## Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Monastir

### École Nationale d'Ingénieurs de Monastir

\*\_\*\_\*\_\*\_\*

Année Universitaire: 2016/2017





# MEMOIRE DE PROJET DE FIN D'ETUDES

PRESENTE POUR OBTENIR LE
DIPLÔME NATIONAL
D'INGENIEUR

Spécialité : GENIE ELECTRIQUE

Par

**Ghyath BOUZID** 

Né le : 08/08/1993 à Ksar Helal

Contrôle de la navigation des véhicules autonomes dans les intersections

Soutenu le 30/09/2017 ; devant le jury d'examen:

M. Kais BOUZRARA Président
M. Anouar BENAMOR Rapporteur
M. Messaoud HASSANI Encadrant
M. Lounis ADOUANE Encadrant

### Dédicaces

Du profond de mon cœur je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chères; Mes chers parents

Qu'ils trouvent ici l'hommage de ma gratitude, que si grande qu'elle puisse être ne sera à la hauteur de leurs sacrifices consentis, pour mon instruction et mon bien être, et leurs prières pour moi.

A ma sœur

Pour son soutien plus que précieux et à qui je souhaite beaucoup de réussite et de bonheur.

A toute ma famille et mes amis qui me sont chers

Qu'ils trouvent ici l'expression de mes sentiments les plus dévoués et mes vœux les plus sincères.

A toute personne qui m'a aidé à franchir un horizon dans ma vie...

Que dieu le tout puissant vous procure prospérité et réussite.

#### Remerciements

C'est avec un grand plaisir que j'exprime ma gratitude et ma profonde reconnaissance à tous ceux qui m'ont aidé à la réalisation de ce travail.

Je remercie très vivement, **M. Lounis Adouane**, Maître de conférences à l'Institut Pascal et l'École POLYTECH Clermont-Ferrand, et responsable du groupe MACCS dans le laboratoire Institut Pascal, qui m'a offert l'opportunité d'effectuer mon stage de fin d'études au sein de son équipe, qui m'a guidé et qui s'est montré très disponible pour me conseiller et me répondre régulièrement à mes questions tout au long de ce projet. C'était vraiment un honneur de travailler sous son encadrement.

Au même titre, Je tiens à remercier et à exprimer toute ma gratitude à mon superviseur au sein de l'École Nationale d'Ingénieur de Monastir (ENIM), le professeur **M. Messaoud Hassani**, pour sa disponibilité malgré ses charges professionnelles, son aide, ses précieux conseils, sa confiance et son encouragement.

Ma gratitude s'adresse aussi à toute l'équipe MACCS, pour leurs soutiens, leurs aides et leurs conseils judicieux tout au long de la période de ce stage.

Enfin, je tiens à adresser mes très sincères remerciements aux membres du jury pour m'avoir fait l'honneur de participer à l'évaluation de ce travail.

## Table des matières

Introdu	ıction générale	1
Chapit	re 1: État de l'art (Véhicules autonomes & Gestion des intersections)	3
I.	Introduction	4
II.	Présentation de l'institut pascal	4
III.	La navigation des véhicules autonomes	5
IV.	La gestion du trafic d'une intersection	12
1)	Les intersections signalisées	13
2)	Les intersections Non-signalisées	14
8	a) La réservation coopérative des ressources	15
	i. La réservation coopérative centralisée des ressources	16
	ii. Réservation coopérative distribuée des ressources	16
ŀ	o) Planification de la trajectoire	17
	i. Planification des trajectoires en utilisant une séquence de passage sécurisée	17
	ii. Planification de trajectoire basée sur la région de collision	18
3)	Vulnerable Road Users (VRU)	18
V.	Quelques projets réalisés sur le management coopératif des intersections	20
1)	Les projets des États-Unis	20
8	a) Connected Vehicle Safety Pilot Program (2011–2013)	20
ł	o) Connected Vehicle Reference Implementation Architecture (CVRIA) (2011–2014)	20
2)	Les projets européens	21
8	a) Compass4D (2013–2015)	21
ł	b) KO-PER [61] (2009–2013)	21
3)	Les projets du Japon	21
I	Oriving Safety Support System (DSSS) (1999)[62]	21
VI.	Conclusion	22
Chapit	re 2 : Analyse du problème & Solutions Proposées	23
I.	Introduction	24
II.	La stratégie de contrôle, la planification des trajectoires et évitement des collisions	24
III.	La Commande prédictive basée sur modèle : ("Model Predictive Control" (MPC) )	27
1)	Introduction à la commande prédictive	27
2)	Résumé historique de la commande prédictive	

3)	La méthodologie de la MPC	30	
4)	Éléments du MPC	31	
5)	Modèle de prédiction	32	
6)	Fonction objectif et obtention de la loi de commande	33	
7)	La trajectoire de référence	34	
8)	Les contraintes	34	
9)	L'application de MPC dans notre problème	35	
IV.	Conclusion	36	
Chapitı	re 3 : Construction du problème & Algorithme	37	
I.	Introduction	38	
II.	Construction du problème	38	
1)	La zone d'étude	39	
2)	La zone de croisement ou zone de collision	40	
3)	Le véhicule	41	
4)	Zone de sécurité pour véhicule	42	
5)	Trajectoire et points cibles (Targets)	43	
III.	La commande prédictive centralisée et génération des trajectoires	44	
1)	Construction de problème	44	
2)	Simulation & Résultats	49	
IV.	La commande prédictive décentralisée et la suivie des références	57	
	Résultats de la simulation	60	
V.	Conclusion	62	
Conclus	sion générale	63	
Bibliog	Bibliographie		

## Table des figures

Figure 1. Les blocs de navigation d'un véhicule autonome.	6
Figure 2. Méthode des champs de potentiels.	9
Figure 3. Méthode des tentacules	9
Figure 4. La méthode Limit-Cycle	10
Figure 5. La méthode "Smooth switches-based" (SFR-S)	11
Figure 6. La méthode "The inter target distance-based" (SFR-D)	
Figure 7. La méthodologie de la MPC	30
Figure 8. Les éléments de MPC	31
Figure 9. Stratégie de contrôle proposée	36
Figure 10. L'intersection étudiée	38
Figure 11. Les trajectoires possibles d'un véhicule	39
Figure 12. La zone d'étude	40
Figure 13. La zone de croisement.	40
Figure 14. Modèle tricycle de véhicule	41
Figure 15. Cercles de sécurité des véhicules.	42
Figure 16. Les points cibles d'une trajectoire	43
Figure 17. Schéma explicatif de la solution	47
Figure 18. 1 <sup>er</sup> essai : Simulation du franchissement de l'intersection par les véhicules	50
Figure 19. 1 <sup>er</sup> essai : Les courbes des vitesses des véhicules (V1 en rouge V2 en bleu)	51
Figure 20. 2ème essai : Simulation du franchissement de l'intersection par les véhicules	52
Figure 21. 2ème essai : Les courbes des vitesses des véhicules (V1 en rouge V2 en bleu)	52
Figure 22. 3 <sup>ème</sup> essai : Les courbes des vitesses des véhicules (V1 en rouge V2 en bleu)	53
Figure 23. 4ème essai : Les courbes des vitesses des véhicules (V1 en rouge V2 en bleu)	53
Figure 24. 5 <sup>ème</sup> essai : Simulation du franchissement de l'intersection par les véhicules	54
Figure 25. 5 <sup>ème</sup> essai : Les courbes des vitesses des véhicules (V1 en rouge V2 en bleu)	54
Figure 26. 6ème essai : Simulation du franchissement de l'intersection par les véhicules	55
Figure 27. 6ème essai : Les courbes des vitesses des véhicules (V1 en rouge V2 en bleu)	55
Figure 28. 7ème essai : Simulation du franchissement de l'intersection par les véhicules	56
Figure 29. 7 <sup>ème</sup> essai : Les courbes des vitesses des véhicules (V1 en rouge V2 en bleu)	56
Figure 30. Organigramme de la méthode d'optimisation	58
Figure 31. La position actuelle de véhicule.	60
Figure 32. L'erreur de la suivie de référence	61
Figure 33. Les courbes de la vitesse souhaitée (en rouge) et la vitesse actuelle (en bleu)	61

#### Introduction générale

Avec la grande évolution du domaine de transport routier, le nombre des véhicules a augmenté dans ces dernières années. De ce fait, la circulation devient de plus en plus difficile, les embouteillages deviennent plus lourds, et le nombre des accidents et les risques de collisions entre véhicules augmentent surtout dans les croisements des flux de trafic; les intersections et les rondpoints. Ces effets indésirables représentent toujours, même avec l'introduction des feux de circulation et le code de la route, un problème pour le transport routier. En effet, les décès des accidents liés aux intersections représentent plus que 20% des décès liés aux accidents de la route à l'Union Européen au cours de la dernière décennie (2001-2010). Un rapport similaire est indiqué aux États-Unis où 40% des accidents et 21,5% des décès sur la route sont liés aux intersections aussi. Même avec l'apparition des véhicules complètements autonomes qui ont présenté une révolution dans le domaine de la robotique mobile et le transport routier et qui peuvent créer des solutions pour ce genre des problèmes, les intersections représentent toujours des goulots d'étranglement pour les flux de trafic et pour la circulation des véhicules et le peur d'avoir des dégâts plus importants augmente, ce qui empêche les industriels de domaine de se lancer dans des projet réels, même qu'on peut trouver sur le marché des véhicules semi-autonomes.

