la qualité des données de cartographie. En effet, la figure 2.33 permet de comparer, d'une part, les composantes en X des données avec les composantes en X de l'interpolation et d'autre part, les composantes en Y des données avec les composantes en Y de l'interpolation. On constate non seulement des variations trop importantes sur les données mais également une absence de données dans l'intervalle  $\tau \in [0.5; 0.65]$ . Tous ces facteurs conduisent à une interpolation encore moins fiable que précédemment.



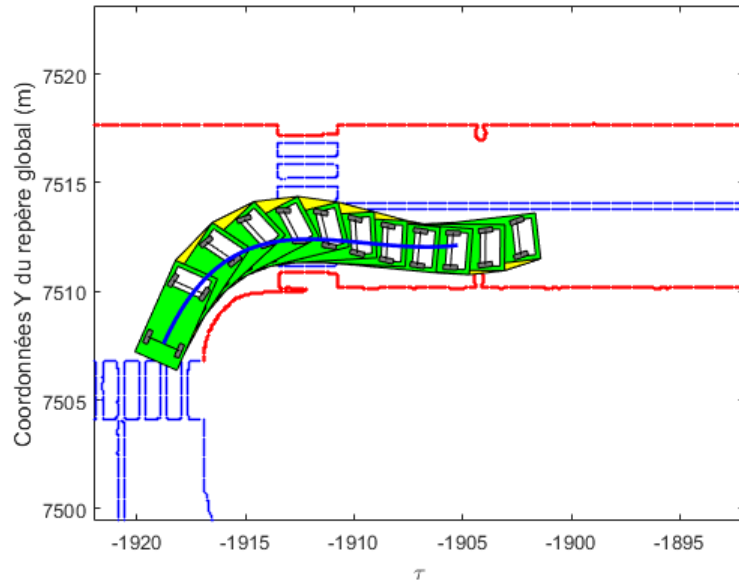
(a)



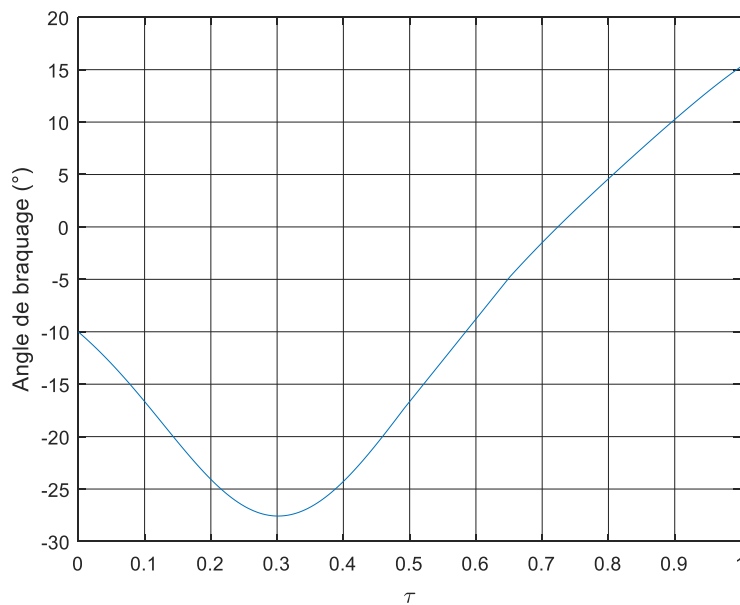
(b)

**Figure 2.33 :** Différence entre les données et l'interpolation pour la composante en X (a) et la composante en Y (b) pour le scénario « tourner à droite dans une intersection en T »

Enfin les figure 2.34 et figure 2.35 représentent respectivement le chemin planifié dans la cartographie et le profil de braquage associé. On constate que la contrainte d'encombrement extérieure n'est pas respectée. Finalement, le braquage maximal est de  $-27.8^\circ$  soit 93% de la limite de braquage.



**Figure 2.34:** *Chemin à suivre planifié par la combinaison de l'interpolation de la limite de la voie et le décalage de la courbe au milieu de voie pour le scénario « tourner à droite dans une intersection en T »*



**Figure 2.35:** *Braquage résultant du chemin à suivre planifié par la combinaison de l'interpolation de la limite de la voie et l'offsetting de la courbe au milieu de voie pour le scénario « tourner à droite dans une intersection en T »*

### 2.2.2.3 Limites et avantages

Cette méthode permet d'obtenir rapidement (0.14s), une solution respectant les contraintes. Cependant, la validité de cette solution est tout de même limitée par la qualité de l'approximation, par la qualité des données de cartographie et par le rayon de courbure de la route. En effet, si ce dernier est trop faible, la contrainte de braquage n'est plus respectée. Enfin pour un rayon de braquage nul (intersection à angle droit), cette méthode n'est plus du tout adaptée.

### 2.2.3 Méthode 3 : Planification d'une enveloppe d'encombrement de l'ego-véhicule

Le principe de cette méthode est de planifier les chemins suivis par les enveloppes d'encombrement de l'ego-véhicule. Les contraintes d'encombrement étant directement liées aux enveloppes, la complexité du problème de planification de chemin devrait être réduite. Cependant, au vu des équations liant les enveloppes au point milieu de l'essieu arrière (cf equations (1.7) et (1.8)), on ne peut que constater que si l'on impose à un point quelconque du véhicule un chemin défini par une courbe de Bézier alors les chemins suivis par tout autre point du véhicule n'est pas une courbe de Bézier, notamment à cause des termes en  $\cos(\theta_\tau(\tau))$  ou en  $\sin(\theta_\tau(\tau))$ . Ainsi, planifier le chemin d'un seul point du véhicule détermine le chemin de tous les points.

#### 2.2.3.1 Principe

Afin de planifier le chemin d'un point du véhicule, il est nécessaire de connaître l'expression du lacet  $\theta$ . Or  $\theta$  s'exprime à partir du vecteur vitesse du point milieu de l'essieu arrière. La première étape consiste donc à exprimer  $\theta$  en fonction du vecteur vitesse du point décrivant le chemin à planifier.

### 2.2.3.1.1 Expression de la vitesse de lacet en fonction d'un point quelconque du véhicule

Soit  $P$  le point milieu de l'essieu arrière et  $M$  un point quelconque appartenant au véhicule exprimés tous les deux dans le repère  $R_0$ . Soit la vitesse de lacet notée  $\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt}$ , la vitesse du point  $M$  s'exprime alors :

$$\vec{V}_M = \vec{V}_P + \dot{\theta} \cdot \vec{z} \wedge \vec{PM} \quad (2.56)$$

où  $\vec{V}_M = \frac{d\vec{OM}}{dt}$  et  $\vec{V}_P = \frac{d\vec{OP}}{dt}$ ,

ou encore,

$$\frac{d\tau}{dt} \frac{d\vec{OM}}{d\tau} = \frac{d\tau}{dt} \frac{d\vec{OP}}{d\tau} + \frac{d\tau}{dt} \frac{d\theta}{d\tau} \cdot \vec{z} \wedge \vec{PM}. \quad (2.57)$$

Finalement, on obtient :

$$\vec{V}_{\tau,M} = \vec{V}_{\tau,P} + \dot{\theta}_{\tau} \cdot \vec{z} \wedge \vec{PM} \quad (2.58)$$

où  $\vec{V}_{\tau,M} = \frac{d\vec{OM}}{d\tau}$  et  $\vec{V}_{\tau,P} = \frac{d\vec{OP}}{d\tau}$

Soit les décompositions suivantes :

$$\vec{V}_{\tau,M} = V_{\tau,M_x} \cdot \vec{i} + V_{\tau,M_y}(\tau) \cdot \vec{j}, \quad (2.59)$$

$$\vec{V}_{\tau,P} = V_{\tau,P_x} \cdot \vec{i} + V_{\tau,P_y}(\tau) \cdot \vec{j} \quad (2.60)$$

et,

$$\vec{PM} = PM_x \cdot \vec{i} + PM_y \cdot \vec{j}. \quad (2.61)$$

En projetant sur l'axe  $\vec{i}$ , on obtient:

$$V_{\tau,M_x} = V_{\tau,P_x} - \dot{\theta}_{\tau} PM_y. \quad (2.62)$$

En projetant sur l'axe  $\vec{j}$ , on obtient:

$$V_{\tau,M_y} = V_{\tau,P_y} + \dot{\theta}_{\tau} PM_x. \quad (2.63)$$



De plus

$$V_{\tau,Py} = V_{\tau,Px} \tan(\theta_{\tau}), \quad (2.64)$$

or

$$V_{\tau,Px} = V_{\tau,Mx} + \dot{\theta}_{\tau} \cdot PM_y, \quad (2.65)$$

d'où

$$V_{\tau,Py} = (V_{\tau,Mx} + \dot{\theta}_{\tau} \cdot PM_y) \tan(\theta_{\tau}) \quad (2.66)$$

et donc

$$V_{\tau,My} = (V_{\tau,Mx} + \dot{\theta}_{\tau} \cdot PM_y) \tan(\theta_{\tau}) + \dot{\theta}_{\tau} PM_x \quad (2.67)$$

c'est-à-dire,

$$V_{\tau,My} = V_{\tau,Mx} \tan(\theta_{\tau}) + \dot{\theta}_{\tau} \cdot PM_y \tan(\theta_{\tau}) + \dot{\theta}_{\tau} \cdot PM_x \quad (2.68)$$

ou

$$V_{\tau,My} = V_{\tau,Mx} \tan(\theta_{\tau}) + \dot{\theta}_{\tau} \cdot (PM_y \tan(\theta_{\tau}) + PM_x). \quad (2.69)$$

Finalement,

$$\dot{\theta}_{\tau} = \frac{V_{\tau,My} - V_{\tau,Mx} \tan(\theta_{\tau})}{PM_y \tan(\theta_{\tau}) + PM_x}. \quad (2.70)$$

Déterminer  $\theta_{\tau}$  à partir de la relation (2.70) revient à la considérer comme une équation différentielle non linéaire du premier ordre à coefficients variables pour laquelle aucune solution analytique n'a été proposée, il est cependant possible de la simuler numériquement. Pour cela, les expressions de  $PM_x$  et de  $PM_y$  doivent être déterminées. Par conséquent, deux cas particuliers sont présentés dans les paragraphes suivants : le premier lorsque  $M$  correspond au point décrivant l'enveloppe d'encombrement extérieure de l'égo-véhicule et le deuxième lorsque  $M$  correspond au point décrivant l'enveloppe d'encombrement intérieure de l'égo-véhicule.

### 2.2.3.1.2 Expression de la vitesse de lacet en fonction du point d'enveloppe d'encombrement extérieure de l'égo-véhicule

Dans ce paragraphe, il est considéré que les calculs sont effectués dans le repère de planification  $R_{planif}$ . Dans ce repère, l'enveloppe d'encombrement extérieure est décrite par le point  $A$  (cf paragraphe §1.3.2.2) tel que:

$$\overrightarrow{PA} = PA_x \cdot \overrightarrow{i_{planif}} + PA_y \cdot \overrightarrow{j_{planif}} \quad (2.71)$$

avec

$$PA_x = (L - PAF_{arr})\cos(\theta_\tau) - \frac{l}{2}\sin(\theta_\tau) \quad (2.72)$$

et

$$PA_y = (L - PAF_{arr})\sin(\theta_\tau) + \frac{l}{2}\cos(\theta_\tau). \quad (2.73)$$

En posant:

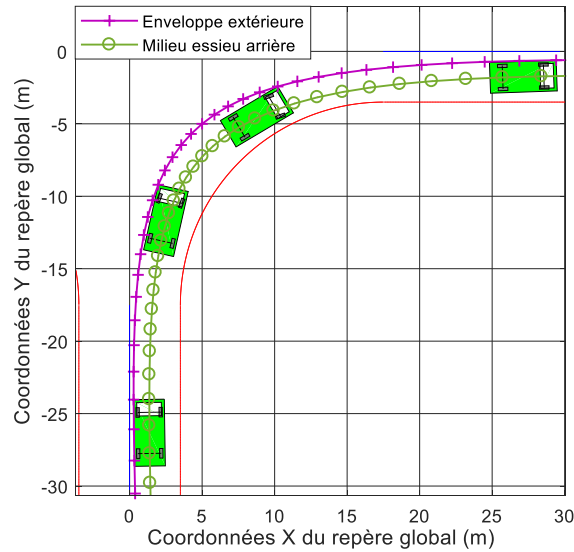
$$\begin{cases} g_1(\theta_\tau) = (L - PAF_{arr})\sin(\theta_\tau) + \frac{l}{2}\cos(\theta_\tau) \\ g_2(\theta) = (L - PAF_{arr})\cos(\theta_\tau) - \frac{l}{2}\sin(\theta_\tau) \end{cases}, \quad (2.74)$$

il vient

$$\dot{\theta}_\tau = \frac{V_{\tau,A_y} - V_{\tau,A_y} \tan(\theta_\tau)}{g_1(\theta_\tau) \tan(\theta_\tau) + g_2(\theta_\tau)}, \quad (2.75)$$

$$\text{où } \overrightarrow{V_{\tau,A}} = \frac{d\overrightarrow{OA}}{d\tau} = V_{\tau,A_x} \cdot \overrightarrow{i_{planif}} + V_{\tau,A_y} \cdot \overrightarrow{j_{planif}}.$$

Cette relation étant établie, il est maintenant possible de la simuler à l'aide de Simulink afin de planifier le chemin qui sera parcouru par le point A. Un exemple est illustré sur la figure 2.36 dans lequel le chemin suivi par le point d'enveloppe extérieure est une courbe de Bézier cubique. Le chemin suivi par le milieu de l'essieu arrière en est ensuite déduit par application des relations (2.75), (1.7) et (1.8).



**Figure 2.36:** *Chemin à suivre généré par planification de l’enveloppe extérieure du véhicule*

La faisabilité de la planification de l’enveloppe d’encombrement extérieure de l’égo-véhicule a été démontrée dans ce paragraphe. Cependant, l’utilité d’une telle démarche est limitée par le fait de devoir simuler une équation différentielle non linéaire. La même démarche est appliquée à la planification de l’enveloppe d’encombrement intérieure de l’égo-véhicule dans la partie suivante.

### 2.2.3.1.3 Expression de la vitesse de lacet en fonction de l’enveloppe intérieure du véhicule

Dans ce paragraphe, il est considéré que les calculs sont effectués dans le repère de planification  $R_{planif}$ . Dans ce repère, l’enveloppe d’encombrement intérieure est décrite par le point  $C$  (cf paragraphe §1.3.2.2) tel que:

$$\overrightarrow{PC} = PC_x \cdot \overrightarrow{i_{planif}} + PC_y \cdot \overrightarrow{j_{planif}} \quad (2.76)$$

avec

$$PC_x = \frac{l}{2} \sin(\theta_\tau) \quad (2.77)$$

et

$$PC_y = -\frac{l}{2}\cos(\theta_\tau). \quad (2.78)$$

Il vient alors :

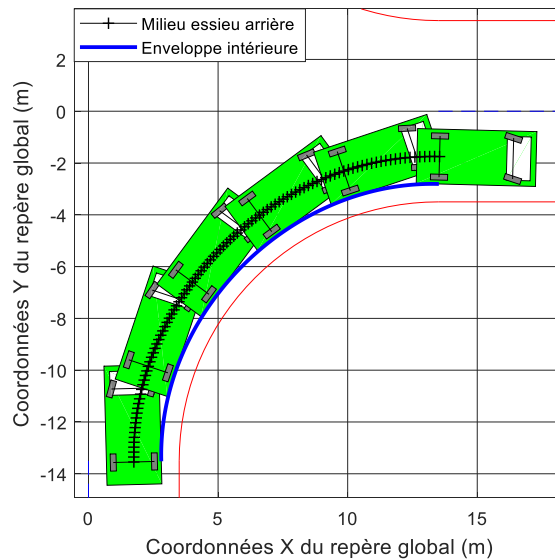
$$V_{\tau,C_y} - V_{\tau,C_x}\tan(\theta_\tau) = 0 \quad (2.79)$$

ou encore

$$\tan(\theta) = \frac{V_{\tau,C_y}}{V_{\tau,C_x}}, \quad (2.80)$$

$$\text{où } \overrightarrow{V_{\tau,C}} = \frac{d\overrightarrow{OC}}{d\tau} = V_{\tau,C_x} \cdot \overrightarrow{i_{planif}} + V_{\tau,C_y} \cdot \overrightarrow{j_{planif}}.$$

On peut donc déduire de ce résultat que le vecteur vitesse au point  $P$  est colinéaire au vecteur vitesse au point  $C$ . Ainsi, le modèle cinématique présenté en paragraphe §1.3.2.2 est donc également utilisable au point  $C$  et les méthodes développées dans ce chapitre peuvent être réutilisées dans le cadre de la planification de l'enveloppe d'englobement intérieure de l'égo-véhicule. L'exemple présenté au paragraphe §2.2.3.1.2 est repris pour la planification de l'enveloppe d'englobement intérieure de l'égo-véhicule en utilisant la méthode par interpolation de Bézier. Le chemin ainsi planifié est présenté en figure 2.37.



**Figure 2.37:** *Chemin à suivre généré par planification de l'enveloppe intérieure du véhicule*

Comme précédemment, la faisabilité de la planification de l'enveloppe d'encombrement intérieure de l'égo-véhicule est illustrée dans ce paragraphe au travers d'un exemple. L'expression de l'angle de lacet étant la même au point C ou au point milieu de l'essieu arrière, il n'y a pas d'augmentation de la complexité calculatoire par rapport à la planification du chemin décrit par le point milieu de l'essieu arrière, elle est donc utilisable au même titre.

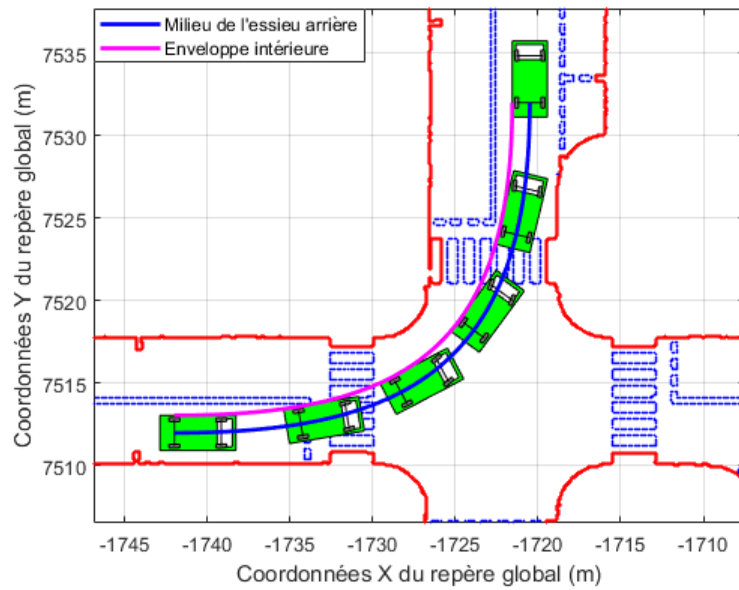
### 2.2.3.2 Simulations

Les scénarios « tourner à gauche dans une intersection en croix » et « tourner à droite dans une intersection en T » sont simulés dans le cadre de la planification de l'enveloppe d'encombrement intérieure de l'égo-véhicule. Le chemin décrit par l'enveloppe d'encombrement intérieure de l'égo-véhicule est planifié par la méthode 2. Cependant, le point décrivant le chemin planifié étant différent de celui défini au paragraphe §2.2.1, le vecteur de contraintes  $b_{ineq}$  est réadapté de la manière suivante :

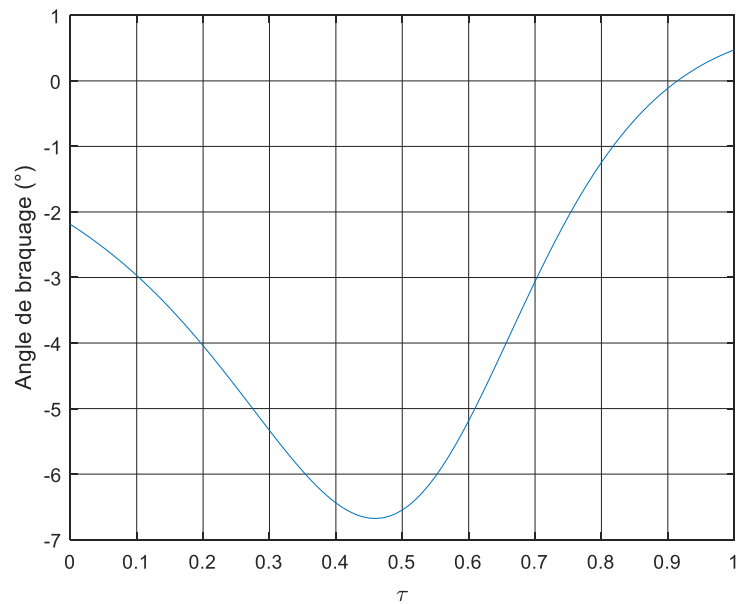
$$b_{ineq} = \begin{bmatrix} f_{R_{inter}}^{ext1}(X_{crit} + (l - PAF_{Ar})) - L \\ f_{R_{inter}}^{ext2}(X_{crit} + (l - PAF_{Ar})) - L \\ -f_{R_{inter}}^{int}(X_{crit}) \\ X_3 \\ 0 \\ X_3 \end{bmatrix}. \quad (2.81)$$

#### 2.2.3.2.1 Scénario « tourner à gauche dans une intersection en croix »

L'enveloppe d'encombrement intérieure de l'égo-véhicule est planifiée par la méthode 1. Les figure 2.38 et figure 2.39 représentent respectivement le chemin planifié dans la cartographie et le profil de braquage associé. On constate que la contrainte d'encombrement intérieure est respectée (plus petite marge de 20 cm). De plus, l'amplitude de braquage maximale est de  $6.67^\circ$  soit 22.2% de la limite de braquage autorisée.



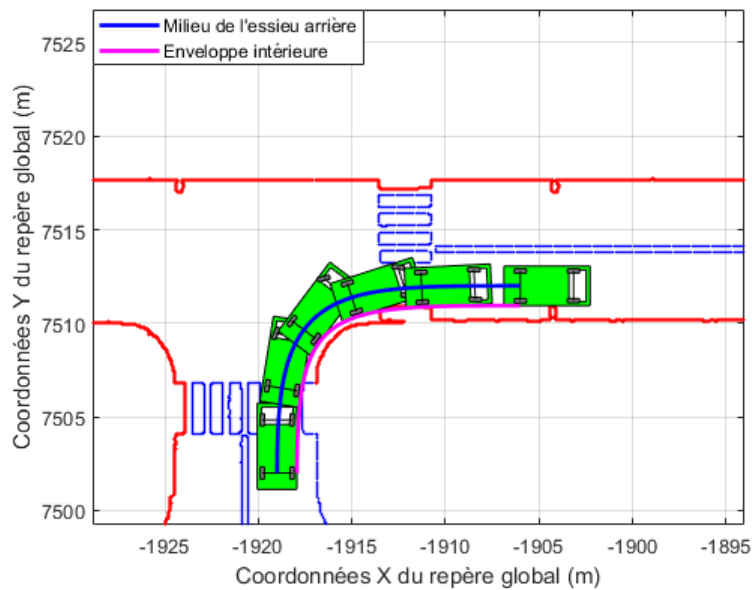
**Figure 2.38:** *Chemin à suivre généré par planification de l'enveloppe intérieure du véhicule pour le scénario « tourner à droite dans une intersection en croix »*



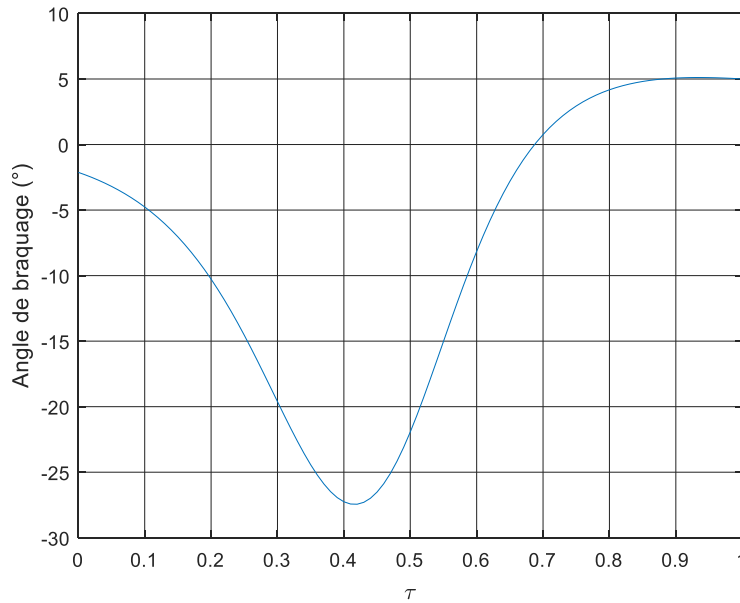
**Figure 2.39:** *Braquage résultant du chemin à suivre planifié pour le scénario « tourner à droite dans une intersection en croix »*

### 2.2.3.2.2 Scénario « tourner à droite dans une intersection en T »

De la même manière que précédemment, la méthode est appliquée au scénario « tourner à droite dans une intersection en T ». Les figure 2.40 et figure 2.41 représentent respectivement le chemin planifié dans la cartographie et le profil de braquage associé. On constate que la contrainte d'encombrement intérieure est respectée (plus petite marge de 40 cm). De plus, l'amplitude de braquage maximale est de  $-27.4^\circ$  soit 91.3% de la limite de braquage autorisée.



**Figure 2.40:** *Chemin à suivre généré par planification de l'enveloppe intérieure du véhicule pour le scénario « tourner à droite dans une intersection en T »*



**Figure 2.41:** *Braquage résultant du chemin à suivre planifié pour le scénario « tourner à droite dans une intersection en T »*

### 2.2.3.3 Limites et avantages

Cette méthode reprend la plupart des avantages et inconvénients de la méthode 1. Cependant, comme l’enveloppe intérieure est directement planifiée dans cette méthode, les contraintes d’encombrement intérieur sur l’ensemble du chemin sont prises en compte dès la planification. Le temps de calcul de l’algorithme associé est quant à lui similaire à celui de la méthode 1 (1.16 s).



## 2.2.4 Méthode 4 : Méthode par analyse de l'espace autorisé

Dans ce paragraphe, tous les calculs sont effectués dans le repère de planification présenté dans la partie §2.1.1.3. Le principe de cette méthode est une représentation des contraintes dans un espace décrit par les variables d'optimisation. Dans le paragraphe §2.2.1 consacré à la méthode 1, il a été montré que le nombre de variables d'optimisation peut être réduit au nombre de deux :  $Y_1$  et  $Y_2$ . Cependant, avec cette méthode, il n'est pas possible d'exprimer les contraintes sous la forme  $Y_2 = f(Y_1)$  sur l'ensemble du chemin indépendamment de la variable spatiale  $\tau$ . Une solution possible est d'exprimer les contraintes sous une forme faisant apparaître  $\tau$  explicitement. À partir de ces expressions, l'idée est d'aboutir à une définition de l'espace autorisé, celui-ci étant alors défini comme étant l'ensemble des points respectant l'intégralité des contraintes.

### 2.2.4.1 Obtention de l'espace autorisé

L'espace autorisé est défini par le respect des contraintes sous la forme :

$$C_k(Y_2, Y_1, \tau) \leq 0, k = 1 \dots 5, \quad (2.82)$$

où  $C_1(Y_2, Y_1, \tau) = Y_A(Y_2, Y_1, \tau) - f_{R_{planif}}^{ext_1}(X_{A,\tau}(Y_2, Y_1, \tau)), \quad (2.83)$

$$C_2(Y_2, Y_1, \tau) = Y_A(Y_2, Y_1, \tau) - f_{R_{planif}}^{ext_2}(X_{A,\tau}(Y_2, Y_1, \tau)), \quad (2.84)$$

$$C_3(Y_2, Y_1, \tau) = -Y_C(Y_2, Y_1, \tau) + f_{R_{planif}}^{int}(X_{C,\tau}(Y_2, Y_1, \tau)), \quad (2.85)$$

$$C_4(Y_2, Y_1, \tau) = \varphi_\tau(Y_2, Y_1, \tau) - \varphi_{sup}^{lim}, \quad (2.86)$$

et  $C_5(Y_2, Y_1, \tau) = -\varphi(Y_2, Y_1, \tau) + \varphi_{inf}^{lim}. \quad (2.87)$

Dans cette méthode, elles seront vérifiées par discrétisation des domaines de variation des variables  $Y_2$ ,  $Y_1$  et  $\tau$  tels que  $Y_2^{min} \leq Y_2 \leq Y_2^{max}$ ,  $Y_1^{min} \leq Y_1 \leq Y_1^{max}$  et  $\tau^{min} \leq \tau \leq \tau^{max}$ . L'obtention de l'espace autorisé se fait en 4 étapes :

- **Etape 1 :** Evaluation des relations (2.83) à (2.87) pour chaque trio  $(Y_2, Y_1, \tau)$ . Les contraintes étant fonction de  $\tau$ , un ensemble de surfaces est alors associé à chaque relation. La figure 2.42 représente les surfaces engendrées par cette évaluation de la relation (2.83), associée à la contrainte sur l'enveloppe extérieure

de l'égo-véhicule, pour une manœuvre de type tourner à droite. Ainsi la paire  $Y_2 = 20\text{ m}$  et  $Y_1 = -20\text{ m}$  respecte la contrainte pour tout  $\tau$ , ce qui n'est pas le cas pour la paire  $Y_2 = -20\text{ m}$  et  $Y_1 = 20\text{ m}$ .

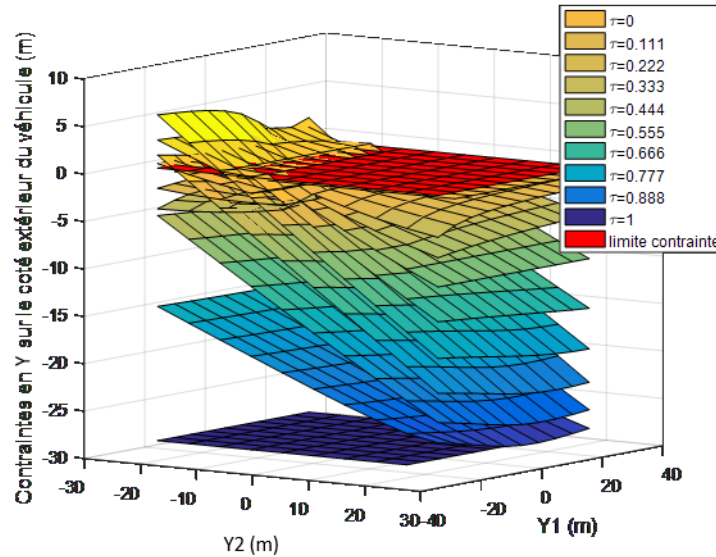


Figure 2.42: Exemple de résultat issu de l'évaluation d'une contrainte en X sur le côté extérieur du véhicule pour une manœuvre de type tourner à droite, telle qu'effectuée dans l'étape 1

- **Etape 2 :** Vérification du respect des contraintes. Le but de cette étape est d'associer à un point  $(Y_2, Y_1)$  une valeur binaire « 1 » si la contrainte est respectée et un « 0 » sinon. Cette étape est illustrée en Figure 2.43 pour l'exemple précédent.

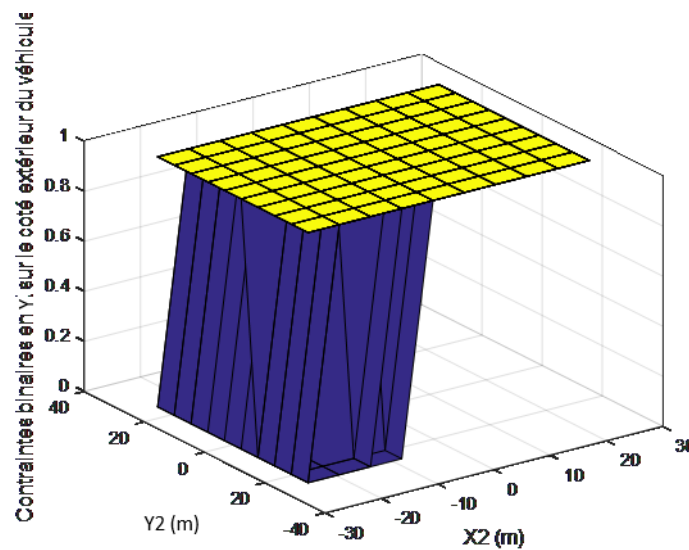


Figure 2.43: Transformation des données de la figure 2.42 en données binaires

- **Etape 3 :** Pour chaque contrainte, les différentes cartographies sont assemblées afin d'obtenir une unique cartographie pour une contrainte donnée conformément à :

$$Carto_{C_k} = \prod_{\tau=0}^1 Carto_{C_k,\tau}(\tau), \quad (2.88)$$

avec  $Carto_{C_k}$  étant l'unique cartographie associée à la k-ième contrainte et  $Carto_{C_k,\tau}(\tau)$  la cartographie de l'étape 2 associée à la k-ième contrainte pour un  $\tau$  donné. Cette étape est illustrée en figure 2.44.

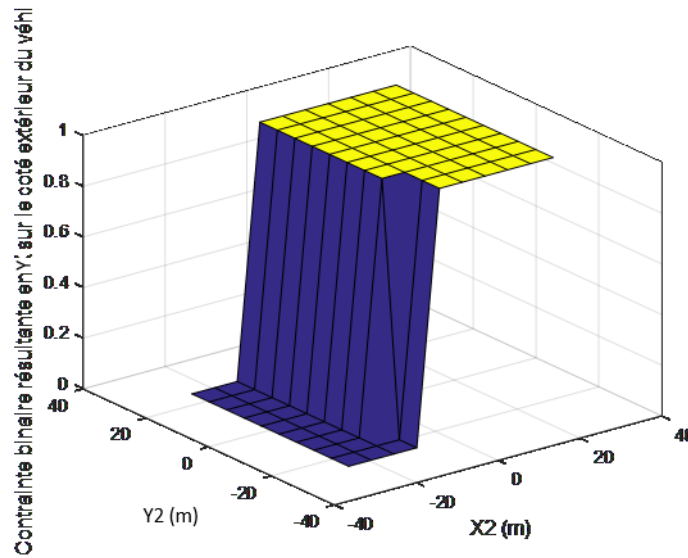
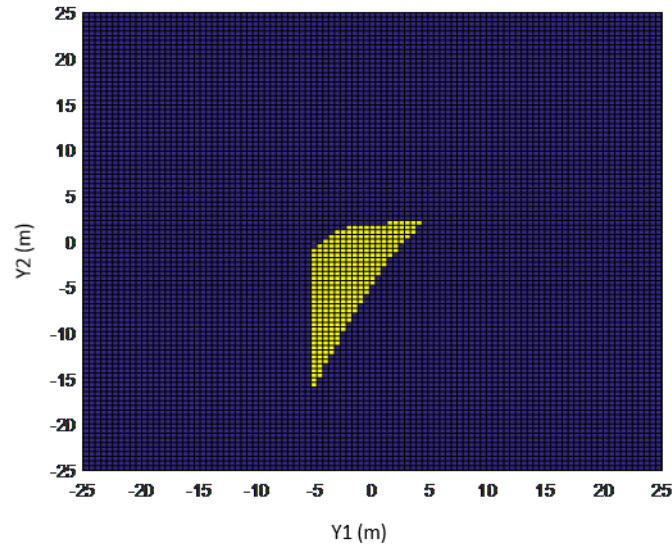


Figure 2.44: Concaténation des cartographies de la Figure 2.43

- **Etape 4 :** Les cartographies de toutes les contraintes sont assemblées pour former l'espace autorisé conformément à :

$$\mathcal{A} = \prod_{k=1}^{nbr\ contraintes} Carto_{C_k} \quad (2.89)$$

où  $\mathcal{A}$  désigne l'espace autorisé. Cette étape est illustrée en figure 2.45.



**Figure 2.45:** Illustration de l'espace autorisé, les valeurs de  $(Y_2, Y_1)$  admissibles sont en jaune, les non-admissibles en bleu

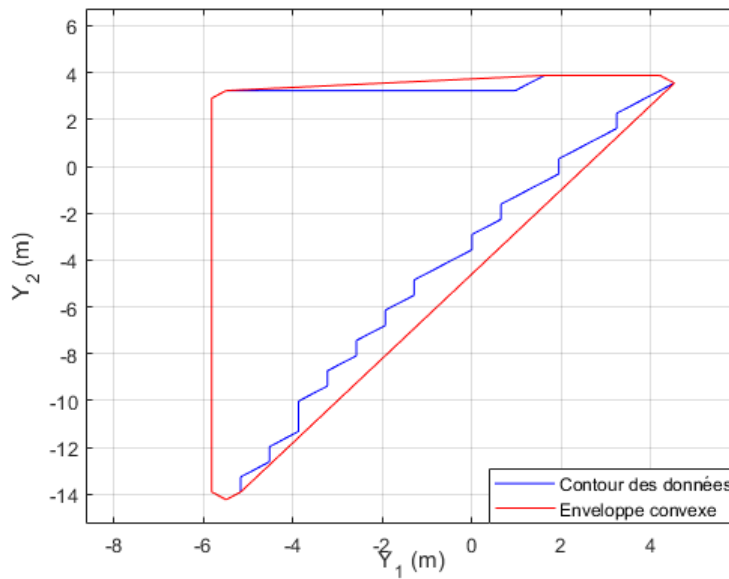
L'obtention d'une estimation de l'espace autorisé permet de simplifier le problème d'optimisation de telle sorte que les variables d'optimisation appartiennent à l'espace autorisé  $\mathcal{A}$  présenté en (2.89).

### 2.2.4.2 Simplification du problème d'optimisation

À partir de l'estimation de l'espace autorisé  $\mathcal{A}$ , il est possible de simplifier le problème d'optimisation par l'utilisation de l'enveloppe convexe contenant l'espace autorisé illustré en figure 2.46. Le problème d'optimisation (2.36) devient alors :

$$\begin{cases} \arg \min J(Y_1, Y_2) \\ \text{s. c: } Y_1 - aY_2 + b \leq 0 \end{cases} \quad (2.90)$$

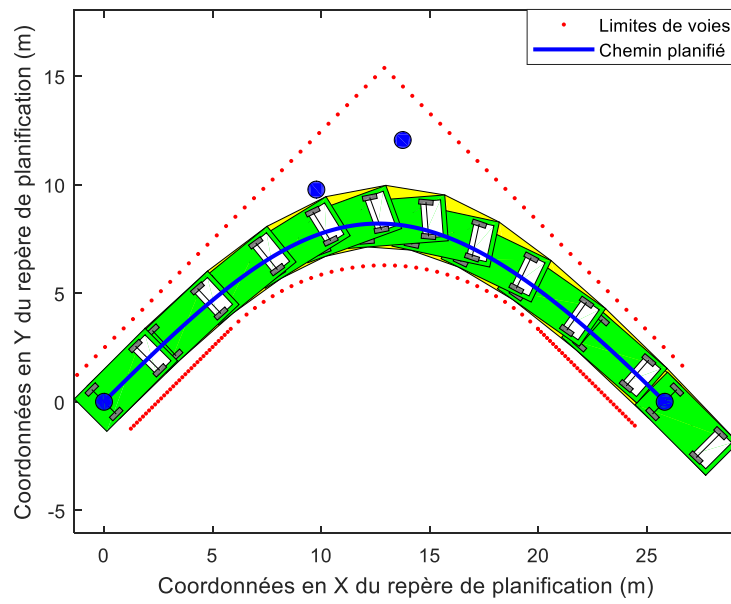
avec  $a = \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix}$ ,  $b = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_N \end{bmatrix}$  où  $N$  est le nombre de côté du polygone formant l'enveloppe convexe.



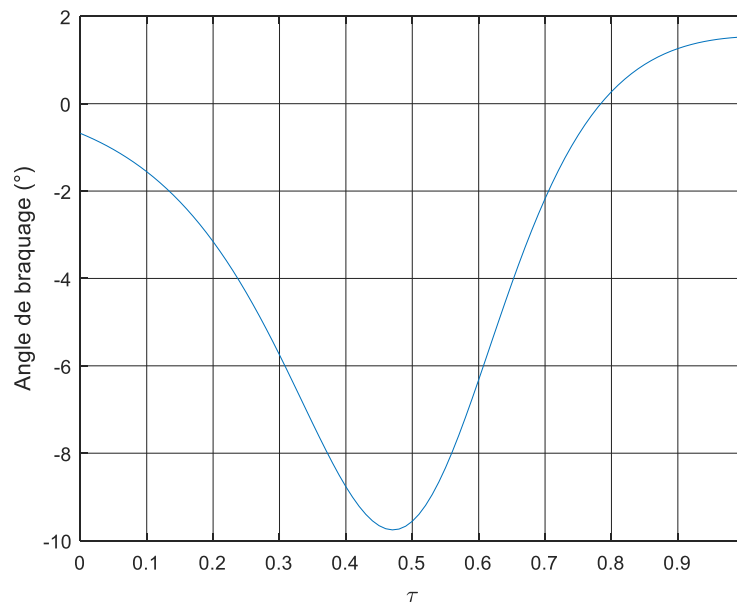
**Figure 2.46:** Illustration de l'enveloppe convexe (rouge) contenant l'espace autorisé (bleu)

Ce type de problème peut alors être résolu par l'algorithme du simplexe [66]. Le simplexe permet l'obtention explicite de la marge associée à chacune des contraintes et permet de connaître le gain potentiel en relâchant certaines contraintes. La résolution du problème sans contrainte conduirait à un chemin en ligne droite c'est-à-dire le chemin le plus court. De ce fait, il est facile d'en déduire que l'optimum du problème contraint sature une ou plusieurs contraintes. Ceci se traduit par le fait que l'optimum est situé sur la bordure de l'espace autorisé c'est-à-dire l'enveloppe convexe dans le problème simplifié. Or cette bordure est la partie la plus soumise aux variations induites par les erreurs d'estimation et de mesures. En choisissant le barycentre de l'espace autorisé comme solution du problème, la solution n'est pas l'optimum mais est la plus robuste aux erreurs d'estimation et de mesures. Cependant il est à noter que cette représentation donne le même poids à toutes les contraintes indépendamment de leur nature (encombrement ou braquage) et indépendamment de  $\tau$ . Ce point peut être sujet à débat puisque l'importance d'une contrainte vis-à-vis d'une autre peut être subjective.

Cette méthode est appliquée à un exemple d'une manœuvre de type « tourner à droite dans une intersection ». Le chemin obtenu est représenté sur la figure 2.47 tandis que le braquage associé à ce chemin est tracé sur la figure 2.48. On constate que toutes les contraintes sont respectées.



**Figure 2.47:** *Chemin obtenu par analyse de l'espace autorisé pour un rayon de courbure de la route de 12m et une largeur de route de 7m*

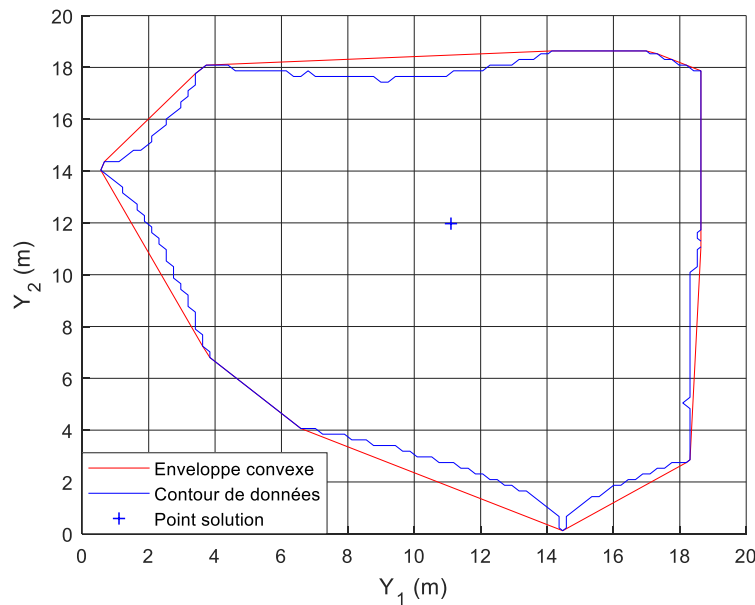


**Figure 2.48:** *Évolution du braquage le long du chemin résultant*

### 2.2.4.3 Simulations

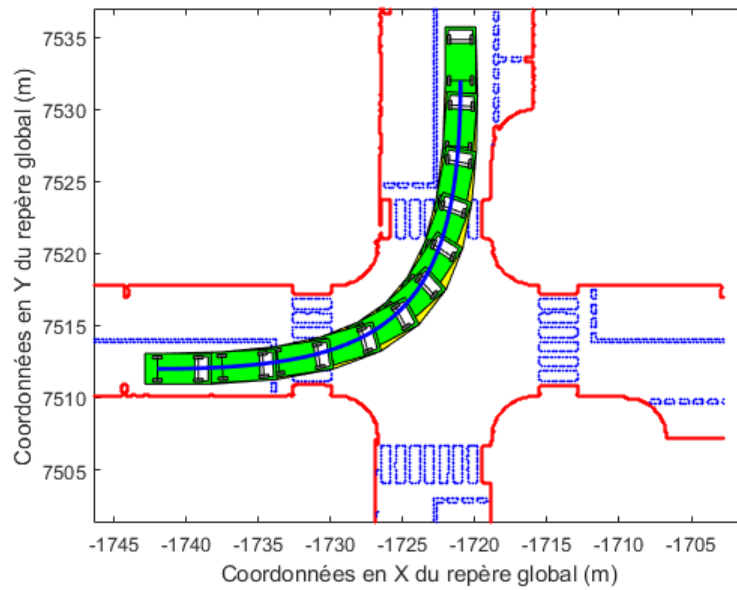
#### 2.2.4.3.1 Scénario « tourner à gauche dans une intersection en croix »

La méthode est appliquée au scénario « tourner à gauche dans une intersection en croix ». La figure 2.49 présente l'espace autorisé correspondant au scénario considéré. L'écart entre l'enveloppe convexe et le contour de données permet d'estimer visuellement le biais introduit par cette méthode. Le point solution est choisi comme étant le barycentre de l'enveloppe convexe.