Et même les solutions classiques proposées, comme les feux de circulation, peuvent devenir un problème pour la circulation, surtout lorsqu'on parle de point de vue temps. Car Ils peuvent rendre vraiment la circulation plus difficile et les trajets peuvent prendre plus de temps que prévu.

En fait, les lumières changent de vert en rouge seulement parce que quelqu'un pourrait venir d'une autre direction, ce qui n'est pas un moyen très efficace de gérer les choses, car vous passez tellement de temps de voyage soit en ralentissant, en accélération, soit en vous arrêtant inutilement.

La seule raison pour laquelle nous devons souffrir par les feux rouges, est que les humains en général ne sont pas suffisamment conscients, assez rapides ou assez tolérants pour se lancer d'une façon sûre et sécurisée à travers les intersections à une grande vitesse. Mais les voitures autonomes, qui sont beaucoup plus mieux à la fois en conduite et en coopération, n'ont pas besoin de ces restrictions. Ainsi, avec un peu de perception, communication et coordination, ils pourront passer à des grandes vitesses même dans les intersections les plus complexes et presque sans ralentir.

C'est ça ce qu'on va essayer de faire dans notre travail où nous avons traité le problème général de la gestion des croisements. Ces problèmes sont traditionnellement étudiés en recherche opérationnelle et en théorie des files d'attente. Des études qui concernent des véhicules contrôlés par des

conducteurs humains. Mais avec l'arrivée des nouvelles technologies, des travaux intégrant plusieurs approches basées généralement sur les communications inter-véhicules, entre véhicules et infrastructure et même avec les piétons, en utilisant des réseaux de communication. Autres moyens de détection et de localisation proposent d'améliorer les solutions existantes telles que les feux de circulation en se basant sur l'étude de comportement de l'environnement.

Cependant, notre travail n'inclue pas la partie perception de l'entourage de l' intersection, même qu'elle représente une partie très importante pour ce genre de problèmes. En fait, on va s'intéresser par la partie contrôle et commande d'un groupe de véhicules autonomes dans les intersections intelligentes, en assurant une navigation sans collisions et dans un minimum de temps et sans temps d'arrêt pour les véhicules, si c'est possible.

Le présent rapport est scindé en trois chapitres décrivant notre problème et les solutions proposées pour le résoudre.

Le premier chapitre contient l'état de l'art et l'étude de l'existant dans le domaine de la navigation des véhicules autonomes et le management coopératif des intersections. Dans ce chapitre on a présenté les différents travaux trouvés dans la littérature qui sont liés à notre problème et dont on est inspiré dans notre solution proposée.

Dans **le deuxième chapitre,** on a présenté d'une façon plus détaillée le problème de la navigation des véhicules autonomes et la méthode "Model Predictive control" (MPC) qu'on va utiliser pour l'optimisation de la génération des trajectoires pour l'ensemble des véhicules et pour atteindre nos objectifs.

Le troisième chapitre contient une autre présentation plus détaillée de notre travail et l'application de la méthode MPC dans notre cas. En effet, dans ce chapitre on a construit le problème algorithmiquement et on a montré les résultats de la simulation.

Finalement, nous avons clôturé par une discussion sur l'efficacité de la solution proposée et quelques perspectives de notre projet.

## Chapitre 1: État de l'art (Véhicules autonomes & Gestion des intersections)

- I. Introduction
- II. Présentation de l'Institut Pascal
- III. La navigation des véhicules autonomes
- IV. La gestion du trafic d'une intersection
- V. les projets réalisés sur le management coopératif des intersections
- VI. conclusion

#### I. Introduction

Dans ce chapitre on va présenter tout d'abord le laboratoire "Institut Pascal" au sein duquel le projet a été réalisé. En suite, on va parler des différentes stratégies pour la navigation des véhicules autonomes et l'évitement des collisions. En plus, on va présenter les différentes études et les travaux faits dans la gestion du trafic des intersections, avec quelques projets réalisés en monde entier dans ce domaine.

#### II. Présentation de l'institut pascal

Ce projet de fin d'études est réalisé dans le cadre des recherches réalisées par le groupe "MACCS" de laboratoire "Institut PASCAL", Clermont-Ferrand, France, dans le domaine de "La robotique mobile & véhicules intelligents".

L'Institut PASCAL est un laboratoire de recherche interdisciplinaire, fondé par la fusion successive (2012, puis 2017) à vocation structurante de six laboratoires, s'inscrivant dans des domaines stratégiques des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes : Génie des Procédés, Mécanique, Robotique, Physique des Sciences de l'Information, Santé.

Avec une équipe qui contient plus que 160 enseignants-chercheurs et 150 doctorants et CDD, qui développent des systèmes innovants et intelligents par une approche systémique et multi-échelle, s'appuyant sur des champs scientifiques identifiés : électromagnétisme, fiabilité, génie des procédés et des bioprocédés, génie civil, imagerie, matériaux, mécanique, microsystèmes, nano physique, perception, photonique, robotique, séparation et fonctionnalisation de biomolécules, technologies interventionnelles et diagnostiques médicales.

Le travail de l'Institut Pascal est composé de 5 Axes de recherche :

- Génie des Procédés, Énergétique et Biosystèmes.
- Image, Systèmes de Perception, Robotique.
- Mécanique, Génie Mécanique, Génie Civil, Génie Industriel.
- Photonique, Ondes, Nanomatériaux.
- Thérapies Guidées par l'Image.

Ce laboratoire a des collaborations avec plus que 50 laboratoires en France, dont on peut mentionner; Limos, Lapsco, Ecole Polytechnique, Institut Néel, C2N, CRHEA, GEPEA, Rapsodee, Instituts Fresnel et Laplace... Aussi avec plus que 50 Universités et organismes de recherche internationaux dont; University of London King's College, Oxford, Cambridge, Singapour, ESA

Agence Spatiale Européenne, UAS Université Autonome de Barcelone, Bri Corée (Université de Sungkyunkwan/Corée du Sud), Oklahoma University, University of Canberra, Institut IOFFE...

L'institut Pascal n'est pas seulement un partenaire de médecine régional: CHU de Clermont-Ferrand, mais il possède aussi plusieurs partenaires industriels. En effet, il est membre de FACTOLAB et il a un laboratoire commun avec la manufacture MICHELIN.

Il est membre aussi des pôles de compétitivité Céréales Vallée et ViaMéca.

Parmi les partenaires de ce Laboratoire on a: MICHELIN, RENAULT, SUPERSONIC IMAGINE,
THALES, SNCF, EDF, TERUMO EUROPE PSA, AUBERT & DUVAL, LIGIER, CONSTELIUM,
LIMAGRAIN, SAFRAN, BABYMOOV, ANSALDO, ALEDIA, QUANTEL MEDICAL, ...



#### III. La navigation des véhicules autonomes

Une grande partie de notre travail consiste à contrôler la navigation des véhicules autonomes. Il faut savoir donc les différentes stratégies et méthodes utilisées dans la navigation de ce genre des véhicules. Beaucoup de travaux et de recherches ont pris comme sujet la navigation des robots mobiles et spécialement la navigation des véhicules autonomes.

En fait, avoir une navigation complètement autonome présentait toujours un défi dans le domaine d'automobile et de la robotique mobile, si on prend en considération toutes les contraintes et les difficultés qu'un tel véhicule peut rencontrer.

Les chercheurs essaient toujours d'améliorer les blocs qui définissent la navigation d'un véhicule autonome pour garantir les meilleures conditions; le bloc de perception, de localisation, de décision et d'action.

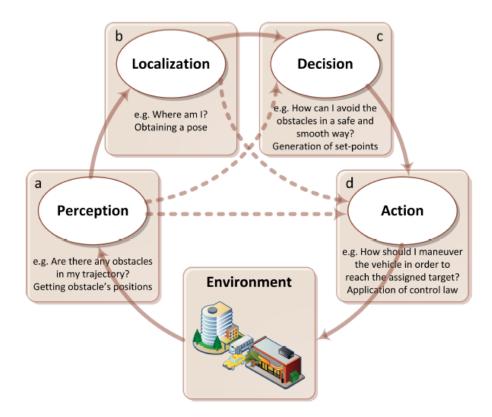


Figure 1. Les blocs de navigation d'un véhicule autonome.

Plusieurs solutions sont proposées dans des travaux comme [1], [2], pour la perception, qui proposent généralement des solutions pour les capteurs extéroceptifs et proprioceptifs des véhicules pour une meilleure perception et connaissance de l'environnement. [3] et [4], ont essayé généralement de jouer sur les capteurs aussi pour une meilleure localisation, et sur les filtres utilisés pour le traitement des informations venant de ces capteurs avec des incertitudes sur les données comme en [5], prenant l'exemple de Localisation de Markov [6], filtre à particules [7], ou le filtrage robuste.

Des architectures, aussi, ont été proposées dans des travaux pour l'aide à la prise de décision prenant l'exemple de "LAAS architecture" (Architecture for Autonomous Systems) [8], aussi CLARAty architecture (Coupled Layer Architecture for Robotic Autonomy),

On peut aussi mentionner les travaux [8] et [9], pour la prise de décision de véhicule.

Alors que des études comme [10], [11] ont montré comment fonctionne le bloque d'action en appliquant les commandes générées par le processus de décision.

Pour parler de la navigation d'un véhicule autonome, on doit commencer par les différentes architectures de navigation présentées dans la littérature. Par exemple les architectures les plus connues comme: l' "architectures délibératives" appelé aussi (SMPA), pour dire SENSE-MODEL-PLAN-ACT, qui consiste à passer par tous ces étapes en faisant la navigation. C'est une stratégie qui se base surtout sur la modélisation de l'environnement comme en [12] et [13]. Une deuxième architecture l' "Architecture réactive", qui est une architecture temps réel qui ne compte plus sur la connaissance en avance de l'environnement, en fait, le véhicule se comporte selon ses capteurs proprioceptifs évoqués dans les travaux [14] et [15].

La difficulté augmente même lorsqu'on parle d'une navigation en formation d'un groupe de véhicules complètement autonomes. On doit s'intéresser à un tel problème surtout que notre travail consiste à contrôler un tel groupe dans les intersections des flux de circulation.

Plusieurs sont les travaux qui ont étudié aussi ce sujet et qui ont proposé des divers stratégies de contrôle pour une navigation en formation.

On peut mentionner l' "Architecture centralisée", qui est basée sur une entité centrale ou bien un "maître" qui réalise la perception, la localisation des véhicules de groupe et la planification et le calcul nécessaire des données de commande pour envoyer chaque véhicule à sa position cible [16].

Une "Architecture décentralisée" ou "distribuée" a été aussi étudiée, où chaque véhicule doit utiliser ses propres capteurs pour la localisation et pour prendre lui-même la décision en passant par tous les bloques qu'on a mentionné avant pour une navigation complètement autonome, par exemple l'architecture ACTRESS (ACtor-based Robots and Equipments Synthetic System) dans [17], et l'architecture SWARM systems dans [18].

D'autres travaux proposent des architectures hybrides qui combinent les deux architectures. En prenant l'exemple celle la plus connue "DIRA" (DIstributed Robot Architecture) développée dans [19], et "Syndicate architecture" dans [20]. La combinaison entre ces architectures va nous permettre d'avoir un niveau de contrôle très élevé avec une robustesse aux erreurs, une possibilité de reconfiguration et reprogrammation pour garantir toujours l'arrivée à l'objectif.

Les stratégies de contrôle d'un groupe des véhicules autonomes se divisent en des grandes approches sont étudiées dans plusieurs travaux comme par exemple l'approche "leader/follower" de

[21] et [22], où La formation est définie par le robot "leader", maître du groupe qui fixe les positions cibles de tous les autres véhicules de formation et donc fixe leurs trajectoires. Les esclaves doivent suivre les données de contrôle de leader en utilisant les informations locales de leurs capteurs.

Une approche appelée navigation à structure virtuelle connue par son nom en Anglais "virtual structure" et présentée par exemple dans [23], où le groupe des véhicules est considéré comme un corps rigide avec des propriétés dynamique qui dépend toujours de nombre et des propriétés des robots dont leurs mouvement et leurs positions dans le temps dépendent des caractéristiques de ce corps.

Mais on ne peut pas parler d'une navigation d'un véhicule complètement autonome sans parler de l'un des plus grands problèmes qui peuvent menacer ce genre de conduite qui est le problème des collisions. En effet, pour la navigation des véhicules autonomes l'évitement des obstacles est un sujet inévitable, Surtout lorsqu'on parle des obstacles dynamiques en mouvement et non plus statiques ou dans des milieux non-structurels où on peut avoir des changements dans le comportement soit du milieu, soit des éléments de l'environnement.

Pour assurer une navigation en toute sécurité pour un véhicule autonome plusieurs stratégies et solutions réactives sont proposées dans plusieurs travaux, dont on peut mentionner:

La Méthode des champs de potentiels présentée en [24]; Cette méthode consiste à définir une fonction qui donne un grand potentiel ou bien champs répulsifs aux obstacles et un faible potentiel ou bien champs attractifs aux points à suivre de la trajectoire .donc pour arriver au point objectif il suffit de trouver une fonction qui amène le véhicule à un minimum global de la fonction objective. C'est une méthode qui ne nécessite pas une connaissance précise des contours des obstacles mais elle se base sur la probabilité de l'existence d'un obstacle.

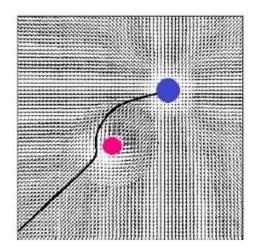


Figure 2. Méthode des champs de potentiels.

La méthode des tentacules ; [25] Le principe de cette méthode consiste à utiliser un ensemble d'antennes virtuelles appelées «tentacules» dans une grille d'occupation égo-centrée liée au véhicule, et qui représente l'environnement proche du véhicule avec la position des obstacles,

Une fois les trajectoires virtuelles créées, une évaluation de ces dernières est effectuée afin de choisir la meilleure selon un critère défini. Le meilleur tentacule ou trajectoire de référence, sera exécuté par le véhicule à chaque pas de calcul. Cette méthode présente l'avantage d'être très réactive, permettant d'éviter des collisions et de circuler dans un environnement incertain sans besoin d'une grande quantité d'informations à priori.

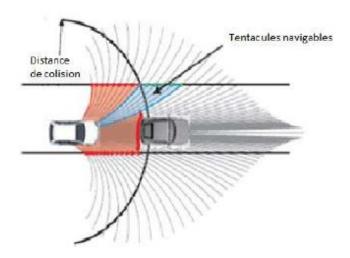


Figure 3. Méthode des tentacules.

Une autre méthode présentée qui est la méthode "Limit-cycle"; c'une méthode présenté dans [26], [27] qui va garantir que les véhicules évitent les obstacles modélisés sous forme des ellipses (une méthode qui a montré une efficacité plus que celle qui modélise les obstacle sous forme des cercles), en suivant les trajectoires plus lisses de "limit-cycle", sous forme des équations différentielles bien précises.

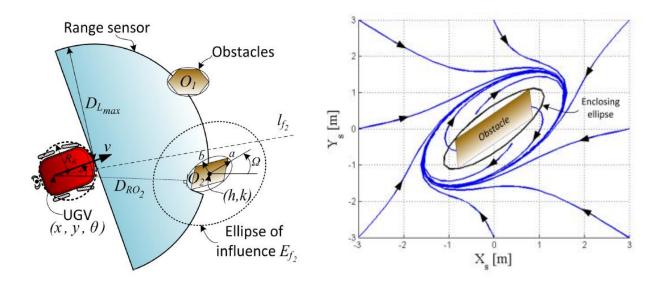


Figure 4. La méthode Limit-Cycle.

Des autres travaux ont proposé des autres solutions basées sur la génération des trajectoires des véhicules. Ceux sont des solutions très efficaces où on génère des points cibles qui forment la trajectoire d'un véhicule en prenant en compte les obstacles qui existent dans l'environnement dès le début.

Même pour la navigation en groupe ou en formation des véhicules autonomes il y a des solutions proposées pour l'évitement des collisions. Des méthodes centralisées où le maître du groupe doit programmer une reconfiguration de la formation actuelle pour construire une nouvelle formation qui permet un passage sans collision. Deux grandes stratégies sont proposées; la première s'appelle "Smooth switches-based" (SFR-S) présentée dans [28] et qui se base sur des changements qui doivent être toujours prédéfinis pour les véhicules qui ne doivent pas retourner en arrière dans la trajectoire pour qu'ils arrivent à la nouvelle position et pour garantir la stabilité pour tout le système. Si on n'a pas cette condition les véhicules doivent garder l'ancienne formation tout en augmentant d'une façon continue les coordonnées longitudinales.