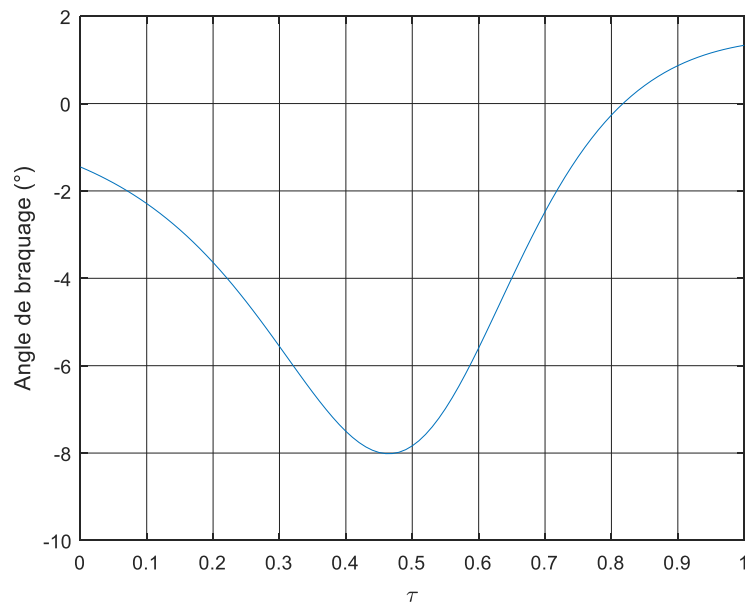


**Figure 2.49:** *Espace autorisé issu du scénario « tourner à gauche dans une intersection en croix »*

Les figure 2.50 et figure 2.51 représentent respectivement le chemin planifié dans la cartographie et le profil de braquage associé. Il peut être constaté que la contrainte d'encombrement intérieure est respectée, la plus petite marge étant de 5 cm. De plus, l'amplitude de braquage maximal est de  $-8^\circ$  soit 27% de la limite de braquage autorisé.



**Figure 2.50:** *Chemin à suivre généré par l'utilisation du point solution pour le scénario « tourner à gauche dans une intersection en croix »*

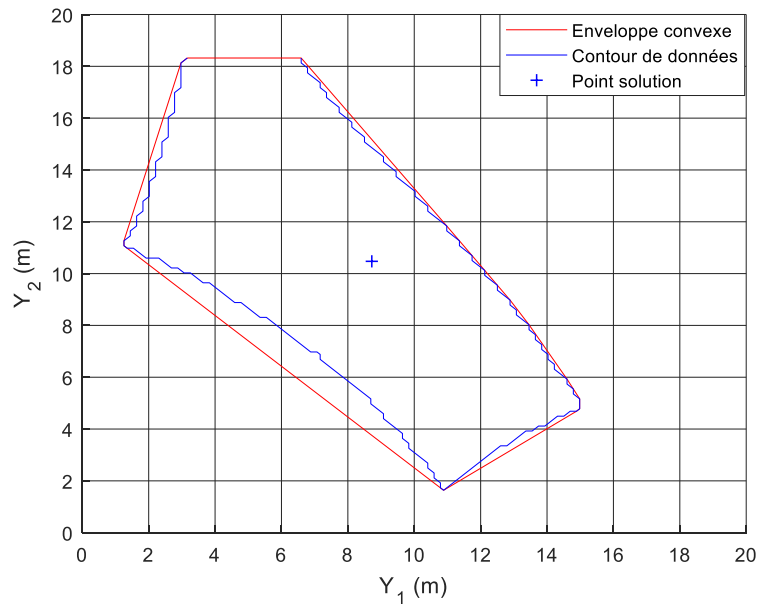


**Figure 2.51:** *Braquage résultant du chemin à suivre planifié pour le scénario « tourner à gauche dans une intersection en croix »*



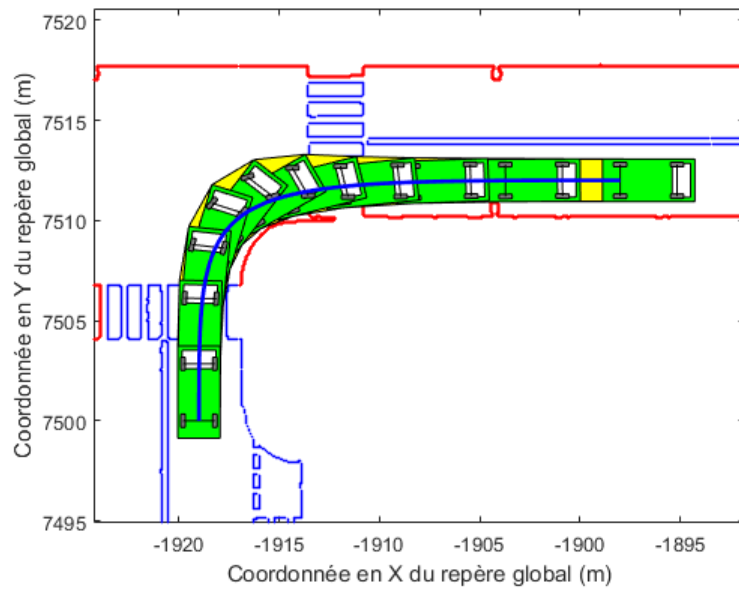
### 2.2.4.3.2 Scénario « tourner à droite dans une intersection en T »

La méthode est maintenant appliquée au scénario « tourner à droite dans une intersection en T ». La figure 2.52 présente l’espace autorisé correspondant au scénario considéré. L’écart entre l’enveloppe convexe et le contour de données permet d’estimer visuellement le biais introduit par cette méthode. Le point solution est choisi comme étant le barycentre de l’enveloppe convexe.

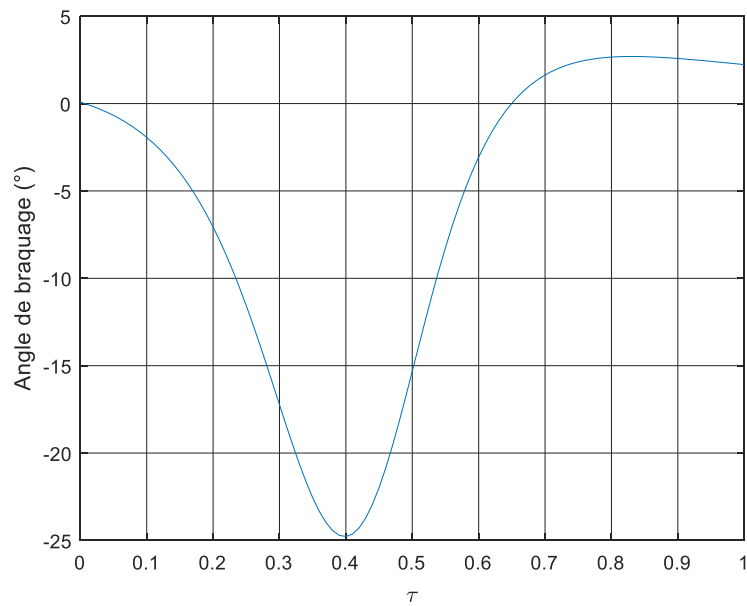


**Figure 2.52:** Espace autorisé issu du scénario « tourner à droite » en intersection en T »

Les figure 2.53 et figure 2.54 représentent respectivement le chemin planifié dans la cartographie et le profil de braquage associé. Il peut être constaté que la contrainte d’encombrement intérieure est respectée (la plus petite marge étant de 6 cm). De plus, l’amplitude de braquage maximal est de  $-24.8^\circ$  soit 83% de la limite de braquage.



**Figure 2.53:** *Chemin à suivre généré par l'utilisation du point solution pour le scénario « tourner à droite » en intersection en T »*

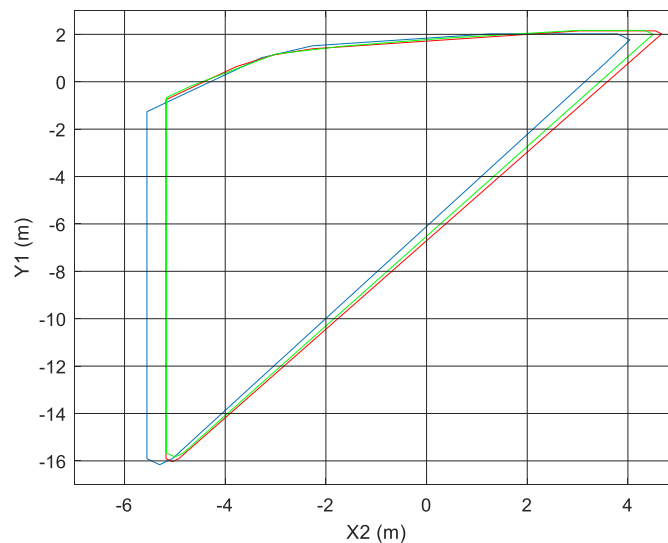


**Figure 2.54:** *Braquage résultant du chemin à suivre planifié pour le scénario « tourner à droite » en intersection en T »*

### 2.2.4.3.3 Etude de la robustesse

#### 2.2.4.3.3.1 Sensibilité des points de contrôle à la resolution de l'espace autorisé

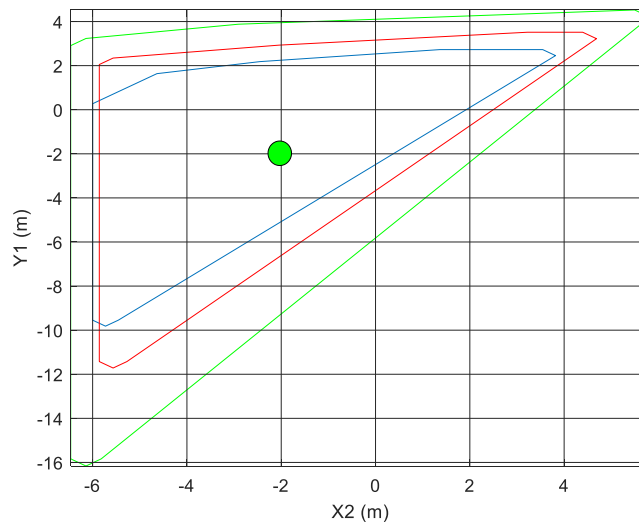
La résolution de l'espace considéré est un paramétrage important de la méthode par le fait qu'elle dicte la performance de la fonction. En effet, afin d'estimer l'espace autorisé, la zone de recherche est quadrillée en une grille. Les contraintes sont alors évaluées pour chaque case. La taille de ces cases est donnée par la résolution. Si la résolution est trop faible l'estimation de l'espace autorisé est imprécise et biaisée mais le nombre de cases est réduit et donc le temps de calcul est faible. De manière duale, si la résolution est trop importante l'espace autorisé est précis et peu biaisé mais le nombre de cases est important et donc le temps de calcul est lui-même important. La figure 2.55 illustre l'impact du paramètre de résolution  $r$  sur l'espace autorisé. On constate un biais plus important pour  $r = 0.3333$  se traduisant sur la figure par un décalage de l'espace autorisé par rapport aux autres.



**Figure 2.55:** Espace autorisé pour  $r = 0.3333$  (en bleu),  $r = 0.2525$  (en rouge),  $r = 0.1667$  (en vert)

### 2.2.4.3.3.2 Sensibilité des points de contrôle aux incertitudes de cartographie

Dans ce paragraphe, la robustesse de l'algorithme aux incertitudes est évaluée de manière qualitative. Cet algorithme est basé sur l'évaluation de l'espace autorisé à partir d'un ensemble de contraintes. Ces contraintes étant majoritairement évaluées par le biais de données de cartographies, elles sont donc soumises aux incertitudes. Or, cet algorithme est conçu afin de maximiser les marges relatives aux contraintes. Par conséquent, cet algorithme permet de maximiser la robustesse, dans une certaine mesure, aux erreurs et aux incertitudes issues de la cartographie. Ce principe est illustré sur la figure 2.56. Les paramètres inconnus  $X_2$  et  $Y_1$  du chemin de référence sont calculés à partir de l'espace autorisé correspondant au rayon de courbure de 12 m, cas le plus favorable. Les espaces autorisés pour des rayons de courbure inférieurs sont tracés. Il peut être alors constaté que si des erreurs de cartographie défavorables à la planification, les contraintes sont toujours respectées pour le chemin de référence initialement calculé. Il faut néanmoins noter que cette robustesse n'est valable que vis-à-vis des obstacles prédits par la cartographie statique. Il n'y a aucune robustesse relative aux obstacles non prédits comme par exemple un véhicule garé empiétant sur la voie de circulation. Ces considérations seront développées au chapitre 3.



**Figure 2.56:** Illustration de la robustesse : espace autorisé pour  $R = 7m$  (en bleu),  $R = 9m$  (en rouge) et  $R = 12 m$  (en vert).

#### 2.2.4.4 Limites et avantages

Cette méthode permet de trouver la solution la plus robuste vis-à-vis des perturbations, des erreurs de mesure et d'estimation. Cette robustesse dépend néanmoins de la précision de l'espace autorisé généré. Cependant, plus l'espace autorisé est précis et plus le temps de calcul est élevé. Le nombre de points de l'espace autorisé est donc limité à cent pour avoir le meilleur compromis précision/temps de calcul. Cette méthode peut être également utilisée afin de trouver la solution optimale du problème d'optimisation mais, dans ce cas, elle devient très sensible aux perturbations.

À partir des informations sur l'intersection et des contraintes véhicules associées au braquage, l'espace autorisé représentant l'ensemble des valeurs admissibles des paramètres est estimé. Le calcul de l'enveloppe convexe associée à l'espace autorisé permet de simplifier le problème d'optimisation en un problème de programmation quadratique résolvable par l'algorithme du simplexe ou par l'algorithme de Hildreth.

Enfin la possibilité d'utiliser le barycentre de l'enveloppe convexe est évoquée. Cette solution permet d'obtenir une certaine robustesse aux perturbations.

Cette méthode peut toutefois être améliorée en remplaçant l'utilisation de l'enveloppe convexe de l'espace autorisé par l'utilisation de l'enveloppe convexe intérieure de l'espace autorisé. L'enveloppe convexe intérieure est définie ici comme étant l'enveloppe convexe contenue dans l'espace autorisé ayant la plus grande aire possible. Cette amélioration permettrait de s'affranchir du biais introduit par l'enveloppe convexe au prix d'un ajout de conservatisme dans le problème d'optimisation.

### 2.3 Etude comparative et sélection

L'objectif de ce paragraphe est d'évaluer les différentes méthodes de planification de chemin prédictif au travers de quatre critères :

- le minimum de marge sur les contraintes de l'enveloppe intérieure. Ce critère correspond au plus petit écart entre l'enveloppe d'encombrement intérieure du véhicule et les limites de voies;
- le minimum de marge sur les contraintes de l'enveloppe extérieure. Ce critère correspond au plus petit écart entre l'enveloppe d'encombrement extérieure du véhicule et les limites de voies ;
- la marge sur la contrainte de maximum de braquage. Elle représente l'amplitude d'angle de braquage des roues restant avant saturation de l'actionneur ;

- le temps de calcul. Il est évalué comme étant le temps moyen d'exécution sous Matlab/Simulink de l'algorithme associé à la méthode. Ce critère permet d'établir une comparaison relative entre les algorithmes et non pas de tirer des conclusions dans l'absolu.

Dans le cas où les contraintes ne sont pas respectées, la notion de marge n'a plus de sens, il sera alors noté « Non Respect » le cas échéant.

### **2.3.1 Evaluation des performances des algorithmes sur le scénario « tourner à gauche dans une intersection en croix »**

Les quatre méthodes sont évaluées sur le scénario « tourner à gauche dans une intersection en croix ». La synthèse des résultats est présentée dans le tableau 2-1. Pour chaque critère, la pire performance est repérée par une case rouge tandis que la meilleure est repérée par une case verte.

La méthode 2 est très inappropriée. En effet, les contraintes sur l'enveloppe intérieure ne sont pas respectées. Cette méthode demande des vecteurs de points issus de la cartographie déjà lissés afin d'obtenir une interpolation efficace.

Les méthodes 1 et 3 ont des performances relativement intéressantes, cependant leurs temps de calculs respectifs sont très élevés vis-à-vis des autres méthodes en vue d'une implantation temps réel

Par élimination, la méthode 4 paraît la plus adaptée bien qu'elle possède la pire performance relative aux contraintes sur l'enveloppe extérieure. Cette performance reste tout de même acceptable et permet d'offrir une robustesse aux incertitudes.

	Minimum de marge sur les contraintes de l'enveloppe intérieure	Minimum de marge sur les contraintes de l'enveloppe extérieure	Marge sur la contrainte de maximum de braquage	Temps de calcul
Méthode 1	15 cm	47 cm	17.3°	1.2s
Méthode 2	Non respect	55 cm	3.3°	0.14s
Méthode 3	20 cm	20 cm	23.3°	1.16s
Méthode 4	5 cm	20 cm	22°	0.65s

**Tableau 2-1 :** *Synthèse des performances des algorithmes issues des méthodes 1 à 4 dans le cadre du scénario « tourner à gauche dans une intersection en croix »*

### **2.3.2 Evaluation des performances des algorithmes sur le scénario « tourner à droite dans une intersection en T »**

Les quatre méthodes sont évaluées sur le scénario « tourner à droite dans une intersection en T ». La synthèse des résultats est présentée au tableau 2-2. Pour chaque critère, la pire performance est repérée par une case rouge tandis que la meilleure est repérée par une case verte.

La méthode 2 est à nouveau inappropriée, pour les mêmes raisons que celles évoquées au paragraphe précédent.

Le temps de calcul étant un temps de calcul moyen, il est invariant d'un scénario à l'autre. Dans ce contexte, et pour les mêmes raisons que dans le paragraphe précédent, les méthodes 1 et 3 ne peuvent être retenus à cause de leur temps de calcul.

Enfin, la méthode 4 possède les meilleures performances en termes de marge sur les contraintes de l'enveloppe extérieure et sur la contrainte de maximum de braquage. En contrepartie, cette méthode doit concéder la pire performance sur les contraintes de l'enveloppe intérieure.

	Plus petite marge sur les contraintes de l'enveloppe intérieure	Plus petite marge sur les contraintes de l'enveloppe extérieure	Marge sur la contrainte de maximum de braquage	Temps de calcul
Méthode 1	87 cm	33 cm	4.2	1.2s
Méthode 2	63 cm	Non respect	2.2°	0.14s
Méthode 3	40 cm	30 cm	2.6°	1.16s
Méthode 4	6 cm	50 cm	5.2°	0.65

**Tableau 2-2** : Synthèse des performances des algorithmes issues des méthodes 1 à 4 dans le cadre du scénario « tourner à droite dans une intersection en T »

## 2.4 Conclusion

La planification de chemin prédictive s'intéresse à la planification de chemin en intersection connaissant un certain nombre de contraintes a priori sur notre chemin. Le chemin ainsi obtenu est appelé chemin de référence. Le respect des contraintes par ce chemin de référence est le critère le plus important.

Ce chemin décrit le déplacement du milieu de l'essieu arrière de l'ego-véhicule dans le plan. De plus, les points et les directions d'entrée et de sortie de l'intersection sont supposés connus car fournis par une cartographie HD ou par un premier algorithme de planification globale.



L'utilisation du repère de planification  $R_{planif}$  introduite dans ce chapitre a permis, d'une part, de formaliser mathématiquement le problème de planification et, d'autre part, d'avoir une représentation générique du problème.

Quatre méthodes ont alors été proposées afin de répondre à ce problème :

- la première méthode a consisté à simplifier le problème pour le mettre sous forme d'un problème optimisation linéaire puis de le résoudre ;
- la deuxième méthode a consisté à interpoler la courbure de la route afin de l'utiliser pour planifier notre chemin ;
- la troisième méthode a permis de planifier le chemin suivi par l'enveloppe d'encombrement intérieure de l'égo-véhicule et d'en déduire le chemin à suivre par le point milieu de l'essieu arrière.
- enfin, la dernière méthode a consisté à calculer différentes combinaisons paramétriques conduisant à un chemin respectant les contraintes et d'en déduire le jeu de paramètres maximisant les marges associées aux contraintes.

Ces quatre méthodes ont ensuite été évaluées sur deux scénarios différents en intersections : une intersection en croix et une intersection en T. À partir de ces évaluations, la méthode 4 s'est avérée la plus adaptée aux problématiques de la planification de chemin prédictive. Cependant cette méthode peut toutefois être améliorée en remplaçant l'utilisation de l'enveloppe convexe de l'espace autorisé par celle de l'enveloppe convexe intérieure de l'espace autorisé. Cette amélioration permettrait de s'affranchir du biais introduit par l'enveloppe convexe au prix d'un ajout de conservatisme dans le problème d'optimisation. Une réflexion plus approfondie sur l'optimisation de l'algorithme serait utile afin d'améliorer le temps de calcul. L'adaptation d'algorithmes de type « ROI detection based » (detection de Region Of Interest) serait une piste sérieuse pour réduire ce temps de calcul.

# Chapitre 3

## Replanification réactive de chemin

3.1 INTRODUCTION .....	134
3.1.1 Contexte et problématique .....	134
3.1.2 Notations utilisées dans ce chapitre .....	134
3.1.3 Étapes préliminaires à la replanification .....	138
3.1.4 Limites des méthodes de replanification réactive.....	146
3.2 ÉTUDE DES METHODES CHOISIES .....	167
3.2.1 Méthode 1 : Optimisation d'une courbe de Bézier cubique .....	167
3.2.2 Méthode 2 : Optimisation par programmation quadratique .....	176
3.3 ÉTUDE COMPARATIVE ET SELECTION .....	182
3.4 CONCLUSION .....	184

## **3.1 Introduction**

### **3.1.1 Contexte et problématique**

Lorsqu'un véhicule autonome évolue en milieu urbain, il suit généralement un chemin défini lors d'une phase de planification de chemin en fonction de la géométrie de la route et de l'espace habituellement libre. La génération d'un tel chemin fait l'objet du chapitre précédent. Le chemin obtenu ne prend pas en compte la variation de l'environnement et le véhicule est alors amené à éviter un certain nombre d'obstacles empêchant le suivi de ce chemin planifié. Ces obstacles peuvent être dynamiques (leurs vitesses sont non nulles) ou statiques (leurs vitesses sont nulles) par exemple un véhicule garé empiétant sur la voie. Dans le cas des obstacles statiques, un nouveau chemin à suivre par le véhicule doit être généré au travers d'un ou plusieurs algorithmes de replanification de chemin, si un chemin existe, tandis que dans le cas des obstacles dynamiques, une solution supplémentaire consiste à adapter la vitesse sans modifier le chemin pour laisser le passage à ces obstacles. Ces algorithmes de replanification de chemin doivent être utilisables en temps réel.

Les méthodes décrites dans ce document concernent des algorithmes permettant à un véhicule autonome de planifier un nouveau chemin afin d'éviter un obstacle statique. Ils utilisent :

- le chemin initialement planifié, éventuellement obtenu par application des développements du chapitre 2,
- et la position d'un obstacle entrant en conflit avec ce dit chemin ainsi que ses dimensions.

Dans cette partie introductive, après une présentation des notations utilisées dans ce chapitre et une présentation des différentes étapes préliminaires à la replanification de chemin, la méthode des champs de potentiels est présentée. Cette méthode constitue une référence en termes de réactivité dans le domaine de la robotique mobile.

### **3.1.2 Notations utilisées dans ce chapitre**

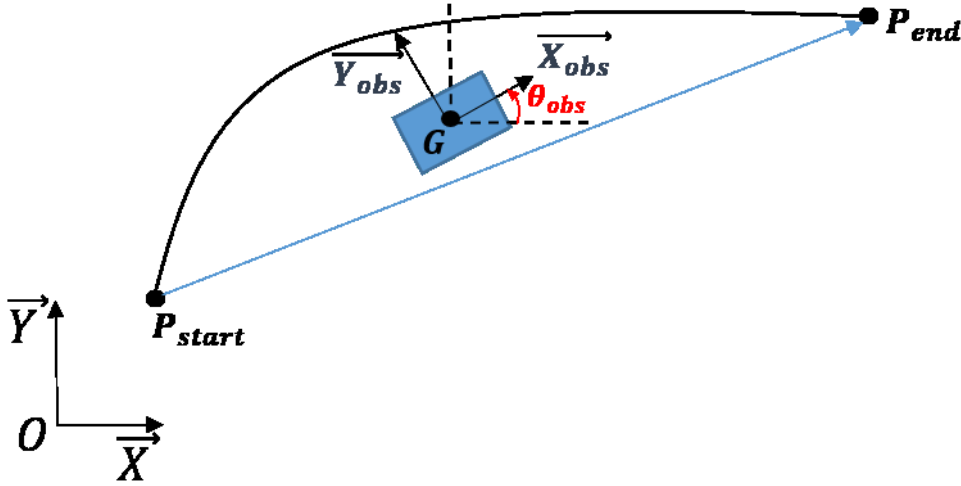
#### **3.1.2.1 Repère global**

Le repère global est celui défini par  $R_0(O, \vec{X}, \vec{Y})$  en partie 2.1.1.1. La référence à ce repère sera éventuellement omise lorsque le contexte est clair, par souci de simplicité de lecture.

### 3.1.2.2 Repère lié à l'obstacle

L'obstacle qu'il s'agit de contourner par les méthodes présentées dans ce chapitre est supposé connu, en position, en direction et en dimensions. Les capteurs associés à cette mesure ne font pas l'objet de cette partie. La partie 3.1.3.1 discute des moyens disponibles.

Soit un repère  $R_{obs}(G, \overrightarrow{X}_{obs}, \overrightarrow{Y}_{obs})$  où  $G$  est le centre géométrique de la représentation de l'obstacle,  $\overrightarrow{X}_{obs}$  et  $\overrightarrow{Y}_{obs}$  sont des vecteurs unitaires orthogonaux.  $\overrightarrow{X}_{obs}$  a pour direction la plus grande dimension de l'obstacle et le même sens que le chemin de référence. Le sens du chemin de référence étant ici défini par  $\overrightarrow{P_{start}P_{end}}$ , le sens de  $\overrightarrow{X}_{obs}$  peut alors être défini tel que  $\overrightarrow{X}_{obs} \cdot \overrightarrow{P_{start}P_{end}} > 0$ . L'angle entre le repère obstacle et le repère global est nommé  $\theta_{obs}$ . La figure 3.1 représente de manière schématique le repère obstacle dans le repère global.



**Figure 3.1** - Définition du repère obstacle  $(G, \overrightarrow{X}_{obs}, \overrightarrow{Y}_{obs})$  par rapport au repère global  $(O, \overrightarrow{X}, \overrightarrow{Y})$

Soit un vecteur quelconque de coordonnées  $\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}$  dans le repère absolu. Les coordonnées  $\begin{bmatrix} X_{obs} \\ Y_{obs} \end{bmatrix}$  de ce vecteur dans le repère obstacle s'expriment par le biais d'une matrice de rotation de la manière suivante:

$$\begin{bmatrix} X_{obs} \\ Y_{obs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{obs}) & \sin(\theta_{obs}) \\ -\sin(\theta_{obs}) & \cos(\theta_{obs}) \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_{x,obs} \\ P_{y,obs} \end{bmatrix} \right), \quad (3.1)$$

où  $P_{x,obs} = \overrightarrow{OG} \cdot \overrightarrow{X}$  et  $P_{y,obs} = \overrightarrow{OG} \cdot \overrightarrow{Y}$ .

### 3.1.2.3 Chemin de référence et chemin replanié

Il est possible de décomposer une courbe de Bézier en deux courbes de Bézier de même ordre. En effet, toute portion d'une courbe de Bézier est une courbe de Bézier de même ordre. Soit une courbe de Bézier cubique définie par:

$$P_{\tau}(\tau) = P_0^0 (1 - \tau)^3 + 3P_1^0 \tau(1 - \tau)^2 + 3P_2^0 \tau^2 (1 - \tau) + P_3^0 \tau^3. \quad (3.2)$$

pour découper, à  $\tau = \tau_{replan}$ , cette courbe de Bézier initiale en deux courbes, l'une définie sur l'intervalle  $[0, \tau_{replan}]$  et l'autre définie sur l'intervalle  $[\tau_{replan}, 1]$ , il faut effectuer le changement de variable  $\tau = f_1(U_1)$  tel que  $P_{\tau}(\tau)$  soit décrit sur  $[0, \tau_{replan}]$  par une courbe de Bézier  $P_{U_1}(U_1)$ ,  $U_1 \in [0, 1]$ . En remarquant qu'en posant  $U_1 = \frac{\tau}{\tau_{replan}}$ ,  $\tau = \tau_{replan}$  pour  $U_1 = 1$  et  $\tau = 0$  pour  $U_1 = 0$ , il apparait alors que la fonction  $f_1(U_1) = \tau_{replan}U_1$  est une fonction candidate pour ce changement de variable. Il vient alors,

$$P_{\tau}(\tau_{replan}U_1) = P_0^0(1 - \tau_{replan}U_1)^3 + 3P_1^0\tau_{replan}U_1(1 - \tau_{replan}U_1)^2 + 3P_2^0\tau_{replan}^2U_1^2(1 - \tau_{replan}U_1) + P_3^0\tau_{replan}^3U_1^3, \quad (3.3)$$

ou encore, sous forme polynomiale,

$$P_{\tau}(\tau_{replan}U_1) = (3P_1^0\tau_{replan}^3 - P_0^0\tau_{replan}^3 - 3P_2^0\tau_{replan}^3 + P_3^0\tau_{replan}^3)U_1^3 + (3\tau_{replan}^2P_0^0 - 6\tau_{replan}^2P_1^0 + 3\tau_{replan}^2P_2^0)U_1^2 + (3\tau_{replan}P_1^0 - 3\tau_{replan}P_0^0)U_1 + P_0^0. \quad (3.4)$$

L'expression de  $P_{\tau}(\tau_{replan}U_1)$  peut être reformulée comme une courbe de Bézier cubique  $P_{U_1}(U_1)$  de variable  $U_1$  et d'équation:

$$P_{U_1}(U_1) = P_0'(1 - U_1)^3 + 3P_1'U_1(1 - U_1)^2 + 3P_2'U_1^2(1 - U_1) + P_3'U_1^3, \quad (3.5)$$

ou encore, sous forme polynomiale,

$$P_{U_1}(U_1) = (3P_1' - P_0' - 3P_2' + P_3')U_1^3 + (3P_0' - 6P_1' + 3P_2')U_1^2 + (3P_1' - 3P_0')U_1 + P_0', \quad (3.6)$$

s'obtient par l'identification  $P_{U_1}(U_1) = P_{\tau}(\tau_{replan}U_1)$  avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} P'_0 = P_0^0 \\ 3P'_1 - 3P'_0 = 3\tau_{replan}P_1^0 - 3\tau_{replan}P_0^0 \\ 3P'_0 - 6P'_1 + 3P'_2 = 3\tau_{replan}^2P_0^0 - 6\tau_{replan}^2P_1^0 + 3\tau_{replan}^2P_2^0 \\ -P'_0 + 3P'_1 - 3P'_2 + P'_3 = 3P_1^0\tau_{replan}^3 - P_0^0\tau_{replan}^3 - 3P_2^0\tau_{replan}^3 + P_3^0\tau_{replan}^3 \end{array} \right. \quad (3.7)$$

Après résolution, il vient :

$$\left\{ \begin{array}{l} P'_0 = P_0^0 \\ P'_1 = \tau_{replan}P_1^0 + P_0^0(1 - \tau_{replan}) \\ P'_2 = P_0^0(1 - \tau_{replan})^2 + 2P_1^0\tau_{replan}(1 - \tau_{replan}) + \tau_{replan}^2P_2^0 \\ P'_3 = P_0^0(1 - \tau_{replan})^3 + 3P_1^0\tau_{replan}(1 - \tau_{replan})^2 + 3P_2^0\tau_{replan}^2(1 - \tau_{replan}) + \tau_{replan}^3P_3^0 \end{array} \right. \quad (3.8)$$

Ainsi, la fonction candidate  $f_1(U_1) = \tau_{replan}U_1$  permet un changement de variable tel que  $P_{U_1} = P_\tau(f_1(U_1))$ , c'est-à-dire tel que  $P_{U_1}(U_1) = P_\tau(\tau)$  pour tout  $U_1$  dans  $[0,1]$  et pour tout  $\tau$  dans  $[0, \tau_{replan}]$ .

De la même manière, on cherche maintenant le changement de variable  $\tau = f_2(U_2)$  tel que  $P_\tau(\tau)$  soit décrit sur  $[\tau_{replan}, 1]$  par une courbe de Bézier  $P_{U_2}(U_2)$ ,  $U_2$  dans  $[0,1]$ . En remarquant qu'en posant  $U_2 = \frac{\tau - \tau_{replan}}{1 - \tau_{replan}}$ ,  $\tau = \tau_{replan}$  pour  $U_2 = 0$  et  $\tau = 1$  pour  $U_2 = 1$ , la fonction  $f_2(U_2) = U_2(1 - \tau_{replan}) + \tau_{replan}$  est une fonction candidate pour ce changement de variable. Il apparait alors, après plusieurs développements, que sur  $\tau$  dans  $[\tau_{replan}, 1]$ ,  $P_{U_2}(U_2) = P_\tau(\tau)$  avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} P''_0 = P_3^0 \\ P''_1 = P_2^0(1 - \tau_{replan}) + P_3^0\tau_{replan} \\ P''_2 = P_1^0(1 - \tau_{replan})^2 + 2P_2^0\tau_{replan}(1 - \tau_{replan}) + P_3^0\tau_{replan}^2 \\ P''_3 = P_0^0(1 - \tau_{replan})^3 + 3P_1^0\tau_{replan}(1 - \tau_{replan})^2 + 3P_2^0\tau_{replan}^2(1 - \tau_{replan}) + P_3^0\tau_{replan}^3 \end{array} \right. \quad (3.9)$$

Ainsi, la fonction candidate  $f_2(U_2) = U_2(1 - \tau) + \tau$  permet un changement de variable tel que  $P_{U_2} = P_\tau(f_2(U_2))$ , c'est-à-dire que  $P_{U_2}(U_2) = P_\tau(\tau)$  pour tout  $U_2$  dans  $[0,1]$  et pour tout  $\tau$  dans  $[\tau_{replan}, 1]$ .

Pour illustrer cette démarche, un exemple est présenté en figure 3.2. La courbe de référence (en bleu) est définie par les points de contrôle  $P_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ ,  $P_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ ,  $P_2 = \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix}$  et  $P_3 = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix}$ . Un obstacle est détecté lorsque le véhicule se situe au point  $\tau_{replan} = 0.45$ . L'algorithme de découpage est alors utilisé afin de récupérer la partie de courbe appartenant à  $\tau$  dans  $[0.45; 1]$ . La courbe ainsi extraite est définie par les point de contrôle  $P'_0 = \begin{bmatrix} 0.704 \\ 0.720 \end{bmatrix}$ ,  $P'_1 = \begin{bmatrix} 1.28 \\ 0.84 \end{bmatrix}$ ,  $P'_2 = \begin{bmatrix} 2 \\ 0.6 \end{bmatrix}$  et  $P'_3 = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix}$ .

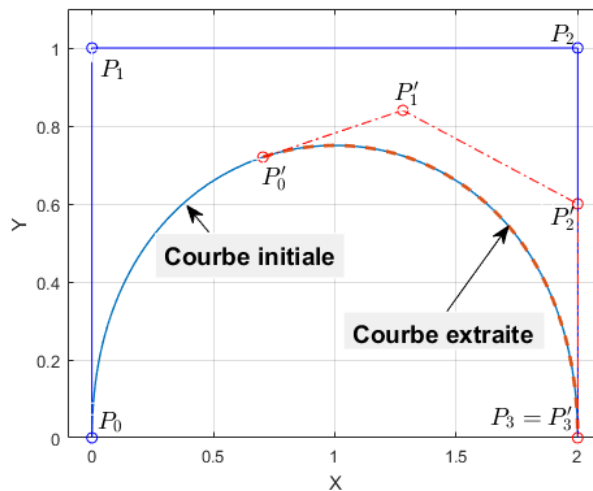


Figure 3.2 – Illustration de l'algorithme de décomposition de courbes de Bézier

Ces développements montrent que replanifier une partie extraite d'une courbe de Bézier revient à replanifier une courbe de Bézier dont les paramètres sont déterminés par ceux de la courbe initiale et la valeur de la variable spatiale au point de coupure.

### 3.1.3 Étapes préliminaires à la replanification

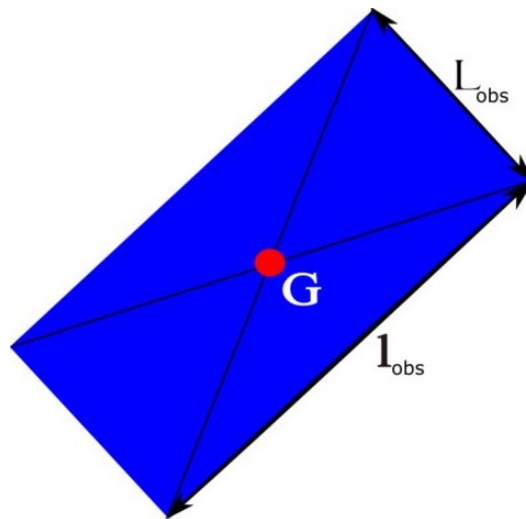
#### 3.1.3.1 Détection de l'obstacle

Cette étape consiste à détecter un obstacle sur la voie du véhicule autonome à partir des données capteurs. Cette détection d'obstacle peut s'effectuer par multi-capteur comme développé dans [67], ou uniquement par LIDAR [68] ou encore par camera [69].

### 3.1.3.2 Modélisation de l'obstacle

Après la détection d'un obstacle statique pendant le suivi du chemin de référence par le véhicule autonome, il est nécessaire de vérifier si l'obstacle détecté entre en conflit avec ce chemin de référence.

Tout d'abord, il est supposé que la fusion des données issues de la perception permet d'obtenir la position ainsi qu'une représentation de l'obstacle de type « minimum bounding rectangle » ou encore « bounding box ». Cette représentation n'est nulle autre que le plus petit rectangle contenant l'obstacle comme développé dans [70]. Dans le reste de ce document, ce rectangle sera défini par son centre géométrique  $G$  ainsi que par sa longueur  $l_{obs}$  et sa largeur  $L_{obs}$ . La figure 3.3 présente le modèle géométrique de l'encombrement de l'obstacle.



**Figure 3.3** – *Modèle de l'obstacle: l'obstacle est contenu dans une « bounding box » de largeur  $L_{obs}$ , de longueur  $l_{obs}$  et de centre géométrique  $G$*

### 3.1.3.3 Détection du conflit

Afin de détecter la présence d'un conflit, il est nécessaire de connaître la position relative de l'obstacle vis à vis du chemin de référence. En effet, la détection d'un éventuel conflit avec l'obstacle dépend du type de manœuvre effectuée par le véhicule autonome ainsi que la position relative de l'obstacle par rapport au chemin de référence. Il existe quatre cas possibles présentés dans les parties suivantes.



### 3.1.3.3.1 Cas où l'obstacle est à droite du chemin initial

Soient  $X_\tau(\tau)$  et  $Y_\tau(\tau)$ ,  $0 \leq \tau \leq 1$ , les coordonnées, dans le repère obstacle, de l'ensemble des points du chemin. Soit  $\tau_0$  tel que  $X_\tau(\tau_0) = 0$ , si  $Y_\tau(\tau_0) > 0$  alors l'obstacle est situé sur la droite du chemin. La figure 3.4 présente un tel cas.

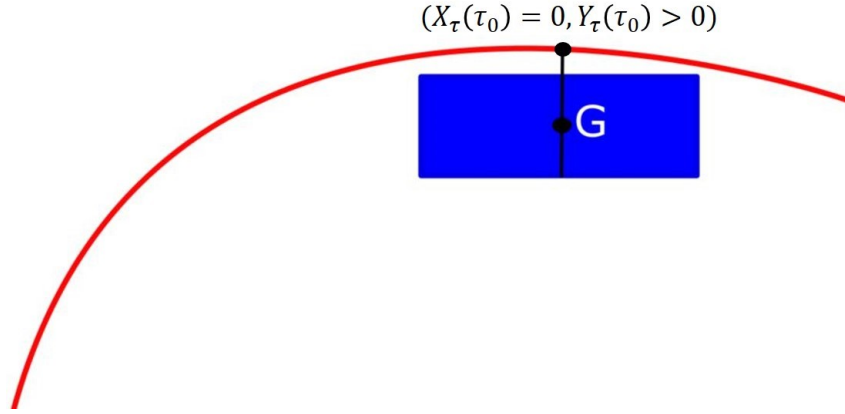


Figure 3.4 – Détection d'un obstacle situé à droite du chemin de référence

#### 3.1.3.3.1.1 Cas d'une manœuvre de type tourner à droite/virage à droite

Soient  $X_{int}(\tau)$  et  $Y_{int}(\tau)$  les coordonnées dans le repère obstacle du point définissant l'enveloppe intérieure du gabarit d'encombrement de l'égo-véhicule et présentées au chapitre 1.

Soient: 
$$\tau_{X_{obs_{inf}}} \text{ tel que } X_{int}(\tau_{X_{obs_{inf}}}) = -\frac{l_{obs}}{2} \quad (3.10)$$

et 
$$\tau_{X_{obs_{sup}}} \text{ tel que } X_{int}(\tau_{X_{obs_{sup}}}) = \frac{l_{obs}}{2}, \quad (3.11)$$

avec  $l_{obs}$  la longueur de l'obstacle et  $L_{obs}$  la largeur de l'obstacle. Il y a conflit si :

$$Y_{int}(\tau) \leq \frac{L_{obs}}{2}, \quad (3.12)$$

pour  $\tau \in [\tau_{X_{obs_{inf}}}; \tau_{X_{obs_{sup}}}]$ .  $\tau_{dichotomie}$  est calculé par dichotomie tel que  $Y_{int}(\tau_{dichotomie}) - \frac{L_{obs}}{2} = 0$ . Si lors de la recherche dichotomique la relation (3.12) est vraie, un conflit est détecté, la recherche est alors stoppée et la replanification de chemin est nécessaire.

La figure 3.5 présente la détection d'un obstacle situé à droite du chemin de référence lorsque l'égo-véhicule effectue une manœuvre de type tourner à droite ou virage à droite.

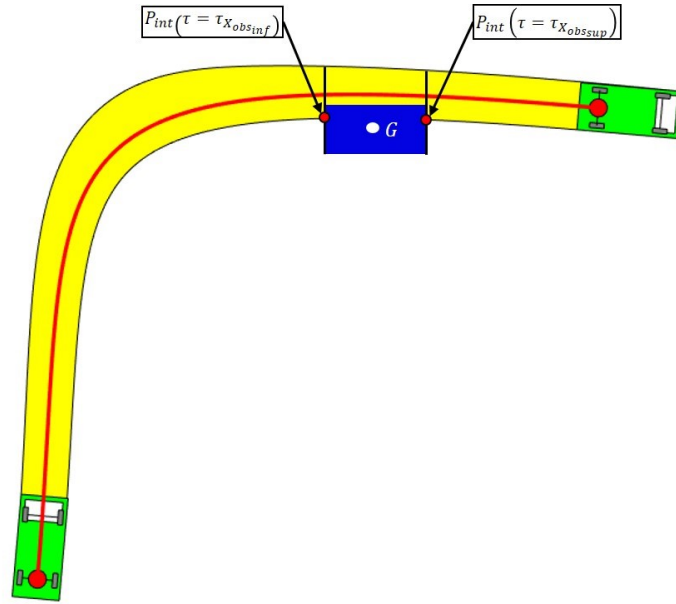


Figure 3.5 – Cas d’une manœuvre de type tourner à droite/virage à droite avec un obstacle situé à droite du chemin de référence

### 3.1.3.3.1.2 Cas d’une manoeuvre de type tourner à gauche/virage à gauche

Soient  $X_{ext}(\tau)$  et  $Y_{ext}(\tau)$  les coordonnées dans le repère obstacle du point définissant l’enveloppe extérieure du gabarit d’encombrement de l’ego-véhicule et présentées au chapitre 1.

Soient :

$$\tau_{X_{obs_{inf}}} \text{ tel que } X_{ext}(\tau_{X_{obs_{inf}}}) = -\frac{l_{obs}}{2} \quad (3.13)$$

et

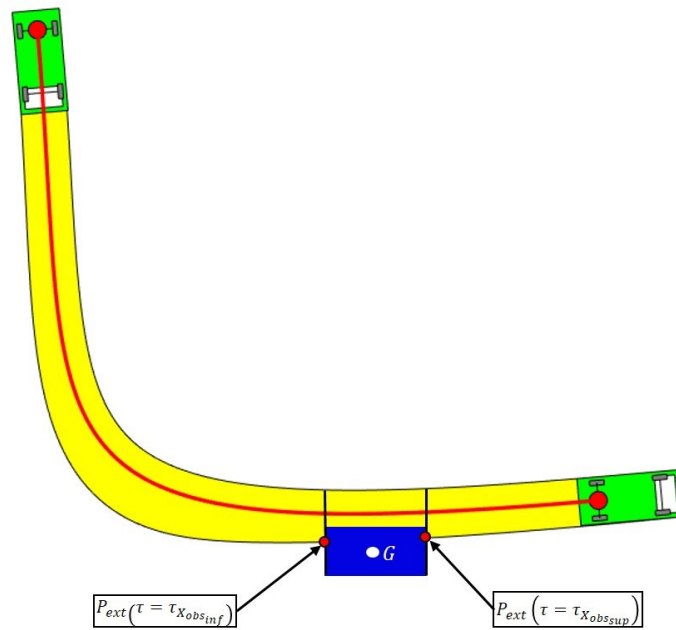
$$\tau_{X_{obs_{sup}}} \text{ tel que } X_{ext}(\tau_{X_{obs_{sup}}}) = \frac{l_{obs}}{2}. \quad (3.14)$$

Il y a conflit si :

$$Y_{ext}(\tau) \leq \frac{L_{obs}}{2} \quad (3.15)$$

pour  $\tau \in [\tau_{X_{obs_{inf}}}; \tau_{X_{obs_{sup}}}]$ .  $\tau_{dichotomie}$  est calculé par dichotomie tel que  $Y_{ext}(\tau_{dichotomie}) - \frac{L_{obs}}{2} = 0$ . Si lors de la recherche dichotomique la relation (3.15) est vraie, un conflit est détecté, la recherche est alors stoppée et la replanification de chemin est nécessaire.

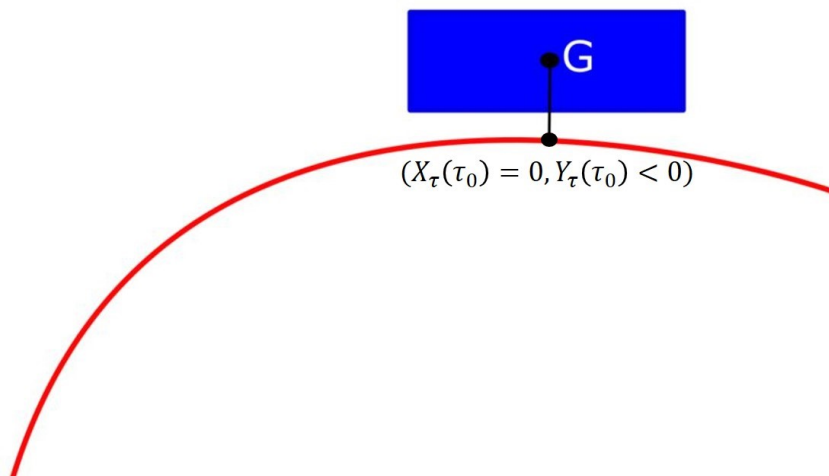
La figure 3.6 présente la détection d’un obstacle situé à droite du chemin de référence lorsque l’ego-véhicule effectue une manoeuvre de type tourner à gauche ou virage à gauche.



**Figure 3.6** – Cas d'une manœuvre de type tourner à gauche/virage à gauche avec un obstacle situé à droite du chemin de référence

### 3.1.3.3.2 Cas où l'obstacle est à gauche du chemin initial

Soit  $\tau_0$  tel que  $X_\tau(\tau_0) = 0$ , si  $Y_\tau(\tau_0) < 0$  alors l'obstacle est situé sur la gauche du chemin. La figure 3.7 présente un tel cas.



**Figure 3.7** – Détection d'un obstacle situé à gauche du chemin de référence

### 3.1.3.3.2.1 Cas d'une manœuvre de type tourner à droite/virage à droite

Soient :

$$\tau_{X_{obs_{inf}}} \text{ tel que } X_{ext}(\tau_{X_{obs_{inf}}}) = -\frac{l_{obs}}{2} \quad (3.16)$$

$$\tau_{X_{obs_{sup}}} \text{ tel que } X_{ext}(\tau_{X_{obs_{sup}}}) = \frac{l_{obs}}{2} \quad (3.17)$$

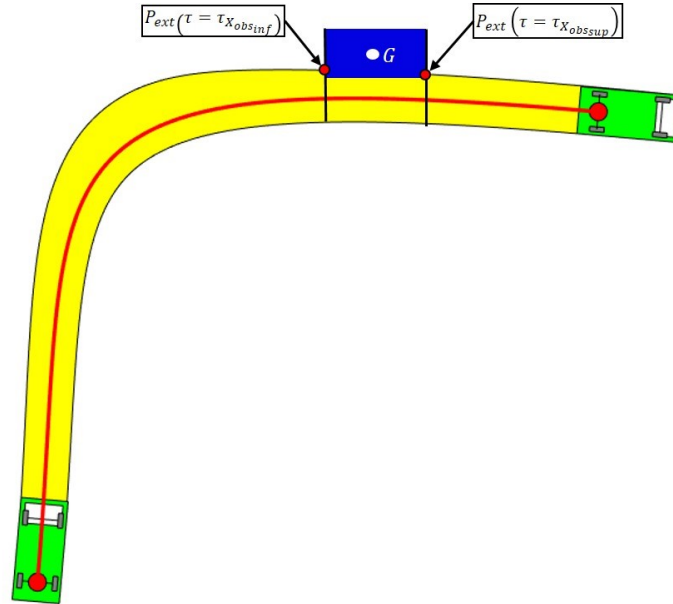
Il y a conflit si :

$$Y_{ext}(\tau) \geq -\frac{L_{obs}}{2} \quad (3.18)$$

pour  $\tau \in [\tau_{X_{obs_{inf}}}; \tau_{X_{obs_{sup}}}]$ .

$\tau_{dichotomie}$  est calculé par dichotomie tel que  $Y_{ext}(\tau_{dichotomie}) + \frac{L_{obs}}{2} = 0$ . Si lors de la recherche dichotomique la relation (3.18) est vraie, un conflit est détecté, la recherche est alors stoppée et la replanification de chemin est nécessaire.

La figure 3.8 présente la détection d'un obstacle situé à gauche du chemin de référence lorsque l'égo-véhicule effectue une manœuvre de type tourner à droite ou virage à droite.



**Figure 3.8** – Cas d'une manœuvre de type tourner à droite/virage à droite avec un obstacle situé à gauche du chemin de référence

### 3.1.3.3.2 Cas d'une manoeuvre de type tourner à gauche/virage à gauche

Soient :

$$\tau_{X_{obs_{inf}}} \text{ tel que } X_{int}(\tau_{X_{obs_{inf}}}) = -\frac{l_{obs}}{2} \quad (3.19)$$

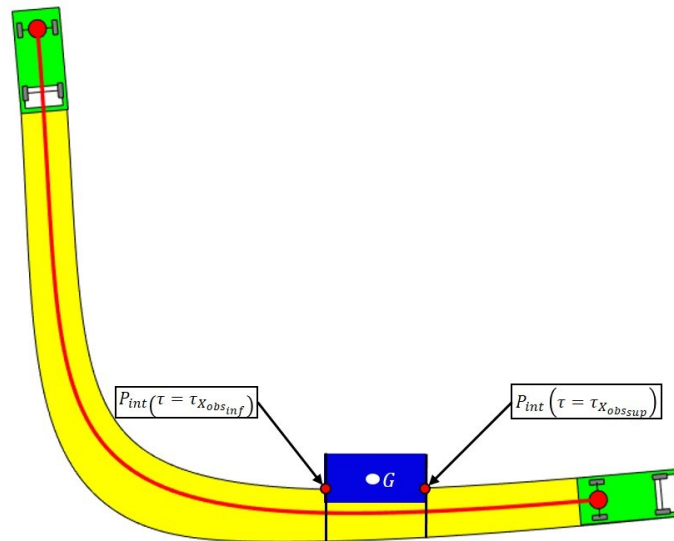
$$\tau_{X_{obs_{sup}}} \text{ tel que } X_{int}(\tau_{X_{obs_{sup}}}) = \frac{l_{obs}}{2} \quad (3.20)$$

Il y a conflit si :

$$Y_{int}(\tau) \leq -\frac{L_{obs}}{2} \quad (3.21)$$

pour  $\tau \in [\tau_{X_{obs_{inf}}}; \tau_{X_{obs_{sup}}}]$ .  $\tau_{dichotomie}$  est calculé par dichotomie tel que  $Y_{int}(\tau_{dichotomie}) + \frac{L_{obs}}{2} = 0$ . Si lors de la recherche dichotomique la relation (3.21) est vraie, un conflit est détecté, la recherche est alors stoppée et la replanification de chemin est nécessaire.

La figure 3.9 présente la détection d'un obstacle situé à gauche du chemin de référence lorsque l'égo-véhicule effectue une manoeuvre de type tourner à gauche ou virage à gauche.



**Figure 3.9** – Cas d'une manoeuvre de type tourner à gauche/virage à gauche avec un obstacle situé à gauche du chemin de référence

### 3.1.3.4 Sélection du point de départ du chemin replanifié sur le chemin de référence

Soit  $\tau_{min}$  la valeur de  $\tau$  associée à la position sur le chemin de référence où le véhicule autonome détecte l'obstacle et  $\tau_{max}$  la valeur de  $\tau$  maximal au-delà de laquelle la replanification de chemin ne garantit plus l'évitement de l'obstacle.  $\tau_{max}$  est ainsi défini telle que :

$$X_{\tau}(\tau_{max}) = -(l - PAF_{ar}) - l_{obs}. \quad (3.22)$$

L'instant de replanification  $\tau_{replan} \in [\tau_{min} \tau_{max}]$  est défini tel que:

$$\tau_{replan} = \operatorname{argmin} \left( \left( \theta(\tau) - \theta_{target}(\tau) \right)^2 \right), \quad (3.23)$$

c'est-à-dire que  $\tau_{replan}$  est la valeur de la variable spatiale minimisant l'écart entre le lacet du véhicule autonome et le lacet idéal  $\theta_{target}$  permettant d'effectuer la manœuvre d'évitement. Ce lacet idéal est défini comme l'angle formé par un vecteur colinéaire à l'axe des abscisses du repère obstacle et un vecteur colinéaire à la direction  $\overrightarrow{P_{\tau}(\tau)P_{target}}$  avec

$$P_{target}: \begin{bmatrix} -(l - PAF_{ar}) - l_{obs} \\ \frac{L}{2} + \frac{L_{obs}}{2} \end{bmatrix}_{R_{obs}}. \text{ Minimiser } \theta(\tau) - \theta_{target}(\tau) \text{ revient à minimiser l'angle}$$

de braquage du véhicule le long du chemin. Cette minimisation est réalisée par dichotomie. Cette étape est illustrée en figure 3.10 qui présente une situation d'évitement d'obstacle dans le cas d'une manœuvre de type tourner à droite.

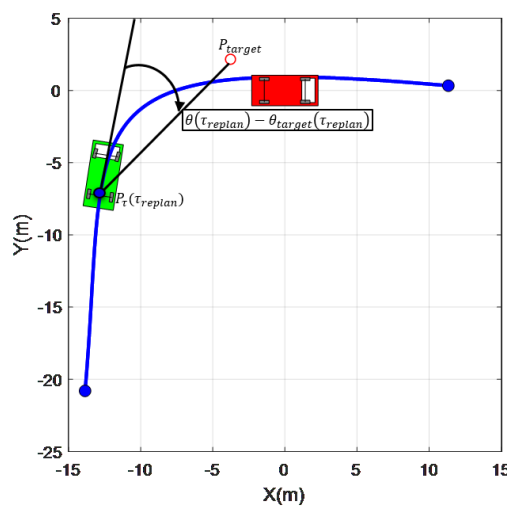


Figure 3.10 – Illustration du choix de  $\tau_{replan}$

### 3.1.4 Limites des méthodes de replanification réactive

Les méthodes les plus répandues utilisent l'approche par champs de potentiels. Cette partie présente cette approche ainsi que les limites des méthodes associées.

#### 3.1.4.1 Champs de potentiel fractionnaire

En planification de trajectoire, un robot mobile est associée à une particule chargée soumise à :

- un champ de potentiel attractif, associé à la cible à atteindre,
- un champ de potentiel répulsif, associé à chaque obstacle afin de l'éviter.

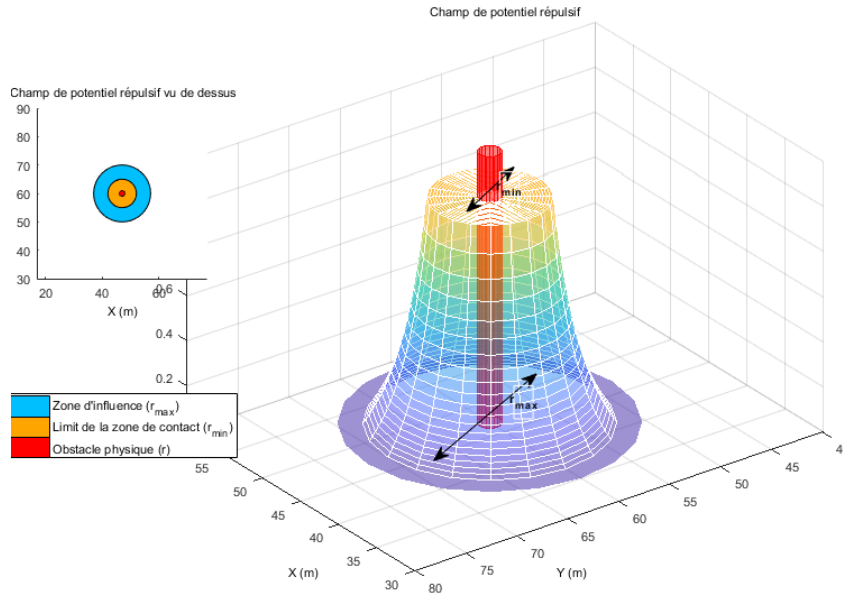
Comparée aux champs de potentiel classiques, une définition fractionnaire du champ de potentiel permet un degré de liberté supplémentaire associé à la courbure du champ de potentiel. Dans le reste de ce chapitre, la particule chargée sera associée à l'égo-véhicule.

##### 3.1.4.1.1 Champs de potentiel répulsif fractionnaire

Soit un champ de potentiel répulsif  $U$  défini par :

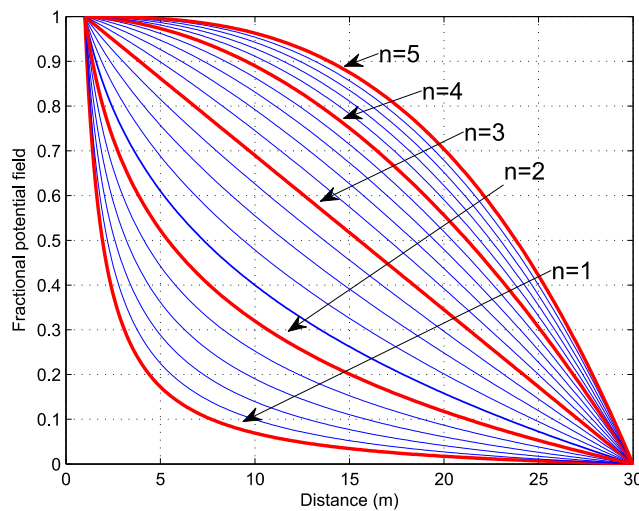
$$U(r) = \frac{r^{n_r-2} - r_{max}^{n_r-2}}{r_{min}^{n_r-2} - r_{max}^{n_r-2}} \quad (3.24)$$

pour  $r_{min} < r \leq r_{max}$ , où  $r = \sqrt{(X_{obs} - X)^2 + (Y_{obs} - Y)^2}$  est la distance entre l'égo-véhicule et l'obstacle considéré,  $X_{obs}$  et  $Y_{obs}$  étant les coordonnées de l'obstacle,  $r_{min}$  et  $r_{max}$  sont les distances limites du champ de potentiel répulsif et  $n_r$  dans  $\mathbb{R}$  est l'ordre fractionnaire. La figure 3.11 présente un exemple de champ de potentiel répulsif fractionnaire.



**Figure 3.11:** *Champ de potentiel répulsif fractionnaire créé autour d'un obstacle positionné aux coordonnées (45,60)*

Le champ de potentiel peut être mis en forme par le biais de l'ordre  $n_r$  qui permet d'introduire une influence sur la dangerosité/vulnérabilité de l'obstacle. Par exemple, quand un obstacle est à une distance donnée de l'égo-véhicule, plus le paramètre  $n_r$  est élevé, plus l'égo-véhicule va être repoussé par l'obstacle. Ainsi,  $n_r$  peut être adapté au danger associé à l'obstacle. L'influence du paramètre  $n_r$  sur le champ de potentiel répulsif est représenté en figure 3.12.



**Figure 3.12:** *Influence du paramètre  $n_r$  sur le champ de potentiel repulsif*



Un champ de potentiel est associé à chaque obstacle et le chemin libre est obtenu par troncature de la carte des potentiels [71]. La force résultante appliquée sur l'égo-véhicule est donnée par :

$$\vec{F} = -grad(\vec{U}). \quad (3.25)$$

### 3.1.4.1.2 Champs de potentiel attractif fractionnaire

La force attractive de la cible a été définie par [Ge & Cui, 2002] tel que :

$$\vec{F}_{att} = \alpha_p(\vec{x}_{target} - \vec{x}) + \alpha_v(\vec{v}_{target} - \vec{v}), \quad (3.26)$$

où  $\alpha_p$  et  $\alpha_v$  sont des coefficients de pondération, la position de l'égo-véhicule  $\vec{x}$ , la position de la cible  $\vec{x}_{target}$ , la vitesse de la particule  $\vec{v}$  et la vitesse de la cible  $\vec{v}_{target}$ . Pour le champ de potentiel attractif fractionnaire, une extension de l'équation (3.26) donne :

$$\vec{F}_{att} = \alpha_p(\vec{x}_{target} - \vec{x}) + \alpha_v \frac{d^n}{dt^n}(\vec{x}_{target} - \vec{x}), \quad (3.27)$$

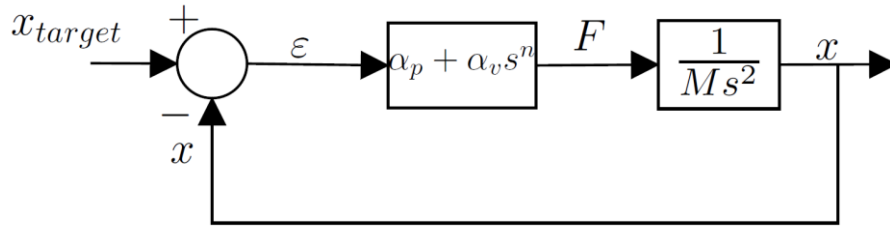
où la dérivée non entière de la variation de position est considérée à la place de la variation de vitesse

Un modèle de masse ponctuelle peut être considéré où l'application du principe fondamental de la dynamique sur la masse de l'égo-véhicule soumis à la force résultante  $F$ , sommes des forces attractive et répulsive, conduit à :

$$G(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{Ms^2}, \quad (3.28)$$

où  $s$  est la variable de Laplace,  $X(s)$  est la transformée de Laplace de la position du véhicule et  $F(s)$  la transformée de Laplace de la force résultante (répulsive et attractive), avec conditions initiales nulles.

En l'absence d'obstacles, c'est-à-dire  $F = F_{att}$  et compte-tenu des équations (3.27) et (3.28), la force  $F$  peut être considérée comme la commande du modèle masse ponctuelle, par conséquent l'équation (3.27) peut être réinterprétée comme un régulateur de position. Cette interprétation conduit au schéma de la boucle élémentaire de commande de la figure 3.13.



**Figure 3.13:** Schéma de boucle de commande élémentaire pour un champ de potentiel attractif de Ge&Cui (lorsque  $n = 1$ ) ou pour un champ de potentiel attractif fractionnaire dans les autres cas

### 3.1.4.1.3 Interprétation sur la boucle ouverte

L'expression de la boucle ouverte associée à ce schéma s'écrit  $\beta(j\omega) = \frac{\alpha_v(j\omega)^n + \alpha_p}{M(j\omega)^2} = \frac{1 + \left(\frac{j\omega}{\omega_c}\right)^n}{\frac{M}{\alpha_p}(j\omega)^2}$ . En hautes fréquences, elle devient :

$$\beta(j\omega) \approx \frac{\alpha_v}{M(j\omega)^{2-n}}, \quad (3.29)$$

pour  $\omega \gg \omega_c = \left(\frac{\alpha_p}{\alpha_v}\right)^{\frac{1}{n}}$ , ou encore,

$$\beta(j\omega) \approx \left(\frac{\omega_{ug}}{j\omega}\right)^{n'}, \quad (3.30)$$

où  $n' = 2 - n$  et la pulsation au gain unité :

$$\omega_{ug} = \left(\frac{\alpha_v}{M}\right)^{\frac{1}{n'}}. \quad (3.31)$$

Une telle boucle ouverte est paramétrée par un ordre non entier  $n'$ , ce qui amène, selon [72] à un coefficient d'amortissement :

$$\xi = -\cos\left(\frac{\pi}{n'}\right). \quad (3.32)$$

Il apparait alors que le coefficient d'amortissement ne dépend que du paramètre  $n'$  et est indépendant des paramètres du modèle. Ainsi, La robustesse du degré de stabilité est alors assurée malgré des incertitudes sur ces paramètres du modèle, en particulier sur la masse du

véhicule. Cette propriété de robustesse est inhérente à la forme de la boucle ouverte et donc à la forme de la force attractive qui est de type proportionnel dérivée non entière.

### 3.1.4.2 Application au véhicule autonome

Dans cette partie, les défauts du champ de potentiel attractif classique lorsqu'il est appliqué au véhicule autonome sont présentés. Une solution utilisant le concept de point de passage est proposée. Finalement, une amélioration de cette solution utilisant les champs de potentiel attractif fractionnaire est expliquée.

#### 3.1.4.2.1 Limites du champ de potentiel attractif de Ge&Cui dans le contexte du véhicule autonome

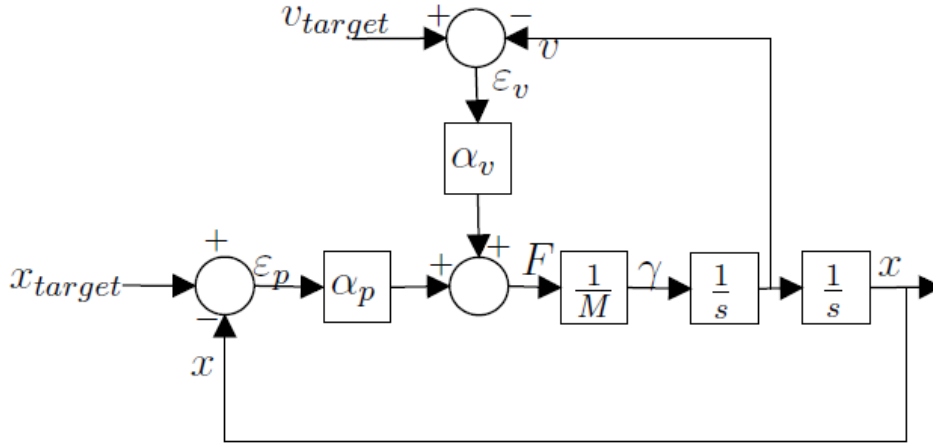
D'après les développements précédents, la transformée de Laplace de l'accélération d'une masse ponctuelle, commandée en position par une commande de type Ge&Cui peut être exprimée (avec  $n = 1$ ) conformément à :

$$\Gamma(s) = \frac{\frac{\alpha_v}{\alpha_p} s^3 + s^2}{\frac{M}{\alpha_p} s^2 + \frac{\alpha_v}{\alpha_p} s + 1} X_{target}(s). \quad (3.33)$$

Deux problèmes principaux apparaissent avec une telle définition. Premièrement, cette fonction de transfert n'est pas propre (le degré du numérateur est supérieur à celui du dénominateur) ce qui conduit à des problèmes d'implémentation. Deuxièmement plus la cible est loin, plus l'amplitude de la force attractive est grande et donc plus l'accélération du véhicule est importante. Ainsi, une accélération du véhicule trop importante conduit à un inconfort pour les passagers et dans le pire cas, les limites du système peuvent être atteintes.

#### 3.1.4.2.2 Champs de potentiel attractif classique avec limitation de l'accélération du véhicule

Tout d'abord, le problème de causalité peut être résolu en utilisant la vitesse du véhicule. En effet, la vitesse du véhicule est utilisée à la place de la dérivée de la position du véhicule. Cependant, la vitesse de la cible doit être ajoutée comme signal d'entrée comme illustrée sur la Figure 3.14.



**Figure 3.14:** Schéma de la boucle de commande utilisant le champ de potentiel attractif et la vitesse

Dans ce cas, l'accélération du véhicule devient :

$$\Gamma(s) = \frac{\frac{\alpha_v s^2}{\alpha_p}}{\frac{M}{\alpha_p} s^2 + \frac{\alpha_v}{\alpha_p} s + 1} V_{target}(s) + \frac{s^2}{\frac{M}{\alpha_p} s^2 + \frac{\alpha_v}{\alpha_p} s + 1} X_{target}(s). \quad (3.34)$$

Afin de limiter l'accélération à une valeur  $\gamma_{max}$ , l'équation (3.34) devient avec  $s = j\omega$  :

$$\max_{\omega} |\Gamma(j\omega)| \leq \max_{\omega} \left| \frac{\frac{\alpha_v (j\omega)^2}{\alpha_p}}{\frac{M}{\alpha_p} (j\omega)^2 + \frac{\alpha_v}{\alpha_p} (j\omega) + 1} \right| |V_{target}(j\omega)| + \max_{\omega} \left| \frac{(j\omega)^2}{\frac{M}{\alpha_p} (j\omega)^2 + \frac{\alpha_v}{\alpha_p} (j\omega) + 1} \right| |X_{target}(j\omega)|, \quad (3.35)$$

avec une cible stationnaire,  $V_{target} = 0$ , les coefficients du champ de potentiel attractif peuvent être exprimés comme suit :

$$\alpha_v = 2\xi\sqrt{\alpha_p M}, \quad (3.36)$$

et

$$\alpha_p \leq \frac{\gamma_{max} M}{\max(X_{target})}. \quad (3.37)$$

avec  $\max(X_{target})$  la distance maximale entre l'égo-véhicule et la cible.

Ces équations montrent que la cible doit être stationnaire et pas trop loin du véhicule afin de limiter son accélération. Conformément à ces contraintes, un ensemble de cibles peut être ajouté tout le long de l'itinéraire du véhicule. Ces cibles sont appelées points de passage. Le véhicule ne doit considérer que le point de passage le plus proche comme point attractif.

C'est seulement après l'avoir atteint que le point suivant est considéré comme attractif. Il en va ainsi jusqu'à ce que le véhicule atteigne sa destination.

### 3.1.4.2.3 Champs de potentiel attractif fractionnaire avec limitation de l'accélération du véhicule

De la même manière que précédemment, un schéma similaire, présenté en figure 3.15, peut être établi dans le cas fractionnaire.

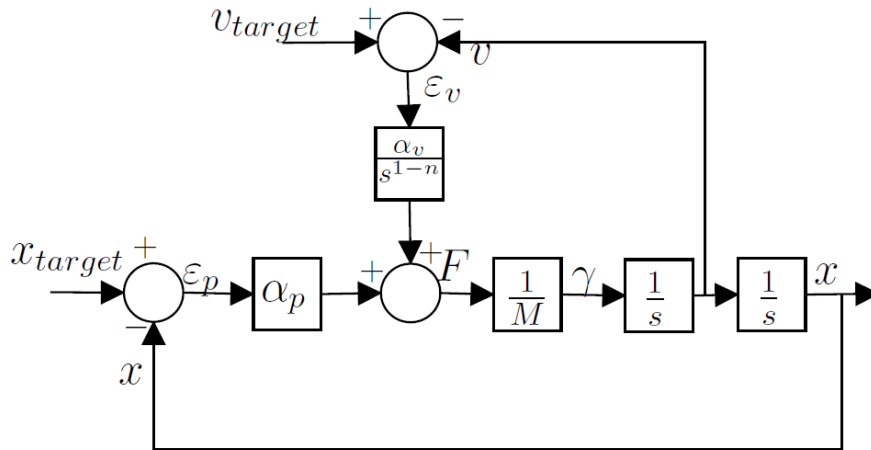


Figure 3.15: Champs de potentiel attractif fractionnaire avec causalité

Dans ce cas, l'accélération du véhicule devient :

$$\Gamma(s) = \frac{\frac{\alpha_v s^{n+1}}{\alpha_p}}{\frac{M}{\alpha_p} s^2 + \frac{\alpha_v s^{n+1}}{\alpha_p}} V_{target}(s) + \frac{\frac{s^2}{M}}{\frac{M}{\alpha_p} s^2 + \frac{\alpha_v s^{n+1}}{\alpha_p}} X_{target}(s). \quad (3.38)$$

Afin de limiter l'accélération à une valeur  $\gamma_{max}$ , l'équation (3.38) devient alors :

$$\max_{\omega} |\Gamma(j\omega)| \leq \max_{\omega} \left| \frac{\frac{\alpha_v (j\omega)^{n+1}}{\alpha_p}}{\frac{M}{\alpha_p} (j\omega)^2 + \frac{\alpha_v (j\omega)^{n+1}}{\alpha_p}} \right| |V_{target}(j\omega)| + \max_{\omega} \left| \frac{(j\omega)^2}{\frac{M}{\alpha_p} (j\omega)^2 + \frac{\alpha_v (j\omega)^{n+1}}{\alpha_p}} \right| |X_{target}(j\omega)|. \quad (3.39)$$

En considérant une cible stationnaire,  $V_{target} = 0$  et l'équation (3.31), les expressions des coefficients du champ de potentiel attractif deviennent :

$$\alpha_v = M\omega_{ug}^{n'} \quad (3.40)$$

et

$$\alpha_p \leq \frac{\gamma_{max}^M}{|x_{target}|}. \quad (3.41)$$

Il est possible d'aller plus loin dans des considérations de confort en s'intéressant au jerk. Cependant, de telles considérations conduiraient à une modification de la forme de la force attractive et donc à une perte de la propriété de robustesse du degré de stabilité.

En effet, si l'on s'intéresse au confort passager, il est nécessaire de minimiser l'accélération et le jerk. Cependant, comme expliqué précédemment, le fait d'ajouter un terme proportionnel à l'accélération et/ou au jerk entraîne une modification de la forme de la boucle ouverte et peut ainsi entraîner une perte des propriétés de robustesse. Le jerk et l'accélération peuvent cependant être pris en compte dans l'ordre de dérivation non entière  $n$ . En effet, une dérivée de la position d'ordre  $n$  compris entre 1 et 2 correspond à la prise en compte d'une combinaison de la vitesse et de l'accélération. Par extension, une dérivée de la position d'ordre  $n$  compris entre 2 et 3 correspondrait à la prise en compte d'une combinaison de l'accélération et du jerk [72]. Les propriétés de résonance et de stabilité des systèmes non entiers de second ordre généralisé sont explicitées dans [73].

### 3.1.4.2.4 Potentiel attractif en vitesse de Ge&Cui

Les paragraphes précédents ont permis de montrer les améliorations apportées à la théorie des champs de potentiels de Ge&Cui. Cependant, suite à l'introduction des points de passage, il est nécessaire de considérer un ensemble de cibles attractives. Nous considérons que l'attractivité d'une cible de position  $k + 1$  est ressentie par l'égo-véhicule que lorsque la cible de position  $k$  a été atteinte. Dans ce paragraphe, le scénario simple à deux points de passage est illustré sur figure 3.16.

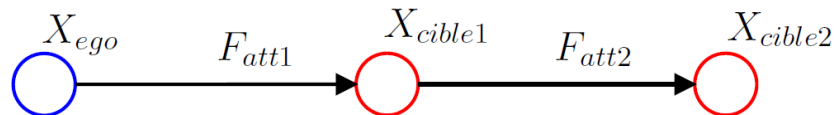
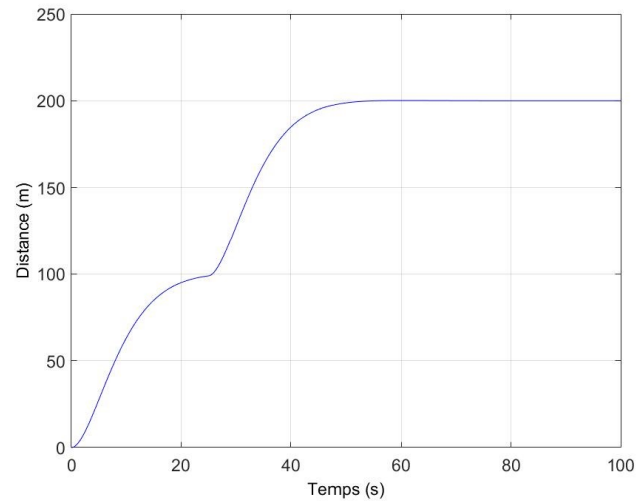
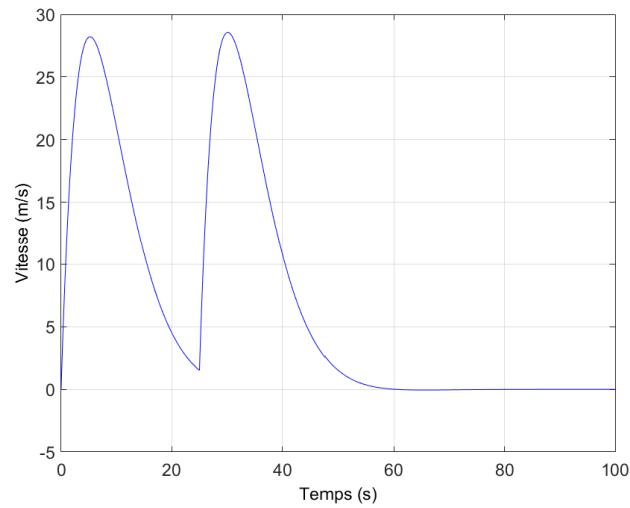


Figure 3.16: Champs de potentiel attractif fractionnaire avec multi-cibles

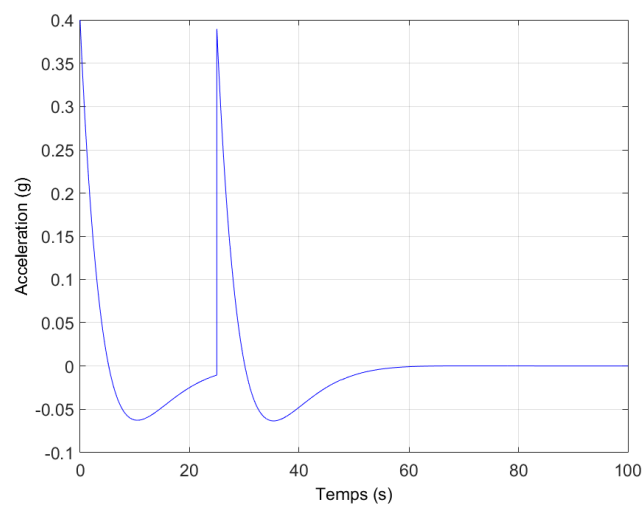
Une simulation avec changement de position de cible est proposée : la première cible est positionnée à 100m de l'égo véhicule modélisé comme une masse ponctuelle  $M = 600 \text{ kg}$  tandis que la deuxième est positionnée à 200m. Les résultats de cette simulation sont présentés en figure 3.17. Le véhicule atteint bien sa destination tout en ayant une accélération inférieure à la contrainte fixée à  $0.5g$ , où  $g$  est l'accélération de la gravité. Cependant, le profil d'accélération est en « dent de scie » et le profil de vitesse s'annule au point de passage intermédiaire. Ces observations peuvent être considérées comme des effets indésirables pour les passagers. Il est donc nécessaire, dans un premier temps, de comprendre ces phénomènes afin de les corriger dans un deuxième temps.



(a)



(b)



(c)

**Figure 3.17:** Évolution de la position (a), de la vitesse (b) et de l'accélération (c) de l'égo-véhicule lors du passage consécutif à deux points de passage



En intégrant la relation (3.34), on obtient l'expression de la vitesse de l'égo-véhicule en fonction de la vitesse de la cible est obtenue :

$$V(s) = \frac{\frac{\alpha_v s}{\alpha_p}}{\frac{M}{\alpha_p} s^2 + \frac{\alpha_v}{\alpha_p} s + 1} V_{target}(s) + \frac{s}{\frac{M}{\alpha_p} s^2 + \frac{\alpha_v}{\alpha_p} s + 1} X_{target}(s). \quad (3.42)$$

En utilisant les théorèmes de la valeur initiale et de la valeur finale, il peut être constaté que la vitesse du véhicule s'annule dans les premiers et derniers instants et ce, quelles que soient la vitesse et la position de la cible considérée. Cette constatation est prévisible puisque le principe du potentiel attractif est de minimiser l'erreur de position entre la cible et le véhicule. Il n'est alors pas possible de minimiser cette erreur en considérant une vitesse du véhicule non nulle et une cible fixe.

En prenant en considération les contraintes du code de la route notamment en termes de limitation de vitesse, il serait intéressant de pouvoir imposer la vitesse. Ainsi, la dérivée de la force attractive de Ge&Cui est considérée :

$$\frac{d\vec{F}}{dt} = \alpha_v(\vec{v}_{target} - \vec{v}) + \alpha_a(\vec{a}_{target} - \vec{a}). \quad (3.43)$$

Cette relation conduit à l'architecture de la Figure 3.18 similaire à la Figure 3.15 présentée à la partie 3.1.4.2.3. Seuls les signaux sont différents (il s'agit ici des dérivées des signaux considérés dans l'architecture précédente) et un intégrateur a été remplacé par le gain  $1/M$ .

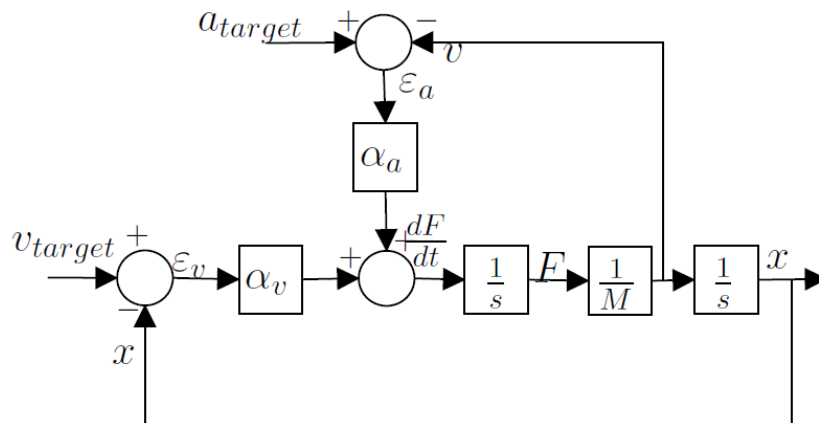


Figure 3.18: Schéma de la boucle de commande utilisant le champ de potentiel attractif et la vitesse

Les relations relatives à la vitesse du véhicule et à son accélération s'écrivent respectivement :

$$V(s) = \frac{\frac{\alpha_v}{\alpha_p}}{\frac{M}{\alpha_p}s^2 + \frac{\alpha_v}{\alpha_p}s + 1} A_{target}(s) + \frac{s}{\frac{M}{\alpha_p}s^2 + \frac{\alpha_v}{\alpha_p}s + 1} V_{target}(s), \quad (3.44)$$

et

$$\Gamma(s) = \frac{\frac{\alpha_v}{\alpha_p}}{\frac{M}{\alpha_p}s^2 + \frac{\alpha_v}{\alpha_p}s + 1} V_{target}(s) + \frac{s}{\frac{M}{\alpha_p}s^2 + \frac{\alpha_v}{\alpha_p}s + 1} X_{target}(s). \quad (3.45)$$

Elles permettent d'obtenir les nouvelles expressions des coefficients de Ge&Cui :

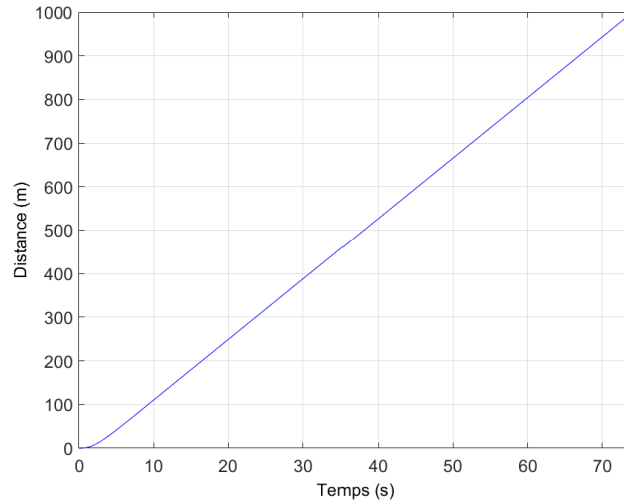
$$\alpha_a = 2\xi\sqrt{\alpha_v M}, \quad (3.46)$$

et

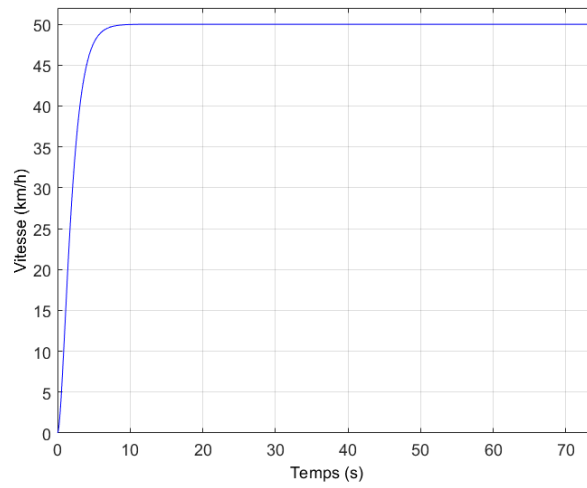
$$\alpha_v \leq \frac{2\xi M V_{max}}{\gamma_{max}}. \quad (3.47)$$

Une simulation en ligne droite est ensuite effectuée en considérant un point de passage attractif placé au point de coordonnées (1000m,1000m) alors que le véhicule est placé à l'origine du repère (0m,0m).

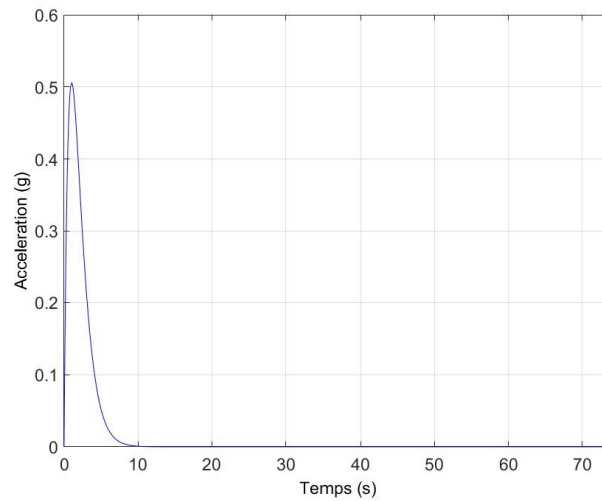
Les figure 3.19 représentent respectivement la position, la vitesse et l'accélération du véhicule selon l'axe  $X$ . Il peut être constaté que le véhicule atteint sa destination en 75 s avec une vitesse de 50km/h et une accélération maximum de 0.5g conformément aux contraintes d'accélération fixées ce qui permet de conclure qu'en utilisant un tel potentiel, il est possible d'imposer une vitesse tout en limitant l'accélération. Cependant, la position n'étant plus minimisée et la vitesse étant non nulle, le véhicule ne s'arrête pas, une amélioration de cette méthode est proposée dans la partie suivante.



(a)



(b)



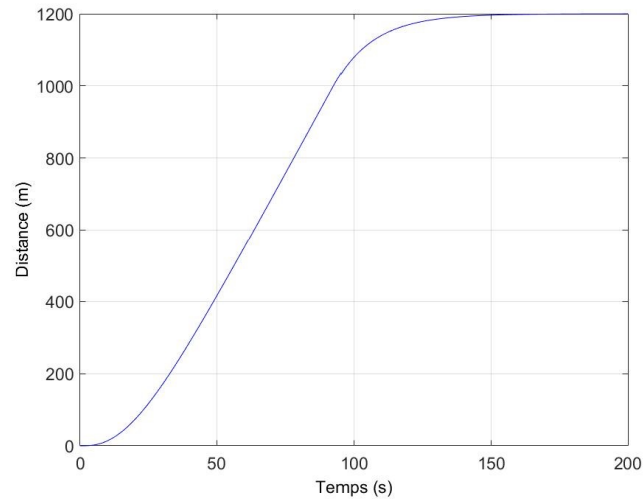
(c)

**Figure 3.19:** Évolution de la position (a), de la vitesse (b) et de l'accélération (c) lors de l'utilisation du potentiel attractif en vitesse

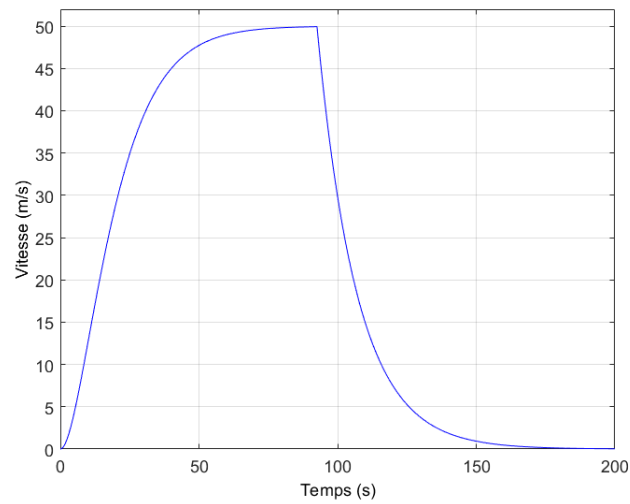
### 3.1.4.2.5 Potentiel attractif de Ge&Cui mixte

Dans le paragraphe précédent, un champ de potentiel a été introduit permettant d'imposer une vitesse. La méthode associée est tout à fait adaptée pour une navigation du véhicule sur un tronçon de route sur lequel la vitesse est limitée. Cependant elle ne permet pas de faire converger le véhicule vers une position donnée contrairement à la méthode classique de champ de potentiel attractif présentée au paragraphe §3.1.4.2.2. Au vu de cette constatation, il semble alors judicieux de combiner ces deux méthodes, permettant ainsi de pallier à leurs défauts respectifs et ainsi de profiter de leurs avantages. Pour ce faire, il est nécessaire de définir deux types de points de passages : le premier est appelé point de passage de transition et impose une vitesse au véhicule tandis que le deuxième est appelé point de passage d'arrêt et impose une position au véhicule. Ainsi lorsque le prochain point de passage considéré par le véhicule est un point de passage de transition, le véhicule reçoit une référence en vitesse et fait appel au champ de potentiel attractif en vitesse. De même, lorsque le prochain point de passage considéré par le véhicule est un point de passage d'arrêt, le véhicule reçoit une référence en position et fait appel au champ de potentiel attractif classique.

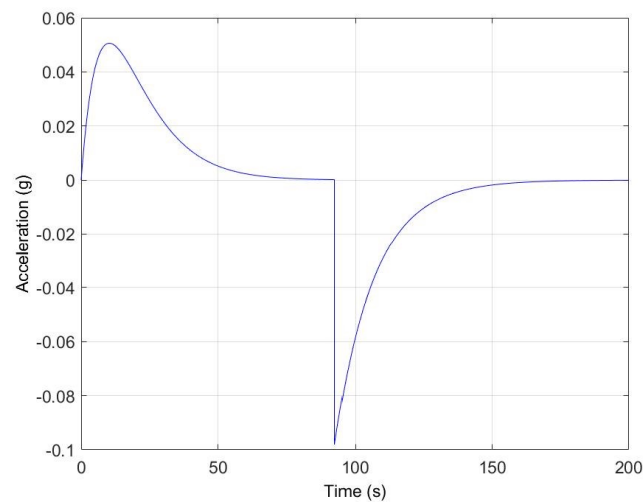
Le scénario suivant est considéré : le véhicule circule en ligne droite un point de passage de transition est placé à 1000 m du véhicule et un point de passage d'arrêt est placé 200 m plus loin. Les résultats de simulation sont présentés sur la figure 3.20. Il peut être constaté que le véhicule parcourt le premier tronçon à une vitesse de 50km/h avec une accélération inférieure à 0.5g et s'arrête au point de passage d'arrêt conformément aux contraintes.