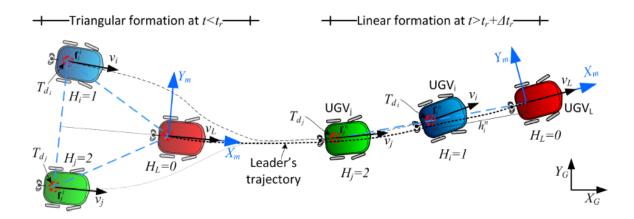
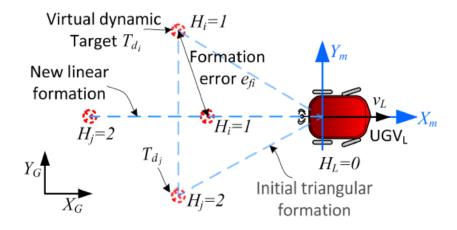


Figure 5. La méthode "Smooth switches-based" (SFR-S).

Une deuxième qui est la reconfiguration de la formation basée sur la distance entre les intercibles "The inter target distance-based" SFR-D qui est une extension de la stratégie (SRF-S) qui utilise des fonction continues au lieu des changements lisses .Elle est basée sur l'analyse procustéenne ou en Anglais "Procrustes Analysis" et qui utilise l'erreur de la distance entre les sommets de la formation initiale et finale.

Cette stratégie analyse la dérivative de l'erreur  $e_{fi}$  comme on peut le voir sur la "figure 6" pour garantir la dérivation vers la nouvelle formation



**Figure 6.** La méthode "The inter target distance-based" (SFR-D).

#### IV. La gestion du trafic d'une intersection

Dans cette partie on va parler d'un sujet qui a toujours présenté un problème pour le transport routier en général et la navigation des véhicules autonomes précisément, qui est le problème des "intersections".

L'introduction des feux de signalisation dans les intersections a permis d'améliorer l'état de la circulation, et des systèmes tels que le système de circulation adaptative de Sydney ou en Anglais "Sydney Coordinated Adaptive Traffic " (SCAT) [29], ainsi que RHODES [30] ont d'amélioré l'efficacité de management de circulation en adaptant les signaux de circulation à l'estimation du trafic. Mais malheureusement, la majorité des feux de circulation ne sont pas adaptés à la notion temps réel, ce qui rend leurs effets loin d'être explorés, et avec un réglage incorrect du signal, peuvent même devenir des causes de congestion. En plus, pour les intersections à faible niveau de congestion, la possibilité des collisions augmente et les dégâts des accidents deviennent très importants, en raison des collisions frontales et de la participation des autres usagers de la route comme les piétons, les cyclistes... qui sont connues par les "usagers vulnérables de la route" ou en Anglais "vulnerable road users " (VRU). C'est pour cette raison, la sécurité routière et l'efficacité restent loin d'être corrélées. Et donc on a dû chercher d'autres solutions pour l'organisation de la circulation dans les intersections, et donc un grand domaine de la recherche apparaît s'intéressant par les intersections, connue sous le nom "management coopératif des intersections" ou en Anglais "cooperative intersection management" (CIM).

Les progrès récents des technologies de l'information et de la communication (TIC) ont permis de nouvelles méthodes, telles que la prévalence des systèmes de transport intelligents (STI) pour la gestion des intersections. Les véhicules sont aujourd'hui équipés des capteurs avancés qui fournissent des informations environnementales beaucoup plus détaillées, permettant une perception plus riche, et connaissance des environnements locaux. Ces information sont partagées entre véhicules par le réseau de communication inter-véhicules "ad hoc" connu par le nom "vehicular ad hoc networks" et qui est appelé aussi (VANET), qui est très utilisé pour la gestion des intersections.

Les véhicules communiquent donc entre eux par une communication véhicule-véhicule (vehicle-to-vehicle (V2V)), et avec l'infrastructure ou dans notre cas l'intersection via une communication véhicule-infrastructure (vehicle to infrastracture (V2I)) (V2V et V2I sont appelés ensemble V2X).

Les usagers de la route vulnérables (Vulnerable road users (VRU)) peuvent également communiquer avec les véhicules par le réseau véhicule-à-piétons (vehicle to pedestriant V2P). Cela permet une perception globale de l'environnement pour les véhicules et une grande connaissance de tous les

participants dans l'environnement et même qui sont en dehors du champ de vision. En outre, l'échange d'informations en temps réel permet une coopération entre les usagers de la route, les infrastructures et les centres de contrôle, formant alors des systèmes coopératifs de transports intelligents (ITS) (cooperative intelligent transport system : C-ITS). Des systèmes qui sont devenu tendance dans ce domaine connu pat l'abréviation (C-ITS). En fait, beaucoup des projets ont commencé à standardiser la station (ITS) ou ce qu'on appelle l' "ITS station", prenant les exemples de "Ann Arbor connected vehicle test environment" aux états unis et "cross-border C-ITS" et "corridor connecting" à Rotterdam, Frankfurt et Vénice à l'union européenne UE.

Lorsqu'on parle des intersections on peut dire qu'ils sont de sont de deux catégories principales; signalisée et non signalisée. Les intersections signalisées sont celle où la décision de passer ou pas est prise selon les signaux lumineux des feux de signalisation. Alors que les intersections non signalisée ont généralement des panneaux de signalisation ou de STOP. Dans certains cas on ne trouve aucun signe ou panneau du tout dans l'intersection ce qui pause certainement des problèmes pour tous les usagers. Dans le cas de l'intersection signalée, le (CIM) permet aux véhicules de communiquer avec l'infrastructure pour la perception des informations sur le du trafic, la négociation de la priorité de passage dans l'intersection... etc. La perception précise du trafic de l'infrastructure permet une circulation bien organisée, alors que la négociation permet aux véhicules de prendre un rôle active dans la gestion des intersections et donc un contrôle de l'intersection flexible et coopératif.

La nécessité d'avoir un système de management coopératif (CIM) dans une intersection non signalisée est clair. Un tel système peut aider les conducteurs à avoir une vue détaillée et globale de l'environnement pour la prise de décision. Dans le cas des véhicules autonomes, le (CIM) permet aux véhicules de communiquer entre eux et de négocier la priorité de passage dans l'intersection et de naviguer sans aucune intervention humaine, et en toute sécurité.

#### 1) Les intersections signalisées

L'introduction du feu de circulation a montré une amélioration dans la gestion du trafic et la sécurité dans les intersections. Des travaux significatifs ont été réalisés pour améliorer les algorithmes de contrôle du feu de circulation.

Les principaux domaines de recherche, utilisent des modèles mathématiques [31], la logique floue [32], [33], l'approche de l'horizon roulant [34], le contrôle basé sur le Markovian [35] Le contrôle basé sur le réseau de neurone [36], le contrôle basé sur le réseau de Petri Net [37], la théorie des files d'attente [38], ainsi que les méthodes d'apprentissage fondées sur les agents [39].

Plus récemment, des études sur un réseau d'intersections signalisées basé sur la "pression maximale" et la "contre-pression" ont été présentées par exemple dans [40] pour éliminer les embouteillages. Ces méthodes mettent l'accent sur des algorithmes qui contrôlent les feux de circulation intelligents.

Dans [41], des algorithmes d'optimisation ont été développés pour minimiser la longueur moyenne de queue d'attente de trafic en donnant du feu vert aux voies avec la plus grande file d'attente. Dans ce travail, les informations routières ont été collectées par la communication entre les véhicules et l'infrastructure. Ce type des travaux a montré que la communication sans fil présente plus d'avantages que les détecteurs traditionnels, car la zone de détection est significativement plus grande, et les informations transmises sont plus détaillées. En effet, une communication V2X efficace permet aux véhicules de prendre un rôle plus actif dans les étapes de passage par l'intersection, telles que la négociation avec l'infrastructure sur le feu vert et la priorité de passage.

La gestion de l'intersection signalisée comprend également les VRUs, à condition que les piétons suivent les feux de signalisation aussi, le problème peut être considéré comme un problème d'optimisation de la phase de signal lumineux, incluant le trafic VRU tel que [42], [43]. Les objectifs de ces travaux sont d'intégrer le trafic piéton dans l'optimisation de la phase de signalisation pour des feux de signalisation plus intelligents, afin d'améliorer la sécurité des piétons et d'équilibrer le trafic entre les véhicules et les VRU... etc.

L'observation des flux des VRUs peut être basée sur les boutons de demande de passage des piétons, les caméras de surveillance et les capteurs de détection [44].

Avec une bonne communication, les VRU aussi peuvent jouer un rôle actif pour le management de l'intersection. Dans [45], par exemple une unité piétonnière de communication bidirectionnelle a été développée. Elle a été utilisée à la fois pour demander un feu vert et pour fournir des commentaires aux piétons. Gérer une intersection signalisée reste beaucoup plus simple qu'une intersection qui ne contient aucune signalisation.

#### 2) Les intersections Non-signalisées

Les intersections non signalisées, sont celles qui ne contiennent aucuns feux de signalisation ou d'autres stratégies de contrôle qui permet la gestion des flux de trafic ou de piétons. Normalement, dans ce genre des cas les conducteurs doivent interagir les uns avec les autres grâce au contact visuel, pour un passage sécurisé.