(a)



(b)



(c)

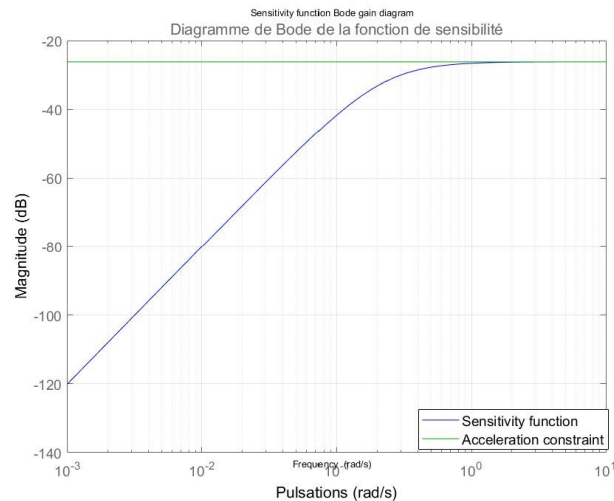
**Figure 3.20:** *Évolution de la position (a), de la vitesse (b) et de l'accélération (c) du véhicule autonome lors du passage consécutif de deux points de passage, l'un de transition, l'autre d'arrêt, en utilisant le potentiel attractif mixte*

### 3.1.4.3 Simulations des champs de potentiel

#### 3.1.4.3.1 Accélération contrainte et étude de robustesse

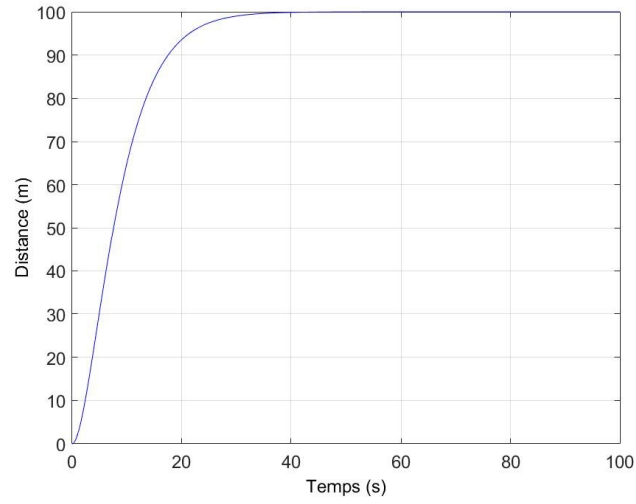
##### 3.1.4.3.1.1 Simulation de l'accélération contrainte

Le véhicule autonome est attiré par un point de passage unique conformément à la théorie des champs de potentiel attractif. Les coefficients du champ de potentiel attractif sont choisis en accord avec les expressions (3.36) et (3.37) où  $\xi = 1$ , ce qui impose un dépassement nul  $M = 750 \text{ kg}$  (véhicule léger) et le point de passage est placé  $100 \text{ m}$  devant le véhicule. Une limite de l'accélération est fixée à  $0.5g$ . Le diagramme de Bode de la fonction de sensibilité  $\frac{\Gamma(s)}{X_{target}(s)}$  et la contrainte d'accélération sont tracés sur la figure 3.21. Comme attendu, ce choix de coefficient permet de respecter la contrainte d'accélération dans la bande de fréquences utile.

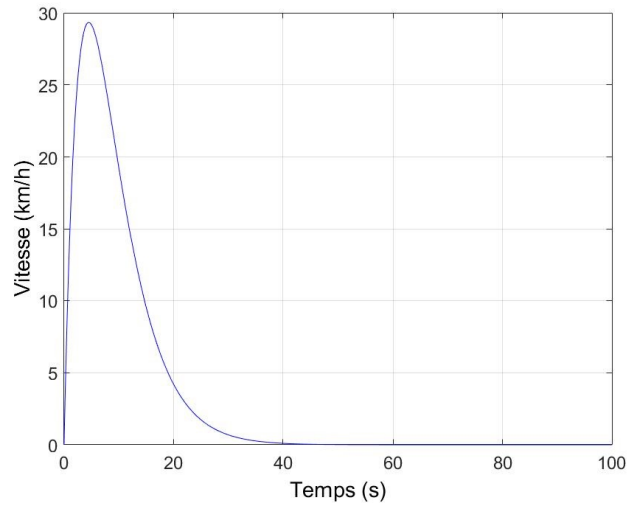


**Figure 3.21:** Diagramme de gain de la fonction de sensibilité  $\frac{\Gamma(s)}{X_{target}(s)}$  représenté en bleu, la contrainte d'accélération est représentée en verte

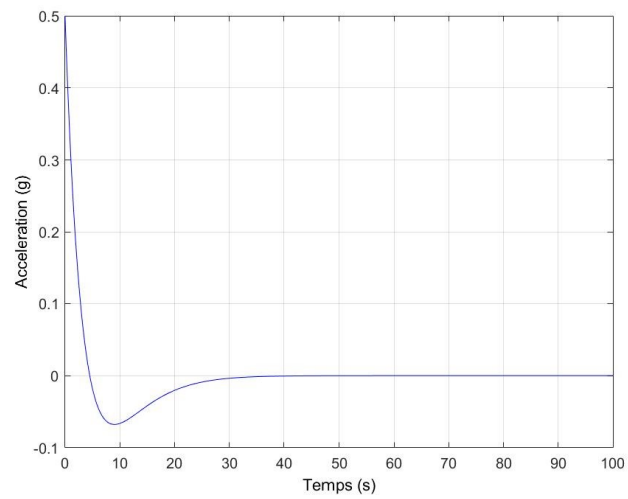
Afin d'être certain que cette contrainte est bel et bien respectée, une simulation en ligne droite est effectuée en positionnant le point attractif aux coordonnées  $(100 \text{ m}, 100 \text{ m})$  tandis que le véhicule est placé à l'origine du repère  $(0 \text{ m}, 0 \text{ m})$ . La figure 3.22 représentent respectivement la position, la vitesse et l'accélération du véhicule relativement à l'axe  $X$ . Le véhicule atteint sa destination en  $30 \text{ s}$  avec une vitesse maximum de  $30 \text{ km/h}$  et une accélération maximum de  $0.5 g$  conformément à la contrainte d'accélération.



(a)



(b)

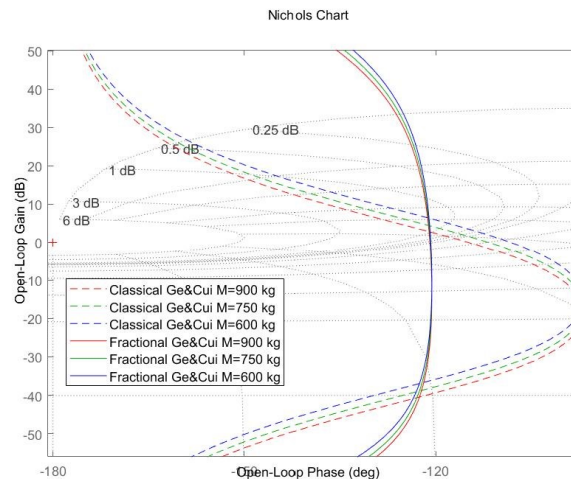


(c)

Figure 3.22: Évolution de la position (a), de la vitesse (b) et de l'accélération (c) du véhicule

### 3.1.4.3.1.2 Simulation de la robustesse du degré de stabilité

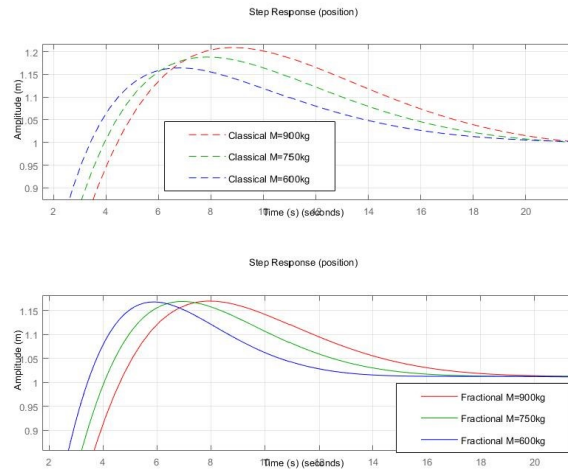
Cette partie concerne le cas où la masse du véhicule est entachée d'incertitude due, par exemple, au nombre de passagers ou encore à la charge du véhicule. Les champs de potentiel attractifs classiques et fractionnaires sont paramétrés pour une même masse maximum et une même pulsation au gain unité  $\omega_{ug} = 0.39 \text{ rad/s}$  conformément à la relation (3.29). L'impact des variations de masse sur le degré de stabilité est évalué par l'analyse des diagramme de Nichols des boucles ouvertes pour les cas classiques et fractionnaires pour une masse maximale  $M = 900 \text{ kg}$ , moyenne  $M = 750 \text{ kg}$  et minimale  $M = 600 \text{ kg}$ . présentés sur la figure 3.23. Dans le cas classique, les variations de masse conduisent à des variations de phase autour de la pulsation au gain unité  $\omega_{ug}$  (la marge de phase varie entre  $65^\circ$  et  $70^\circ$ ) contrairement au cas fractionnaire où il n'y a pas de variations autour de  $\omega_{ug}$  (la marge de phase est verrouillée à  $60^\circ$ ). Ainsi, dans le cas fractionnaire, la marge de phase est maintenue, assurant ainsi la robustesse du degré de stabilité.



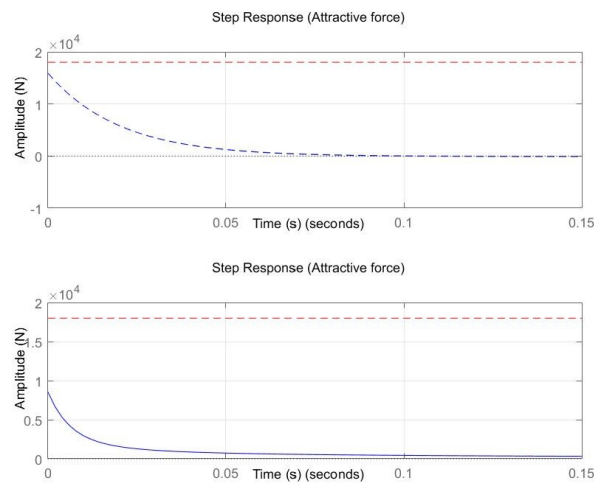
**Figure 3.23:** Diagrammes de Nichols des boucles ouvertes fractionnaire et classique

La figure 3.24 présente les réponses indicielles de la position pour le cas classique (pointillés) et dans le cas fractionnaire (trait plein) pour une masse maximale (rouge), une masse moyenne (vert) et une masse minimale (bleu). Dans le cas fractionnaire, le dépassement est maintenu constant lorsque la masse varie contrairement au cas classique. Finalement, la figure 3.25 illustre la force attractive correspondante (bleu) avec la contrainte de force (rouge). Dans les deux cas, la contrainte de force est respectée cependant, dans le cas fractionnaire, la courbe est bien en dessous de cette limite comparée au cas classique. De plus, le temps de réponse dans le cas du champ de potentiel attractif fractionnaire peut être amélioré contrairement au cas classique.





**Figure 3.24:** Positions pour des réponses indicielles unitaires illustrant la robustesse du degré de stabilité dans le cas fractionnaire (bas) comparée au cas classique (haut)



**Figure 3.25:** Forces attractives pour des réponses indicielles unitaires illustrant la robustesse du degré de stabilité dans le cas fractionnaire (bas) comparée au cas classique (haut) avec la force attractive correspondant (bleu) et la contrainte de force (rouge)

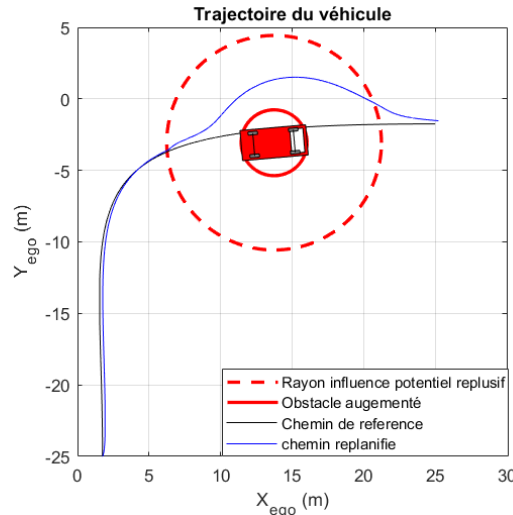
### 3.1.4.3.1.3 Simulation d'une situation de vie particulière

Dans cette partie, une simulation d'une situation de vie particulière est présentée : l'égo-véhicule doit tourner à droite dans une intersection et possède déjà un chemin de référence à suivre. Cependant, un conflit entre un obstacle imprévu et le chemin de référence survient alors que l'égo-véhicule est déjà sur ce dernier. Afin de réagir et d'éviter cet obstacle, le véhicule doit replanifier le chemin. Ce scénario est illustré en figure 3.26.

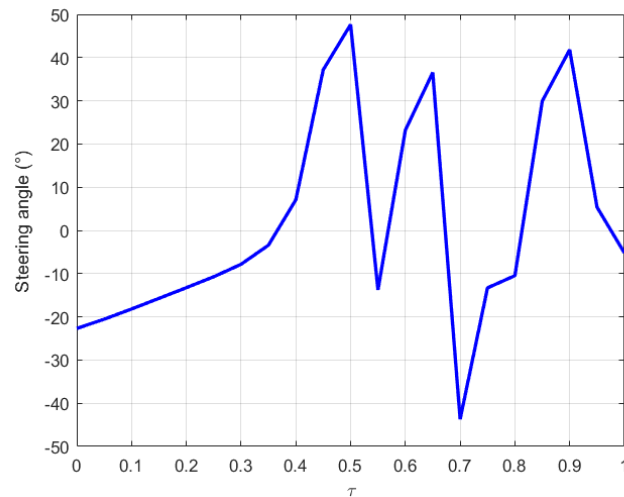
Les paramètres du champ de potentiel attractif sont choisis tels que présentés en (3.36) et (3.37), avec  $\xi = 1$ ,  $M = 1500 \text{ kg}$ ,  $\gamma_{max} = 0.5g$  et avec une cible attractive située sur le chemin de référence à 5m devant l'égo-véhicule soit  $X_{target} = 5m$ . Le suivi du chemin de référence par l'égo-véhicule est alors simulé avec une cible attractive suivant également ce même chemin à une vitesse  $V_{target} = 10 \text{ km/h}$ .

Les paramètres du champ de potentiel répulsif, quant à eux, sont choisis tels que  $r_{min} = \frac{l_{obs}}{2}$ ,  $r_{max} = 7.5 \text{ m}$ ,  $n = 1$  et  $K = \max(F_{att})$ .

Ainsi, le chemin réplanifié est très proche du chemin de référence hors du rayon d'influence du champ de potentiel répulsif et s'écarte de cette référence à l'intérieur de ce dernier afin d'éviter l'obstacle. Cependant, la méthode des champs de potentiels a été initialement développée pour des robots mobiles de faibles envergures et holonomes, d'où l'hypothèse de masse ponctuelle. Or un véhicule tel qu'une voiture est non-holonyme, c'est-à-dire que le véhicule ne peut pas se déplacer dans toutes les directions de l'espace. En effet, tout mouvement latéral du véhicule est induit par un mouvement longitudinale. Cette constatation mène alors à des angles de braquage de l'égo-véhicule évalués le long du chemin replanifié beaucoup trop important comme présenté en figure 3.27. Finalement, la définition du champ de potentiel répulsif étant discontinue dans l'espace, elle engendre également une discontinuité du chemin replanifié au niveau de la limite du rayon d'influence. Cette discontinuité a également pour conséquences une discontinuité du lacet de l'égo-véhicule et donc de son angle de braquage.



**Figure 3.26:** Replanification de chemin par champs de potentiels afin d'éviter un véhicule stationné



**Figure 3.27:** Angle de braquage de l'égo-véhicule évalué le long du chemin replanifié

### 3.1.4.4 Limites et avantages

La méthode des champs de potentiels est inialement une méthode purement réactive conçue pour les robots mobiles afin d'éviter tout obstacle rencontré par ces derniers. Une adaptation de cette méthode est nécessaire afin de pouvoir l'utiliser dans le cadre de la conduite autonome. Une telle adaptation a été réalisé dans [59], où une première trajectoire de référence est générée par un algorithme génétique, prenant en compte l'ensemble des obstacles à un instant donné, et une trajectoire replanifiée est calculée en temps réel par la méthode des champs de potentiels. Cette adaptation donne de très bon résultats mais demande beaucoup trop de ressources de calculs.

Cette méthode des champs de potentiels est également peu adaptée à l'approche développée dans cette thèse puisqu'elle consiste en une replanification de trajectoire et non pas de chemin. Cependant, elle reste une référence en termes de réactivité à l'obstacle et permet de guider le développement d'autres méthodes de replanification réactives. Ces dernières se doivent de respecter les contraintes de l'égo-véhicule tout en nécessitant peu de ressources calculatoires. De telles méthodes sont présentées dans la partie suivante.

## 3.2 Étude des méthodes choisies

Dans ce paragraphe, deux méthodes de replanification sont explorées :

- une première se basant sur l'optimisation d'une courbe de Bézier cubique utilisant le Lagrangien
- et une dernière permettant l'optimisation d'un ensemble de courbes de Bézier par programmation quadratique.

### 3.2.1 Méthode 1 : Optimisation d'une courbe de Bézier cubique

#### 3.2.1.1 Principe

##### 3.2.1.1.1 Notion de fonction de sensibilité d'une courbe de Bézier

L'objectif de cette méthode est de modifier la courbe de référence par le biais des points de contrôle de Bézier afin d'éviter l'obstacle. Ainsi, les fonctions de sensibilité de Bézier, aussi appelées polynômes de Bernstein, sont étudiées. La relation de premier ordre entre les variations des points de contrôle  $dP_i$ ,  $i = 0, \dots, 3$ , et les variations de la courbe de Bézier  $dP$ , pour un  $\tau$  donné, est exprimée de la manière suivante :

$$dP_\tau(\tau) = \sum_i \begin{pmatrix} \frac{\partial X(\tau)}{\partial X_i} & \frac{\partial X(\tau)}{\partial Y_i} \\ \frac{\partial Y(\tau)}{\partial X_i} & \frac{\partial Y(\tau)}{\partial Y_i} \end{pmatrix} dP_i, \quad (3.48)$$

avec  $dP_\tau(\tau) = \begin{bmatrix} dX(\tau) \\ dY(\tau) \end{bmatrix}$  et  $dP_i = \begin{bmatrix} dX_i \\ dY_i \end{bmatrix}$ .

Pour les courbes de Bézier cubiques, les fonctions de sensibilité  $f_i$ ,  $i = 0, \dots, 3$  s'expriment selon l'équation :

$$dP_\tau(\tau) = \sum_i \begin{pmatrix} f_i & 0 \\ 0 & f_i \end{pmatrix} dP_i, \quad (3.49)$$

où  $f_0 = (1 - \tau)^3$ ,  $f_1 = 3(1 - \tau)^2\tau$ ,  $f_2 = 3(1 - \tau)\tau^2$  et  $f_3 = \tau^3$ .

L'influence des points de contrôle sur un point du chemin  $P_\tau(\tau)$  dépend de la valeur de  $\tau$  comme illustré en figure 3.28 qui présente les polynômes de Bernstein. Par exemple, afin de déformer le début du chemin ( $\tau \in [0; 0.25]$ ), il est plus efficace de faire varier  $P_0$  ou même  $P_1$  que  $P_2$  ou  $P_3$ . De manière générale, plus la valeur de la fonction de sensibilité  $f_i(\tau)$  est élevée, plus l'influence du point de contrôle  $P_i$  sur le chemin est importante.

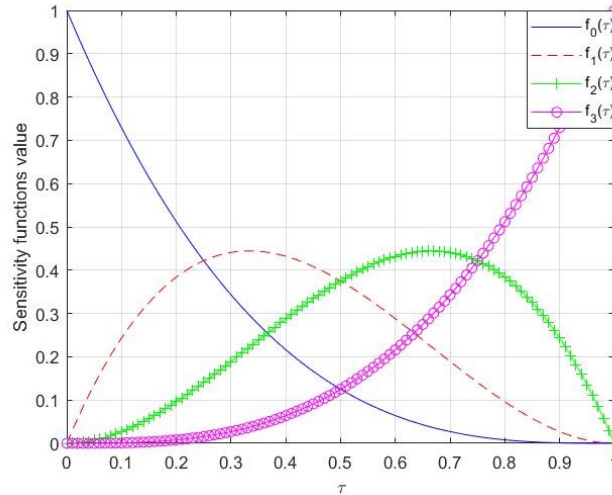


Figure 3.28: Tracé des fonctions de sensibilité d'une courbe de Bézier cubique

### 3.2.1.1.2 Formulation du problème

Lorsque le véhicule perçoit qu'un obstacle entre en conflit avec son chemin suivi, généré à l'issue de la planification prédictive, cela signifie que la position connue de l'obstacle est devenue plus précise ou qu'un nouvel obstacle est apparu. Cette variation de position est notée  $\Delta X_{obs}$  et  $\Delta Y_{obs}$  et représente la déformation de la courbe nécessaire pour éviter l'obstacle.

$P(\tau_{obs})$  est défini comme étant le point sur la courbe initiale où le conflit avec l'obstacle intervient. Un point de passage  $P_{wp}$  est déterminé conformément à :

$$P_{wp} = P(\tau_{obs}) + \begin{pmatrix} \Delta X_{obs} \\ \Delta Y_{obs} \end{pmatrix}. \quad (3.50)$$

La nouvelle courbe de Bézier devra passer par ce point de passage afin d'éviter l'obstacle. La courbe initiale  $P(\tau)$ , le point de passage  $P_{wp}$  et l'obstacle  $P(\tau_{obs})$  sont représentés en figure 3.29.

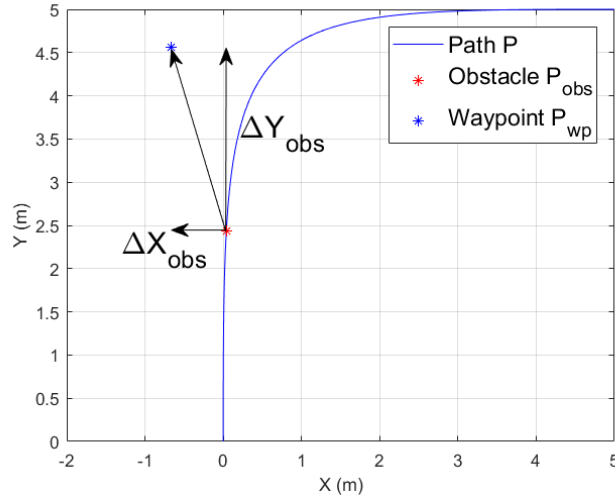


Figure 3.29: Mise en place du problème, représentation de l'obstacle, du point de passage et de la courbe initiale

Pour simplifier les notations, un changement de repère est introduit, tel que  $P_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ .

L'équation de la courbe initiale est donc donnée par :

$$P_i(\tau) = P_{1i}f_1(\tau) + P_{2i}f_2(\tau) + P_{3i}f_3(\tau) . \quad (3.51)$$

L'équation de la nouvelle courbe, issue de la replanification est donnée par :

$$P_n(\tau) = P_{1n}f_1(\tau) + P_{2n}f_2(\tau) + P_{3i}f_3(\tau) . \quad (3.52)$$

L'objectif est de déterminer les valeurs de  $P_{1n} = \begin{pmatrix} X_{1n} \\ Y_{1n} \end{pmatrix}$  et  $P_{2n} = \begin{pmatrix} X_{2n} \\ Y_{2n} \end{pmatrix}$  qui permettent d'éviter l'obstacle en passant par un point de passage  $P_{wp}$ , qui se situera sur la nouvelle courbe. Dans cette partie, la contrainte que l'on cherche à imposer est que l'égo-véhicule doit conserver le même lacet initial  $\theta_0$  que celui du chemin de référence. D'après l'équation du lacet (1.2) présentée en partie §1.3.2.2 et après simplification, cette contrainte se traduit de la manière suivante :

$$\frac{Y_{1n}}{X_{1n}} - \tan(\theta_0) = 0, \quad (3.53)$$

Le fait que la nouvelle courbe doit passer par le point  $P_{wp}$  à un  $\tau$  fixe et inconnu, c'est à dire  $P_n(\tau^*) = \begin{pmatrix} X^* \\ Y^* \end{pmatrix}$  se traduit par le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \frac{Y_{1n}}{X_{1n}} - \tan(\theta_0) = 0 \\ X_n(\tau^*) = X_{1n}f_1(\tau^*) + X_{2n}f_2(\tau^*) + X_{3n}f_3(\tau^*) \\ Y_n(\tau^*) = Y_{1n}f_1(\tau^*) + Y_{2n}f_2(\tau^*) + Y_{3n}f_3(\tau^*) \end{cases} \quad (3.54)$$

Le système est composé de 3 équations à inconnues ( $X_{1n}, Y_{1n}, X_{2n}, Y_{2n}$  et  $\tau^*$ ). Une façon de diminuer le nombre d'inconnues est de poser  $X_{1n} = X_{2n} = X_{12n}$  et  $Y_{1n} = Y_{2n} = Y_{12n}$ , ce qui implique que les deux points de contrôle seront confondus, le système se résout conformément à :

$$\begin{cases} X_{12n} = \frac{X(\tau^*) - X_3 f_3(\tau^*)}{f_1(\tau^*) + f_2(\tau^*)} \\ Y_{12n} = \frac{Y(\tau^*) - Y_3 f_3(\tau^*)}{f_1(\tau^*) + f_2(\tau^*)} \end{cases} \quad (3.55)$$

La seule variable inconnue est alors  $\tau^*$ . La valeur de cette dernière est cruciale puisque qu'elle définit la forme de la courbe. La figure 3.30 permet d'illustrer l'influence de  $\tau^*$  sur le chemin replanifié pour un jeu de paramètres  $P_0, P_3$  et  $P_{wp}$  donné.

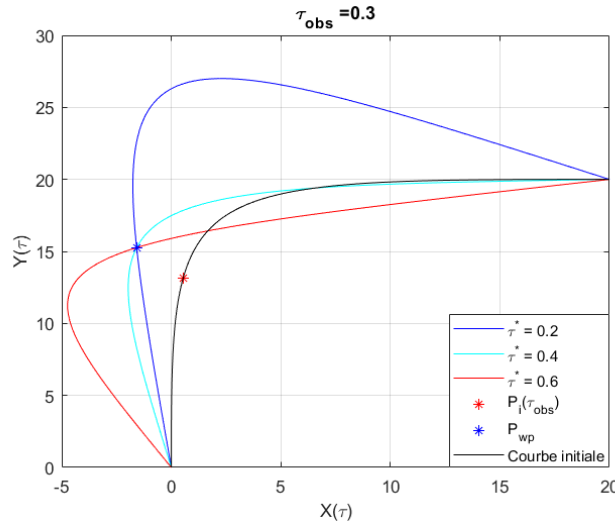


Figure 3.30: Influence de  $\tau^*$  sur le chemin replanifié

Afin de trouver la valeur de  $\tau^*$ , une contrainte sur le maximum d'angle de braquage  $\varphi_{max}$  peut être pris en compte. En effet, l'angle de braquage du véhicule étant limité, si une courbure trop importante est présente sur le chemin replanifié, l'égo-véhicule ne peut physiquement pas suivre un tel chemin. L'influence de  $\tau^*$  et  $\tau_{obs}$  sur  $\varphi_{max}$  est présentée en figure 3.31 pour un jeu de paramètres  $P_0, P_3$  et  $P_{wp}$  donné. Pour un  $P_{wp}$  donné, il existe une infinité de chemins passant par ce point. Chaque chemin est caractérisé par un angle de

braquage maximum résultant. D'après, la figure 3.30 et la figure 3.31, plus  $P_{wp}$  est proche de  $P_{obs}$ , plus  $\varphi_{max}$  est important.

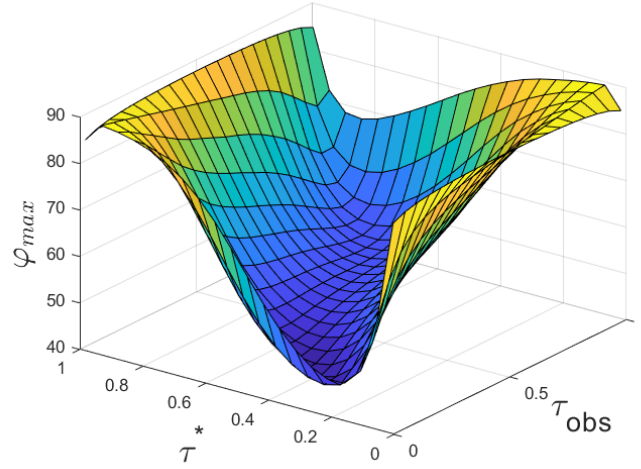


Figure 3.31: Evolution de la valeur  $\varphi_{max}$  en fonction de  $\tau^*$  et  $\tau_{obs}$

L'idée serait de trouver la valeur optimale de  $\tau^*$  qui minimise  $\varphi_{max}$ . Le problème est que l'expression analytique liant  $\tau_{max}$  à  $\varphi_{max}$  ne peut pas être établie. Cependant une approche alternative utilisant des solutions numériques est proposée dans la partie suivante.

### 3.2.1.1.3 Résolution du problème

Dans cette partie, le problème complet est considéré, c'est-à-dire  $X_{1n} \neq X_{2n}$  et  $Y_{1n} \neq Y_{2n}$ . Afin de le résoudre, un critère d'optimalité  $J$  représentant l'erreur quadratique, le long de  $\tau$  entre la courbe initiale et la nouvelle courbe est introduit :

$$J(X_{1n}, Y_{1n}, X_{2n}, Y_{2n}, \tau^*) = \int_0^1 |P_i(\tau) - P_n(\tau)|^2 d\tau . \quad (3.56)$$

D'après la Figure 3.31, et même si  $X_{1n} \neq X_{2n}$  et  $Y_{1n} \neq Y_{2n}$ , il est supposé que minimiser le critère  $J$  conduit à minimiser la différence entre le maximum d'angle de braquage du chemin initial et celui du chemin replanifié  $\varphi_{max}$ . Ainsi, le but est de minimiser le critère  $J$  sous contraintes. La première de ces dernières concerne le point de passage  $P_{wp}$  :

$$g_1 = X_{1n}f_1(\tau_2) + X_{2n}f_2(\tau_2) + X_{3i}f_3(\tau_2) - X^* , \quad (3.57)$$

$$g_2 = Y_{1n}f_1(\tau_2) + Y_{2n}f_2(\tau_2) + Y_{3i}f_3(\tau_2) - Y^* , \quad (3.58)$$

avec  $g_1 = 0$  et  $g_2 = 0$ .



Une autre contrainte à respecter est la valeur de l'angle de lacet à  $\tau = 0$  de la nouvelle courbe. De l'équation de lacet (cf équation (1.2) de la partie §1.3.2.2), la troisième égalité est déduite :

$$g_3 = \frac{Y_{1n}}{x_{1n}} - \tan(\theta_0), \quad (3.59)$$

où  $\theta_0$  représente l'angle de lacet du véhicule, au début de la nouvelle courbe.

Les variables d'optimisation sont assemblées dans un vecteur  $x$  tel que :

$$x = (X_{1n}, Y_{1n}, X_{2n}, Y_{2n}, \tau_2)^T, \quad (3.60)$$

permettant de considérer  $J(x)$  en lieu et place de  $J$ .

Le principe est donc de trouver la valeur optimale du vecteur  $x$  qui minimise le critère  $J$ , selon les contraintes  $g_1$ ,  $g_2$  et  $g_3$ . Le Lagrangien  $L(x, \lambda_1, \dots, \lambda_m)$  du problème est introduit :

$$L(x, \lambda_1, \dots, \lambda_m) = J(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(x) \quad (3.61)$$

où  $\lambda_1, \dots, \lambda_m$  représentent des coefficients de Lagrange.

Résoudre le problème d'optimisation revient alors à trouver les vecteurs d'inconnues  $x$  et  $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_n)$  tels que le gradient du Lagrangien  $\nabla L(x, \lambda)$  soit nul, c'est-à-dire :

$$\nabla L(x, \lambda) = \begin{bmatrix} \nabla_x L(x, \lambda) \\ \nabla_\lambda L(x, \lambda) \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \nabla J(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \nabla g_i(x) \\ g_1(x) \\ \vdots \\ g_m(x) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.62)$$

Le problème d'optimisation sous contrainte a été transformé en un problème de recherche de racine. La méthode de Newton-Raphson est alors utilisée, elle permet, par itérations numériques, de trouver la valeur du vecteur  $(x, \lambda)$  tel que  $\nabla L(x, \lambda) = 0$ . L'expression de  $\nabla L(x, \lambda)$  à l'itération  $k + 1$  est donnée par l'équation :

$$(x_{k+1}, \lambda_{k+1})^T = (x_k, \lambda_k)^T - \nabla^2 L(x_k, \lambda_k)^{-1} \nabla L(x_k, \lambda_k). \quad (3.63)$$

### 3.2.1.2 Simulations

Dans cette partie, une simulation d'une situation de vie est présentée. L'égo-véhicule doit tourner à droite dans une intersection et possède déjà un chemin de référence à suivre.

Cependant, un conflit entre un obstacle imprévu et le chemin de référence survient alors que l'égo-véhicule est déjà sur ce dernier. Afin de réagir et d'éviter l'obstacle, le véhicule doit replanifier le chemin. Ce scénario est illustré en figure 3.32.

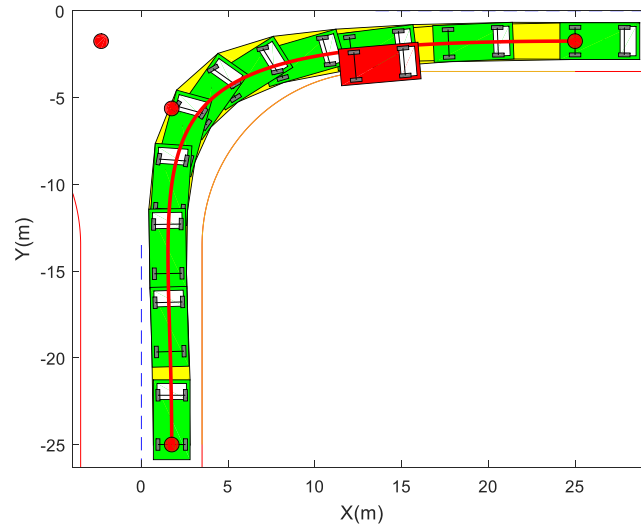
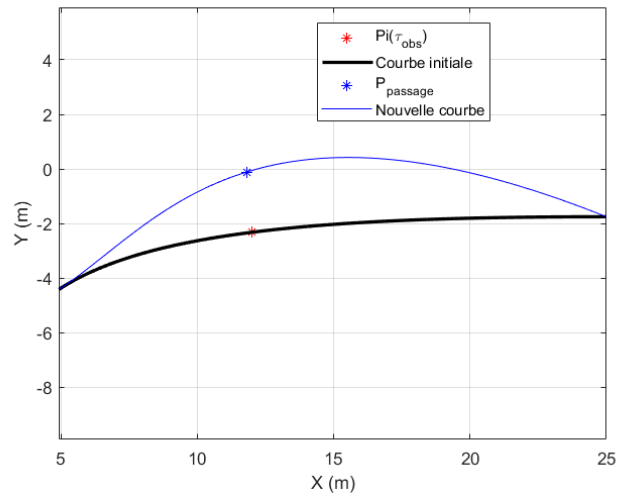
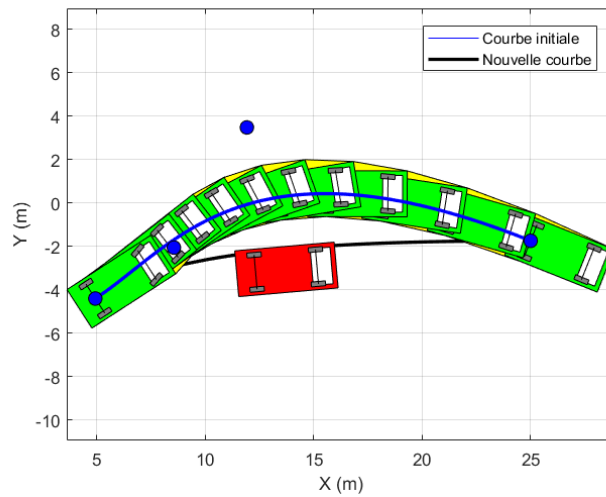


Figure 3.32: Illustration du scénario de type tourner à droite dans une intersection en croix avec obstacle sur la voie (en rouge)

La méthode de Newton-Raphson présentée dans la partie précédente est implémentée et les paramètres suivants sont considérés :  $\begin{pmatrix} \Delta X_{obs} \\ \Delta Y_{obs} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.1884 \\ 2.2090 \end{pmatrix}$ ,  $\tau_{obs} = 0.8$  et  $\theta_0 = 32.84^\circ$ . Le critère minimisé est le critère défini à l'équation (3.56). Le résultat et l'évolution du critère sont montrés respectivement en figure 3.33 et Figure 3.35. Les conditions initiales pour le vecteur  $(x, \lambda)$  sont :  $(x_0, \lambda_0) = (X_{1i}, Y_{1i}, X_{2i}, Y_{2i}, \tau_{obs}, 1, 1, 1)^T$ . La figure 3.33 illustre le tracé obtenu avec les paramètres précédents. Le nouveau chemin (en bleu) permet donc d'éviter l'obstacle en passant par le point de passage  $P_{wp}$  tout en assurant un angle de lacet initial de valeur  $\theta_0$ .



(a)



(b)

Figure 3.33: Résultats de la replanification sans (a) et avec (b) représentation de l'égo-véhicule et de l'obstacle

L'angle de braquage de l'égo-véhicule le long du chemin replanifié est représenté en figure 3.34. Le braquage reste dans les limites acceptables du véhicule.

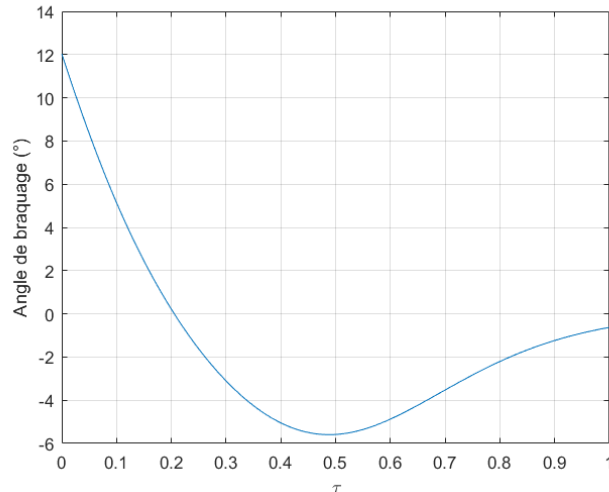


Figure 3.34: Angle de braquage résultant du chemin replanifié

L'évolution du critère est présentée à la figure 3.35. Il est constaté une décroissance dans les 4 premières itérations avant de converger vers sa valeur optimale.

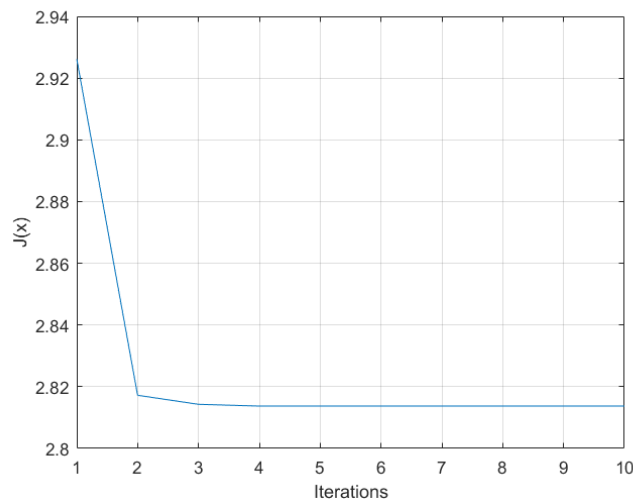


Figure 3.35: Evolution du critère  $J(x)$

### 3.2.1.3 Limites et avantages

La première méthode permet donc de calculer une nouvelle courbe de Bézier passant par un point  $P_{wp}$  donné, en assurant un angle de lacet  $\theta_0$  donné tout en assurant une déformation minimale de la courbe d'origine.

En revanche, cette méthode ne permet pas de s'assurer que le nouveau chemin déterminé est atteignable, c'est-à-dire que l'angle de braquage requis par la nouvelle courbe peut être supérieur au braquage maximum de la voiture. De plus, le lacet du véhicule à sa position finale sur le chemin n'est pas imposé. Pour ce faire, plus de degrés de liberté sur la paramétrisation du chemin sont nécessaires. Cette piste est explorée dans la méthode suivante.

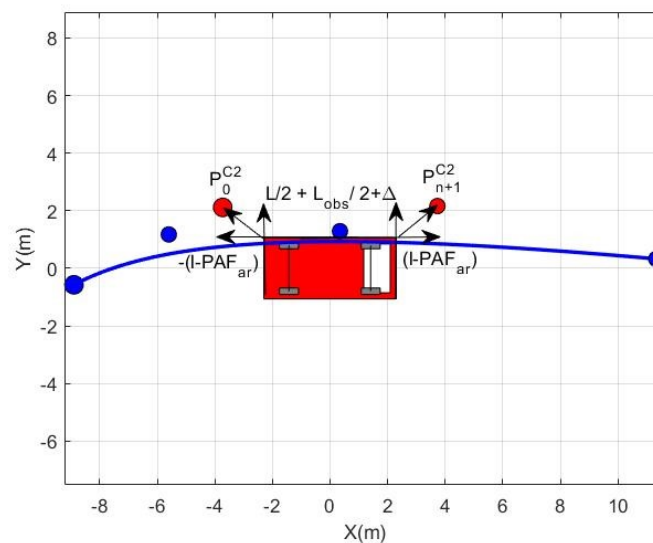
### 3.2.2 Méthode 2 : Optimisation par programmation quadratique

Cette méthode consiste à traduire notre problème de replanification de chemin en un problème d'optimisation de type programmation quadratique sous contraintes. L'apparition d'un besoin de replanification pouvant intervenir à n'importe quel instant pendant une manœuvre préalablement planifiée, seule la partie non parcourue par l'égo-véhicule est replanifiée. L'objectif est donc de replanifier une partie du chemin afin de passer à une distance de sécurité prédéfinie de l'obstacle avec conservation du lacet initial et final ainsi que l'obligation d'obtenir au moins une courbe de classe  $C^2$  afin d'assurer la continuité du lacet et du braquage le long du chemin.

#### 3.2.2.1 Principe

##### 3.2.2.1.1 Définition des points de passage limite

Afin d'éviter l'obstacle, le chemin replanifié est contraint de passer par deux points particuliers  $P_0^{C2} = \left[ \begin{matrix} -(l - PAF_{ar}) - l_{obs} \\ \pm \left( \frac{L}{2} + \frac{L_{obs}}{2} + \Delta \right) \end{matrix} \right]$  et  $P_{n+1}^{C2} = \left[ \begin{matrix} (l - PAF_{ar}) + l_{obs} \\ \pm \left( \frac{L}{2} + \frac{L_{obs}}{2} + \Delta \right) \end{matrix} \right]$  situés à une distance minimale latérale de l'obstacle de  $\frac{L}{2} + \frac{L_{obs}}{2} + \Delta$  conformément à la figure 3.36 et avec  $\Delta$  une marge de sécurité. Le chemin est alors défini par trois courbes de Bézier cubiques afin d'imposer deux points de passage.



**Figure 3.36** - Formalisation du problème : l'obstacle est représenté par le véhicule rouge, le chemin de référence est quant à lui représenté en bleu.

### 3.2.2.1.2 Détermination du chemin replanifié

#### 3.2.2.1.2.1 Formulation du problème d'optimisation

Le problème est d'identifier le chemin le plus court respectant les contraintes de continuité et de passage par deux points particuliers. Le chemin est défini dans cette partie par deux courbes de Bézier cubiques et une courbe de Bézier d'ordre 4 afin d'imposer deux points de passage et la continuité de la vitesse de braquage.

Le problème est donc d'identifier le chemin le plus court respectant les contraintes de continuité et de passage par deux points particuliers. La traduction de ce problème en problème d'optimisation sous contraintes est réalisée de la manière suivante :

$$\operatorname{argmin} J_{\text{longueur}}(P_0^{C1}, \dots, P_3^{C1}) + J_{\text{longueur}}(P_0^{C2}, \dots, P_4^{C2}) + J_{\text{longueur}}(P_0^{C3}, \dots, P_3^{C3}) = \sum_{i=0}^3 |P_{i+1}^{C1} - P_i^{C1}|^2 + \sum_{i=0}^3 |P_{i+1}^{C2} - P_i^{C2}|^2 + \sum_{i=0}^3 |P_{i+1}^{C3} - P_i^{C3}|^2 \quad (3.64)$$

avec  $C_k$  désignant la  $k$ -ième courbe de Bézier,  $P_i^{Ck} = \begin{bmatrix} X_i^{Ck} \\ Y_i^{Ck} \end{bmatrix}$  et  $P_\tau^{Ck}(\tau) = \begin{bmatrix} X_\tau^{Ck} \\ Y_\tau^{Ck} \end{bmatrix}$ .

Les contraintes de type égalité sont les suivantes :

$$P_3^{C1} = P_0^{C2}, \quad (3.65)$$

$$P_4^{C2} = P_0^{C3}, \quad (3.66)$$

pour la continuité du chemin,

$$\theta^{C1}(\tau)|_{\tau=0} = \theta_0, \quad (3.67)$$

$$\theta^{C3}(\tau)|_{\tau=1} = \theta_\infty, \quad (3.68)$$

où  $\theta_\infty$  est le lacet final de l'égo-véhicule sur le chemin de référence,

$$\theta^{C1}(\tau)|_{\tau=1} = \theta^{C2}(\tau)|_{\tau=0}, \quad (3.69)$$

$$\theta^{C2}(\tau)|_{\tau=1} = \theta^{C3}(\tau)|_{\tau=0}, \quad (3.70)$$

pour la continuité de l'angle de lacet,

$$\varphi^{C1}(\tau)|_{\tau=1} = \varphi^{C2}(\tau)|_{\tau=0}, \quad (3.71)$$

$$\varphi^{C_2}(\tau)|_{\tau=1} = \varphi^{C_3}(\tau)|_{\tau=0}, \quad (3.72)$$

pour la continuité de l'angle de braquage,

$$Y_0^{C_2} \geq \frac{L}{2} + \frac{L_{obs}}{2} + \Delta \quad (3.73)$$

$$Y_4^{C_2} \geq \frac{L}{2} + \frac{L_{obs}}{2} + \Delta \quad (3.74)$$

pour les contraintes d'inégalités des points de passage.

Le problème d'optimisation étant posé, il s'agit maintenant de le résoudre, ce qui est l'objet de la partie suivante.

### 3.2.2.1.2.2 Programmation quadratique

Afin de résoudre le problème, le critère doit être mis sous forme d'un critère quadratique :

$$J_{longueur}(x) = \frac{1}{2}x^T E x + x^T F. \quad (3.75)$$

Dans le but de réduire le nombre de degrés de liberté, l'ensemble des contraintes égalités sont réécrites de la manière suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} X_3^{C_1} = X_0^{C_2} \\ Y_3^{C_1} = Y_0^{C_2} \\ X_3^{C_2} = X_0^{C_3} \\ Y_3^{C_2} = Y_0^{C_3} \\ Y_1^{C_1} = Y_0^{C_1} + (X_1^{C_1} - X_0^{C_1})\tan(\theta_0) \\ Y_2^{C_3} = Y_3^{C_3} + (X_2^{C_3} - X_3^{C_3})\tan(\theta_\infty) \\ X_1^{C_2} = 2X_0^{C_2} - X_2^{C_1} \\ Y_1^{C_2} = 2Y_0^{C_2} - Y_2^{C_1} \\ X_2^{C_2} = 2X_3^{C_2} - X_1^{C_3} \\ Y_2^{C_2} = 2Y_3^{C_2} - Y_1^{C_3} \\ X_2^{C_1} = X_1^{C_2} - 0.5X_2^{C_2} + 0.5X_1^{C_1} \\ Y_2^{C_1} = Y_1^{C_2} - 0.5Y_2^{C_2} + 0.5Y_1^{C_1} \\ X_1^{C_3} = X_2^{C_2} - 0.5X_1^{C_2} + 0.5X_2^{C_3} \\ Y_1^{C_3} = Y_2^{C_2} - 0.5Y_1^{C_2} + 0.5Y_2^{C_3} \end{array} \right. \quad (3.76)$$

De plus, si l'on considère que l'encombrement du véhicule selon l'axe longitudinal est délimité par  $-l_{obs}/2$  et  $l_{obs}/2$ , on obtient alors les équations :

$$X_0^{C2} = \frac{-l_{obs}}{2} - (l - PAF_{ar}) \quad (3.77)$$

et

$$X_4^{C2} = \frac{l_{obs}}{2} (l - PAF_{ar}). \quad (3.78)$$

En injectant les équations (3.76) dans l'équation (3.75), on obtient le problème d'optimisation suivant :

$$\begin{aligned} \arg \min J_{longueur}(x) &= \frac{1}{2} x^T E x + x^T F \\ \text{sous contraintes } Mx &\leq \gamma, \end{aligned}$$

avec  $x = [Y_0^{C2} \ Y_4^{C2}]$ ,  $E = \frac{\partial^2 J_{longueur}}{\partial x^2}$ ,  $F = \frac{\partial J_{longueur}}{\partial x} \Big|_{x=0}$ ,  $M = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$ ,  $\gamma = \begin{bmatrix} -\frac{L}{2} - \frac{L_{obs}}{2} + \Delta \\ -\frac{L}{2} - \frac{L_{obs}}{2} + \Delta \end{bmatrix}$

et  $L_{obs}$  largeur de l'obstacle.

Afin de transformer notre problème sous contraintes en problème sans contraintes, le Lagrangien du problème est établi :

$$J(x, \lambda) = \frac{1}{2} x^T E x + x^T F + \lambda^T (Mx - \gamma). \quad (3.79)$$

Trouver le vecteur  $x$  qui minimise le critère  $J$  revient à résoudre le problème:

$$\max_{\lambda \geq 0} \min_x \left[ \frac{1}{2} x^T E x + x^T F + \lambda^T (Mx - \gamma) \right]. \quad (3.80)$$

En annulant la dérivée du critère en fonction de  $x$ , il est possible d'obtenir  $x = f(\lambda)$  :

$$x = -E^{-1}(F + M^T \lambda). \quad (3.81)$$

En remplaçant  $x$  dans l'équation (3.80) par son expression de la relation (3.81), on obtient la relation

$$\max_{\lambda \geq 0} \left( -\frac{1}{2} \lambda^T H \lambda - \lambda^T K - \frac{1}{2} F^T E^{-1} F \right) \quad (3.82)$$



qui peut se réécrire, en posant  $H = ME^{-1}M^T$  et  $K = \gamma + ME^{-1}F$  :

$$\min_{\lambda \geq 0} \left( \frac{1}{2} \lambda^T H \lambda + \lambda^T K + \frac{1}{2} \gamma^T E^{-1} \gamma \right). \quad (3.83)$$

Le problème peut alors être résolu par l'algorithme de Hildreth présentée dans [Wang, 2009].

### 3.2.2.2 Simulations

Le scénario considéré dans ce paragraphe est de type « tourner à droite à une intersection en croix ». L'égo-véhicule suit un chemin de référence défini par une courbe de Bézier de point de départ  $P_{0i}=[1.75 ; -25]$  et de point d'arrivée  $P_{3i} = [25 ; -1.75]$ . Lors de son arrivée au point de paramètre  $\tau = 0.5$ , l'égo-véhicule détecte un véhicule garé encombrant la voie conformément à la figure 3.37. Cet obstacle entre en conflit avec le chemin de référence aux alentours du point de paramètre  $\tau = \tau_{obs} = 0.8$ . L'objectif est donc de replanifier la partie du chemin de référence correspondant à l'intervalle  $\tau \in [0.5 ; 1]$ . La largeur du véhicule  $l$  est de  $2.117 \text{ m}$  et  $l_{obs} = l$ . La marge  $\Delta$  est choisie égale à  $0.1 \text{ m}$ . Le problème d'optimisation devient alors :

$$\begin{cases} \arg \min J_{longueur}(x) = \frac{1}{2} x^T E x + x^T F \\ \text{sous contraintes } Mx \leq \gamma \end{cases}, \quad (3.84)$$

$$\text{Avec } x = [X_1^{C1} \ Y_0^{C2} \ Y_3^{C2} \ X_2^{C3}], \quad E = \begin{bmatrix} 8.3 & -2.2 & 0.63 & -0.12 \\ -2.2 & 3.5 & -2.1 & -0.047 \\ 0.63 & -2.1 & 3.5 & 0.16 \\ -0.12 & -0.047 & 0.16 & 3.5 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} 76 \\ -19 \\ 3.2 \\ -28 \end{bmatrix} \quad M =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \text{ et } \gamma = \begin{bmatrix} -2.2170 \\ -2.2170 \end{bmatrix}.$$

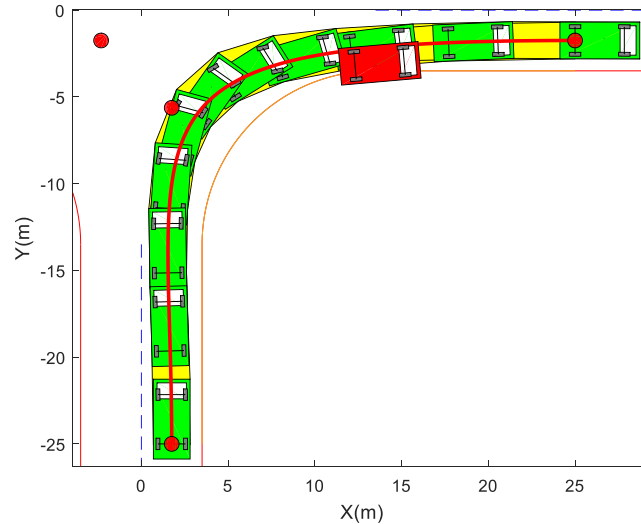


Figure 3.37: Illustration du scénario de type tourner à droite dans une intersection en croix avec obstacle sur la voie (en rouge)

Le vecteur de variable d'optimisation évalué à l'optimum  $x^*$  est donné par :

$$x^* = [X_1^{C1} = -8.5887, Y_0^{C2} = 2.2170, Y_3^{C2} = 2.2170, X_2^{C3} = 7.7634] \quad (3.85)$$

La figure 3.38 présente le résultat de l'optimisation. Le véhicule autonome évite l'obstacle avec une marge de  $0.1m$ .

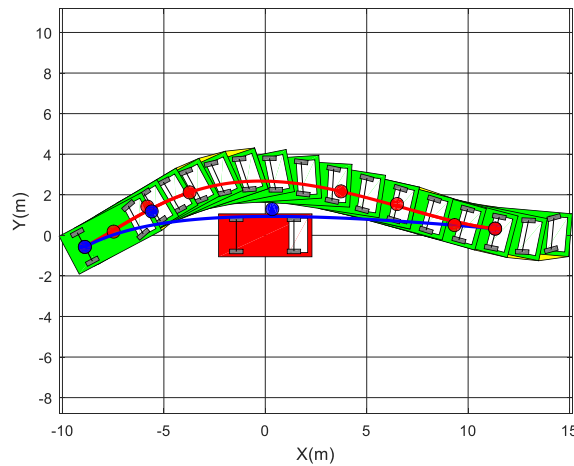


Figure 3.38: Illustration de la replanification de chemin dans le repère obstacle

La figure 3.39 présente l'angle de braquage du véhicule autonome pendant la manœuvre d'évitement. Cet angle de braquage est compris entre  $-30^\circ$  et  $30^\circ$  conformément aux limites de braquage du véhicule. Le maximum de braquage dépend de la marge d'évitement  $\Delta$  imposée et du  $\tau$  de replanification  $\tau_{replan}$ . En effet; plus la marge d'évitement  $\Delta$  est importante, plus le

maximum d'angle de braquage est important. De la même manière, plus  $\tau_{replan}$  est proche de  $\tau_{obs}$ , plus le maximum d'angle de braquage est grand. Ainsi, le meilleur moyen de limiter le maximum d'angle de braquage est de replanifier le chemin le plus tôt possible et/ou de diminuer la marge d'évitement le plus possible.

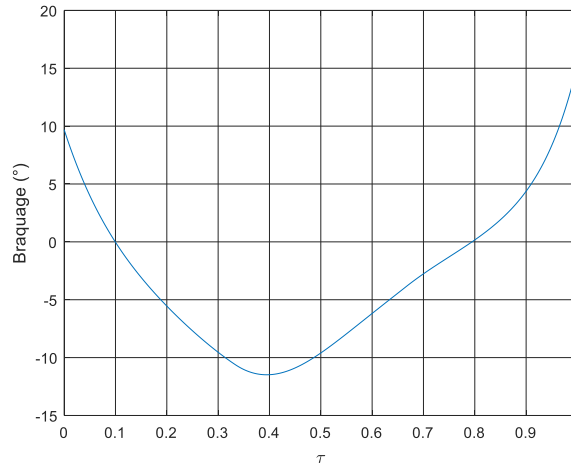


Figure 3.39: Braquage associé au chemin replanifié

### 3.2.2.3 Limites et avantages

En résumé, cette méthode constitue une amélioration de la méthode précédente. En effet, la continuité du chemin, du lacet et de l'angle de braquage est assurée par l'utilisation combinée de plusieurs courbes de Bézier et de points de passage. De plus, la formulation du problème sous forme de programmation quadratique permet ainsi l'obtention rapide d'une solution respectant l'ensemble des contraintes.

## 3.3 Etude comparative et sélection

Dans cette partie, un récapitulatif des performances des méthodes présentées dans ce chapitre est présenté sous la forme du tableau 3-1. Ces performances ont été évaluées au travers des différentes simulations de la situation de vie présentée en §3.1.4.3.1.3.

	Continuité du chemin replanifié	Respect du lacet initial et final	Marge sur la contrainte de maximum de braquage	Temps de calcul
Méthode des champs de potentiels	Non	Oui	Non respect des contraintes	0.326s
Méthode 1	Oui	Non	18°	0.085s
Méthode 2	Oui	Oui	15°	0.037s

***Tableau 3-1 : Synthèse des performances des algorithmes issues des méthodes présentées dans ce chapitre dans le cadre de la simulation de la situation de vie introduite en §3.1.4.3.1.3***

Tout d’abord, la continuité du chemin replanifié est respectée par les méthodes 1 et 2 contrairement à la méthode des champs de potentiels de part la discontinuité de la définition de son potentiel répulsif.

Ensuite, la conservation des lacets initial et final est possible via la méthode 2 et la méthode des champs de potentiels. La méthode 1, quant à elle, utilise une simple courbe de Bézier cubique ne possédant pas suffisamment de degrés de liberté pour à la fois éviter l’obstacle et imposer le lacet final.

De plus, la méthode des champs de potentiel dans sa forme classique ne permet pas le respect des contraintes sur la maximum d’angle de braquage de l’égé véhicule, ce qui est le cas pour les méthodes 1 et 2.

Enfin, la méthode 2 possède le meilleur temps de calcul bien que celui de la méthode 1 reste acceptable pour du temps réel. En revanche, le temps de calcul de la méthode des champs de potentiels reste trop important.

Finalement, la méthode 2 est choisie pour l’implantation dans la plateforme de simulation, présentée en chapitre 5, étant donnée qu’elle respecte l’ensemble des contraintes et de part son faible temps de calcul.

### 3.4 Conclusion

L'objectif de ce chapitre a été de présenter une méthode de replanification de chemin permettant l'évitement d'un obstacle statique.

Ainsi dans un premier temps, la méthode des champs de potentiels a été étudiée. Cette méthode a permis d'obtenir une replanification réactive vis-à-vis des obstacles survenant le long du chemin de l'égo-véhicule mais ne peut respecter pas les contraintes de non-holonomie du véhicule tout en possédant un temps de calcul non compatible avec le temps réel.

Une méthode plus simple a alors été développée. Elle est fondée sur l'optimisation d'une courbe de Bézier cubique au travers du Lagrangien et de l'algorithme de Newton-Raphson. Cependant, une courbe de Bézier cubique ne possède pas suffisamment de degrés de liberté afin de pouvoir respecter l'ensemble des contraintes.

Une amélioration de cette dernière méthode a finalement été présentée. Un ensemble de courbe de Bézier a alors été considéré permettant alors d'imposer deux points de passage au chemin replanifié et de formuler le problème d'optimisation sous forme de programmation quadratique conduisant à un faible temps de calcul tout en respectant l'ensemble des contraintes fixé.

La replanification de chemin étant établie, il s'agit maintenant d'associer le profil de vitesse de l'égo-véhicule à ce chemin, ce qui est l'objet du chapitre suivant.

# Chapitre 4

## Planification de vitesse

4.1 INTRODUCTION .....	186
4.2 PARAMETRISATION DE LA VITESSE A PARTIR D'UN CHEMIN PLANIFIE .....	186
4.2.1 <i>Contraintes sur la vitesse en virage</i> .....	186
4.2.1.1 Limites des accélérations pour la prise en compte des contraintes de confort .....	187
4.2.1.2 Limitation de la vitesse de braquage .....	190
4.2.1.3 Autres limites.....	192
4.2.2 <i>Implémentation</i> .....	192
4.2.2.1 Démarche .....	192
4.2.2.2 Exemples.....	193
4.2.3 <i>Bilan</i> .....	200
4.3 REPARAMETRISATION DE LA VITESSE .....	201
4.3.1 <i>Théorie de l'espace de coordination</i> .....	201
4.3.1.1 Les zones de collision.....	202
4.3.1.2 Calcul de $P_{collision}$ .....	203
4.3.1.3 Relation de priorité dans l'espace de coordination .....	205
4.3.1.4 Obtention de la contrainte de vitesse .....	206
4.3.2 <i>Simulation</i> .....	207
4.3.2.1 Exemple de coordination avec priorité à droite .....	208
4.3.2.2 Exemple de coordination lorsque l'égo-véhicule est prioritaire.....	211
4.3.3 <i>Bilan</i> .....	214
4.4 CONCLUSION .....	215

## 4.1 Introduction

Lorsqu'un véhicule autonome est en circulation, il suit généralement un chemin préalablement défini lors d'une phase de planification de chemin en fonction de la géométrie de la route et de l'espace habituellement libre. Une consigne de vitesse doit alors être associée à ce chemin en tenant compte de la sécurité, du confort des passagers et des limites du véhicule, notamment celles de ses actionneurs.

Le véhicule autonome peut également être amené à éviter un certain nombre d'obstacles dynamiques. Dans ce cas, l'adaptation de la vitesse de l'égo-véhicule en fonction de la situation est alors primordiale afin d'éviter une éventuelle collision.

Les méthodes décrites dans ce document concernent donc des algorithmes permettant à un véhicule autonome de planifier un profil de vitesse cohérent vis-à-vis d'un chemin préalablement planifié ou d'adapter un profil de vitesse déjà existant afin d'éviter une éventuelle situation conflictuelle. Ainsi, les méthodes présentées dans ce chapitre utilisent :

- le chemin initialement planifié, dans la première partie
- et les trajectoires d'éventuels obstacles dynamiques dans l'environnement proche de l'égo-véhicule, dans une seconde partie.

## 4.2 Paramétrisation de la vitesse à partir d'un chemin planifié

Dans cette première partie, une méthode de génération d'un profil de vitesse est développée. Cette méthode utilise le chemin initialement planifié afin d'associer à chaque point de l'espace une vitesse prenant en compte un certain nombre de contraintes telles que le confort des passagers.

### 4.2.1 Contraintes sur la vitesse en virage

La planification de la vitesse en virage est primordiale dans la mesure où elle influence directement différents critères associés non seulement au confort des occupants du véhicule, mais aussi à la sécurité. Certains critères sont particulièrement sensibles à haute vitesse seulement (la stabilité du véhicule par exemple) ou sur route à fort devers inverse (basculement du véhicule par exemple). Ils ne seront pas abordés dans ce mémoire dédié à un environnement urbain en intersection, dans lequel la vitesse est faible.

Les différentes contraintes considérées et leurs expressions sont maintenant présentées.

### 4.2.1.1 Limites des accélérations pour la prise en compte des contraintes de confort

La première contrainte à prendre en compte lors de la planification de vitesse est le confort des passagers. Ce confort est quantifié au travers des accélérations latérales et longitudinales.

#### 4.2.1.1.1 Accélération latérale

##### 4.2.1.1.1.1 Formalisation de la contrainte

La contrainte de confort est associée dans cette partie à l'accélération latérale ressentie par les occupants du véhicule. Cette accélération latérale  $\gamma_{lat,occ}$  est liée, pour chaque occupant, au rayon de courbure  $R_{occ}$  de la trajectoire qu'il emprunte par la relation :

$$\gamma_{lat,occ} = \frac{V_{occ}^2}{R_{occ}}, \quad (4.1)$$

dans laquelle  $V_{occ}$  est sa vitesse.

Il est alors supposé classiquement que cette accélération latérale provoque de l'inconfort lorsqu'elle est supérieure à une valeur limite  $\gamma_{lat,limite}$ , fixée à  $0,2 g$  et la contrainte est alors représentée par la relation :

$$\gamma_{lat,occ} < \gamma_{lat,limite} \cdot \quad (4.2)$$

Afin d'unifier le critère et de ne pas tenir compte de la position des occupants dans le véhicule, l'accélération latérale considérée dans cette étude est l'accélération latérale maximale de tout point du véhicule et il peut être montré, en remarquant que la vitesse  $V_k$  d'un point quelconque  $k$  du véhicule est lié au rayon de courbure  $R_k$  de la trajectoire qu'il décrit par la relation

$$V_k = \dot{\theta} R_k, \quad (4.3)$$

dans laquelle  $\dot{\theta}$  est la vitesse angulaire de lacet, indépendante du point  $k$  considéré, que l'accélération latérale maximale est subie par le point de rayon de courbure maximal, c'est-à-dire par le point A ou le point B de la Figure 1.20, point le plus éloigné au virage. En pratique le rayon de courbure étant beaucoup plus grand que la largeur du véhicule, il n'y a pas grande



différence dans les accélérations entre les différents points du véhicule. Les plus grandes différences apparaissent en ville pour les courbures les plus grandes.

#### 4.2.1.1.2 Expression de la vitesse du point d'accélération latérale maximale

En remarquant que la vitesse  $\vec{V}_A$  de ce point est liée à la vitesse  $\vec{V}_p$  du centre du milieu de l'essieu arrière par la relation

$$\vec{V}_A = \vec{V}_p + \vec{PA} \dot{\theta} \cdot \vec{z} , \quad (4.4)$$

de même,

$$\vec{V}_B = \vec{V}_p + \vec{PB} \dot{\theta} \cdot \vec{z} , \quad (4.5)$$

dans laquelle la géométrie permet de constater que

$$\vec{PA} = (l - PAF_{ar}) \vec{u}_{longi} + \frac{L}{2} \vec{u}_{lat} \quad (4.6)$$

et

$$\vec{PB} = (l - PAF_{ar}) \vec{u}_{longi} - \frac{L}{2} \vec{u}_{lat}, \quad (4.7)$$

où  $\vec{u}_{longi}$  et  $\vec{u}_{lat}$  sont les vecteurs unitaires du repère véhicule. En remarquant que

$$\vec{V}_p = V \vec{u}_{longi}, \quad (4.8)$$

où  $V$  est la norme de la vitesse du point milieu de l'essieu arrière, il vient :

$$\vec{V}_A = \left( V + \frac{L}{2} \dot{\theta} \right) \vec{u}_{longi} + (l - PAF_{ar}) \dot{\theta} \vec{u}_{lat}. \quad (4.9)$$

et

$$\vec{V}_B = \left( V - \frac{L}{2} \dot{\theta} \right) \vec{u}_{longi} + (l - PAF_{ar}) \dot{\theta} \vec{u}_{lat}. \quad (4.10)$$

#### 4.2.1.1.3 Expression de l'accélération latérale maximale

En remarquant que l'accélération latérale  $\gamma_{lat,k}$  de n'importe quel point  $k$  du véhicule est donnée par

$$\gamma_{lat,k} = \frac{V_k^2}{R_k} , \quad (4.11)$$

et en l'utilisant conjointement avec la relation  $V_k = \dot{\theta} R_k$ , (4.3) en particulierisant aux points  $A$ ,  $B$  et  $P$ , il vient :

$$\gamma_{lat,A} = V_A \frac{V_P}{R_P} . \quad (4.12)$$

#### 4.2.1.1.1.4 Expression de la contrainte liée au confort sur la vitesse du milieu de l'essieu arrière

D'après la relation (4.12), la contrainte liée au confort donnée dans la partie 4.2.1.1.1 se réécrit :

$$V_A \frac{V}{R_P} < \gamma_{lat,limite} . \quad (4.13)$$

En utilisant la relation (4.3) particularisée au point  $P$ , de telle sorte que

$$\dot{\theta} = \frac{V}{R_P} , \quad (4.14)$$

dans les relations (4.9) et (4.10), il vient que

$$V_A = \sqrt{\left(V + \frac{LV}{2R_p}\right)^2 + \left(\frac{(l-PAFar)V}{R_P}\right)^2} , \quad (4.15)$$

et

$$V_B = \sqrt{\left(V - \frac{LV}{2R_p}\right)^2 + \left(\frac{(l-PAFar)V}{R_P}\right)^2} , \quad (4.16)$$

qui permet d'exprimer la contrainte de confort sous la forme :

$$V^2 \cdot \frac{1}{R_P} \sqrt{\left(1 + \frac{L}{2R_p}\right)^2 + \left(\frac{(l-PAFar)}{R_P}\right)^2} < \gamma_{lat,limite} , \quad (4.17)$$

ou encore:

$$V^2 < \frac{\gamma_{lat,limite} \cdot R_P}{\sqrt{\left(1 + \frac{L}{2R_p}\right)^2 + \left(\frac{(l-PAFar)}{R_P}\right)^2}} . \quad (4.18)$$

dans le cas d'une manœuvre de type « tourner à droite »,

$$V^2 \cdot \frac{1}{R_p} \sqrt{\left(1 - \frac{L}{2R_p}\right)^2 + \left(\frac{(l-PAFar)}{R_p}\right)^2} < \gamma_{lat,limite}, \quad (4.19)$$

ou encore, finalement :

$$V^2 < \frac{\gamma_{lat,limite} \cdot R_p}{\sqrt{\left(1 - \frac{L}{2R_p}\right)^2 + \left(\frac{(l-PAFar)}{R_p}\right)^2}}, \quad (4.20)$$

dans le cas d'une manœuvre de type « tourner à gauche ».

Dans le reste du document, on notera :

$$V_{conf,lat} = \begin{cases} \sqrt{\frac{\gamma_{lat,limite} \cdot R_p}{\sqrt{\left(1 - \frac{L}{2R_p}\right)^2 + \left(\frac{(l-PAFar)}{R_p}\right)^2}}} & \text{lorsque le véhicule tourne à gauche} \\ \sqrt{\frac{\gamma_{lat,limite} \cdot R_p}{\sqrt{\left(1 + \frac{L}{2R_p}\right)^2 + \left(\frac{(l-PAFar)}{R_p}\right)^2}}} & \text{lorsque le véhicule tourne à droite} \end{cases} \quad (4.21)$$

#### 4.2.1.1.2 Accélération longitudinale

La contrainte de confort est associée dans cette partie à l'accélération latérale ressentie par les occupants du véhicule. Les variations d'accélération longitudinale  $\gamma_{longi,veh}$  sur l'ensemble du véhicule sont supposées négligeables.

Il est cependant supposé classiquement que cette accélération longitudinale provoque de l'inconfort lorsqu'elle est supérieure, en phase d'accélération, à une valeur limite  $\gamma_{accel,limite}$ , fixée à 0,1 g et en phase de décélération, à une valeur limite  $\gamma_{decel,limite}$ , fixée à moins de 0,3 g. La contrainte sur l'accélération longitudinale du véhicule se résume alors par :

$$\gamma_{decel,limite} < \gamma_{longi,veh} < \gamma_{accel,limite} \quad (4.22)$$

où  $\gamma_{longi,veh}$  désigne l'accélération longitudinale du véhicule.

#### 4.2.1.2 Limitation de la vitesse de braquage

La vitesse de braquage des roues est également une limitation à la vitesse du véhicule. En effet, la rotation des roues directrices n'étant pas instantanée, il est nécessaire d'adapter la

vitesse du véhicule à la courbure du chemin à suivre afin de respecter la dynamique de la colonne de direction.

En combinant les expressions (1.3) et (4.3), l'angle de braquage roue du véhicule s'exprime alors :

$$\varphi = \text{atan}\left(\frac{d}{R_p}\right), \quad (4.23)$$

ou encore,

$$\varphi = \text{atan}(d \cdot C_p), \quad (4.24)$$

où  $C_p = \frac{1}{R_p}$  désigne la courbure du chemin suivi par le point  $P$  du véhicule et  $d$  l'empattement du véhicule.

La vitesse de braquages des roues s'exprime alors par :

$$\dot{\varphi} = \frac{\frac{dC_p}{dt}}{\left(\frac{1}{d} + d \cdot C_p^2\right)}. \quad (4.25)$$

En remarquant que  $\frac{dC_p}{dt} = \frac{dC_p}{ds} \frac{ds}{dt}$  et que  $\frac{ds}{dt} = V$ , il vient :

$$\dot{\varphi} = \frac{\frac{dC_p}{ds} \cdot V}{\left(\frac{1}{d} + d \cdot C_p^2\right)}. \quad (4.26)$$

Finalement, la contrainte de la vitesse de braquage des roues sur la vitesse du véhicule se traduit par l'expression :

$$V < \dot{\varphi}_{max} \frac{\left(\frac{1}{d} + d \cdot C_p^2\right)}{\left|\frac{dC_p}{ds}\right|}. \quad (4.27)$$

Dans le reste du document, on notera :

$$V_{braq} = \dot{\varphi}_{max} \frac{\left(\frac{1}{d} + d \cdot C_p^2\right)}{\left|\frac{dC_p}{ds}\right|}. \quad (4.28)$$

La valeur de  $\dot{\varphi}_{max}$  est une caractéristique de l'actionneur pilotant la colonne de direction de l'égo-véhicule. En se référant à [56], l'auteur utilise une direction assistée électrique comme actionneur produisant des couples de braquage volant maximaux de 10 Nm, à une vitesse angulaire du volant pouvant atteindre jusqu'à 600°/s. De plus, l'angle de braquage du volant  $\varphi_{volant}$  et celui de la roue  $\varphi$  sont liés par la relation :

$$\varphi = \frac{1}{\lambda} \varphi_{volant}, \quad (4.29)$$

où  $\lambda$  est appelé rapport de réduction de la direction.

Ainsi, dans ce mémoire, il est sera considéré que  $\lambda = 15$  et donc  $\dot{\varphi}_{max} = 40^\circ/s$ .

### 4.2.1.3 Autres limites

D'autres contraintes peuvent être utilisées pour la génération de la consigne de vitesse.

Par exemple,

- éviter le basculement ;
- limitation du Jerk,
- garantir la stabilité du véhicule.

Cependant ces contraintes sont actives qu'à hautes vitesses et n'intervenant que très peu aux vitesses autorisées en milieu urbain dans les cas d'adhérence nominal (route sèche), elles ne sont donc pas prises en compte dans cette thèse.

## 4.2.2 Implémentation

### 4.2.2.1 Démarche

La paramétrisation de la vitesse permet d'obtenir à chaque instant  $t$ , un profil de vitesse respectant l'ensemble des contraintes présentées en 4.2.1 en fonction du rayon de courbure du chemin  $R_\tau(\tau(t))$ . Il suffit alors de trouver une fonction  $\tau(t)$  croissante sur l'intervalle  $[t_{min}; t_{max}]$  tel que  $\tau(t_{min}) = 0$  et  $\tau(t_{max}) = 1$ ,  $t_{min}$  et  $t_{max}$  étant respectivement les temps aux points de départ et d'arrivée de la trajectoire du véhicule.

Les contraintes présentées dans la partie précédente concernent la valeur de la vitesse, pour celles associées à l'accélération latérale, la vitesse de braquage et la limitation réglementaire, mais également la dérivée, par rapport au temps, de cette valeur. La démarche proposée se décompose en deux temps :

Dans le premier, la vitesse  $V(t)$  doit respecter l'inégalité suivante :

$$V(t) \leq \min(V_{conf,lat}(t), V_{lim}(t), V_{braq}) \quad (4.30)$$

avec  $V_{lim}(t)$  la vitesse limite autorisée par le code de la route, cette vitesse est déduite de l'environnement du véhicule autonome (en particulier de la signalisation). Pour la méthode proposée il sera considéré qu'au moins une des contraintes est saturée, c'est-à-dire :

$$V(t) = \min(V_{conf,lat}(t), V_{lim}(t), V_{braq}). \quad (4.31)$$

Cette considération se justifie intuitivement par le fait qu'un objectif implicite de la planification de vitesse est d'obtenir un temps de trajet le plus court possible, ce qui passe, pour un chemin fixé, par la maximisation de la vitesse moyenne, c'est-à-dire par la maximisation de la vitesse à chaque instant.

Dans un second temps, un algorithme est ensuite utilisé afin de respecter la contrainte de confort longitudinale. Le principe de ce dernier est de parcourir le profil de vitesse obtenu lors de la prise en compte des contraintes agissant sur sa valeur, dans le sens des temps croissants afin de vérifier que les coefficients directeurs des tangentes en chaque point du profil sont inférieurs à  $\gamma_{accl,limite}$ . Si ce n'est pas le cas, les pentes de ces tangentes sont maintenues à cette limite d'accélération. De la même manière, l'algorithme parcourt le profil de vitesse dans le sens des temps décroissants, les coefficients directeurs des tangentes en chaque point du profil sont alors évalués afin de vérifier que leurs valeurs sont supérieures à  $\gamma_{decel,limite}$ . Si ce n'est pas le cas, les pentes de ces tangentes sont également maintenues à cette limite d'accélération.

## 4.2.2.2 Exemples

### 4.2.2.2.1 Exemple d'un cas du type « tourner à droite » dans une intersection en croix

Soit le chemin  $P_\tau(\tau)$  fourni par la planification de chemin prédictive et présenté en figure 4.1. La planification de vitesse s'intéresse alors à associer la variable  $\tau$  à la variable de temps  $t$ .

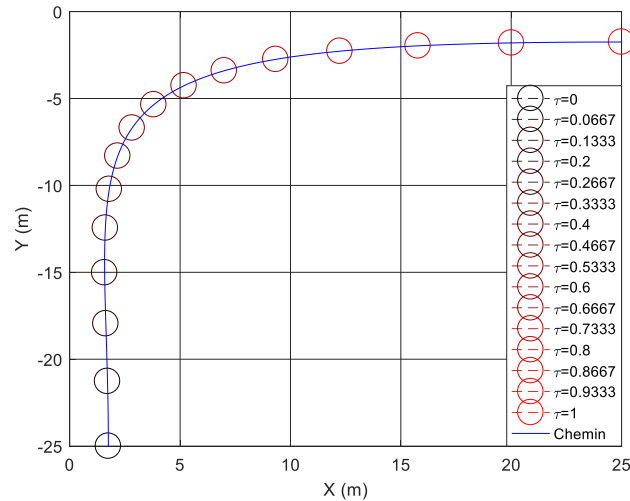


Figure 4.1 – Tracé du chemin  $P_\tau(\tau)$  : les différentes positions du véhicule en fonction de  $\tau$  sont repérées par des cercles allant du noir ( $\tau = 0$ ) au rouge ( $\tau = 1$ ).

La première étape consiste à générer l'ensemble des profils de vitesse limites :

- le profil de vitesse limite  $V_{conf,lat}$  pour le confort latéral défini à l'équation (4.21) ;
- le profil de vitesse limite  $V_{braq}$  pour la vitesse de braquage des roues défini à l'équation (4.28) ;
- la vitesse limite autorisée  $V_{lim}$ .

Ces profils de vitesse sont tracés en figure 4.2. Il peut être observé, dans cet exemple, que le profil de vitesse limite  $V_{braq}$  n'est pas limitant contrairement à  $V_{conf,lat}$  qui constitue la contrainte principale de la vitesse de l'égo-véhicule en virage.

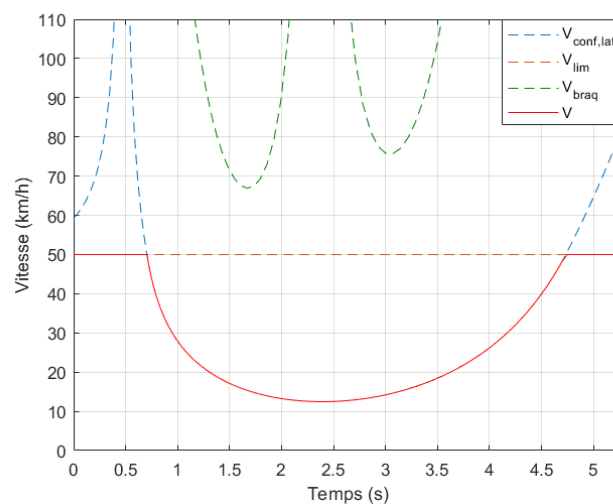
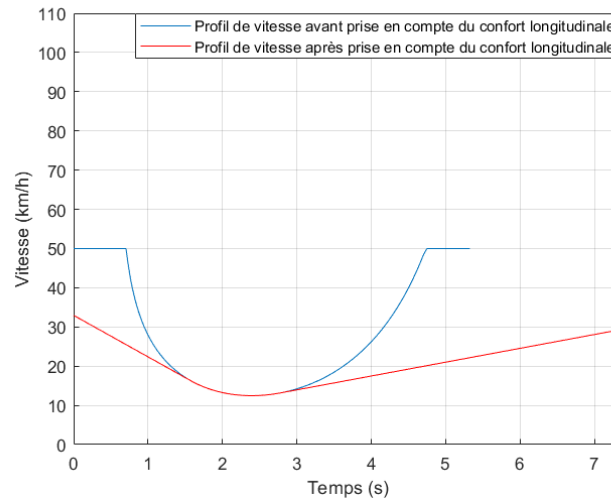


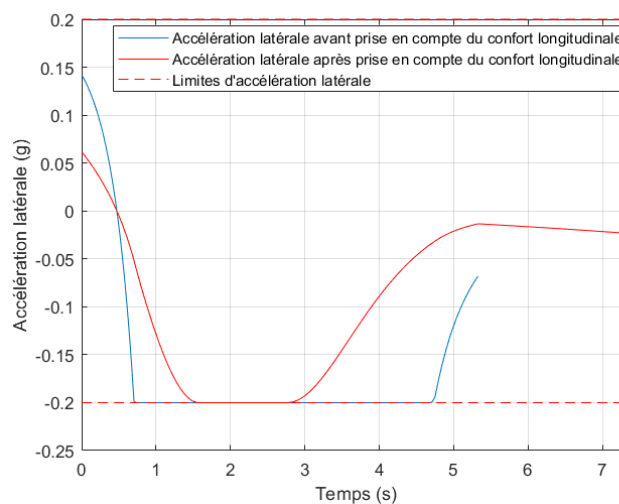
Figure 4.2 – Profils de vitesse limite pour chaque type de contraintes (traits discontinus) et profil de vitesse résultant (trait continu)

Le profil de vitesse est ensuite ajusté pour respecter les limites d'accélération longitudinale et présenté en figure 4.3. Les variations de vitesse de ce nouveau profil sont beaucoup plus faibles. De plus, la vitesse étant en moyenne plus faible pour une même distance à parcourir, le temps de parcours du chemin est plus élevé.



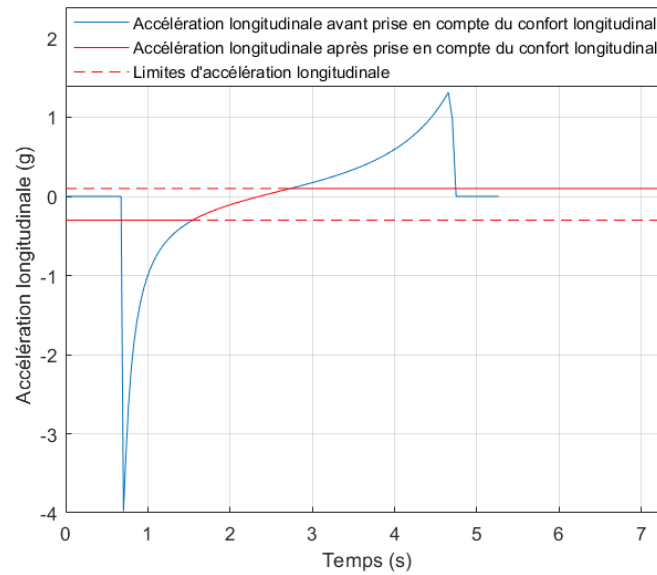
**Figure 4.3** – Profil de vitesse avant (en bleu) et après (en rouge) prise en compte du confort longitudinal

Les figures figure 4.4 et figure 4.5 représentent respectivement l'accélération latérale et longitudinale de l'égo-véhicule. Avant l'utilisation de l'algorithme de prise en compte du confort, l'accélération longitudinale est bien au-delà des limites fixées bien que celles de l'accélération latérale soient respectées. L'algorithme permet alors de saturer aux limites l'accélération longitudinale.



**Figure 4.4** – Accélération latérale résultant de la planification de vitesse avant (en bleu) et après (en rouge) prise en compte du confort longitudinal



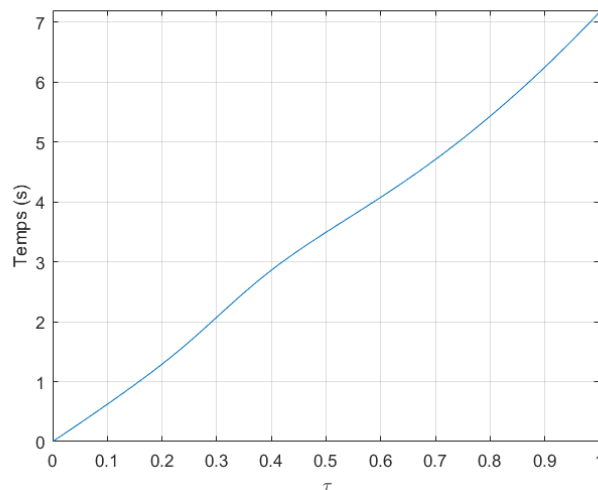


**Figure 4.5** – Accélération longitudinale résultant de la planification de vitesse avant (en bleu) et après (en rouge) prise en compte du confort longitudinal

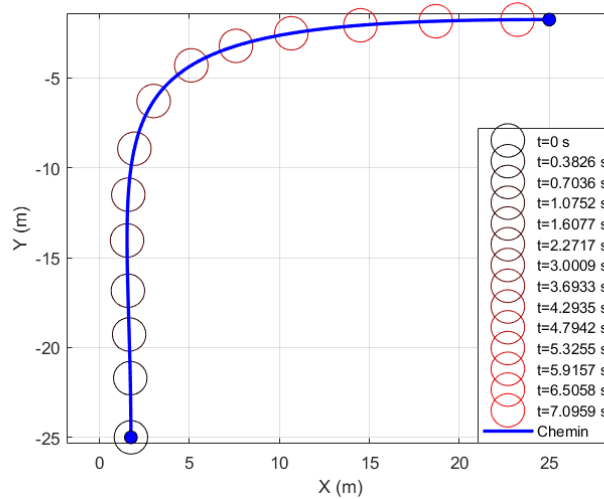
La dernière étape consiste enfin à obtenir  $t(\tau)$  par le calcul numérique de l'équation:

$$t(\tau) = \int_0^\tau \frac{V_\tau(\tau')}{V(t(\tau'))} d\tau'. \quad (4.32)$$

La figure 4.6 présente ainsi le tracé de  $t(\tau)$ . L'obtention du lien entre  $t$  et  $\tau$  permet alors de relier la vitesse  $V(t)$  au chemin  $P_\tau(\tau)$  conformément à la figure 4.7.



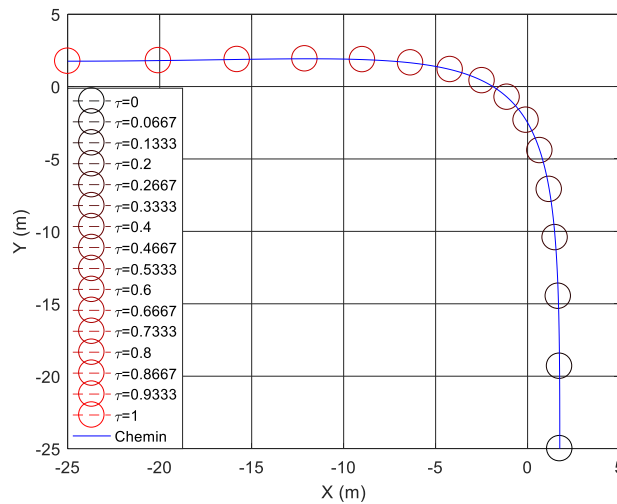
**Figure 4.6** – Tracé de  $t(\tau)$  : pour tout  $\tau$  est associé un temps  $t$  afin d'obtenir un profil de vitesse  $V(t)$



**Figure 4.7** – Tracé de la trajectoire  $P(t)$  : les différentes positions du véhicule en fonction du temps  $t$  sont repérées par des cercles allant du noir ( $t = 0$  s) au rouge ( $t = 4.3$  s).

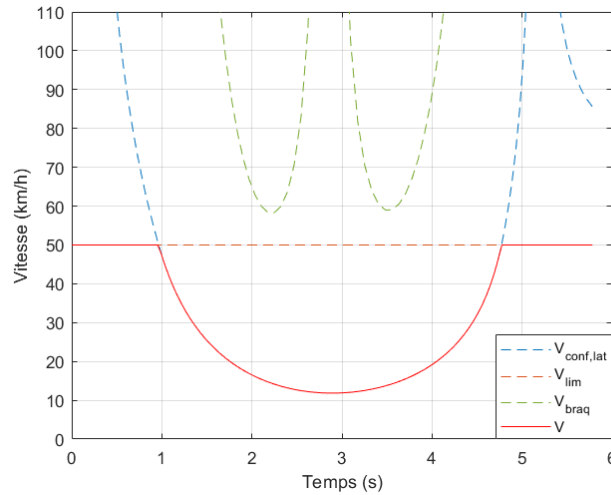
#### 4.2.2.2.2 Exemple d'un cas du type « tourner à gauche » dans une intersection en croix

Soit le chemin  $P_\tau(\tau)$  fourni par la planification de chemin prédictive. Ce chemin est présenté en figure 4.8.



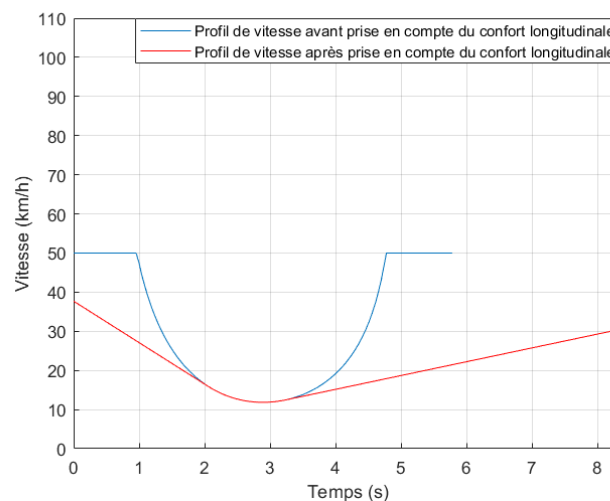
**Figure 4.8** – Tracé du chemin  $P_\tau(\tau)$  : les différentes positions du véhicule en fonction de  $\tau$  sont repérées par des cercles allant du noir ( $\tau = 0$ ) au rouge ( $\tau = 1$ )

L'équation donnant le profil de vitesse en fonction du rayon de courbure du chemin et de la contrainte de confort est donnée en partie §4.2.1.1.4. Ce profil de vitesse est tracé en rouge en figure 4.9.