Avec les communications inter-véhicules, les interactions des conducteurs deviennent de plus en plus faciles et plus précises. Les informations détaillées des véhicules et les intentions de conduite, en particulier de ceux qui ne sont pas dans le champ de vision des conducteurs, par exemple, bloqués

par des bâtiments ou des arbres, peuvent être partagés entre les conducteurs pour une meilleure décision. Des facteurs critiques tels que la portée de la communication, la latence, la vitesse du véhicule, le temps de réponse du conducteur et la précision de localisation doivent être pris en considération.

Une méthode similaire a été utilisée dans [46], où les auteurs ont étudié les scénarios de communication V2V uniquement et V2X. Le concept qui s'appelle le concept de "platoon", où les véhicules vont être conduits très proche les uns aux autres en formant des petits trains de véhicules, a été utilisé dans [47] pour le CIM. Les véhicules s'approchant de l'intersection vont d'abord communiquer les uns avec les autres et formuler un groupe de véhicule qui a un maître ou "Leader" qui va organiser le passage par l'intersection.

L'harmonisation coopérative des vitesses entre les véhicules pour une meilleure harmonisation de trafic, a été présentée dans [48], où les communications V2I ont été utilisées pour fixer la vitesse de chaque véhicule d'avance, et donc le choix de vitesse de chaque véhicule dépend des autres véhicules et les résultats de la négociation. La méthode utilisée dans ce travail a introduit ce qu'ils ont appelé "speed waves" les ondes des vitesses, où les véhicules sur la même route ont d'abord été organisés en groupes avec la meilleure vitesse calculée, puis les groupes des autres routes ont pris leurs tours en arrivant à l'intersection, en évitant ainsi la congestion et améliorant la circulation.

#### a) La réservation coopérative des ressources

En regardant les différentes études sur de gestion de l'intersection nous allons surement tomber sur les méthodes de gestion d'espace qui consistent à diviser l'espace total de la zone d'étude sous forme des carreaux d'espace.

Dans la phase de la réservation des ressources coopératives, les véhicules doivent réserver les carreaux sur leurs trajectoires prévus pour certains créneaux horaires.

Une fois que les carreaux et les créneaux horaires sont accordés, les véhicules peuvent passer dans l'intersection selon la réservation. Et on peut donc garantir que les carreaux d'espace dans la zone de collision seront attribués d'une manière non conflictuelle, c'est-à-dire qu'un carreau d'espace ne sera jamais attribué au plus qu'un véhicule dans l'intervalle de temps correspondant.

L'allocation peut également tenir compte de la situation du trafic et utiliser d'autres objectifs d'optimisation pour améliorer la performance de l'intersection, de manière à maximiser le flux du trafic par exemple, ou à minimiser la consommation d'énergie.

Selon l'implication de l'infrastructure, la réservation coopérative des ressources peut être classée comme une "stratégie de contrôle centralisée", où l'infrastructure de l'intersection est responsable de l'attribution des créneaux horaires et des spatiaux. Et on peut la considérer aussi comme stratégie

distribué, où les véhicules eux-mêmes négocient la réservation des ressources. Les méthodes utilisées pour la réservation de ressources coopératives sont basées généralement sur des agents; de véhicules et de l'infrastructure qui effectuent des réservations et des subventions.

#### i. La réservation coopérative centralisée des ressources

Pour la réservation coopérative centralisée des ressources, il y a deux types d'agents, c'est-àdire un agent de véhicule (VA) représenté par un véhicule, et un autre agent de réservation d'intersection (RA) qui représente l'infrastructure.

Un véhicule demande une réservation d'un carreau d'espace dans l'intersection à travers son agent (VA) lorsqu'il s'approche d'une intersection en envoyant les informations nécessaires, qui contiennent par exemple le temps d'arrivée, la vitesse, les intentions de conduite ou bien la direction... etc. L'agent (RA) calcule les créneaux horaires de dépassement, les carreaux qui corresponds au trajectoire et les intervalles de temps de passage de véhicule dans ces carreaux.

Pendant la Simulation, le (RA) vérifie si les carreaux demandés sont déjà réservés par un autre véhicule aux intervalles de temps correspondants, pour la détection des conflits. Si aucun conflit n'est trouvé, la réservation sera accordée. Sinon, la demande de réservation sera rejetée et le véhicule doit renvoyer de nouveau une autre demande.

Une fois qu'un carreau d'espace est accordé, le véhicule doit être en mesure de déterminer s'il peut suivre la réservation. Sinon, le véhicule doit annuler la réservation et demander une nouvelle.

Dans [49], la réserve coopérative des ressources a été étudiée avec une simple intersection. Outre les hypothèses communes, on a supposé qu'une fois la réservation accordée, le véhicule maintient la même vitesse jusqu'à qu'il dépasse l'intersection.

La simulation a été effectuée par comparaison avec deux autres méthodes de gestion de l'intersection, le pont autoroutier et le feu de signalisation. Il a démontré que la réserve coopérative des ressources va donner des résultats de deux à trois fois meilleures que les deux autres méthodes de gestion d'intersections.

#### ii. Réservation coopérative distribuée des ressources

La réserve coopérative des ressources peut être également sous forme de (CIM) distribuée, où aucun support d'infrastructure n'est nécessaire.

En effet, dans [50], un schéma de réservation distribuée a été proposé en fonction des régions de collision. Ils ont introduit le concept de jeton pour la réservation et l'occupation des ressources. Chacune des régions de la zone de collision était associée à un jeton et à chaque fois un seul véhicule pouvait posséder le jeton et occuper ainsi la région. Le véhicule qui a le jeton diffusait constamment l'information d'occupation jusqu'à ce qu'il quitte la région et relâche le jeton. Pendant ce temps, les

autres véhicules écoutent continuellement et détectent la disponibilité des jetons pour éviter les conflits. La méthode s'est révélée sans arrêt des véhicules et sans collisions grâce aux modèles de "Petri".

Pour être plus flexible et adapté aux différentes conditions particulières de la circulation, les auteurs ont également proposé un mécanisme de réservation basé sur les priorités, où les véhicules sur des routes très encombrées ou des véhicules de types particuliers tels que les véhicules d'urgence, les véhicules de police, peuvent demander une priorité plus élevée pour le passage dans l'intersection. Une méthode qui a montré à la simulation une grande efficacité.

#### b) Planification de la trajectoire

Les méthodes de réservation coopérative des ressources ne traitent que la planification des ressources d'une intersection; les créneaux horaires et les carreaux d'espace. Alors qu'un trajet d'un véhicule qui contient une intersection se décompose lui-même à un certain nombre de points cibles. C'est pour cette raison une autre méthode majeure est introduite pour la gestion de l'intersection basée sur la planification des trajectoires.

#### i. Planification des trajectoires en utilisant une séquence de passage sécurisée

Les véhicules ayant leurs trajectoires de passage dans l'intersection dans des régions libres de l'intersection où on n'a aucun risque de collision avec les autres véhicules, on peut programmer leurs passages simultanément sans aucun problème.

Le problème sur le quel se concentre de ce type de (CIM) consiste alors à planifier les trajectoires des véhicules qui passent par les régions des conflits, où on peut croiser le trajectoire d'autres véhicules au temps de passage, et donc essayer de programmer les flux de circulation d'une manière efficace qui assure la sécurité de tous les véhicules.

Dans [51], un algorithme de planification coopérative a été présenté, où les véhicules qui ne présentent aucun croisement des trajectoires dans le moment de passage, et donc il n'y a pas un risque de collision, devaient passer simultanément.

Une zone a été définie juste avant l'intersection où la planification de la trajectoire doit être effectuée par la négociation avec les autres véhicules via la communication inter véhicules (V2V). Les véhicules vont partage leurs trajectoires prévues entre eux et ils vont être étiquetés selon le moment pendant le quel ils vont entrer dans la zone.

L'un des véhicules est choisi comme le maître du groupe. Il est responsable de la planification des trajectoires. Le travail a décrit le problème comme un problème d'ordonnancement.

Il a proposé des algorithmes pour minimiser le temps de libération de l'intersection ou le temps que va prendre tous les véhicules pour passer dans l'intersection.

L'échange d'informations s'est déroulé en temps réel en supposant l'absence des erreurs.

On peut caractériser cette stratégie de planification comme hybride; la négociation est distribuée, tandis que la planification est effectuée par le maître des véhicules.

Les auteurs ont utilisé une méthode assez simple pour la sélection des "leaders", qui consiste que le véhicule qui va le premier recevoir toutes les informations disponibles va être choisi comme le "leader" ou maître de groupe.

Mais le problème pour cette étude reste pour une intersection complètement autonome où il n' y a aucun contrôleur centralisé. Les conducteurs des véhicules vont se comporter dans ce cas comme les contrôleurs temporaires pour tous les véhicules concernés, de sorte que la sélection du "leader" des véhicules devient un des problèmes qui peut gêner.