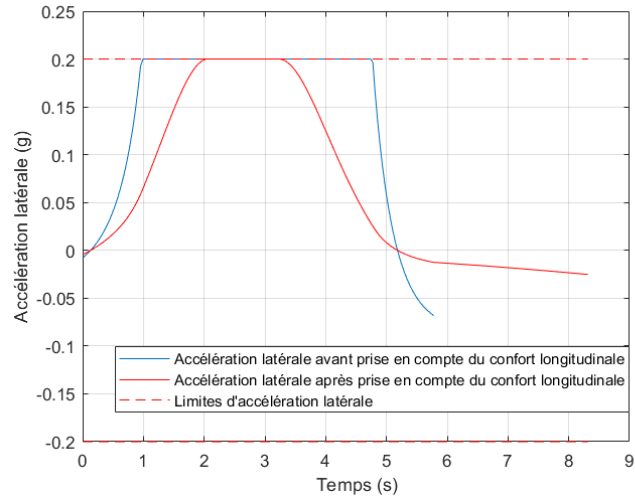
**Figure 4.9** – Profils de vitesse limite pour chaque type de contraintes (traits discontinus) et profil de vitesse résultant (trait continu)

De la même manière que dans l'exemple précédent, les profils de vitesse limites sont tracés en figure 4.9. Ces profils sont proches de ceux obtenus précédemment. Le profil de vitesse est ensuite ajusté pour respecter les limites d'accélération longitudinale et présenté en figure 4.10. Les variations de vitesse de ce nouveau profil sont beaucoup plus faibles. De plus, la vitesse étant en moyenne plus faible pour une même distance à parcourir, le temps de parcours du chemin est plus élevé.

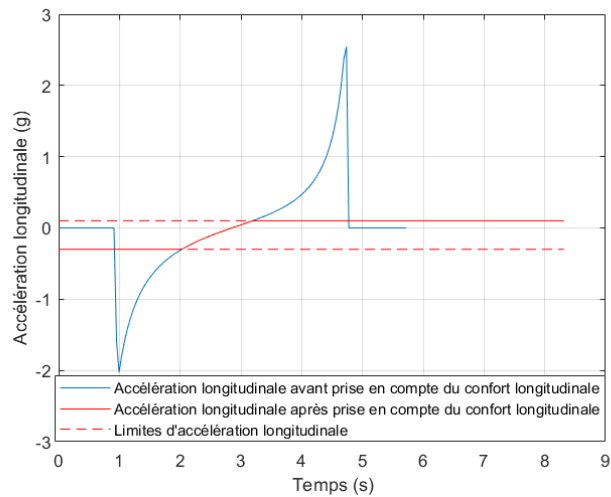


**Figure 4.10** – Profil de vitesse avant (en bleu) et après (en rouge) prise en compte du confort longitudinal

La figure 4.11 et la figure 4.12 représentent respectivement l'accélération latérale et longitudinale de l'égo-véhicule. Avant l'utilisation de l'algorithme de prise en compte du confort, l'accélération longitudinale est bien au-delà des limites fixées bien que celles de l'accélération latérale soient respectées. L'algorithme permet alors de saturer aux limites d'accélération longitudinale.

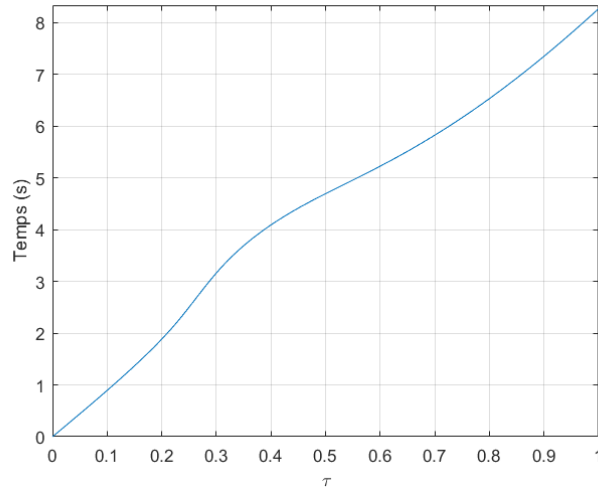


**Figure 4.11** – Accélération latérale résultant de la planification de vitesse avant (en bleu) et après (en rouge) prise en compte du confort longitudinal

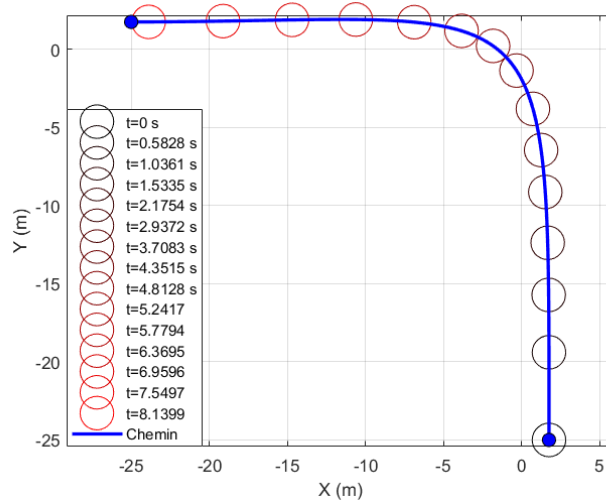


**Figure 4.12** – Accélération longitudinale résultant de la planification de vitesse avant (en bleu) et après (en rouge) prise en compte du confort longitudinal

Finalement  $t(\tau)$  est calculé à partir de  $V_\tau$  et  $V$ . La figure 4.13 présente ainsi le tracé de  $t(\tau)$ . L'obtention du lien entre  $t$  et  $\tau$  permet alors de relier la vitesse  $V(t)$  au chemin  $P_\tau(\tau)$  conformément à la figure 4.14.



**Figure 4.13** – Tracé de  $t(\tau)$  : pour tout  $\tau$  est associé un temps  $t$  afin d'obtenir un profil de vitesse  $V(t)$



**Figure 4.14** – Tracé de la trajectoire  $P(t)$  : les différentes positions du véhicule en fonction du temps  $t$  sont repérées par des cercles allant du noir ( $t = 0$  s) au rouge ( $t = 4.8$  s).

### 4.2.3 Bilan

Dans cette partie, une première paramétrisation de la vitesse de l'égo-véhicule en fonction du chemin de référence préalablement planifié est développée. Ce profil de vitesse ainsi obtenu tient compte, en premier lieu, du confort latéral des passagers au travers de l'accélération latérale du véhicule et donc de la courbure du chemin de référence. Cette dernière est également utilisée afin de limiter la vitesse du véhicule pour respecter les limites de l'actionneur de direction en terme de vitesse de braquage. Enfin, les variations de vitesse sont

ajustées pour prendre en compte le confort longitudinal des passagers au travers de l'accélération longitudinale.

L'objectif de cette première approche, associé à l'obtention d'une planification de vitesse de l'égo-véhicule cohérente vis-à-vis d'un chemin à suivre, est atteint. Cependant, l'environnement dynamique n'est pas considéré. En effet, lorsqu'un véhicule circule dans le trafic, il doit réagir, par le biais d'une adaptation de sa vitesse, à divers événements tels que des piétons traversant la route ou encore le franchissement d'intersection en présence d'autres usagers de la route. Ce dernier cas nécessite une coordination de l'égo-véhicule avec ces autres usagers afin, tout d'abord, d'éviter un conflit, mais aussi de respecter les relations de priorité dictées par le code de la route. Cette coordination fait l'objet de la partie suivante.

### 4.3 Reparamétrisation de la vitesse

Dans cette partie, une adaptation d'une théorie appelée « espace de coordination » et retranscrite dans [74] est présentée. À l'origine, cette théorie a été développée afin de coordonner plusieurs robots mobiles lors d'un croisement afin d'éviter un conflit tout en imposant des relations de priorité entre les robots. L'espace de coordination permet alors l'interprétation de la situation et l'adaptation des vitesses de ces derniers afin d'atteindre cet objectif.

#### 4.3.1 Théorie de l'espace de coordination

La théorie est basée sur la représentation des trajectoires relatives des usagers de la route par l'intermédiaire de leur abscisse curviligne respective définie par :

$$S(t) = \int_0^t V(t') dt', \quad (4.33)$$

où le temps est relatif à l'instant initial considéré, par exemple celui de la planification.

De plus, il est possible de calculer l'abscisse curviligne au travers de la paramétrisation du chemin et plus précisément la variable spatiale  $\tau$  par le biais de la relation :

$$S_\tau(\tau) = \int_0^\tau V_\tau(\tau') d\tau'. \quad (4.34)$$

Les relations (4.33) et (4.34) sont alors liées par la fonction  $\tau(t)$  déjà introduite en partie 4.2

L'espace de coordination est alors défini par un espace à  $n_c$  dimensions, avec  $n_c \in \mathbb{N} \setminus \{0,1\}$ , où chaque dimension est associée à l'abscisse curviligne d'un des usagers de la route.

Les différentes configurations d'abscisses curvilignes conduisant à une collision entre deux usagers sont alors représentées dans cet espace. Ces différentes configurations sont regroupées en zones appelées zones de collision.

### 4.3.1.1 Les zones de collision

Le nombre de zones de collision  $N_c$  est alors défini par :

$$N_c = n_c \frac{n_c - 1}{2}. \quad (4.35)$$

Il peut être constaté que l'utilisation de l'espace de coordination devient de plus en plus complexe avec l'augmentation du nombre  $n_c$  d'usagers pris en compte et donc du nombre  $N_c$  de zones de conflit à considérer. Ainsi, afin de limiter cette complexité, dans la suite de ce document,  $n_c$  sera égal à 2.

Dans [74], plusieurs formes de zones de collision sont présentées en fonction de la forme de la modélisation des usagers de la route. La forme rectangulaire est celle la plus couramment utilisée pour la modélisation des véhicules notamment du fait de l'utilisation de fonctions d'interprétation et de classification des éléments de la perception par « Bounding box » (cf §3.1.3.2). La zone de collision associée à une telle modélisation est présentée en figure 4.15.

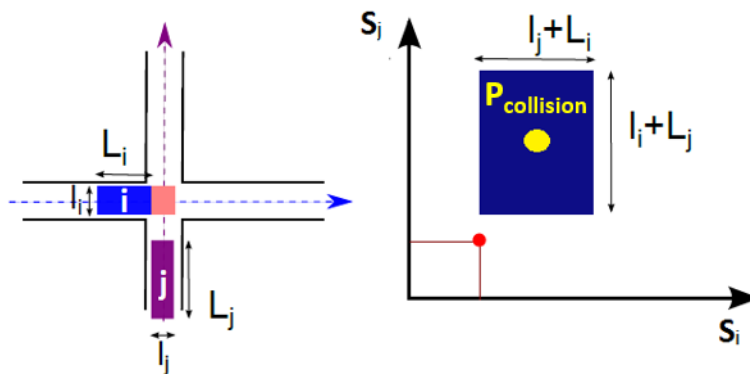


Figure 4.15 – Illustration de la zone de collision dans l'espace de coordination

La partie gauche de cette dernière représente une situation donnée dans le repère intersection où un véhicule  $j$  arrive à une intersection en croix tandis qu'un véhicule  $i$  est sur le point de franchir cette même intersection. La partie droite, quant à elle, représente la même situation mais dans l'espace de coordination. Le point rouge est la position relative des deux

véhicules et est repéré dans cet espace l'abscisse curviligne  $s_i$  du véhicule  $i$  et celle du véhicule  $j$  noté  $s_j$ . Il est considéré que le point d'origine de l'espace de coordination, c'est-à-dire le point repéré par  $s_i = 0$  et  $s_j = 0$ , correspond aux points de départ des trajectoires des véhicules  $i$  et  $j$ . Le point jaune appelé  $P_{collision}$  est le centre géométrique de la zone de collision. Il est repéré par les valeurs particulières des abscisses curvilignes des véhicules  $i$  et  $j$  correspondant à l'intersection de leurs chemins. Son calcul est explicité dans la partie suivante. Enfin, les dimensions de la zone de collision sont paramétrées par celles des rectangles modélisant l'encombrement des véhicules avec  $L_i$  et  $l_i$ , respectivement la longueur et la largeur du véhicule  $i$ , tandis que  $L_j$  et  $l_j$  sont celles du véhicule  $j$ .

Dans le reste de ce mémoire, le véhicule  $j$  sera associé à l'égo-véhicule et identifié par l'indice *ego* tandis que le véhicule  $i$  sera associé au véhicule obstacle et identifié par l'indice *obs*.

#### 4.3.1.2 Calcul de $P_{collision}$

Le calcul de  $P_{collision}$  consiste à obtenir le ou les points d'intersections des chemins suivis par les usagers de la route susceptibles d'entrer en conflit. Dans le cas où ces chemins sont définis par des courbes de Bézier, cette étape se résume alors à un problème de recherche d'intersection entre deux courbes de Bézier. La résolution de ce type de problème se fait classiquement par un algorithme récursif lui-même utilisant l'algorithme de décomposition des courbes de Bézier (cf §3.1.2.3) et la « bounding box » d'une courbe de Bézier c'est-à-dire le plus petit rectangle contenant cette dernière (cf §3.1.3.2). Ainsi l'algorithme de recherche d'intersection entre deux courbes de Bézier est basé sur l'itération de quatre étapes et est illustrés à la figure 4.16 :

- Étape 1 : deux courbes de Bézier sont considérées. La première sera nommée  $C_1$  tandis que la deuxième  $C_2$ . Ces dernières sont soit les courbes dont l'intersection ou les intersections sont recherchées, soit une subdivision de celles-ci ;
- Étape 2 : les bounding box de  $C_1$  et  $C_2$  sont calculées. S'il existe une intersection entre celles-ci alors les courbes associées sont découpées en deux subdivisions appelées  $C_{11}$  et  $C_{12}$  pour la courbe  $C_1$  et  $C_{21}$  et  $C_{22}$  pour la courbe 2 ;
- Étape 3 : les bounding box de  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{21}$  et  $C_{22}$  sont calculées ;



- Étape 4 : les paires  $(C_{11}, C_{21})$ ,  $(C_{11}, C_{22})$ ,  $(C_{12}, C_{21})$  et  $(C_{12}, C_{22})$  sont considérées. Pour chacune d'entre elles, s'il existe une intersection de leurs bounding box respectives, les étapes 1 à 4 sont réitérées en considérant cette même paire comme  $(C_1, C_2)$ . Sinon, cette paire est supprimée du problème de recherche d'intersection.

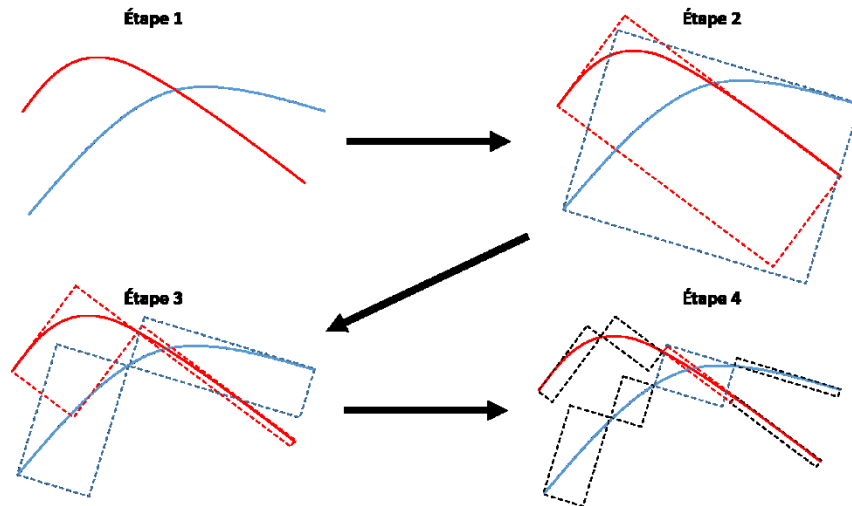


Figure 4.16 – Illustration des différentes étapes de l'algorithme de recherche d'intersection entre deux courbes de Bézier

À chaque itération, les aires des bounding box des courbes subdivisées considérées par l'algorithme sont évaluées. Si la plus grande de ces aires est inférieure à une valeur seuil définie par l'utilisateur alors l'algorithme est terminé et les valeurs des paramètres  $\tau$  correspondant aux intersections des courbes de Bézier initiales sont ainsi fournies. Dans le reste du mémoire, ces valeurs seront notées  $\tau_{ego,inter}$  pour celles associées à la courbe de Bézier modélisant le chemin suivi par l'égo-véhicule et  $\tau_{obs,inter}$  pour celles associées à la courbe de Bézier modélisant le chemin suivi par le véhicule obstacle.

Enfin, à partir de ces valeurs particulières de  $\tau_{ego,inter}$  et  $\tau_{obs,inter}$  sont calculées les abscisses curvilignes  $s_{ego,inter}$  et  $s_{obs,inter}$  repérant le point d'intersection entre les chemins suivis respectivement par l'égo-véhicule et le véhicule obstacle. Ainsi,  $s_{obs,inter}$  et  $s_{ego,inter}$  constituent les coordonnées du point  $P_{collision}$  dans l'espace de coordination.

### 4.3.1.3 Relation de priorité dans l'espace de coordination

Dans cette partie, les notions de priorités entre les véhicules sont introduites par l'analyse et l'interprétation de l'espace de coordination. Soit une fonction  $f_{coord\ space}$  continue par morceaux sur  $\mathbb{R}$  et croissante. La trajectoire relative entre l'égo-véhicule et l'obstacle représentée dans l'espace de coordination est définie par :

$$s_{ego}(t) = f_{coord\ space}(s_{obs}(t)). \quad (4.36)$$

Toutes les trajectoires relatives qui ne conduisent pas à une collision entre l'égo-véhicule et l'obstacle respectent, par définition de la zone de collision, une des deux conditions suivantes

$$\forall s_{obs}(t) \in \left[ s_{obs,inter} - \frac{(L_{obs}+l_{ego})}{2}, s_{obs,inter} + \frac{(L_{obs}+l_{ego})}{2} \right] :$$

$$s_{ego}(t) > s_{ego,inter} + \frac{(l_{obs}+L_{ego})}{2}, \quad (4.37)$$

ou

$$s_{ego}(t) < s_{ego,inter} - \frac{(l_{obs}+L_{ego})}{2}. \quad (4.38)$$

Dans le cas où la condition (4.37) est respectée, l'égo-véhicule franchit la zone de collision avant l'obstacle tandis que dans l'autre cas l'égo-véhicule cède le passage à l'obstacle.

Considérons le cas où  $f_{coord\ space}$  est une fonction linéaire c'est-à-dire que :

$$s_{ego}(t) = \alpha_{coord\ space} s_{obs}(t), \quad (4.39)$$

avec  $\alpha_{coord\ space}$  le coefficient de proportionnalité entre  $s_{ego}(t)$  et  $s_{obs}(t)$ . Soit  $A_{collision}$  le sommet supérieur gauche de la zone de collision de coordonnées  $\left( s_{obs,inter} - \frac{(L_{obs}+l_{ego})}{2}, s_{ego,inter} + \frac{(l_{obs}+L_{ego})}{2} \right)$  et  $C_{collision}$  le sommet inférieur droit de coordonnées  $\left( s_{obs,inter} + \frac{(L_{obs}+l_{ego})}{2}, s_{ego,inter} - \frac{(l_{obs}+L_{ego})}{2} \right)$ . La condition (4.37) obligeant l'obstacle à céder le passage à l'égo-véhicule devient alors :

$$\alpha_{coord\ space} > \frac{s_{ego,inter} + \frac{(l_{obs}+L_{ego})}{2}}{s_{obs,inter} - \frac{(L_{obs}+l_{ego})}{2}}. \quad (4.40)$$

De la même façon, la condition (4.38) permettant à l'égo-véhicule de céder le passage devient également :

$$\alpha_{coord\ space} < \frac{s_{ego,inter} - \frac{(l_{obs} + l_{ego})}{2}}{s_{obs,inter} + \frac{(L_{obs} + l_{ego})}{2}} \quad (4.41)$$

La figure 4.17 illustre cette relation de priorité. En effet, dans le cas linéaire, les trajectoires relatives supérieures à la limite représentée en rouge sont associées à l'obstacle cédant le passage à l'égo-véhicule tandis que celles inférieures à la limite verte correspondent à l'égo-véhicule cédant le passage à l'obstacle.

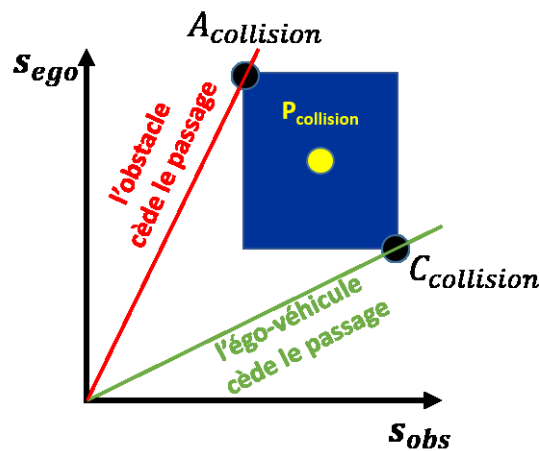


Figure 4.17 – Illustration de la priorité dans l'espace de coordination

En résumé, dans cette partie les conditions sur la trajectoire relative entre l'égo-véhicule et l'obstacle permettant d'imposer une relation de priorité entre ces derniers ont été établies. La partie suivante présente les contraintes sur le profil de vitesse de l'égo-véhicule permettant d'imposer une trajectoire relative souhaitée.

#### 4.3.1.4 Obtention de la contrainte de vitesse

Comme évoqué dans les parties précédentes, l'espace de coordination permet d'analyser les trajectoires relatives entre deux véhicules ainsi que d'en synthétiser une nouvelle, qui respecte notamment des relations de priorités. Cet espace peut également permettre de raisonner en termes de vitesses relatives. En effet, par dérivation de l'expression (4.36), il vient :

$$\frac{ds_{ego}(t)}{dt} = \frac{df_{coord\ space}(s_{obs}(t))}{ds_{obs}(t)} \frac{ds_{obs}(t)}{dt}, \quad (4.42)$$

ou encore,

$$V_{ego}(t) = \frac{df_{coord\ space}(s_{obs}(t))}{ds_{obs}(t)} V_{obs}(t), \quad (4.43)$$

avec  $V_{ego}(t)$  la vitesse de l'égo-véhicule et  $V_{obs}(t)$  celle de l'obstacle. Ainsi, la dérivée en chaque instant de la trajectoire relative par rapport à l'abscisse curviligne de l'obstacle permet de fixer le rapport de vitesse entre l'égo-véhicule et l'obstacle.

Dans le cas général, imposer une trajectoire relative à l'aide de la fonction  $f_{coord\ space}$  implique une parfaite prédiction de la trajectoire de l'obstacle. Cependant, dans le cas linéaire, le gain de vitesse devient :

$$\frac{df_{coord\ space}(s_{obs}(t))}{ds_{obs}(t)} = \alpha_{coord\ space}. \quad (4.44)$$

Ainsi, le gain de vitesse devient indépendant de la prédiction de la position  $s_{obs}(t)$  de l'obstacle. Seule la mesure de la vitesse de ce dernier à l'instant  $t$  est nécessaire afin d'obtenir une contrainte sur la vitesse de l'égo-véhicule. De telles considérations conduisent à :

$$V_{ego}(t) < \frac{s_{ego,inter} - \frac{(l_{obs} + l_{ego})}{2}}{s_{obs,inter} + \frac{(L_{obs} + l_{ego})}{2}} V_{obs}(t), \quad (4.45)$$

quand l'égo-véhicule cède le passage, ou encore,

$$V_{ego}(t) > \frac{s_{ego,inter} + \frac{(l_{obs} + l_{ego})}{2}}{s_{obs,inter} - \frac{(L_{obs} + l_{ego})}{2}} V_{obs}(t), \quad (4.46)$$

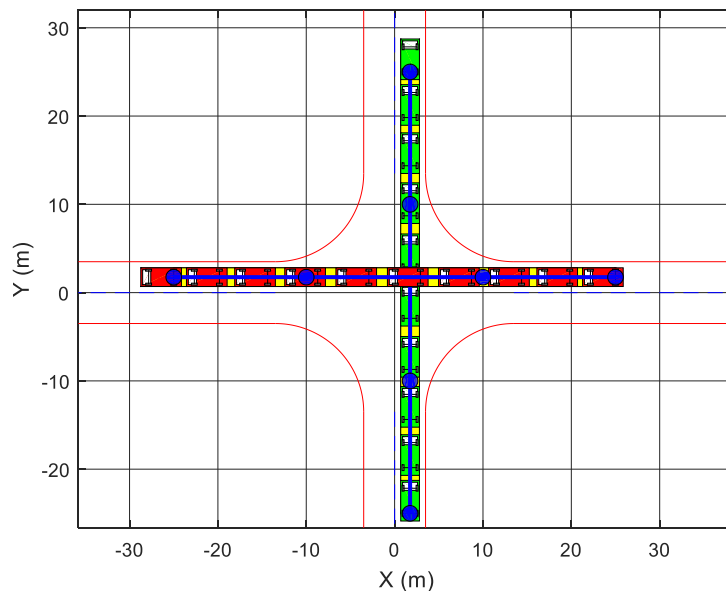
lorsque l'égo-véhicule impose à l'obstacle de céder le passage. Ainsi ces contraintes de vitesse viennent s'ajouter aux contraintes établies à la partie §4.2. Cependant, la contrainte (4.46) peut être contradictoire avec ces dernières, par exemple lorsqu'elle impose une vitesse supérieure à la limitation du code de la route. Dans un tel cas, il est alors préférable de céder le passage à l'obstacle afin de respecter ces autres contraintes.

### 4.3.2 Simulation

Dans cette partie, deux types de simulation de situations de vie dans une intersection en croix sont proposées afin d'illustrer la théorie abordée précédemment. La première est une situation où l'égo-véhicule cède la priorité à un véhicule obstacle venant de sa droite. La deuxième quant à elle simule l'égo-véhicule imposant la priorité à un véhicule arrivant à sa gauche.

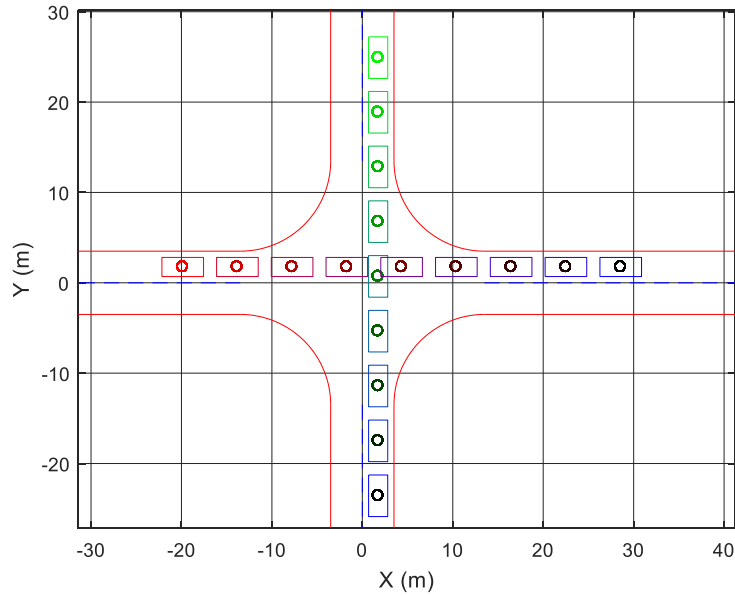
### 4.3.2.1 Exemple de coordination avec priorité à droite

Dans ce scénario, l'égo-véhicule suit un chemin planifié le conduisant à aller tout droit dans une intersection en croix à la vitesse de  $50 \text{ km/h}$ . Son point de départ est repéré par les coordonnées  $(1.75, -25)$  tandis que son point d'arrivée est repéré par les coordonnées  $(1.75, 25)$ . Un véhicule arrivant de la droite suit un chemin, également à la vitesse de  $50 \text{ km/h}$ , dont le point de départ est repéré par les coordonnées  $(30, 1.75)$  et le point d'arrivée est repéré par les coordonnées  $(-25, 1.75)$ . Ces chemins sont tracés en Figure 4.18. Puisque, l'obstacle vient de sa droite, l'égo-véhicule doit céder le passage. L'intersection de ces deux chemins se situe aux coordonnées  $(1.75, 1.75)$  correspondant à une abscisse curviligne de l'égo-véhicule  $s_{ego,inter} = 28.25 \text{ m}$  et de l'obstacle  $s_{obs,inter} = 26.75 \text{ m}$ .



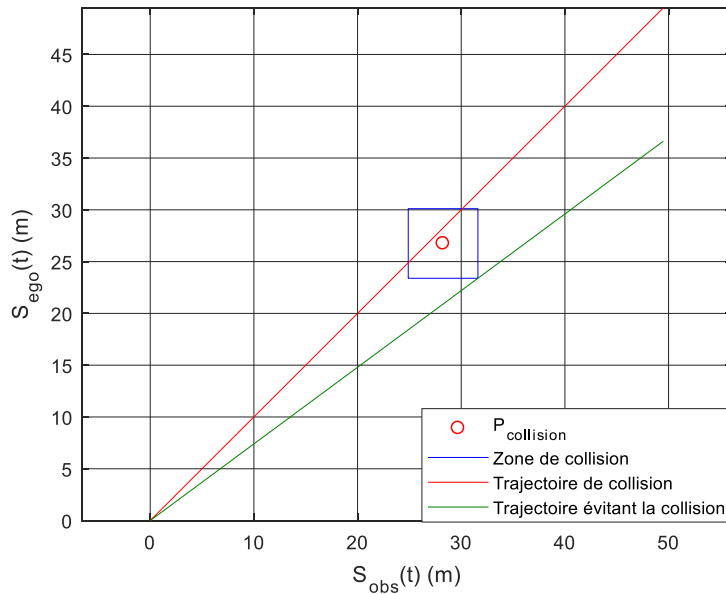
**Figure 4.18** – *Chemin suivi par l'égo-véhicule (en vert) et par l'obstacle (en rouge)*

La figure 4.19 présente l'évolution des positions de l'égo-véhicule et de l'obstacle le long de leur chemin respectif. À  $t = 1.75 \text{ s}$ , correspondant à la 5<sup>ème</sup> position sur la figure, les deux véhicules entrent en collision. Afin d'éviter un tel scénario, l'égo-véhicule doit adapter sa vitesse pour non-seulement éviter l'accident mais également céder le passage à l'obstacle.



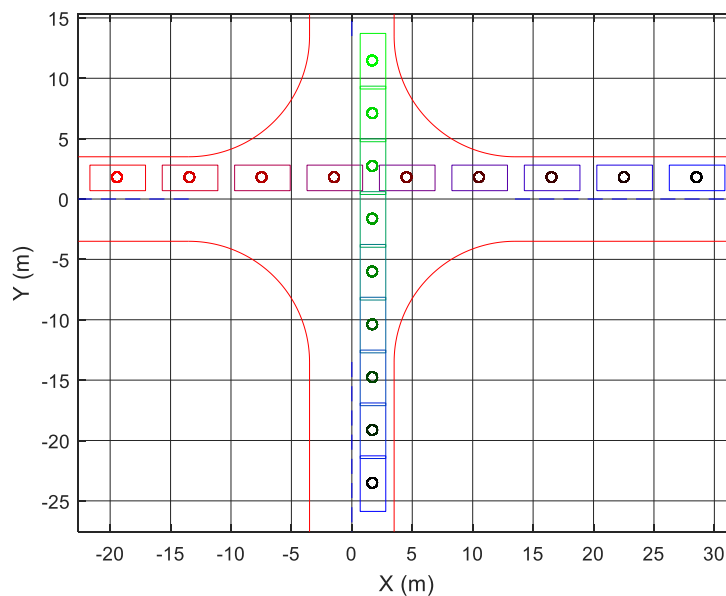
**Figure 4.19** – Positions successives de l'égo-véhicule allant du bleu au vert et celles de l'obstacle allant du bleu au rouge

La trajectoire relative entre l'égo-véhicule et l'obstacle est alors représentée dans l'espace de coordination à la figure 4.20. La trajectoire actuelle, représentée en rouge sur la figure, passe en plein dans la zone de collision ce qui correspond bien au conflit observé à la figure 4.19. Une nouvelle trajectoire, représentée en vert sur la figure, est alors planifiée afin d'éviter la collision et de céder le passage à l'obstacle. Cette trajectoire a été volontairement choisie à la frontière pour illustrer la méthode. En pratique une marge peut être fixée pour répondre à des problématiques de robustesse, non abordées dans cette étude.



**Figure 4.20** –Trajectoires relatives représentées dans l’espace de coordination

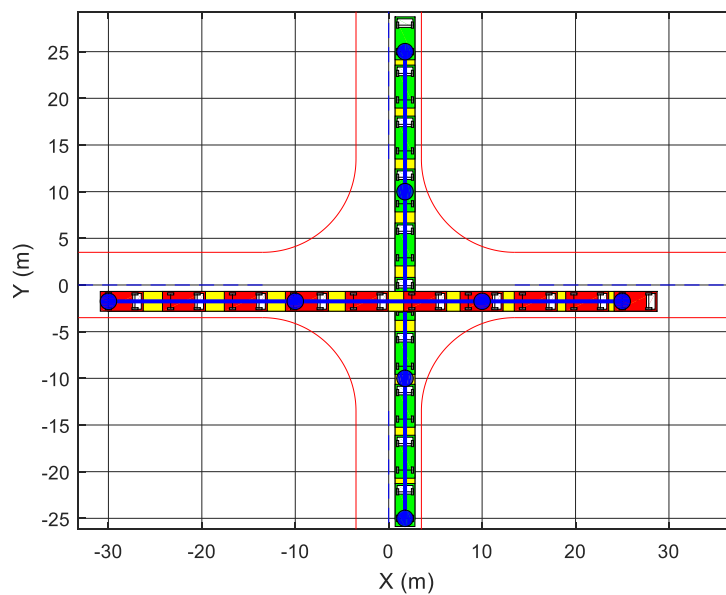
Le gain de vitesse  $\alpha_{coord\ space}$  correspondant à cette nouvelle trajectoire est égale à 0.74 ce qui correspond à une vitesse limite de l’égovéhicule de  $V_{ego} = 37\ km/h$  lorsque l’obstacle est à une vitesse  $V_{obs} = 50\ km/h$ . La figure 4.21 présente l’évolution des positions de l’égovéhicule et de l’obstacle le long de leur chemin respectif après replanification de la vitesse. À  $t = 2.16\ s$ , correspondant à la 6<sup>ème</sup> position sur la figure, l’égovéhicule arrive à proximité du point d’intersection tandis que l’obstacle vient de le dépasser. La collision présentée en figure 4.19 est alors évitée.



**Figure 4.21** –Positions successives de l’égovéhicule allant du bleu au vert et celles de l’obstacle allant du bleu au rouge après replanification de la vitesse

### 4.3.2.2 Exemple de coordination lorsque l'égo-véhicule est prioritaire

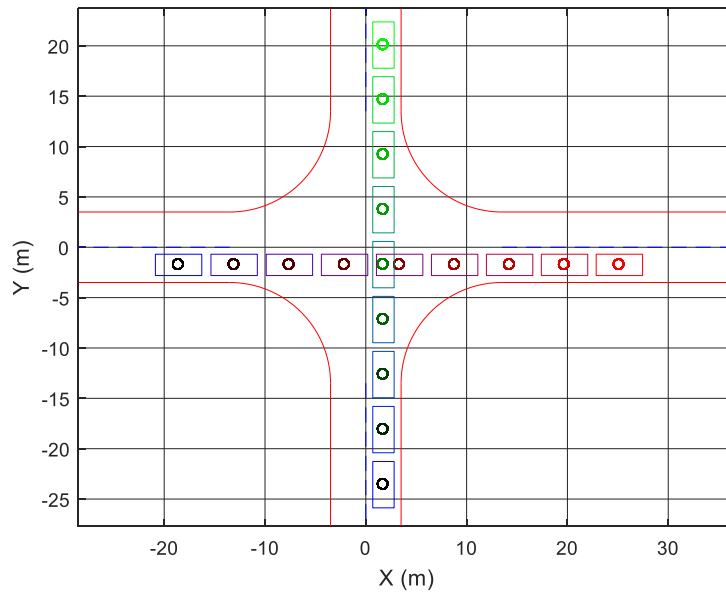
Dans ce scénario, l'égo-véhicule suit la même trajectoire planifiée que celle de la partie précédente. Un véhicule arrivant cette fois de la gauche suit un chemin, également à la vitesse de  $50 \text{ km/h}$ , dont le point de départ est repéré par les coordonnées  $(-20, -1.75)$  et le point d'arrivée est le  $(25, -1.75)$ . Ces chemins sont tracés en figure 4.22. Ainsi, l'égo-véhicule venant de sa droite, l'obstacle doit céder le passage mais ne le fait pas. L'intersection de ces deux chemins se situe aux coordonnées  $(-1.75, -1.75)$  correspondant à une abscisse curviligne de l'égo-véhicule  $s_{ego,inter} = 21.75 \text{ m}$  et de l'obstacle  $s_{obs,inter} = 23.25 \text{ m}$ .



**Figure 4.22** –Chemin suivi par l'égo-véhicule (en vert) et par l'obstacle (en rouge)

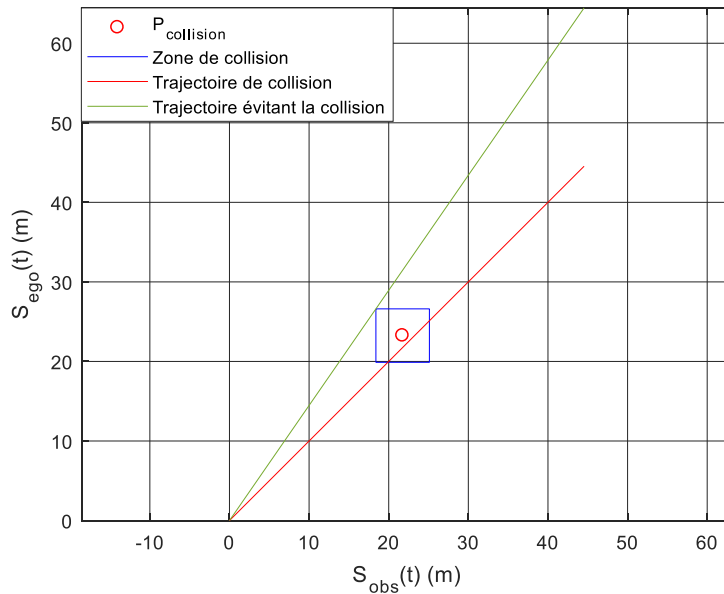
La figure 4.23 présente l'évolution des positions de l'égo-véhicule et de l'obstacle le long de leur chemin respectif. L'obstacle ne respectant pas la priorité à  $t = 1.57 \text{ s}$ , correspondant à la 5<sup>ème</sup> position sur la figure, les deux véhicules entrent en collision. Afin d'éviter un tel scénario, l'égo-véhicule doit adapter sa vitesse pour non-seulement éviter l'accident mais également afin d'éviter d'imposer une attente non nécessaire.





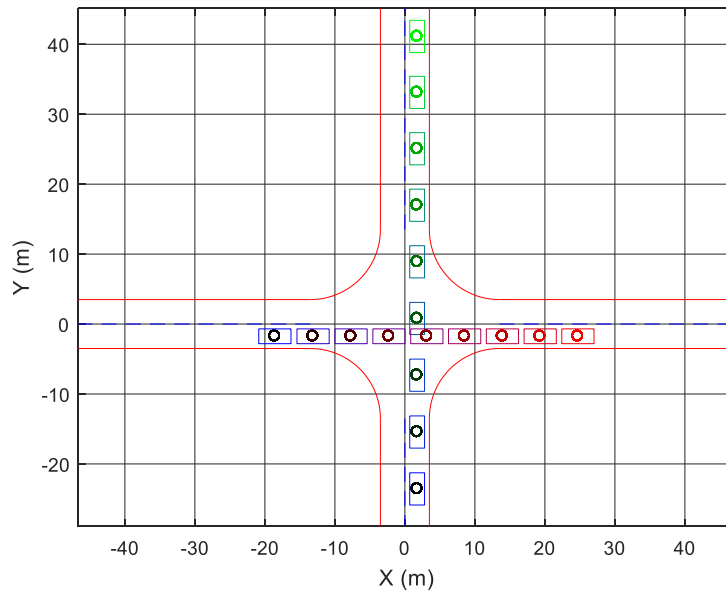
**Figure 4.23** – Positions successives de l'égo-véhicule allant du bleu au vert et celles de l'obstacle allant du bleu au rouge

La trajectoire relative entre l'égo-véhicule et l'obstacle est alors représentée dans l'espace de coordination à la figure 4.24. La trajectoire initiale, représentée en rouge sur la figure, passe en plein dans la zone de collision ce qui correspond bien au conflit observé à la figure 4.23. Une nouvelle trajectoire, représentée en vert sur la figure, est alors planifiée afin d'éviter la collision et d'imposer la priorité de l'égo-véhicule. Cette trajectoire a été volontairement choisie à la frontière pour illustrer la méthode. En pratique une marge peut être fixée pour répondre à des problématiques de robustesse, non abordées dans cette étude.



**Figure 4.24** –Trajectoires relatives représentées dans l'espace de coordination

Le gain de vitesse  $\alpha_{coord\ space}$  correspondant à cette nouvelle trajectoire est égale à 1.45 ce qui correspond à une vitesse limite de l'égo-véhicule de  $V_{ego} = 72\ km/h$  lorsque l'obstacle est à une vitesse  $V_{obs} = 50\ km/h$ . La figure 4.25 présente l'évolution des positions de l'égo-véhicule et de l'obstacle le long de leur chemin respectif après replanification de la vitesse. À  $t = 1.17\ s$ , correspondant à la 4<sup>ème</sup> position sur la figure, l'obstacle arrive à proximité du point d'intersection tandis que l'égo-véhicule vient de le dépasser. La collision présentée en figure 4.23 est alors évitée. Cependant, dans une telle situation, il est préférable de céder le passage à l'obstacle même s'il n'est pas prioritaire afin de respecter la limitation de vitesse du code de la route qui est ici de  $50\ km/h$ . La replanification revient à appliquer la même démarche que dans la situation de vie précédente.



**Figure 4.25** – Positions successives de l'égo-véhicule allant du bleu au vert et celles de l'obstacle allant du bleu au rouge après replanification de la vitesse

### 4.3.3 Bilan

L'espace de coordination est un outil permettant l'analyse d'une situation impliquant le croisement d'au moins deux véhicules. Il est alors possible de conclure sur la présence ou non d'une éventuelle collision entre ces véhicules.

Cet outil est également utilisable pour replanifier un profil de vitesse pour éviter une collision entre l'égo-véhicule et un véhicule obstacle et respecter les règles de priorités. Il doit permettre de fournir une option supplémentaire de type « adapter la vitesse » à la décision qui classiquement n'en possède que deux : s'arrêter ou franchir l'intersection. Dans une telle utilisation, cette approche peut se résumer à un profil de vitesse qui est à chaque instant proportionnel à la vitesse de l'obstacle. Le coefficient de proportionnalité entre ces deux vitesses est alors fixé par l'analyse de l'espace de coordination.

Cependant, une telle approche nécessite d'une part, une prédiction du chemin que va suivre l'obstacle pour estimer le point d'intersection avec celui suivi par l'égo-véhicule, et de l'autre une mesure de la vitesse de l'obstacle suffisamment fiable afin d'obtenir une contrainte de la vitesse de l'égo-véhicule pertinente et représentative de la situation.

Une méthode plus robuste doit être mise en place afin de représenter également l'ensemble des incertitudes de mesure ou de prédiction. Cependant, une telle représentation se doit de limiter l'introduction de conservatisme qui pourrait revenir à se limiter à un choix binaire de la décision et donc la perte des avantages de l'approche par l'espace de coordination.

## 4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, une méthodologie complète de planification de vitesse pour un véhicule autonome en milieu urbain a été présentée. Cette méthodologie est composée de deux parties : la première s'intéresse à la planification de vitesse utilisant les informations a priori sur le parcours suivi par l'égo véhicule, tandis que la seconde s'intéresse à la replanification de la vitesse de l'égo-véhicule afin de coordonner le franchissement d'une intersection avec les autres véhicules également présents.

La première planification de vitesse utilise l'estimation de la courbure du chemin à suivre, préalablement planifié, afin de contraindre la vitesse de l'égo-véhicule à respecter les limites de confort latéral. De plus, les limites de vitesse de braquage des roues et de vitesses autorisées par le code de la route sont prises en compte dans cette approche. Enfin, un algorithme de mise en forme de profil de vitesse est utilisé afin de respecter les contraintes de confort longitudinal.

La replanification de la vitesse, quant à elle, se base sur la prédiction de trajectoire des autres véhicules pour recalculer, si nécessaire, un profil permettant un franchissement de l'intersection en sécurité et respectant les règles de priorités fixées par le code de la route. Cette méthode est également utilisable pour réagir à la violation de ces règles par un autre usager.