#### ii. Planification de trajectoire basée sur la région de collision

La modélisation de l'intersection basée sur la région de collision a été également utilisée pour la planification de la trajectoire.

En effet, dans [52], les auteurs ont présenté une formulation de programmation linéaire pour le contrôle des intersections autonomes " linear programming formulation for autonomous intersection control " (LPAIC) qui a pu obtenir des solutions optimales pour la planification des trajectoires des véhicules et le passage dans les intersections.

Tout d'abord, une stratégie basée sur la planification de la circulation pour les voies qui construisent l'intersection, afin de minimiser le temps de déplacement total. Pour éviter les conflits, un certain nombre de contraintes non linéaires ont été proposées pour garantir l'occupation unique des régions de collision. Les contraintes sont écrites par la suite sous forme d'un ensemble d'équations linéaires, et l'optimisation non linéaire a été transférée à une optimisation linéaire.

Également aux autres études qui proposent la même idée, le changement de voie n'était pas autorisé. (LPAIC) qui donne la priorité à la voie qui possède la file d'attente la plus longue a démontré des meilleurs résultats que le feu de circulation,

#### 3) Vulnerable Road Users (VRU)

Les méthodes (CIM) se sont concentrées généralement sur le trafic des véhicules, alors que les (VRU) causent aussi des grands problèmes pour la navigation des véhicules autonomes, causés généralement par une mauvaise détection et ou avertissement.

Ces problèmes ont commencé à prendre une grande importance dans les études et les recherches dans le domaine de la gestion des intersections.

En général, la vision par ordinateur, le traitement d'images et les capteurs de l'infrastructure sont les outils utilisés pour la détection des piétons, prenant l'exemple de [53].

Ces méthodes d'acquisition et d'analyse ont été largement utilisées par des industries telles que Volvo, BMW, Toyota, Ford et Nissan dans ce genre d'applications.

L'une des inconvénients de ces méthodes est qu'elles reposent sur une détection sur un champ de vison précis (ligne of sight LOS). Pour impliquer tout l'environnement de l'intersection et même les zones hors champ (NLOS), des méthodes basées sur une communication V2X en utilisant des réseaux comme par exemple, *Dedicated Short Range Communications* (DSRC), 3G, Long Term Evolution (LTE) networks, sont étudiées.

Dans [54], les auteurs ont étudié des méthodes de sécurité pour les piétons basées sur les communications cellulaires et les réseaux intervéhicules à base de Wi-Fi, et ils ont comparé leurs performances. Les deux méthodes se sont révélées applicables pour l'évitement des accidents.

Dans [55], un système de communication V2P a été proposé en fonction de 3G et un réseau local sans fil (WLAN).

Le système comprenait des téléphones cellulaires, un système de navigation automobile et un serveur. En s'approchant d'une intersection, les piétons et les véhicules vont signaler leurs statuts sur le serveur via les téléphones mobiles et le réseau WLAN. Le serveur peut donc estimer les risques et envoyer des commentaires aux téléphones portables des piétons.

Si des risques élevés ont été identifiés, des communications directes pourraient être établies entre les piétons et les véhicules.

Dans [56], les dispositifs de communication basés sur "ZigBee" qui est un protocole de haut niveau permettant la communication radio pour les WPAN " Wireless Personal Area Networks : WPAN", ont été développés pour la détection des piétons. On a supposé que les piétons avaient un émetteur envoyant régulièrement ses informations. Quatre boîtes de communication ont été installées aux quatre coins d'un véhicule utilisées pour localiser le piéton en comparant la puissance du signal reçu.

Le système a été capable de détecter les états relatifs des piétons au véhicule, c'est-à-dire à proximité, loin, s'approchant ou s'éloignant.

Dans [57], les auteurs ont formulé les exigences de la distance minimale d'échange d'informations pour les communications (V2P) et ont étudié une base de communication Wifi pour la protection des (VRU)s. En plus, les piétons et les cyclistes sont également considérés.

Les entreprises; Volvo, POC et Ericsson développent un système d'alerte cycliste. Une communication bidirectionnelle est établie entre les casques des cyclistes et les véhicules connectés. En cas de risque, les véhicules sont alertés par l'affichage dans le véhicule tandis que les cyclistes sont prévenus par la lumière de leurs casques. Les applications de sécurité V2P basées sur *Dedicated Short Range Communications* DSRC sont présentées. Dans [58], basé des normes WAVE

et SAE J2735, les auteurs ont proposé un système d'évitement des collisions des piétons d'intersection, ainsi que des messages pour cibler les piétons.

Dans [59], l'auteur a présenté un système de sécurité (V2P) qui a été développé en collaboration entre Honda et Qualcomm. L'auteur a intégrer le "Dedicated Short Range Communications" (DSRC) avec le chipset WiFi sur un smartphone. Les véhicules étaient équipés de communications (V2V) personnalisées pour les communications (V2P).

Le système a été testé aux intersections dans les zones résidentielles. De même, dans [60], l'auteur a proposé une architecture (V2P) pour l'évitement des collisions avec les piétons, consistant en des applications (DSRC) pour les piétons et les véhicules.

D'autres exemple des équipements (V2P) basés sur (DSRC) comme par exemple; Arada Systems3 et Oki Electronic.

#### V. Quelques projets réalisés sur le management coopératif des intersections

#### 1) Les projets des États-Unis

#### a) Connected Vehicle Safety Pilot Program (2011–2013)

Était une initiative de recherche qui impliquait l'USDOT (United States Department of Transportation), des industriels dans le domaine de transport, des organismes publics et des universitaires. L'objectif était de tester les applications de sécurité des véhicules connectées par des démonstrations réalistes. Le programme a été mené par l'Institut de recherche sur le transport de l'Université du Michigan (UMTRI). Il y avait 21 intersections signalisées équipées de dispositifs V2I qui ont envoyé des informations sur les phases de signalisation lumineuses et de synchronisation de passage aux véhicules. Dans le cas où le passage dans les intersections n'est pas complètement sécurisé et il y a des risques de collision, l'application a averti le conducteur pour éviter les situations dangereuses.

#### b) Connected Vehicle Reference Implementation Architecture (CVRIA) (2011–2014)

Le projet a été dirigé par le ministère de Transport des États-Unis USDOT. Deux approches ont été utilisé: une à approche écologique sous le nom "Eco-Approach and Departure at Signalized Intersections", et l'aide au mouvement dans les intersection "IntersectionMovement Assist" (IMA).

La première était une application environnementale qui visait à conseiller le conducteur de passer par les feux de circulation d'une façon écologique, par exemple, adapter la vitesse pour passer les feux de signalisation de la manière la plus respectueuse à l'environnement. Et le dernier était une application liée à la sécurité qui visait à réduire la probabilité de collision aux intersections en fournissant des informations d'avertissement de collision.

#### 2) Les projets européens

#### a) Compass4D (2013–2015)

Se concentre sur l'application de C-ITS (Cooperative intelligent traffic systems) pour améliorer la sécurité routière et l'efficacité énergétique. En effet, ce projet est une combinaison de deux applications, l'avertissement sur violation de la lumière rouge (RLVW) et Intersection à efficacité énergétique (EEI), qui sont considérés comme amélioration de la sécurité dans les intersections et réduction de la consommation d'énergie, en augmentant la vigilance des conducteurs par des messages d'avertissement via les communications V2X. ce projet est appliqué dans nombreuses villes dans des pays de l'UE, comme le Denmark, Allemagne, Pays-Bas, France, Espagne, Italie et Grèce.

#### b) KO-PER [61] (2009–2013)

Ce projet a été financé par "le département fédéral du commerce et de la technologie de l'Allemagne". Ko-PER a développé un système de perception pour les intersections, basées sur un réseau multi-capteurs et des communications sans fil. Le système a mis l'accent sur une vision améliorée pour l'intersection grâce à la perception coopérative des véhicules pour une meilleure prise de décision. Le système a déployé des capteurs et des caméras aux intersections pour surveiller l'environnement. Aussi, des scanners laser ont été utilisés pour déterminer et suivre les objets en mouvement.

Le système a été dans deux intersections une intersection non publique et une autre publique à "Aschaffenburg", en Allemagne.

#### 3) Les projets du Japon

#### Driving Safety Support System (DSSS) (1999)[62]

C'est un système d'alerte de danger qui était déployé sous le système "Universal Traffic Management Systems (UTMS)" déjà utilisé, au Japon pour améliorer la sécurité des intersections.

Le DSSS diffuse des données à la fois par infrarouge et par le DSRC du côté de l'infrastructure et avant l'intersection. Les données diffusées contiennent des informations géographiques, y compris l'alignement des routes, la distance à l'intersection, la réglementation de la circulation...etc. Et des informations sur les véhicules, y compris l'emplacement et le numéro de voie.

Les informations partagées sur le réseau DSRC contient des informations dynamiques détectées par des capteurs routiers tels que la position et la vitesse des piétons, des informations sur les autres véhicules et l'intersection.

Le DSSS détecte les scénarios de violation des panneaux d'arrêt, la violation de la lumière rouge, les accidents de virage, les accidents du chemin de passage, les collisions des véhicules et les accidents. Sa principale fonction est de prévenir les accidents, en alertant les conducteurs sur les dangers potentiels. Les données reçus sont traitées par les CPU des véhicules pour l'analyse des risques de collision. Les avertissements sont émis via des HMI si des risques de collision sont détectés.

#### VI. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté presque toutes les stratégies déployées et les travaux réalisés dans le sujet de la navigation des véhicules autonomes, et surtout la gestion des flux de trafic dans les intersections pour assurer une meilleure navigation en toute sécurité pour les véhicules autonomes dans un tel environnement.

Malgré la grande variété des solutions proposées dans la littérature, on a choisi d'appliquer la méthode d'optimisation de la génération des trajectoires des véhicules pour arriver à nos objectifs; de réaliser une navigation en minimum du temps et sans collision dans une intersection pour un groupe des véhicules autonomes. Une solution proposée qu'on va la présenter dans les prochains chapitres.

## Chapitre 2 : Analyse du problème & Solutions Proposées

- I. Introduction
- II. La stratégie de contrôle, la planification et évitement des collisions
- III. La commande prédictive basée sur modèle (MPC)
- IV. Conclusion

#### I. Introduction

Dans Ce, on va présenter d'une façon plus détaillée le problème de la navigation des véhicules autonomes dans les intersections, la stratégie de contrôle qu'on a proposé, et la méthode "Model Predictive control" (MPC) qu'on a utilisé pour l'optimisation de la génération des trajectoires pour l'ensemble des véhicules dans la zone d'étude et pour gérer les flux de trafic dans une intersection intelligente.

#### II. La stratégie de contrôle, la planification des trajectoires et évitement des collisions

Notre travail consiste à contrôler la navigation d'un groupe de véhicules autonomes dans les intersections et les ronds points. Notre objectif était de trouver une solution pour une meilleure navigation en toute sécurité pour tout les éléments de la zone d'étude (l'intersection); les piétons, les cyclistes, et surtout les autres véhicules autonomes, et en plus un passage dans l'intersection dans un minimum de temps pour résoudre surtout le problème des embouteillages, les queues d'attente à l'entrée de l'intersection et éviter les temps d'arrêt inutiles pour les véhicules.

Pour ce problème on a proposé une solution qui consiste à construire une architecture de contrôle hybride. Une architecture en même temps centralisée et décentralisée; où on va avoir un agent d'infrastructure et des agents des véhicules.

La notion de centralisation est inspirée du principe des intersections intelligentes, qui consiste à avoir un agent extérieur qui permet d'organiser la circulation des véhicules dans l'intersection. Cet agent ou bien le maître va contrôler la navigation de tous les véhicules en générant la trajectoire optimale pour chacun d'eux. Ces trajectoires générées doivent optimiser le plus possible le critère du temps pour la navigation des véhicules dans un tel environnement, c'est à dire garantir que chaque véhicule franchisse l'intersection dans un minimum de temps tout en respectant les contraintes; par exemple les contraintes de distances de sécurité entre les véhicules pour garantir un passage sans collision, et les contraintes de confort qui limite les variations de la commande des véhicules (des contraintes sur la vitesse, la vitesse angulaire, sur l'accélération...etc.).

La deuxième partie de travail est basée sur une architecture de commande décentralisée, où chaque véhicule représente lui-même un agent responsable de la suivie de la trajectoire générée par le maître de l'intersection avec une grande précision, et en assurant aussi un respect pour des contraintes généralement de sécurité et de précision.

Puisque le critère de sécurité des véhicules contre les collisions a une grande importance dans un problème de management coopératif des intersections on doit donc parler des priorités de passage

des véhicules, surtout qu'on va considérer notre travail dans une intersection non signalisée où on ne trouve pas des feux de circulation ou panneaux de la route. On a eu donc le choix entre l'application directe de principe de code de la route pour fixer la priorité de chaque véhicule dans l'intersection, ou bien fixer cette priorité par l'agent de l'intersection, soit par un choix aléatoire par le maître, soit par un calcul qui prend en compte des facteurs comme la vitesse de véhicule et la distance par rapport au centre de l'intersection.

Mais ce que nous intéresse le plus dans ce cas, c'est même qu'on fixe la priorité aucun véhicule ne doit s'arrêter avant d'entrer dans la zone de collision pour laisser passer les autres qui ont les plus grandes priorités. Des arrêts qui peuvent être inutiles et représentent une grande perte du temps et une mauvaise gestion de l'intersection, même qu'ils peuvent garantir la sécurité des véhicules.

Dans le cas simple de deux véhicules dans la zone d'étude, l'un qui a une priorité par rapport à l'autre, en respectant le code de la route 3 cas sont possible ;

Le véhicule qui a la priorité arrive en premier à l'intersection ; Dans ce cas, on n'a pas de problème. Ce véhicule a la priorité et peut donc passer directement par l'intersection sans arrêt. La même chose pour le deuxième véhicule, qui peut passer aussi directement s'il trouve l'intersection libre.

Le deuxième cas si on a les deux véhicules arrivant en même temps à l'intersection, c'est à dire que ces deux véhicules vont arriver aux positions d'entrées dans la zone de collision de l'intersection dans un temps précis de l'horizon d'étude. Dans ce cas le véhicule qui a la priorité doit passer et l'autre doit s'arrêter pour garantir le respect de code de la route.

Le troisième cas, c'est lorsque le véhicule qui a la priorité arrive en retard. Ce cas peut introduire une ambigüité, et une hésitation si le deuxième véhicule doit passer ou pas, ce qui est l'une des grandes causes des accidents dans les intersections. En fait, beaucoup des travaux on étudier ce problème connue par le problème de calcul de GAP, la durée minimale qui assure un passage en sécurité pour le véhicule.

La notion de retard dépend toujours de l'intervalle de temps qui représente la différence de temps entre les deux instants d'arrivée de deux véhicules à leurs points d'entrées dans la zone de collision (la zone partagée par tous les véhicules qui cherchent à franchir l'intersection).

Cet intervalle de temps est nul, tant que la vitesse est constante et les deux véhicules on été détectés à la même distance par rapport au centre, à la même instant de l'horizon d'étude. Il faut voir si cet intervalle de temps permet le passage de ces deux véhicule sans risque en calculant le temps que va

prendre chaque véhicule pour passer. C'est à dire que cet intervalle doit être supérieur à la durée qui va prendre le véhicule en premier pour sortir de la zone de collision.

On peut donc remarquer qu'une telle méthode traditionnelle de management des flux de circulation dans les intersections ne convient pas à notre problème et la notion du temps va nous obliger de ne pas respecter le code de la route.

Comme on a vue dans le premier chapitre, plusieurs sont les travaux qui ont étudier la "partage coopérative de ressources d'une intersection" et qui ont essayé de trouver des solutions pour tels problèmes en attribuant à chaque véhicule un intervalle de temps bien précis pour les carreaux d'espace de l'intersection qui se trouvent sur le trajectoire de véhicule, et d'autres utilisant le principe des jetons, inspiré des protocoles de communication des réseaux informatique, pour la distribution de ces intervalles de temps. Des solutions qui peuvent causer des problèmes si on veut gagner du temps.

C'est pour cette raison qu'on a choisi l'autre raisonnement utilisé dans les problèmes de gestion des intersections, la génération des trajectoires, qui considère le problème comme un problème d'optimisation où on vise à optimiser le plus possible la navigation des véhicules autonomes dans les intersections et les rond points.

On a choisi pour cela, la fameuse méthode d'optimisation, la plus utilisée dans ce genre des problèmes, et surtout dans le domaine de la navigation des robots mobiles, qui est la commande prédictive à modèle ou son nom le plus connu en Anglais "Model Predictive control" (MPC).

C'est une méthode de calcul très développée qui va permettre de résoudre elle-même le problème de priorité, et la fixer pour chaque véhicule en générant une trajectoire optimale et en calculant l'entrée de commande optimale sous forme de vitesse et vitesse angulaire pour chaque véhicule dans l'intersection.

Donc c'est quoi la commande prédictive basée sur modèle et comment peut-elle nous aider à la résolution de notre problème ?

#### III. La Commande prédictive basée sur modèle : ("Model Predictive Control" (MPC) )

#### 1) Introduction à la commande prédictive

La commande prédictive basée sur modèle ou la notation la plus connue en Anglais Model prédictive control "MPC", est une technique de commande avancée de l'automatique, inventée par le Français, J. Richalet, en 1978 [63], et généralisée par D.W. Clarke en 1987 [64], en accord avec des grands groupes industriels aux États-Unis et en Europe (Shell et Adersa). Son objectif de base est de commander des systèmes industriels complexes.