# Chapitre 5

## Application sur plate-forme de simulation

5.1 INTRODUCTION .....	217
5.2 PRESENTATION DE LA PLATEFORME DE SIMULATION .....	217
5.2.1 Description de l'étage de perception .....	218
5.2.2 Description de l'étage de décision/planification.....	219
5.2.3 Description de l'étage de contrôle .....	220
5.3 INTEGRATION, SIMULATION ET EVALUATION DE LA PLANIFICATION DE TRAJECTOIRE EN MILIEU URBAIN .....	220
5.3.1 Intégration de la planification prédictive de chemin .....	222
5.3.1.1 Exemple de résultats de simulation: franchissement de l'intersection n°1.....	224
5.3.1.2 Synthèse des résultats de simulation sur l'ensemble de l'itinéraire.....	226
5.3.1.3 Bilan.....	228
5.3.2 Intégration de la planification de vitesse.....	228
5.3.2.1 Exemple de résultats de simulation: franchissement de l'intersection n°1.....	229
5.3.2.2 Synthèse des résultats de simulation sur l'ensemble de l'itinéraire.....	231
5.3.2.3 Bilan.....	233
5.3.3 Intégration de la replanification réactive de chemin.....	233
5.3.3.1 Exemple de résultats de simulation de l'algorithme de replanification réactive de chemin: franchissement de l'intersection n°1 .....	233
5.3.3.2 Bilan.....	236
5.3.4 Intégration de la replanification de vitesse .....	236
5.3.4.1 Exemple de résultats de simulation de l'algorithme de planification de vitesse: franchissement de l'intersection n°1 .....	237
5.3.4.2 Bilan.....	240
5.4 CONCLUSION .....	241

## 5.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer dans un environnement réaliste, les algorithmes de planification de trajectoire développés dans cette thèse. En effet, les chapitres 2 et 3 apportent une étude de faisabilité sur la planification et la replanification de chemin en intersection tandis que le chapitre 4 traite de l'association d'un profil de vitesse à un chemin ainsi que la replanification de cette vitesse. Cependant, les fonctions qui sont développées dans ces chapitres n'ont pas été testées en association avec la perception ou le contrôle. Pour ce faire, une plateforme de simulation développée avec le logiciel de simulation de conduite SCANeR Studio et le logiciel Matlab/Simulink est utilisée. Elle est présentée à la partie 5.2. Les algorithmes de planification de chemin et de vitesse retenus dans les chapitres 2 à 4 sont ensuite évalués dans un scénario urbain en intersection à la partie 5.3. Enfin une conclusion à ce chapitre est apportée dans partie 5.4.

## 5.2 Présentation de la plateforme de simulation

La plateforme de simulation utilisée dans ce chapitre a été développée dans le cadre du projet scientifique Véhicule Autonome Connecté (VAC) de la division scientifique du Groupe PSA. Elle consiste en une cosimulation du logiciel de simulation de conduite SCANeR Studio de AVSimulation et le logiciel de calcul numérique Matlab/Simulink. Cette cosimulation est cadencée à la période d'échantillonnage de 40 ms et contraint donc les algorithmes devant être utilisés en temps réel à être exécutés en un temps inférieur à cette période.

La partie SCANeR Studio de la plateforme permet la simulation de l'environnement de l'égo-véhicule (le trafic, l'environnement physique, le rendu graphique, etc...) ainsi que la simulation de son comportement dynamique tandis que la partie Simulink est utilisée pour simuler sa stratégie de contrôle. Comme indiqué à la partie §1.2.4.2 du chapitre 1, cette dernière est composée de en trois étages :

- l'étage de perception récupérant les données de l'environnement de l'égo-véhicule,
- l'étage de décision/planification permettant de formuler une stratégie d'action à partir de la perception et de proposer une trajectoire adéquate de référence à suivre
- et l'étage de contrôle qui calcule l'angle volant et le couple de roue à appliquer afin de suivre la trajectoire de référence.

Ces différents étages sont détaillés dans les parties suivantes.

### 5.2.1 Description de l'étage de perception

L'étage de perception est divisé en deux parties :

- une première partie permettant l'interface entre les 2 logiciels, en particulier par un traitement approprié des données issues de SCANeR studio,
- et une deuxième partie permettant la gestion d'une cartographie.

Dans le cadre de la plateforme, seules les positions et vitesses des obstacles ainsi que la signalisation dans un rayon de 50 m autour de l'égo-véhicule sont prises en compte. Cette version de SCANeR ne possédant pas de modèle de capteur, les problématiques d'occlusion, de fiabilité de l'information et de bruits de mesure ne sont pas considérés.

Enfin, une cartographie du circuit du scénario est utilisée afin de localiser l'égo-véhicule dans l'espace libre. Afin d'obtenir cette cartographie de l'espace libre tout le long de l'itinéraire de l'égo-véhicule, un traitement d'image est appliqué sur des captures d'écran, s'apparentant à une vue satellite, du terrain du scénario SCANeR « Europe », comme illustré en figure 5.1. Ce traitement consiste à utiliser le gradient de l'image pour détecter et localiser le marquage au sol ainsi que les bordures de la route. En étudiant la couleur des pixels autour de ces informations extraites, une segmentation des données est faite de la manière suivante :

- un premier ensemble de point délimitant la route
- et un deuxième définissant les contours de la signalisation au sol.



Figure 5.1 – Capture d'écran d'une partie du terrain du scénario Europe de SCANeR

Le résultat de ce traitement est présenté en figure 5.2.

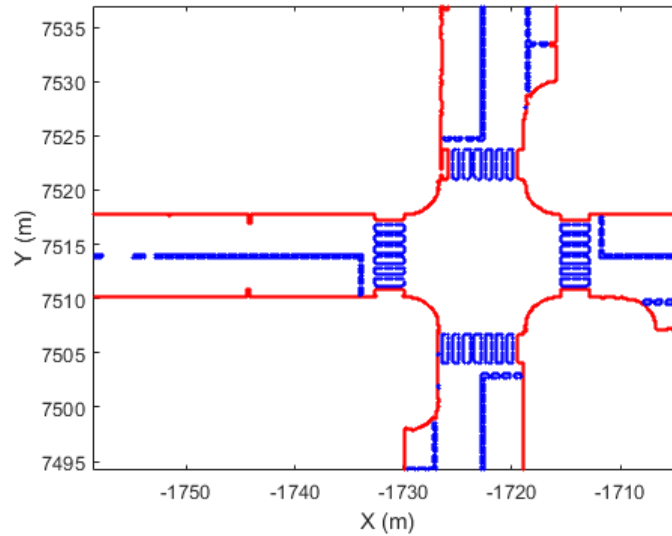


Figure 5.2 – Cartographie du scénario « Europe » obtenu après traitement de l'image de la Figure 5.1 : en rouge les limites de l'espace libre et en bleu les contours de la signalisation au sol

### 5.2.2 Description de l'étage de décision/planification

La partie décision de cet étage est basée sur une machine d'état où sont retranscrites les règles du code de la route. Elle assure la gestion de la priorité, le respect de la signalisation, autorise ou non à l'égo-véhicule le dépassement et l'arrêt du véhicule lorsqu'un piéton traverse la voie par exemple.

La partie planification se compose tout d'abord de la planification de trajectoire globale permettant l'obtention de points de passage le long de l'itinéraire de l'égo-véhicule, et ensuite de la planification de trajectoire locale utilisant les différents algorithmes développés dans cette thèse. Dans la version actuelle de la plateforme, ces points de passage sont directement récupérés de SCANer. Ils sont situés à chaque entrée et sortie d'intersection ainsi qu'à chaque entrée et sortie de virage. Cependant une méthode définie en annexe est utilisée pour définir des points de passage dans un rond-point. Dans le cas du scénario Europe utilisé dans ce chapitre, leurs emplacements sont présentés en figure 5.3.



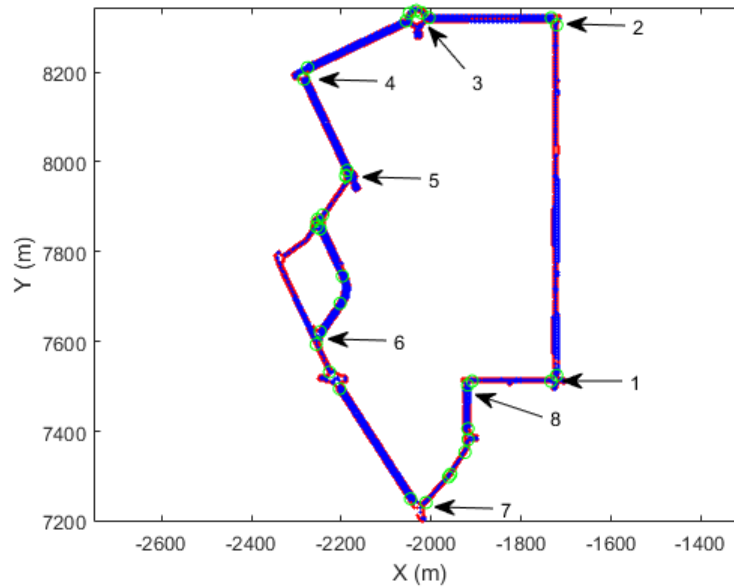


Figure 5.3 – Cartographie de l'espace libre du scénario « Europe » avec positionnement des points de passage (cercles verts)

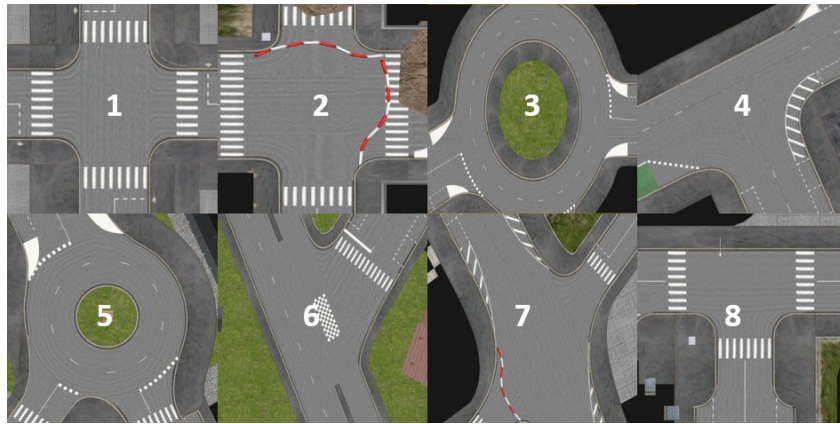
### 5.2.3 Description de l'étage de contrôle

La stratégie de contrôle utilisée sur cette plateforme est basée sur un découplage des dynamiques longitudinale et latérale du véhicule. Elle reprend l'architecture de contrôle actuelle des véhicules autonomes de niveau 2 commercialisés actuellement, dont la commande est basée sur l'utilisation conjointe des ADAS *Adaptive Cruise Control* (ACC) pour la dynamique longitudinale et *Lane Keeping Assist* (LKA) pour la dynamique latérale. Cet étage ne faisant pas l'objet de cette thèse, il ne sera pas développé ici. Cependant, les lecteurs intéressés peuvent se référer à [56] et [75].

## 5.3 Intégration, simulation et évaluation de la planification de trajectoire en milieu urbain

Dans cette partie, les algorithmes de planification de chemin et de vitesse retenus dans les chapitres 2 à 4 sont intégrés dans la plate-forme afin de les évaluer au travers de la simulation.

Le scénario SCANeR « Europe » utilisé dans ce chapitre est de type urbain et possède de nombreuses intersections. Les planifications de chemin et de vitesse sont évaluées sur un itinéraire bouclé d'environ 5 km possédant 8 intersections qui nécessitent une manœuvre de la part de l'égo-véhicule. Elles sont numérotées de 1 à 8 et sont répertoriées à la figure 5.4.



*Figure 5.4 – Ensemble des intersections rencontrées sur l'itinéraire de l'égo-véhicule et nécessitant une manœuvre de la part de ce dernier*

L'intersection n°1 ayant déjà été utilisée dans les chapitres précédents, les résultats de simulation dans cette zone seront détaillés afin de les comparer à ceux précédemment obtenus.

Le modèle de véhicule utilisé est une Peugeot 308 illustrée en figure 5.5. Ses caractéristiques cinématiques sont répertoriées dans le tableau 5-1.



*Figure 5.5 – Modèle de véhicule (Peugeot 308) utilisé pour l'égo-véhicule dans la plate-forme de simulation*

Longueur $L_{ego}$	4.602 m
Largeur $l_{ego}$	2.117 m
Porte-à-faux arrière $PAF_{Ar,ego}$	0.873 m
Porte-à-faux avant $PAF_{Av,ego}$	0.889 m
Empattement $Empat_{ego}$	2.84 m
Voie avant $Voie_{Av,ego}$	1.587 m
Voie arrière $Voie_{Ar,ego}$	1.590 m
Limite de l'angle de braquage roue	$\pm 30^\circ$

**Tableau 5-1** : Caractéristiques du modèle de véhicule Peugeot 308 utilisé comme l'égo-véhicule

Les parties suivantes concernent l'analyse des résultats de simulation pour les différentes composantes de la planification de trajectoire développées dans cette thèse.

### 5.3.1 Intégration de la planification prédictive de chemin

Dans cette partie, l'algorithme de planification prédictive de chemin présenté au paragraphe §2.2.4 du chapitre 2 est intégré dans la plateforme de simulation. Il est appliqué à la cartographie du terrain du scénario « Europe » de manière « hors ligne », c'est-à-dire dans notre cas, avant le lancement de la simulation.

La première étape de l'application de cet algorithme consiste à détecter les points de passage de l'itinéraire de l'égo-véhicule délimitant les intersections. Pour ce faire, un algorithme de détection de ligne droite est utilisé. Cet algorithme parcourt les points de passage et évalue si le point actuel, le précédent et le suivant sont alignés. Si tel est le cas, le point actuel fait partie d'une ligne droite. Lorsque tous les points ont été évalués, les points non répertoriés comme faisant partie d'une ligne sont considérés comme définissant une intersection ou un virage. Ils sont appelés "points non alignés de passage". L'algorithme de planification est ensuite appliqué pour chaque paire de points de passages consécutifs en intersection comme illustré à la figure 5.6. L'étape finale consiste alors à échantillonner le chemin de référence de manière à obtenir des points espacés de 10 cm le long de l'itinéraire de l'égo-véhicule. Cet échantillonnage permet de fournir à l'étage de contrôle un chemin de référence suffisamment précis pour pouvoir être suivi. La vitesse de l'égo-véhicule devra être planifiée tout le long de cet itinéraire, cependant cette planification ne fait pas l'objet de cette partie et sera détaillée dans la suivante.

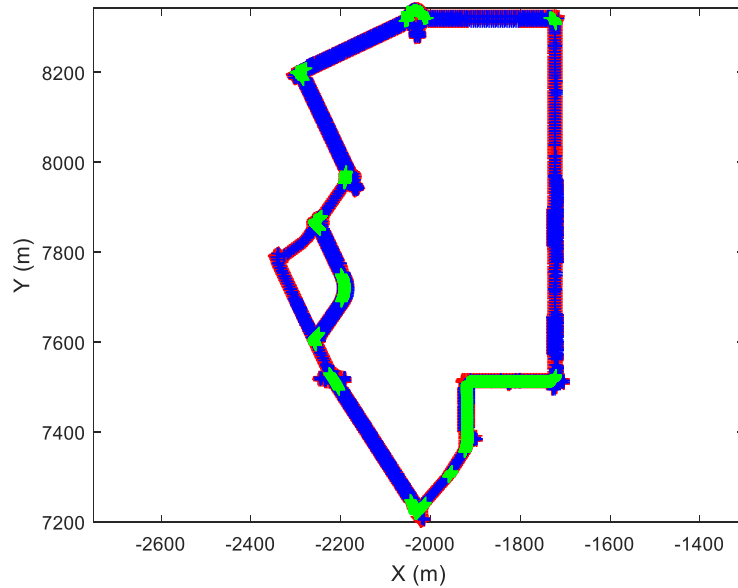


Figure 5.6 – Cartographie de l'espace libre avec les chemins de référence générés en intersection et en virage (points verts)

Le chemin de référence étant défini, la simulation peut être lancée. Elle consiste en un parcours du chemin de référence par l'égo-véhicule dans l'environnement urbain du scénario « Europe ». La planification de chemin prédictive est évaluée dans cette partie de la simulation au travers de la capacité de l'égo-véhicule à suivre le chemin de référence préalablement planifié et aucun trafic n'est ajouté dans le scénario. L'égo-véhicule évoluant dans ce scénario est illustré à la figure 5.7.

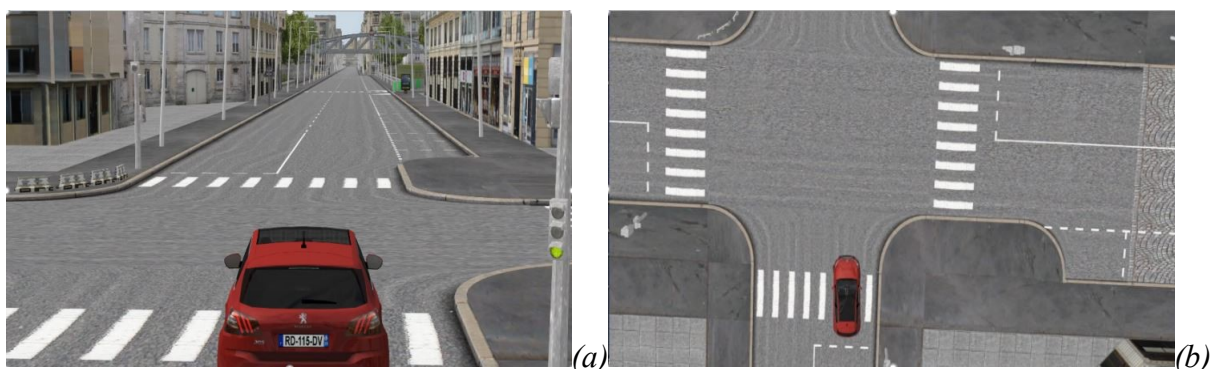


Figure 5.7 – Égo-véhicule évoluant dans l'environnement urbain du scénario « Europe » avec vue « véhicule (a) et vue de dessus (b)

### 5.3.1.1 Exemple de résultats de simulation: franchissement de l'intersection n°1

Le chemin suivi par l'égo-véhicule lors de sa traversée de l'intersection n°1 est présentée à la figure 5.8. Par souci de comparaison, le chemin de référence est également présent sur cette dernière et a déjà été introduit dans la partie §2.2.4.3.1 du chapitre 2. À première vue, l'égo-véhicule semble bien suivre le chemin de référence. Cependant, afin d'obtenir une meilleure analyse, et comme indiqué précédemment, l'évaluation de la qualité du chemin de référence généré est réalisé au travers de la capacité de l'égo-véhicule à suivre un tel chemin et donc au travers de l'erreur de position latérale et du maximum de l'angle de braquage des roues.

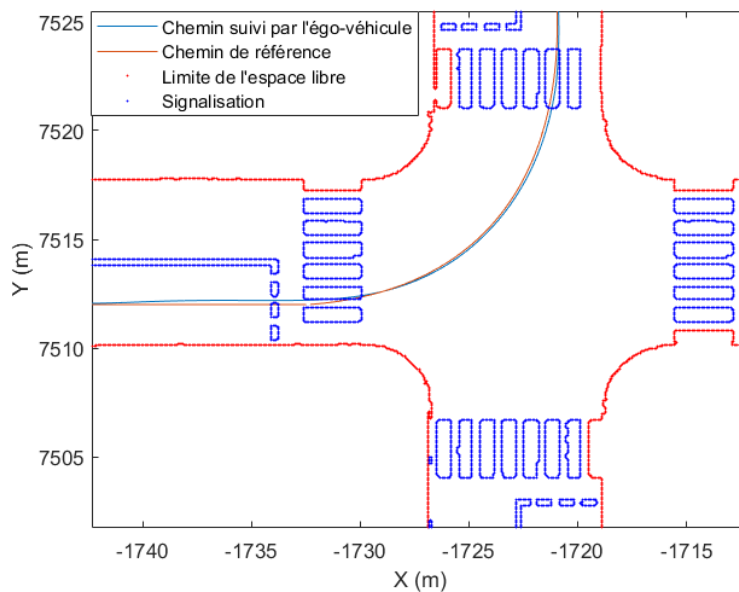


Figure 5.8 – Comparaison du chemin suivi par l'égo-véhicule (bleu) avec le chemin de référence (rouge)

Ainsi, l'erreur latérale de position commise par l'égo-véhicule lors de sa traversée de l'intersection n°1 est présentée à la figure 5.9 tandis que l'angle de braquage des roues correspondant est quant à lui présenté à la figure 5.10. On constate une erreur plus importante entre 10s et 20s ce qui correspond à la période où l'égo-véhicule manœuvre pour tourner à gauche à l'intersection n°1. Cette erreur restant inférieure à 10 cm et correspondant, en réalité, à la résolution du chemin de référence, est donc considérée comme acceptable. Le signal d'erreur est « agité » avec la présence d'une dynamique rapide qui se retrouve également sur le signal de commande de l'angle de braquage des roues. Ce phénomène est essentiellement dû à l'étage de contrôle et peut être désagréable pour le passager présent au niveau du siège conducteur avec des mouvements parasites au volant si cette dynamique n'est pas filtrée par la

colonne de direction. On constate également que le signal d'angle de braquage des roues reste dans les bornes autorisées, de  $\pm 30^\circ$ , avec une valeur maximale de  $16.7^\circ$ , soit environ 56% de la commande maximale.

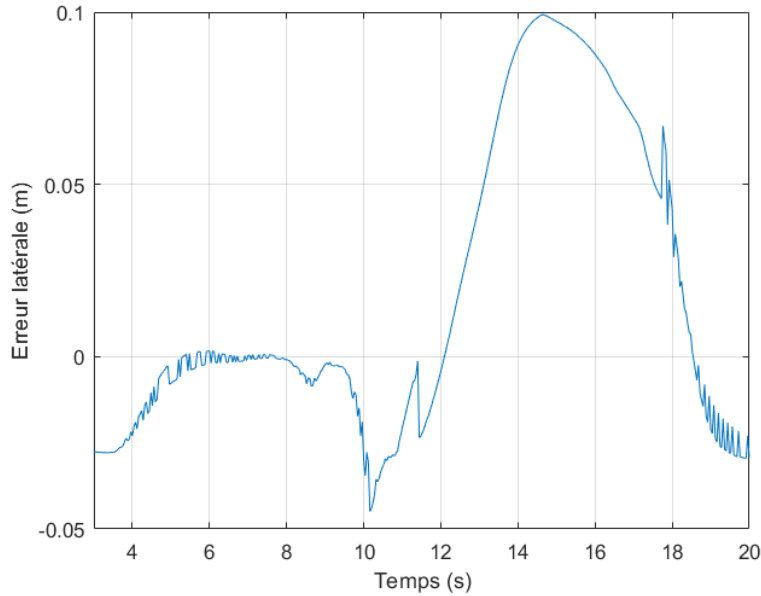


Figure 5.9 – Erreur latérale de position commise par l'égo-véhicule lors de sa traversée de l'intersection n°1

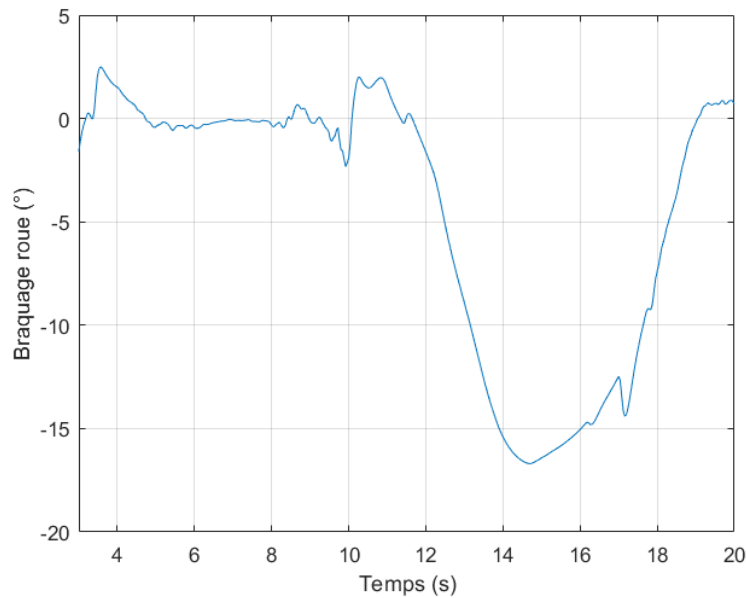


Figure 5.10 – Angle de braquage roue de l'égo-véhicule lors de sa traversée de l'intersection n°1

### 5.3.1.2 Synthèse des résultats de simulation sur l'ensemble de l'itinéraire

L'ensemble des résultats de simulation pour le passage des différentes intersections est consigné dans le tableau 5-2.

Type d'intersection	Erreur latérale maximale (cm)	Niveau du signal de commande (%)
Intersection en croix (N°1)	10 cm	56 %
Intersection en croix (N°2)	8 cm	63 %
Carrefour giratoire deux voies (N°3)	15 cm	66 %
Intersection en T (N°4)	8 cm	47 %
Carrefour giratoire deux voies (N°5)	12 cm	57 %
Intersection en Y (N°6)	8 cm	52 %
Intersection en croix (N°7)	36 cm	117 %
Intersection en T (N°8)	14 cm	76 %

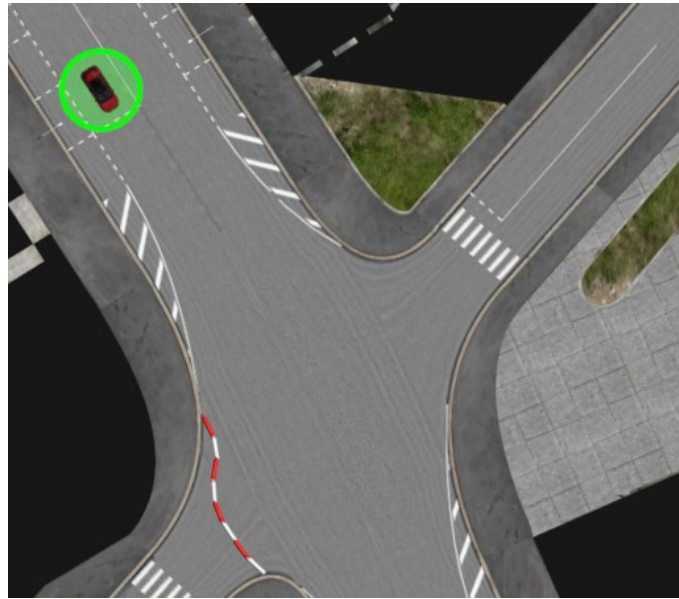
**Tableau 5-2 :** Ensemble des résultats de simulation de suivi de trajectoire de référence lors du passage d'intersections

Les résultats de simulation lors du passage des intersections n°2, 4 et 6 sont similaires aux résultats obtenus à l'intersection n°1. En ce qui concerne les intersections n°3 et 5, on constate des erreurs latérales plus importantes ce qui s'explique par la nature de ces intersections qui sont des carrefours giratoires.

Ensuite, l'intersection n°8 étant l'intersection la plus étroite de l'itinéraire, l'erreur latérale maximale et le niveau du signal de commande sont plus importants que ceux observés lors du passage des autres intersections non giratoires. Cependant, ces résultats restent acceptables, contrairement à ceux obtenus lors du passage de l'intersection n°7.

En effet, le niveau du signal de commande nécessaire est supérieur à ce que peut fournir l'actionneur de direction. Ce dernier étant saturé, il ne peut atteindre les objectifs de performances fixés par la stratégie de commande ce qui conduit à une « explosion » de l'erreur latérale maximale. Le chemin de référence n'est donc pas atteignable par l'égo-véhicule. Cette observation s'explique par la géométrie de cette intersection illustrée à la figure 5.11. En effet, dans son itinéraire, l'égo-véhicule cherche à atteindre la branche située dans le coin supérieur droit sur la figure à partir de celui situé dans le coin supérieur gauche. Or, la ligne de « cédez le passage » est en retrait par rapport à la zone croisement. Ainsi, pour l'algorithme de planification globale, l'intersection commence à cette ligne et demande à la planification de chemin locale de trouver un chemin à partir de ce point. Une phase de ligne droite doit être

effectuée avant d'entrer en intersection. Or l'algorithme de planification de chemin a été conçu pour générer des manœuvres élémentaires. Ainsi l'algorithme cherche à trouver un chemin permettant à l'égo-véhicule d'effectuer une ligne droite puis une manœuvre « tourner à gauche » avec la même courbe de Bézier qui ne possède pas assez de degrés de liberté. Cette limite de l'algorithme peut être levée en contraignant la planification à décomposer les manœuvres lorsqu'un chemin inatteignable est détecté.



*Figure 5.11 – Angle de braquage roue de l'égo-véhicule lors de sa traversée de l'intersection n°7*



### 5.3.1.3 Bilan

L'algorithme de planification de chemin prédictif présente des résultats satisfaisants mais néanmoins dépendants de la planification de chemin global. En effet, la simplicité de l'algorithme permettant d'obtenir un chemin de référence avec peu de paramètres constitue également sa limite. Le peu de degrés de liberté qu'il possède ne lui permet pas, à lui seul, de répondre à toutes les situations, notamment lorsqu'il est confronté à des intersections éloignées des standards.

L'évaluation de la planification de chemin ayant été traitée, il convient alors d'associer à ce chemin, un profil de vitesse ce qui est l'objet de la partie suivante.

### 5.3.2 Intégration de la planification de vitesse

Dans cette partie, l'algorithme de planification de vitesse présenté en partie §4.2 du chapitre 4 est intégré dans la plateforme de simulation. Comme dans la partie précédente, celui-ci est appliqué à la cartographie du terrain du scénario « Europe » de manière « hors ligne », c'est-à-dire dans notre cas, avant le lancement de la simulation.

Conformément au chapitre 4, un premier profil de vitesse est associé au chemin planifié à la partie précédente. Celui-ci a pour objectif d'associer à la courbure du chemin une vitesse respectant les contraintes de confort associées à l'accélération latérale de l'égo-véhicule. Un algorithme est ensuite utilisé afin de limiter les pentes du profil de vitesse afin de respecter les contraintes de confort pour l'accélération longitudinale. Toutes ces étapes ne sont pas réalisées pendant la simulation, mais de manière « hors ligne », elles sont effectuées après la planification prédictive de chemin.

Dans un premier temps, la planification de vitesse est évaluée au travers de l'exemple de l'intersection n°1, puis son évaluation est étendue, dans un deuxième temps au reste des intersections de l'itinéraire.

### 5.3.2.1 Exemple de résultats de simulation: franchissement de l'intersection n°1

La planification de vitesse étant « hors ligne », la vitesse limite autorisée est supposée fixée à 30 km/h dans les zones d'intersection. Elle ne tient alors pas compte de la signalisation pouvant imposer localement une vitesse limite différente. La vitesse planifiée constitue au final une contrainte à ne pas dépasser en temps réel afin de respecter les limites de confort. La vitesse de l'égo-véhicule lors de sa traversée de l'intersection n°1 est présentée à la figure 5.12. Il entre dans l'intersection à  $t = 9\text{ s}$  et en sort à  $t = 20\text{ s}$ . On constate que le contrôle longitudinal n'est pas assez rapide pour suivre la consigne de vitesse. De plus, des légers dépassements de vitesse (2 km/h) sont observables. Ceci conduit à un non respect des contraintes.

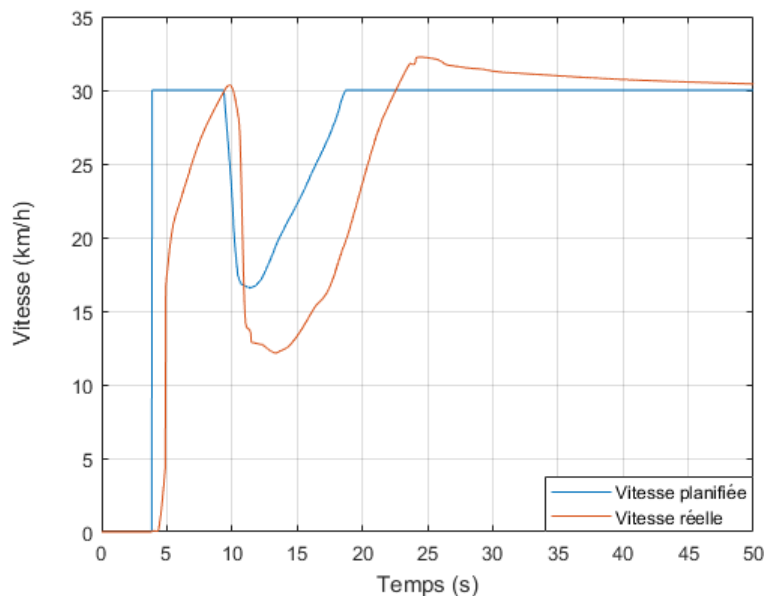


Figure 5.12 – Profils de vitesse planifiée et réelle lors du franchissement de l'intersection n°1 par l'égo-véhicule

Afin de faciliter l'évaluation des performances de l'algorithme, un écart de vitesse  $\Delta_{vitesse}$  par rapport à la contrainte de vitesse est définie tel que :

$$M_{vitesse} = \left| 1 - \frac{V_{ego}}{V_{planif}} \right|, \quad (5.1)$$

où  $V_{ego}$  est la vitesse réelle du véhicule tandis que  $V_{planif}$  est la vitesse planifiée. Cette marge est présentée en figure 5.13. La plus petite marge sur la contrainte de vitesse lors du franchissement de l'intersection n°1 est de 1.2%.

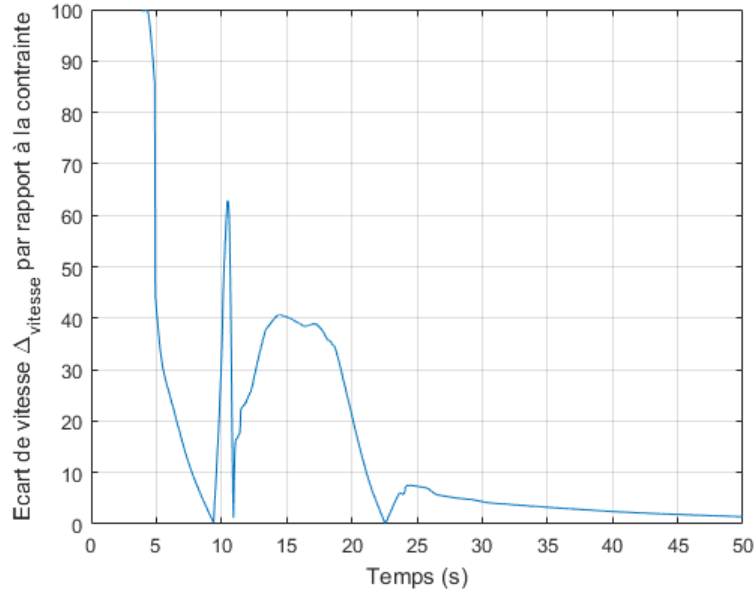


Figure 5.13 – Marge sur la contrainte de vitesse lors du franchissement de l’intersection n°1 par l’égo-véhicule

Les accélérations longitudinale et latérale de l’égo-véhicule sont présentées à la figure 5.14. Les accélérations sont bien en dessous des limites de confort imposées soit  $0.1 g$  pour l’accélération,  $0.3 g$  pour le freinage et  $\pm 0.2 g$  pour l’accélération latérale, alors qu’un dépassement de la contrainte de vitesse a été observé entre  $t = 10 s$  et  $t = 12 s$ . Ceci s’explique alors par le fait que l’utilisation d’un modèle simplifié combinée à un conservatisme introduit par l’évaluation des contraintes de vitesse au point du véhicule possédant le plus grand rayon de courbure (cf 4.2.1.1.1.3), entraîne une surcontrainte de la vitesse.

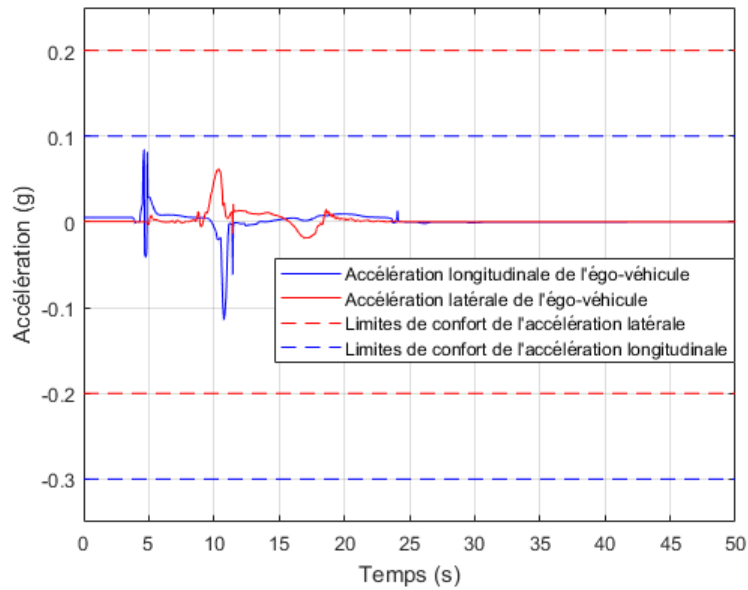


Figure 5.14 – Accélération longitudinale de l'égo-véhicule lors de son franchissement de l'intersection n°1

### 5.3.2.2 Synthèse des résultats de simulation sur l'ensemble de l'itinéraire

L'ensemble des résultats de simulation pour le passage des différentes intersections est consigné dans le tableau 5-3. Les indicateurs évalués dans ce tableau sont : la plus petite marge sur la contrainte de vitesse et les rapports entre les accélérations (ou décélérations) maximales observées dans l'intersection et les limites de confort associées.

La vitesse de l'égo-véhicule tend vers la vitesse de limite de confort planifiée, avec une marge inférieure à 10 %. Les accélérations longitudinales les plus importants (supérieur à 50 %) sont observées lors des franchissements des carrefours giratoires, à l'exception de l'intersection n°1. Les décélérations sont tous inférieurs à 33% de la limite associée au confort. Enfin, les accélérations latérales sont inférieures à 40 % de la limite associée au confort.

<i>Type d'intersection</i>	<i>Plus petite marge sur la contrainte de vitesse (%)</i>	<i>Niveau d'accélération maximale (%)</i>	<i>Niveau de déccélération maximale (%)</i>	<i>Niveau d'accélération latérale maximale (%)</i>
<i>Intersection en croix (N°1)</i>	1.2%	84 %	4 %	5.2%
<i>Intersection en croix (N°2)</i>	9 %	12 %	33 %	12 %
<i>Carrefour giratoire deux voies (N°3)</i>	0 %	99 %	33 %	19 %
<i>Intersection en T (N°4)</i>	6 %	16 %	32 %	10 %
<i>Carrefour giratoire deux voies (N°5)</i>	0 %	59 %	32 %	30 %
<i>Intersection en Y (N°6)</i>	0 %	21 %	33 %	22 %
<b>Intersection en croix (N°7)</b>	0 %	21 %	33 %	40 %
<b>Intersection en T (N°8)</b>	4 %	44 %	32 %	10 %

**Tableau 5-3 :** Ensemble des résultats de simulation de suivi de trajectoire de référence lors du passage d'intersections

### 5.3.2.3 Bilan

L'algorithme de planification de vitesse présente des résultats respectant les contraintes de confort imposées. Cependant, les marges sur ces dernières sont trop importantes et se traduisent par une conduite de l'égo-véhicule peu dynamique. En effet, le conservatisme introduit par la méthode de planification de vitesse prédictive ne permet pas une optimisation du temps de franchissement des intersections par la saturation des contraintes de confort des accélérations qui aurait permis une conduite plus dynamique.

L'évaluation de la planification de trajectoire ayant été traitée, la replanification est traitée dans les parties suivantes, en commençant par la replanification réactive de chemin.

### 5.3.3 Intégration de la replanification réactive de chemin

Dans cette partie, l'algorithme de replanification réactive de chemin présenté en partie 3.2.2 du chapitre 3 est intégré dans la plateforme de simulation.

Conformément au chapitre 3, une replanification de chemin est effectuée lors de la détection d'un obstacle sur le chemin planifié. L'algorithme est alors exécuté en temps réel.

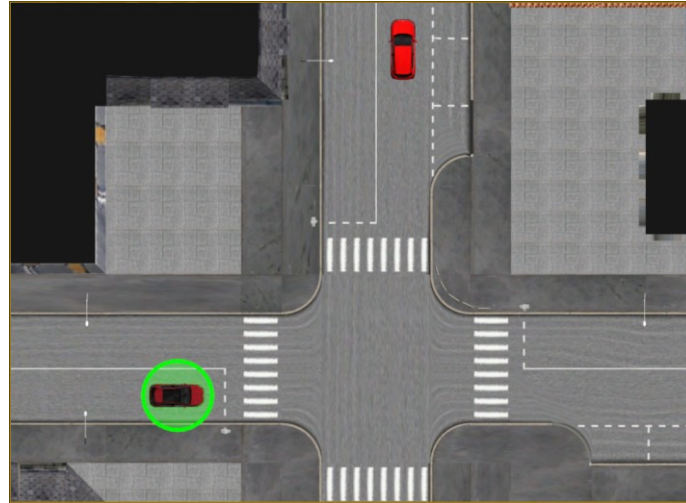
La replanification réactive de chemin est évaluée au travers de l'exemple de l'intersection n°1.

L'algorithme de planification de vitesse donne des résultats respectant les contraintes de confort imposées. Cependant, les marges sur ces dernières sont trop importantes, ce qui conduit à une conduite de l'égo-véhicule peu dynamique.

L'évaluation de la planification de trajectoire ayant été traitée, la replanification est exposée dans les parties suivantes, en commençant par la replanification réactive de chemin.

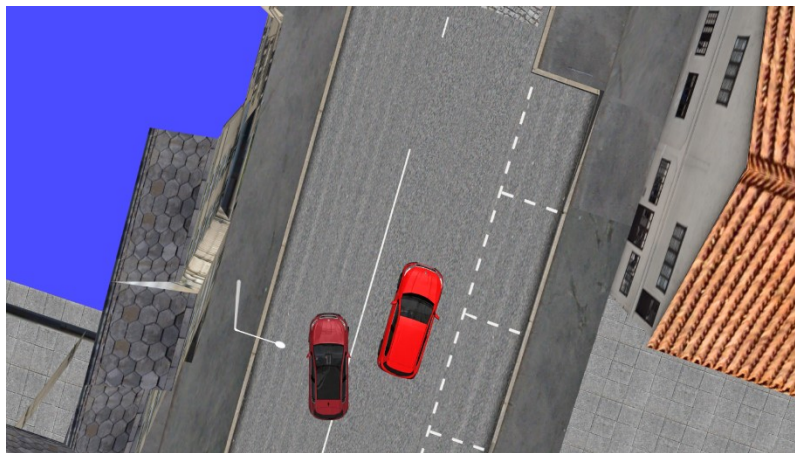
#### 5.3.3.1 Exemple de résultats de simulation de l'algorithme de replanification réactive de chemin: franchissement de l'intersection n°1

La figure 5.15 présente le scénario de test. Lorsque l'obstacle statique est en ligne de vue de l'égo-véhicule, la replanification de chemin est déclenchée afin d'éviter l'obstacle. La marge de distance latérale minimale de sécurité est fixée à 0.5m.



*Figure 5.15 – Scénario de test sous SCANeR Studio : l'égo-véhicule (cercle vert) suit son chemin de référence le menant à tourner à gauche à l'intersection où se situe en sortie un véhicule garé en double file*

La figure 5.16 présente une capture d'écran de l'égo-véhicule pendant la manœuvre d'évitement de l'obstacle. Le chemin replanifié suivi par l'égo-véhicule est quant à lui présenté à la figure 5.17.



*Figure 5.16 – Ego-véhicule évitant un véhicule à l'arrêt en suivant le chemin replanifié, image issue de SCANeR Studio*

Tout d'abord, il peut être constaté que dans ce cas précis la replanification de chemin est nécessaire puisque l'obstacle est situé sur le chemin de référence initial. Ensuite, on constate, en particulier sur la figure 5.19, que l'égo-véhicule n'arrive pas à suivre le chemin replanifié. Ce dernier est présenté plus en détails dans le repère obstacle à la figure 5.18 avec le chemin suivi par l'égo-véhicule.

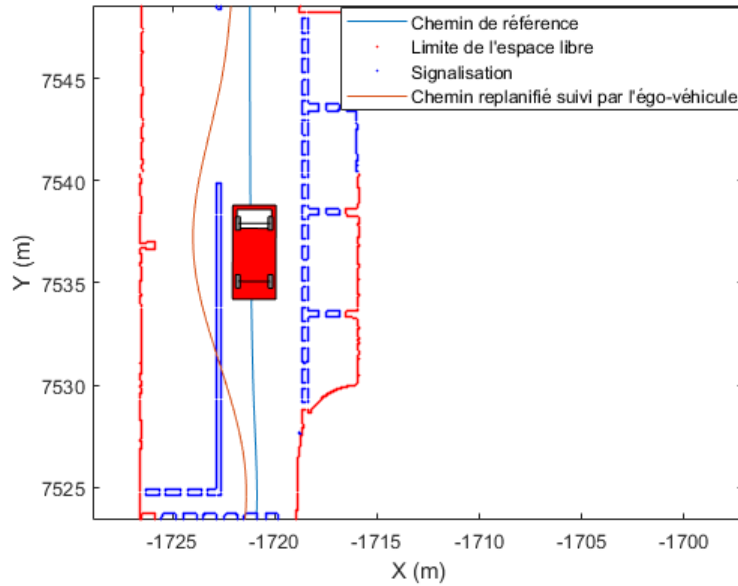


Figure 5.17 – Chemin replanifié de l'égo-véhicule (véhicule vert) afin d'éviter un obstacle statique (véhicule rouge) se trouvant sur le chemin initial

Le chemin replanifié passe au plus près à 1.7 m de l'obstacle. La distance minimale imposée est de 1.6 m ce qui correspond à la demi-largeur de l'égo-véhicule à laquelle s'ajoute la marge de 0.5 m. On constate donc que cette contrainte est respectée. Cependant, les actionneurs de direction ne sont pas saturés par une telle manœuvre, comme indiqué sur la figure 5.19 où l'angle maximal de braquage roue lors de la manœuvre d'évitement est de 22.2°.

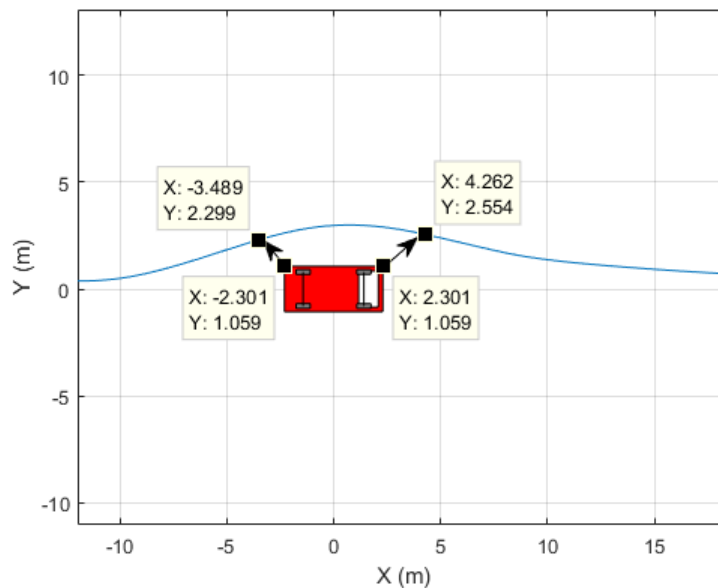
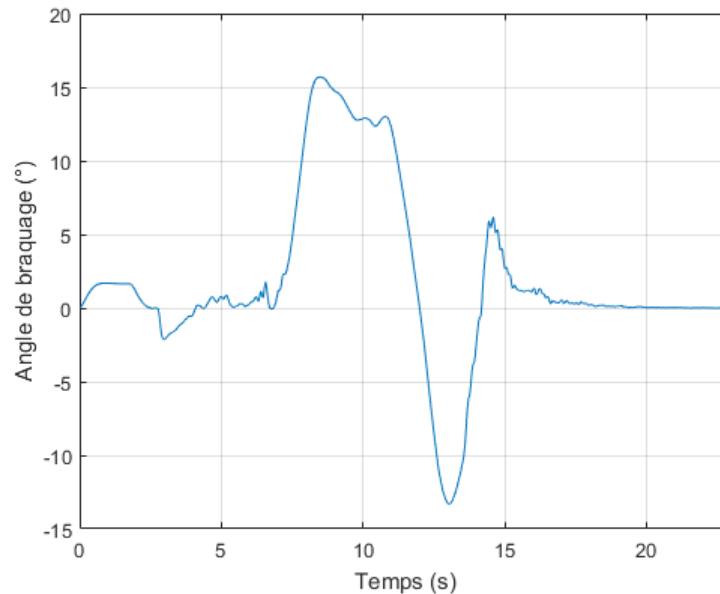


Figure 5.18 – Chemin replanifié suivi par l'égo-véhicule dans le repère obstacle



Enfin, les actionneurs de direction ne sont pas saturés par une telle manœuvre, comme indiqué sur la figure 5.19 où l'angle maximal de braquage roue lors de la manœuvre d'évitement est de  $16^\circ$  soit 53% de la commande maximale.



*Figure 5.19 – Angle de braquage roue de l'égo-véhicule lors de la manoeuvre d'évitement de l'obstacle statique*

### 5.3.3.2 Bilan

L'algorithme de replanification de chemin permet l'obtention en temps réel d'un chemin permettant l'évitement d'un obstacle statique. Les résultats observés sont similaires à ceux du chapitre 3.

La dernière partie concerne l'intégration d'un algorithme de replanification de vitesse afin d'éviter un obstacle dynamique.

### 5.3.4 Intégration de la replanification de vitesse

Dans cette partie, l'algorithme de replanification de vitesse basé sur l'espace de coordination présenté en partie §4.3 du chapitre 4 est intégré dans la plateforme de simulation.

Conformément au chapitre 4, lors de la détection d'un potentiel obstacle dynamique à l'entrée de l'intersection, une analyse de la situation est effectuée dans l'espace de coordination donnant lieu à une replanification de vitesse si un conflit est avéré. De la même manière que

dans la partie précédente, l'algorithme est exécuté pendant la simulation lors de la détection de l'obstacle.

La replanification de vitesse est évaluée au travers de l'exemple de l'intersection n°1.

#### 5.3.4.1 Exemple de résultats de simulation de l'algorithme de planification de vitesse: franchissement de l'intersection n°1

La figure 5.20 présente le scénario de test. L'égo-véhicule suit sa trajectoire de référence le conduisant à franchir l'intersection n°1 en tournant à gauche. Un véhicule arrivant de la droite à la vitesse de 50 km/h ne peut pas respecter la priorité de l'égo-véhicule et provoque un accident illustré à la figure 5.21.



*Figure 5.20 – Scénario de test sous SCANeR Studio : l'égo-véhicule (en rouge) suit son chemin de référence le menant à tourner à gauche à l'intersection où le véhicule blanc va lui couper la route*



*Figure 5.21 – Illustration de la collision lors du scénario de test sous SCANeR Studio : en absence de replanification, le conflit entre l'égo-véhicule (en rouge) et l'obstacle dynamique (en blanc) est inévitable*

Afin d'éviter une telle situation, l'algorithme de replanification de vitesse est utilisé. Dans un premier temps, une analyse de la situation est effectuée par celui-ci dans l'espace de coordination présenté à la figure 5.22. Le centre de la zone de collision est l'intersection entre le chemin suivi par l'égo-véhicule et celui suivi par l'obstacle dynamique. Dans cet exemple, l'intersection survient lorsque l'égo-véhicule a parcouru 54.6 m sur sa trajectoire tandis que l'obstacle a parcouru 249.4 m sur la sienne. La trajectoire relative avant la replanification de vitesse traverse la zone de collision amenant ainsi à la situation de la figure 5.21. Une nouvelle trajectoire relative passant par la droite de la zone de collision, c'est-à-dire lorsque l'égo-véhicule cède le passage à l'obstacle, est calculée.

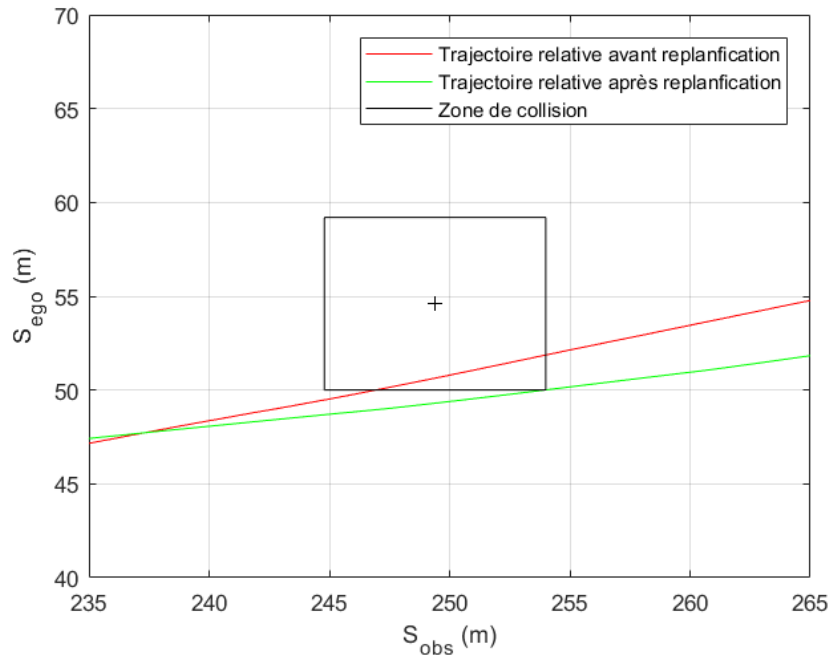


Figure 5.22 – Trajectoires relatives entre l'égo-véhicule et l'obstacle dynamique représentés dans l'espace de coordination avant et après la replanification de vitesse

Le profil de vitesse replanifié est présenté à la figure 5.23. Ce profil est proche de celui suivi par l'égo-véhicule avant la replanification. Cependant, la différence majeure réside dans la phase de freinage entre  $t = 13 \text{ s}$  et  $t = 18 \text{ s}$  permettant à l'égo-véhicule de céder le passage.

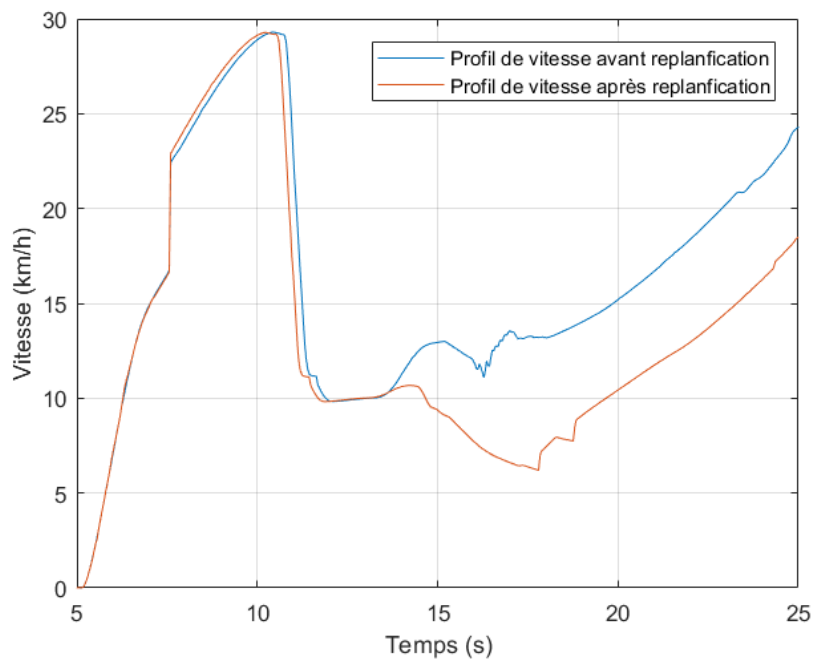


Figure 5.23 – Trajectoires relatives entre l'égo-véhicule et l'obstacle dynamique représentés dans l'espace de coordination avant et après la replanification de vitesse

L'évolution de la distance entre les centres de gravité de l'égo-véhicule et de l'obstacle est présentée à la figure 5.24. La distance limite de collision est non nulle du fait que la distance est calculée aux centres de gravité et est égale à l'addition de la demi-longueur de l'égo-véhicule avec la demi-largeur de l'obstacle. Avant la replanification, l'égo-véhicule va au delà de cette distance limite traduisant une collision entre les deux véhicules. Il est à noter que les collisions étant désactivées pour la simulation, l'égo-véhicule peut aller au delà de la distance limite, c'est à dire qu'il peut "traverser" l'obstacle. À l'inverse, après la replanification de vitesse, l'égo-véhicule passe au plus près à 10 cm de l'obstacle sans le toucher. Bien entendu, ce type de résultats n'est possible qu'en simulation et avec une perception parfaite de l'environnement par l'égo-véhicule. Dans une situation réelle, des marges de sécurité sont préférables pour éviter tout accident.

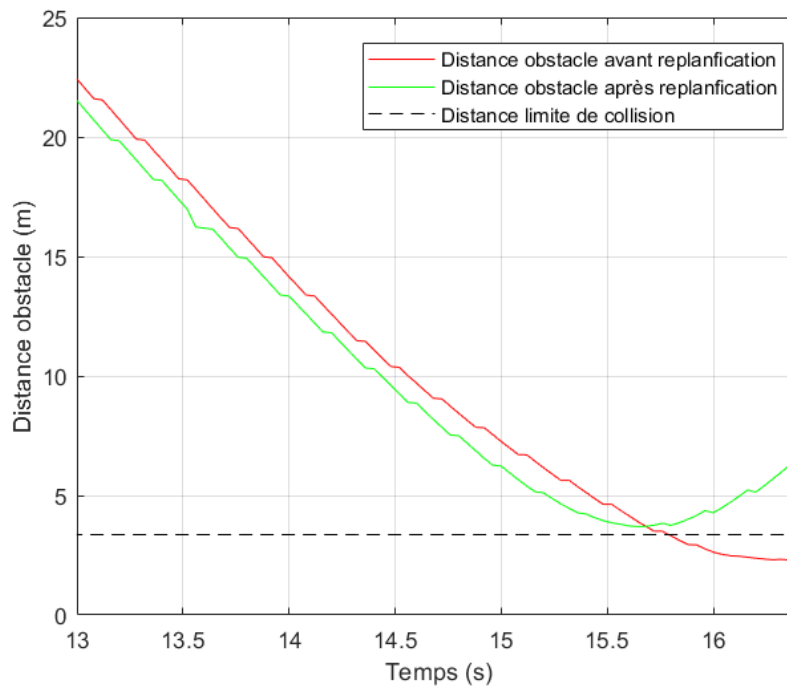


Figure 5.24 – Evolution de la distance entre les centres de gravité de l'égo-véhicule et de l'obstacle

### 5.3.4.2 Bilan

Les performances de l'algorithme de replanification de vitesse sont similaires à celles observées dans le chapitre 4. Le simulateur considère une perception parfaite de l'environnement par l'égo-véhicule. De plus, aucune erreur de prédiction de trajectoire de l'obstacle n'a été introduite dans le simulateur. Des marges sur la zone de collision devront alors être ajoutées afin de prendre en compte l'ensemble des incertitudes.

## 5.4 Conclusion

L'implantation d'algorithmes dans un simulateur est une tâche longue et souvent compliquée. Après une brève présentation de la plateforme de simulation et des différents étages de contrôle de l'égo-véhicule, l'ensemble des simulations des différents algorithmes retenus dans les chapitres précédents est présenté.

Le premier algorithme concerne la planification de chemin prédictif. Il présente des résultats satisfaisants mais néanmoins dépendant de la planification de chemin global. En effet, la simplicité de l'algorithme permettant d'obtenir un chemin de référence avec peu de paramètres constitue également sa limite. Le peu de degrés de liberté qu'il possède ne lui permet pas, à lui seul, de répondre à toutes les situations, notamment lorsqu'il est confronté à des intersections plus éloignées des standards.

Les simulations de la planification de vitesse ont quant à elles des résultats qui respectent les contraintes de confort imposées. Cependant, les marges sur ces dernières sont trop importantes et conduisent à une conduite de l'égo-véhicule peu dynamique. En effet, le conservatisme introduit par la méthode de planification de vitesse prédictive ne permet pas une optimisation du temps de franchissement des intersections par la saturation des contraintes de confort des accélérations qui aurait permis une conduite plus dynamique.

Ensuite, l'algorithme de replanification de chemin permet l'obtention en temps réel d'un chemin permettant l'évitement d'un obstacle statique. Les résultats observés sont similaires à ceux du chapitre 3.

Enfin, les performances de l'algorithme de replanification de vitesse sont similaires à ceux observés dans le chapitre 4. Cependant, le simulateur considère une perception parfaite de l'environnement par l'égo-véhicule. De plus, aucune erreur de prédiction de trajectoires de l'obstacle n'ont été introduites dans le simulateur. Des marges sur la zone de collision devront alors être ajoutées afin de prendre en compte l'ensemble des incertitudes.

# Conclusion générale et perspectives

Cette thèse porte sur la planification de trajectoire en intersection et du développement d'algorithmes associés, nécessaires à la conduite autonome en environnement urbain. Les principaux résultats, ainsi que les perspectives, sont présentés dans cette conclusion.

Le **chapitre 1** présente les thématiques abordées dans cette thèse. Il est montré que la recherche sur la conduite autonome sur autoroute commence à porter ses fruits avec la commercialisation de fonctions permettant une autonomie partielle dans ce milieu. Cependant, afin de répondre à l'évolution de la demande de mobilité actuelle, la conduite autonome en milieu urbain est maintenant envisagée. Le milieu urbain est caractérisé par un environnement à la fois dynamique et incertain, avec une circulation à faible vitesse, mais à fortes variations relatives, et la présence de routes à fortes courbures. L'intersection et son environnement proche concentrent une grande partie des problématiques du milieu urbain. Comparativement à l'autoroute, le milieu urbain nécessite alors une contribution de la planification de trajectoire plus importante. Pour ces raisons, cette thèse se concentre sur la planification de trajectoires en intersection et plus précisément sur la planification locale. Elle cherche à résoudre le problème de manœuvrabilité du véhicule autonome en milieu restreint et dynamique que constitue l'intersection. Pour répondre à cette problématique, la notion de trajectoire est décomposée en celles de chemin et de vitesse. De plus, le problème de planification est divisé en une partie prédictive et une partie réactive. La première consiste à calculer un chemin et une vitesse à partir des données de cartographie, afin d'obtenir une trajectoire de référence. La seconde quant à elle, consiste à ajuster le chemin et la vitesse afin de réagir à l'environnement.

Le **chapitre 2** traite de la planification de chemin prédictive qui s'intéresse à la planification de chemin en intersection connaissant un certain nombre de contraintes a priori sur le trajet. Le chemin ainsi obtenu est appelé chemin de référence. Ce chemin décrit le déplacement du milieu de l'essieu arrière de l'ego-véhicule dans le plan et quatre méthodes ont été proposées afin de répondre à ce problème. Elles ont ensuite été évaluées sur deux scénarios différents en intersections. La méthode par analyse de l'espace autorisé s'est avérée la plus adaptée aux problématiques de la planification de chemin prédictive.

L'objectif du **chapitre 3** a été de présenter une méthode de replanification de chemin permettant l'évitement d'un obstacle statique. Dans un premier temps, la méthode des champs de potentiels a été étudiée. Cette méthode a permis d'obtenir une replanification réactive vis-à-vis des obstacles survenant le long du chemin de l'égo-véhicule, mais qui ne respecte pas les contraintes non-holonome du véhicule et dont le temps de calcul est non compatible avec le temps réel. Dans un second temps, une méthode plus simple a alors été développée. Elle est fondée sur l'optimisation d'une courbe de Bézier cubique au travers du Lagrangien et de l'algorithme de Newton-Raphson. Cependant, une courbe de Bézier cubique ne possède pas suffisamment de degrés de liberté afin de pouvoir respecter l'ensemble des contraintes. Une amélioration de cette dernière méthode a finalement été présentée. Un ensemble de courbe de Bézier a alors été considéré permettant d'imposer deux points de passage au chemin replanifié et de formuler le problème d'optimisation sous forme de programmation quadratique conduisant à un faible temps de calcul tout en respectant l'ensemble des contraintes.

Dans le **chapitre 4**, une méthodologie complète de planification de vitesse pour un véhicule autonome en milieu urbain a été présentée. Cette méthodologie est composée de deux parties : la première s'intéresse à la planification de vitesse utilisant les informations a priori sur le parcours suivi par l'égo véhicule, tandis que la seconde s'intéresse à la replanification de la vitesse de l'égo-véhicule afin de coordonner le franchissement d'une intersection avec les autres véhicules également présents.

La planification de vitesse utilise l'estimation de la courbure du chemin à suivre, préalablement planifié à l'aide des algorithmes présentés au chapitre précédent, afin de contraindre la vitesse de l'égo-véhicule à respecter les limites de confort latéral. De plus, les limites de vitesse de braquage des roues et de vitesses autorisées par le code de la route sont prises en compte dans cette approche. Enfin, un algorithme de mise en forme de profil de vitesse est utilisé afin de respecter les contraintes de confort longitudinal. La replanification de la vitesse, quant à elle, se base sur la prédiction de trajectoire des autres véhicules pour recalculer, si nécessaire, un profil permettant un franchissement de l'intersection en sécurité et respectant les règles de priorités fixées par le code de la route. Cette méthode est également utilisable pour réagir à la violation de ces règles par un autre usager.

Le **chapitre 5** présente brièvement la plateforme de simulation SCANeR Studio/Matlab et les différents étages de contrôle de l'égo-véhicule. L'ensemble des simulations des différents algorithmes retenus dans les chapitres précédents a été également présenté. Le premier



l'algorithme concerne la planification de chemin prédictif. Il présente des résultats satisfaisants mais néanmoins dépendants de la planification de chemin global. En effet, la simplicité de l'algorithme permettant d'obtenir un chemin de référence avec peu de paramètres constitue également sa limite. Le peu de degrés de liberté qu'il possède ne lui permet pas, à lui seul, de répondre à toutes les situations, notamment lorsqu'il est confronté à des intersections plus éloignées des standards. Les simulations de la planification de vitesse ont quant à elles des résultats qui respectent les contraintes de confort imposées. Cependant, les marges sur ces dernières sont trop importantes et conduisent à une conduite de l'égo-véhicule peu dynamique. Ensuite, l'algorithme de replanification de chemin permet l'obtention en temps réel d'un chemin permettant l'évitement d'un obstacle statique et les résultats obtenus sont conformes aux attentes. Finalement, les performances de l'algorithme de replanification de vitesse sont similaires à celles observées dans le chapitre 4. Cependant, le simulateur considère une perception parfaite de l'environnement par l'égo-véhicule. De plus, aucune erreur de prédiction de trajectoires de l'obstacle n'a été introduite dans le simulateur ce qui limite alors l'interprétation des résultats obtenus.

La planification de chemin prédictif peut être améliorée en remplaçant l'utilisation de l'enveloppe convexe de l'espace autorisé par celle de l'enveloppe convexe intérieure de l'espace autorisé. Cette amélioration permettrait de s'affranchir du biais introduit par l'enveloppe convexe au prix d'un ajout de pessimisme dans le problème d'optimisation. Une réflexion plus approfondie sur l'optimisation de l'algorithme serait utile afin d'améliorer le temps de calcul. L'adaptation d'algorithmes de type « ROI detection based » (detection de Region Of Interest) serait une piste sérieuse pour réduire ce temps de calcul. De plus, une étude approfondie du poids des différentes contraintes lors de l'obtention de l'espace autorisé doit être réalisée afin d'avoir une meilleure représentation de ce dernier.

La planification de chemin réactif étant limitée qu'à l'évitement d'obstacles statiques, il serait intéressant de complexifier la méthode afin de prendre en compte des obstacles dynamiques.

La planification de vitesse est trop pessimiste, les contraintes doivent donc être revues afin de dynamiser la conduite autonome.

La replanification de vitesse ne prend pas en compte les incertitudes de mesures, de modèles ou de prédiction. Des marges sur la zone de collision pourront alors être ajoutées afin de prendre en compte l'ensemble des incertitudes. De plus, la prise en compte d'un véhicule

supplémentaire arrivant à l'intersection pour coordonner l'égo-véhicule permettrait de prendre en compte des situations de vie plus complexes.

Finalement, la perspective majeure de cette thèse est l'implantation sur prototype de test de l'ensemble des algorithmes permettant ainsi leur évaluation complète, confrontée à la réalité du terrain.



## Bibliographie

- [1] S. LEFEVRE, «Estimation du risque aux intersections pour applications sécuritaires avec véhicules communicants,» Grenoble, 2012.
- [2] B. A. HAMILTON, «History of intelligent transportation systems,» Mai 2016. [En ligne]. Available: <https://www.its.dot.gov/history/offline/download.pdf>.
- [3] R. L. FRENCH, «Historical overview of automobile navigation technology,» vol. 36, 1986.
- [4] D. A. ROSEN, F. J. MAMMANO et R. FAVOUT, «An electronic route-guidance system for highway vehicles,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 19, n° 11, 1970.
- [5] R. L. FRENCH et G. M. LANG, «Automatic route control system,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 22, n° 12, 1973.
- [6] S. TSUGAWA, T. YATABE, T. HIROSE et S. MATSUMOTO, «An Automobile with Artificial Intelligence,» chez *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Tokyo, 1979.
- [7] S. E. SHLADOVER, «The California PATH Program of IVHS research and its approach to vehicle-highway automation,» *Proceedings of the Intelligent Vehicles '92 Symposium*, 1992.
- [8] E. D. DICKMANN et A. ZAPP, «Autonomous high speed road vehicle guidance by computer vision,» chez *International Federation of Automatic Control. World Congress (10th)*, Munich, 1987.
- [9] D. POMERLEAU, «ALVINN: An Autonomous Land Vehicle In a Neural Network,» *Proceedings of Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 1, 1989.
- [10] L. TRASSOUDAIN, D. HUTBER, P. CHECCHIN, J. ALIZON, J. GALLICE et M. THONNAT, «Building an Environment Map around the Prolab2 Vehicle Using a Controllable Range Sensor,» chez *Intelligent Vehicle Symposium'94*, Paris, 1994.
- [11] C. THORPE, T. JOCHEM et D. POMERLEAU, «The 1997 automated highway free agent demonstration,» *Intelligent Transportation System ITSC '97*, 1997.
- [12] G. BAILLE, P. GARNIER, H. MATHIEU et R. PISSARD-GIBOLLET, «Le Cycab de l'INRIA Rhône-Alpes,» Rapport technique n°0229, 1999.
- [13] S. THRUN, «Winning the DARPA Grand Challenge,» *Machine Learning: ECML 2006*, vol. 4212, 2006.
- [14] J. MARKOFF, «Guided by Computers and Sensors, a Smooth Ride at 60 Miles Per Hour,» 2010.
- [15] D. FAGNANT et K. KOCKELMAN, «Preparing a nation for autonomous vehicles: Opportunities, barriers and policy recommendations,» *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015.
- [16] J. HARDING, G. POWELL, R. YOON, J. FILKENTSCHER, C. DOYLE, D. SADE, M. LUKUC, J. SIMONS et J. WANG, «Vehicle-to-Vehicle Communications: Readiness of V2V Technology for Application,» National Highway Traffic Safety Administration, Washington, 2014.

- 
- [17] SAE Society of Automotive Engineers International, «SAE Standards News: J3016 automated-driving graphic update,» 2019. [En ligne]. Available: <https://www.sae.org/news/2019/01/sae-updates-j3016-automated-driving-graphic>.
- [18] E. FONTAINE, «Audi A8 : un mode de conduite autonome de niveau 3,» 19 07 2017. [En ligne]. Available: <https://www.lesnumeriques.com/voiture/audi-a8-mode-conduite-autonome-niveau-3-a3237.html>.
- [19] D. NOGUEIRA, «AutoPilot 2.0 ou comment Tesla AutoPilot 2.0 ou comment Tesla autonome,» 14 Juillet 2018. [En ligne]. Available: <https://www.01net.com/actualites/autopilot-2-0-ou-comment-tesla-equipe-ses-voitures-pour-la-conduite-autonome-1479214.html>.
- [20] B. BEAUDET, «Quel niveau d'autonomie de nos véhicules autonomes ?,» 11 Novembre 2018. [En ligne]. Available: <https://navette-autonome.fr/ressources/articles-navette-autonome/quel-niveau-dautonomie/>.
- [21] Ministère des Transports du Québec, «Gestion de la vitesse sur le réseau routier municipal en milieu urbain,» 2015.
- [22] S. J. ASHTON, «Pedestrian injuries: the influence of vehicle design,» *Road Safety research and practice*, 1981.
- [23] R. ARKIN, Behavior-Based Robotics, vol. Chapter 9, Cambridge: MIT Press, 1998.
- [24] R. R. MURPHY, Introduction to AI Robotics, vol. 1, Cambridge: MIT Press, 2000.
- [25] R. A. BROOKS, «Intelligence without representation,» *Artificial Intelligence*, vol. 47, 1991.
- [26] D. KIRSH, «Foundations of AI: The big issues,» *Artificial Intelligence*, 1991.
- [27] O. RUSSAKOVSKY, J. DENG, H. SU, J. KRAUSE, S. Sanjeev, M. Sean, H. Zhiheng, A. KARPATY, A. KHOSLA, M. BERNSTEIN, A. C. BERG et L. FEI-FEI, «ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge,» *International Journal of Computer Vision*, vol. 115, 2015.
- [28] J. GODJEVAC, Idées nettes sur la logique floue, PPUR, 1999.
- [29] M. PAVAN et R. TODESCHINI, «Multicriteria Decision Making Methods,» *Comprehensive Chemometrics*, vol. 1, 2009.
- [30] A. BABA, Cartographie de l'environnement et suivi simultané de cibles dynamiques par un robot mobile, Toulouse: Toulouse 3, 2007.
- [31] M. CHIRCA, Perception pour la navigation et le contrôle des robots mobiles. Application à un système de voiturier autonome, Clermont-Ferrand: Clermont-Ferrand 2, 2016.
- [32] A. ELFES, «Using Occupancy Grids for Mobile Robot Perception and Navigation,» *Computer*, vol. 22, 1989.
- [33] W. BURGARD, C. Stachniss et D. Hähnel, «Mobile Robot Map Learning from Range Data in Dynamic Environments,» *Springer Tracts in Advanced Robotics*, vol. 35, 1970.
- [34] E. BRUNSKILLI, T. KOLLAR et N. ROY, «Topological mapping using spectral clustering and classification,» *Intelligent Robots and Systems*, 2007.
- [35] S. THRUN, M. Bennewitz et W. Burgard, «MINERVA: A second generation mobile tour-guide robot,» *Proceedings of the IEEE International Conference*.

- 
- [36] N. J. NILSSON, «A mobile automation: an application of artificial intelligence techniques,» *Proc. of the International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, 1969.
- [37] A. HORNING, K. M. WURM, M. BENNEWITZ, C. STACHNISS et W. BURGARD, «OctoMap: An efficient probabilistic 3D mapping framework based on Octrees,» *AURO*, vol. 34, n° 13, 2013.
- [38] N. TOMATIS, I. NOURBAKSHI et R. SIEGWART, «Hybrid Simultaneous Localization and Map Building: Closing the Loop with Multi-Hypotheses Tracking,» *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA*, vol. 3, 2002.
- [39] B. LISIEN, D. A. S. D. MORALES, G. KANTOR, I. REKLEITIS et H. CHOSSET, «The hierarchical atlas,» *Robotics, IEEE Transactions on Robotics*, vol. 21, 2005.
- [40] M. MEILLAND, A. COMPORT et P. RIVES, «Dense visual mapping of large scale environments for real-time localisation,» 2011.
- [41] R. RAJAMANI, *Vehicle Dynamics and Control*, Springer US, 2006.
- [42] L. LI et F.-Y. WANG, *Advanced Motion Control and Sensing for Intelligent Vehicles*, Springer-Verlag US, 2007.
- [43] J. ACKERMANN, J. GULDNER, W. SIENEL, R. STEINHAUSER et V. I. UTKIN, «Linear and nonlinear controller design for robust automatic steering,» *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 3, 1995.
- [44] P. POLACK, S. DELPRAT et B. D'ANDREA-NOVEL, «Brake and velocity model-free control on an actual vehicle,» *Control Engineering Practice*, vol. 92, 2019.
- [45] J. LEVINE, *Analysis and Control of Nonlinear Systems : A Flatness-based Approach*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [46] L. MAIFFREDY, «Bases de la dynamique du,» Editions T.I., 10 01 2012. [En ligne]. Available: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/sciences-fundamentales-th8/applications-en-mecanique-physique-42643210/bases-de-la-dynamique-du-vehicule-af5100/>.
- [47] W. SCHWARTING, J. ALONSO-MORA et D. RUS, «Planning and Decision-Making for Autonomous Vehicles,» *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 2018.
- [48] A. ESKANDARIAN, *Handbook of Intelligent Vehicles*, Londres: Springer-Verlag London Ltd, 2012.
- [49] S. D. PENDLETON, H. ANDERSEN, X. DU, X. SHEN, M. MEGHJANI, Y. H. ENG, D. RUS et M. H. ANG, «Perception, planning, control, and coordination for autonomous vehicles,» *Machines*, 2017.
- [50] D. GONZALEZ BAUTISTA, «Functional architecture for automated vehicles trajectory planning in complex environments,» phdthesis, 2017.
- [51] S. M. LAVALLE, *Planning algorithms*, Cambridge university press, 2006.
- [52] T. WONGPIROMSARN, U. TOPCU, O. Necmiye, H. XU et R. M. MURRAY, «TuLiP: a software toolbox for receding horizon temporal logic planning,» *Proceedings of the 14th international conference on Hybrid systems: computation and control*, 2011.
- [53] J. TUMOVA, L. I. REYES CASTRO, S. KARAMAN, E. FRAZZOLI et D. RUS, «Minimum-violation LTL Planning with Conflicting Specifications,» 2013.

- 
- [54] L. JAILLET, «Méthodes probabilistes pour la planification réactive de mouvements,» 2005.
- [55] L. E. KRAVAKI, P. SVESTKA, J. C. LATOMBE et M. OVERMARS, «Probabilistic Roadmaps for Path Planning in High-Dimensional Configuration Spaces,» *In Trans. on Robotics and Automation*, 1996.
- [56] S. ABRASHOV, «Étude et modélisation du conducteur pour la conception de systèmes d'assistance à la conduite,» *Thèse de doctorat dirigée par Malti, Rachid et Moreau, Xavier Automatique, productique, signal et image, ingénierie cognitive Bordeaux 2017*, 2017.
- [57] S. BOYD, «Convex optimization: from embedded real-time to large-scale distributed,» *Proceedings of the 17th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2011.
- [58] J. A. REEDS et L. A. SHEPP, «Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards,» *Pacific Journal of Mathematics*, vol. 145, n° 12, 1990.
- [59] J.-B. RECEVEUR, S. VICTOR et P. MELCHIOR, «Trajectory Optimization for Autonomous Vehicles on Crossroads with Mobile Obstacles,» chez *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2018.
- [60] C. BREZINSKI, «Méthodes numérique de base - Analyse numérique,» *Techniques de l'ingénieur Méthodes numériques*, 2006.
- [61] K. KANT et S. ZUCKER, «Toward Efficient Trajectory Planning: The Path-Velocity Decomposition,» *International Journal of Robotic Research - IJRR*, vol. 5, 1986.
- [62] M. C. STONE et T. DEROSE, *Characterizing cubic Bézier curves*, Palo Alto, Calif, Xerox Corp., Palo Alto Research Center, 1988.
- [63] C. V. MURARU, «On a Problem of Fitting Data Using Bézier Curves,» *Brain. Broad Research in Artificial Intelligence and Neuroscience*, vol. 1, 2010.
- [64] SETRA, Service d'Étude Techniques des Routes et Autoroutes, Aménagement des carrefours interurbains sur les routes principales: carrefours plans, Ministère de l'équipement, des transports et du logement, 1998.
- [65] G. HOFFMANN, décembre 2006. [En ligne]. Available: <http://www.fho-emden.de/~hoffmann/bezier18122002.pdf>.
- [66] M. PADBERG, *Linear Optimization and Extensions*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999.
- [67] M. PERROLLAZ, «Détection d'obstacles multi-capteurs supervisée par stéréovision,» Paris, 2012.
- [68] A. ASVADI, C. PREMEBIDA, P. PEIXOTO et U. NUNES, «3D Lidar-based static and moving obstacle detection in driving environments: An approach based on voxels and multi-region ground planes,» *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 83, pp. 299-311, 2016.
- [69] C. HANE, T. SATTTLER et M. POLLEFEYS, «Obstacle detection for self-driving cars using only monocular cameras and wheel odometry,» chez *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Hamburg, 2015.
- [70] A. BEHL, O. H. JAFARI, S. K. MUSTIKOVELA, H. A. ALHAIJA, C. ROTHER et A. GEIGER, «Bounding Boxes, Segmentations and Object Coordinates: How Important is Recognition for 3D Scene Flow Estimation in Autonomous Driving Scenarios?,» chez *2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Venice, 2017.

- 
- [71] A. POTY, P. MELCHIOR et A. OUSTALOUP, «Dynamic path planning for mobile robots using fractional potential field,» *First International Symposium on Control, Communications and Signal Processing*, 2004.
- [72] A. OUSTALOUP, *Diversity and Non-Integer Differentiation for System Dynamics*, ISTE Ltd and John Wiley & Sons Inc, 2014.
- [73] R. MALTI, X. MOREAU, F. KHEMANE et A. OUSTALOUP, «Stability and resonance conditions of elementary fractional transfer functions,» *Automatica*, vol. 47, 2011.
- [74] X. QIAN, J. GREGOIRE, F. MOUTARDE et A. DE LA FORTELLE, «Priority-based coordination of autonomous and legacy vehicles at intersection,» *2014 17th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC 2014*, 2014.
- [75] N. MONOT, F. AIOUN, X. MOREAU, A. BENINE-NETO et A. RIZZO, «Etude comparative de structures de régulation pour le guidage latéral d'un véhicule autonome,» *Automatique*, vol. 2, n° 11, 2018.
- [76] D. BARTON, «A Primer on Bézier Curves,» [En ligne]. Available: [https://pomax.github.io/bezierinfo/#circles\\_cubic](https://pomax.github.io/bezierinfo/#circles_cubic).



# Annexe : Placement des points de contrôle dans un rond point

*Le développement présenté ici est basé sur les travaux présent sur le site :*

<https://pomax.github.io/bezierinfo/#circles>

Les courbes de Bézier ne permettent pas de reproduire un cercle. Lorsqu'une approximation d'un quart de cercle par une courbe de Bézier cubique est effectuée, 4% de la courbe ne se situe pas sur l'arc de cercle alors qu'il n'est que de 0.1% pour un huitième de cercle. Ainsi une courbe de Bézier cubique ne peut pas être utilisée pour planifier le chemin de l'égo-véhicule sur la totalité du rond-point. Pour ce faire une méthode de placement de point de passage à l'intérieur du rond-point est développée.

## A1. Paramétrisation et repérage dans un rond point

Dans cette méthode, un rond point est défini par :

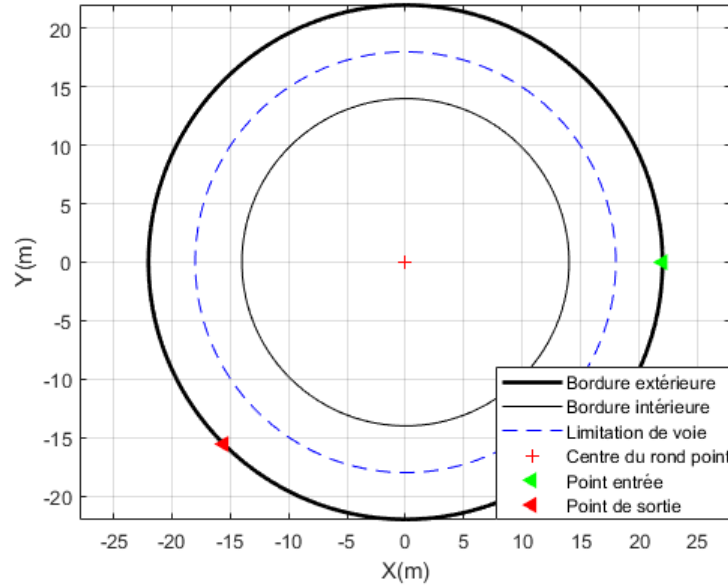
- son centre  $O_{rp}$  de coordonnées  $(X_c, Y_c)$ ,
- sa bordure extérieure de rayon  $r_{ext}$ ,
- sa bordure intérieure de rayon  $r_{int}$ ,
- son nombre de voies  $n_v$ ,
- ses limitations de voies, s'ils existent, d'indice  $k$  et de rayon  $r_{voie}^k$  avec  $k$  un entier allant de 1 à  $n_v$ .

Un point  $P$  est repéré sur un rond point par ses coordonnées polaires :

- sa distance au centre du rond point  $\rho$ ,
- et sa position angulaire  $\alpha$ .

Soient  $P_{in}$  et  $P_{out}$ , respectivement les points d'entrée et de sortie de l'intersection supposées fournies par la planification globale. Ils sont défini par leur distance au centre du rond-point respective  $\rho_{in}$  et  $\rho_{out}$ , ainsi que leur position angulaire  $\alpha_{in}$  et  $\alpha_{out}$ .

Ces notions sont illustrées à la figure A1.1 pour  $O_{rp} = (0,0)$ ,  $r_{ext} = 22\text{ m}$ ,  $r_{int} = 14\text{ m}$ ,  $n_v = 2$ ,  $r_{voie}^1 = 18\text{ m}$ ,  $\rho_{in} = \rho_{out} = r_{ext}$ ,  $\alpha_{in} = 0$  et  $\alpha_{out} = \frac{5\pi}{4}$ .



**Figure A1.1 :** Paramétrisation d'un rond-point utilisée par la méthode de placement de points de passage

## A2. Algorithme de placement de points de passage

Dans cette partie,  $n_v = 2$  par soucis de simplicité. Soient  $P_i$  et  $P_{i+1}$  deux points de passage consécutifs situés dans le rond-point. L'algorithme cherche à placer l'ensemble de ces points de passage tel que les secteurs angulaires  $P_i \widehat{O_{rp}} P_{i+1}$  soient inférieurs ou égale à  $\frac{\pi}{4}$ . Il est constitué de 4 étapes.

**Étape 1 :** Calcul des positions angulaires des points de passage

La position angulaire  $\alpha_1$  du premier point de passage  $P_1$  est définie par :

$$\alpha_1 = \alpha_{in} + \frac{\pi}{4}. \quad (\text{A1.1})$$

La position angulaire du point de passage d'itération  $i + 1$  est quant à lui définie par :

$$\alpha_{i+1} = \alpha_i + \frac{\pi}{4}. \quad (\text{A1.2})$$

Les itérations continues tant que  $P_i \widehat{O_{rp} P_{out}} > \frac{\pi}{4}$ .

**Remarque :**

Si  $P_{in} \widehat{O_{rp} P_{out}} \leq \frac{\pi}{4}$ , il n'y a qu'un seul point de passage dans le rond-point et sa position angulaire position angulaire  $\alpha_1$  est définie par :

$$\alpha_1 = \frac{P_{in} \widehat{O_{rp} P_{out}}}{2} + \alpha_{in}, \quad (A1.2)$$

**Etape 2 :** Calcul des distances au centre du rond-point pour chaque point de passage

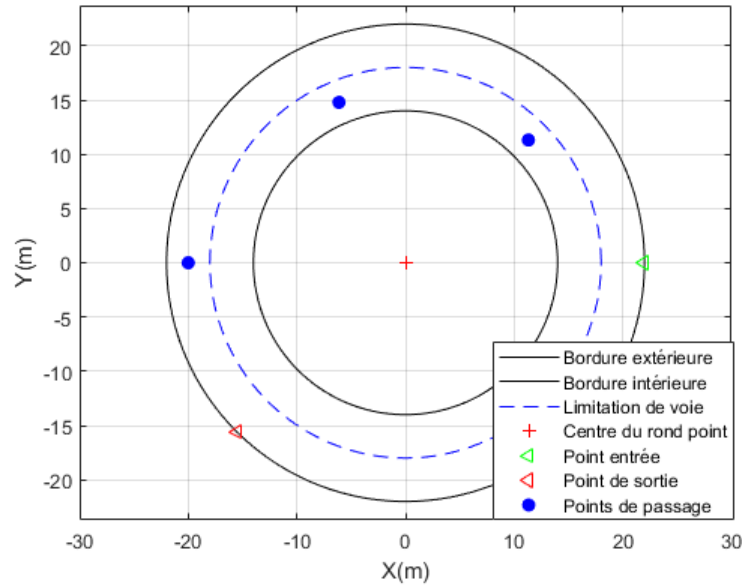
Soit  $N_{wp}$  le nombre de points de passage créés à l'étape 1. La distance au centre du rond-point du point de passage  $P_i$  est définie par :

$$\rho_i = \frac{r_{ext} - r_{voie}^1}{2} + r_{voie}^1, \text{ si } P_{in} \widehat{O_{rp} P_{out}} \leq \pi \quad (A1.3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_i = \frac{r_{voie}^1 - r_{int}}{2} + r_{int} \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, N_{wp} - 1\} \\ \rho_i = \frac{r_{ext} - r_{voie}^1}{2} + r_{voie}^1 \text{ pour } i = N_{wp} \end{array} \right. \text{ si } P_{in} \widehat{O_{rp} P_{out}} > \pi \quad (A1.4)$$

Ces définitions permettent de respecter le chemin à suivre en intersection stipulé par le code de la route. En effet, si  $P_{in} \widehat{O_{rp} P_{out}} \leq \pi$ , nous sommes dans le cas où l'égo-véhicule traverse moins de la moitié du rond-point, il doit donc rester sur la voie extérieure du rond-point. L'ensemble des points de passage se situe alors sur cette voie. Si  $P_{in} \widehat{O_{rp} P_{out}} > \pi$ , l'égo-véhicule traverse plus de la moitié du rond-point, il doit aller sur la voie intérieure du rond-point et se rabattre sur la voie extérieure avant de sortir du rond-point. L'ensemble des points de passage se situe alors sur la voie intérieure hormis le dernier qui se situe sur la voie extérieure.

Les étapes 1 et 2 sont illustrées à la figure A1.2 avec l'exemple utilisé à la partie §A1.



**Figure A1.2 :** Illustration du placement des points de passage via les étapes 1 et 2 de l'algorithme

**Etape 3:** Calcul des coordonnées cartésiennes des points de passage

Les coordonnées cartésiennes  $(X_i, Y_i)$  au point de passage  $P_i$  sont définies par :

$$X_i = \rho_i * \cos(\alpha_i) + X_{rp}, \quad (\text{A1.5})$$

et

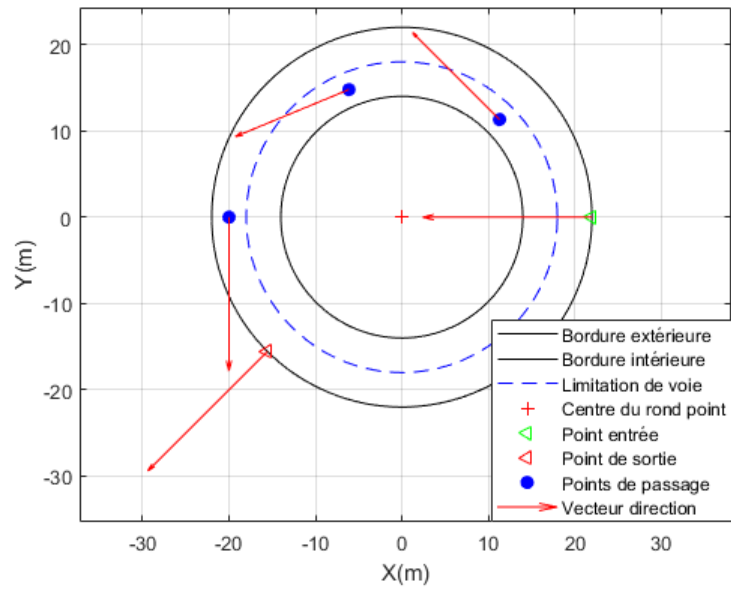
$$Y_i = \rho_i * \sin(\alpha_i) + Y_{rp}. \quad (\text{A1.6})$$

**Etape 4:** Calcul des vecteurs directions pour chaque point de passage

Les vecteurs de directions  $\vec{D}_i$  au point de passage  $P_i$  sont définies par :

$$\vec{D}_i = \begin{bmatrix} Y_{rp} - Y_i \\ -(X_{rp} - X_i) \end{bmatrix} \quad (\text{A1.6})$$

L'étape 4 est illustrée à la figure A1.3 avec l'exemple utilisé à la partie §A1.



**Figure A1.3 :** *Illustration des directions des points de passage issues de l'étape 4 de l'algorithme*