Cette technique qui fait partie des techniques de contrôle à modèle interne (*IMC: Internal Model Controler*), s'appuie sur un modèle mathématique du processus à contrôler qui est le plus souvent représenté sous forme de fonction de transfert discrète, un modèle d'état ou des équations différentielles. Elle utilise un modèle dynamique du processus à l'intérieur du contrôleur en temps réel pour anticiper le futur comportement du procédé.

Elle peut être utilisée pour commander des systèmes complexes comportant plusieurs entrées et sorties MIMO, où le simple régulateur PID est insuffisant, et elle est particulièrement intéressante lorsque les systèmes possèdent des retards importants, des réponses inverses et de nombreuses perturbations. Les principaux utilisateurs de la commande prédictive sont les raffineries de pétroles, l'industrie chimique et agro-alimentaire, l'aérospatiale...

Cette technique possède plusieurs avantages dont on peut mentionner tout d'abord la simplicité de l'idée générale qui est intuitive et facile à comprendre. Elle empêche les violations des contraintes sur les variables contrôlées et manipulées. Permet de prévenir le mouvement excessif des variables d'entrée et donc une commande plus douce, éviter des variations excessives sur les variables manipulées. Cela permet une meilleure utilisation des actionneurs (vérins, vannes, moteurs) et leur temps de vie est ainsi augmenté. Conduit certaines variables de sortie à leur ensemble optimal Points, tout en maintenant d'autres sorties dans leurs plages spécifiées. En plus, en cas de perturbations, le système s'adapte automatiquement.

#### 2) Résumé historique de la commande prédictive

La fin de la décennie 70 été marquée par un intérêt pour le MPC et surtout dans ses développements industriels. En Europe, on peut citer les travaux de Richalet et al. (1976), (1978), où est formulé le problème de la commande heuristique prédictive basée modèle [MPHC "Model Prédictive Heuristic Control" appelé plus tard MAC "Model Algorithmic Control"]. Aux Etats-Unis, Cutler et Ramaker (1980), ont développé ce qui sera connu, plus tard, comme DMC "Dynamic Matrix Control". Un modèle dynamique du processus est utilisé dans les deux contributions (la réponse impulsionnelle dans la première et la réponse indicielle dans la seconde) en vue de quantifier l'effet des actions de commande sur la sortie, les commandes sont calculées pour minimiser l'erreur prédite sous restrictions d'exécution (fonction objectif). L'optimisation est répétée à chaque période d'échantillonnage, s'appuyant aussi sur les données mesurées sur le processus. Rapidement ces techniques sont devenues populaires en particulier dans les processus industriels chimiques grâce à la simplicité de l'algorithme et au fait qu'est utilisé un modèle dérivé de la réponse impulsionnelle ou indicielle, ce qui nécessite moins de paramètres que la formulation dans l'espace d'état ou la formulation entrée-sortie (fonction transfert). Il s'agit d'approches plus intuitives qui exigent une information moindre pour l'identification. Un état complet de ces applications dans le secteur pétrochimique pendant les années quatre-vingt peut être trouvé dans García, Prett et Morari (1989); la plupart des applications se centrent dans le domaine des systèmes multivariables avec restrictions.

En même temps et indépendamment, certains groupes européens de recherche académique, avec une histoire forte dans la commande adaptative, ont commencé à développer des travaux basés sur les idées du prédictif pour des modèles formulés à partir d'une représentation entrée-sortie du système (fonction transfert). La commande autoadaptative prédictive étendue développée par de De Keyser et Van Cauwenberghe (1979) [le EPSAC "Extended Prediction Self Adaptive Control"] propose un signal de commande constant pour tout l'horizon de prédiction, et qui est appliqué dès le début du calcul de la commande qui optimise le critère de coût choisi. Dans la commande adaptative à horizon étendu de Ydstie (1984), [le EHAC "Extended Horizon Adaptive Control"], l'idée fondamentale consiste à calculer à chaque instant la séquence des signaux de commande pour essayer de maintenir la sortie future la plus proche possible de la consigne pour un horizon de temps plus grand que le retard présent sur le processus. La commande prédictive généralisée par Clarke, Mohtadi y Tuffs (1987), le GPC "Generalized Predictive Control", est en, ce moment, la méthode la plus populaire. On peut trouver une résumé de ces méthodes et de leurs caractéristiques les plus importantes dans Clarke et Mohtadi (1989) et dans De Keyser, Van de Velde et Dumortier (1988). Après ces travaux pilotes, l'intérêt pour le MPC a augmenté graduellement depuis les années 80, et d'autres

méthodologies -partageant les même idées- sont apparues dans la littérature spécialisée de la commande. Entre autres, peuvent être mentionnées: MUSMAR "MUlti Step Multivariable Adaptive Control" -Greco et al. (1984)-, MURHAC "MUltipredictor Receding Horizon Adaptive Control" -Lemos et Mosca (1985)-, PFC "Predictive Functional Control" [RAA87], UPC "Unified Predictive Control" -Söeterboek (1992)-, SMC de Setpoint et PCT de Honeywell. Les années 90, ont marqué une vraie explosion dans le nombre des applications du MPC (d'abord aux Etats-Unis, plus tard au Japon et maintenant aussi en Europe). Il existe plusieurs applications réelles qui fonctionnent avec succès (voir De Keyser (1988) par exemple), dans l'industrie des processus chimiques ainsi que dans le domaine de la robotique. Cela s'est toujours accompagné d'une une forte activité de recherche, voir Camacho et Bordons (1998) et la liste des références. Malgré le développement étendu qu'a connu le MPC pendant la fin de la décennie 70 et celle de 80, ce n'est qu'au début des années 90 qu'on commence à se préoccuper de l'étude de la stabilité et de la robustesse en MPC. Dans le chapitre suivant est faite une description de ces travaux. Le MPC peut aussi être formulé dans le contexte de la représentation en variables d'état -Morari (1994)-. Ceci permet non seulement de faire usage de théorèmes et résultats existant dans la théorie d'espace d'état, mais aussi facilite l'extension de la théorie MPC à des cas plus complexes comme ceux des systèmes avec perturbations stochastiques, bruits sur les variables de mesure ou commande multivariable.

Étant donné la charge élevée de calcul qu'exigent les algorithmes de programmation quadratique dans la stratégie MPC, beaucoup d'auteurs commencent à étudier la possibilité d'obtenir une solution rapide fournissant un résultat le plus souvent sous-optimal dans le problème d'optimisation. Dans cette catégorie on peut mentionner les travaux de Bemporad et al. (2002), Ramirez et Camacho (2001). On y présente une solution explicite pour le cas de retour d'états pour systèmes nominaux. On démontre que la loi de commande obtenue, peut être considérée linéaire à morceaux ("piecewise"). Cette approche présente l'inconvénient lié au nombre de régions dans lequel doit être divisé l'espace d'état, ce qui croît de manière combinatoire dans la mesure où augmente l'horizon de prévision. Ceci exige un temps de recherche important pour déterminer la région de travail appropriée, ce qui n'est pas convenable pour beaucoup de cas d'application pratique.

#### 3) La méthodologie du MPC

Dans sa formulation la plus générale, la méthodologie concernant l'approche du MPC peut s'illustrer sur le schéma suivant;

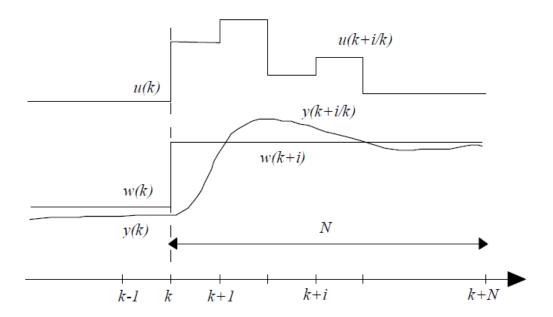


Figure 7. La méthodologie de MPC.

Où

k dénote le temps discret.

- u(k) dénote l'entrée du système au temps k.
- w(k) dénote la référence du système au temps k.
- y(k) dénote la sortie du système au temps k.

Le principe du fonctionnement de MPC peut être caractérisé ainsi:

- a) À chaque instant k, en disposant d'un modèle et de connaissance de la sortie en k du système, on fait la prédiction de la sortie pour un certain horizon N, (dénommé horizon de prédiction), les sorties prédites sont dénotées y(k+i/k) où k=1,2...,N.
- b) La prédiction de la sortie, est faite en calculant le vecteur des futurs signaux de commande  $\{u(k+i/k), i=0,1,...,N-1\}$  à travers l'optimisation d'une fonction objectif.

Cette fonction (en général, convexe) force à rendre la sortie future la plus proche possible de la trajectoire de référence {consigne connue w(k+i)}, tout en réduisant les efforts de la commande. Des contraintes sur la sortie ou sur la commande peuvent être également imposées.

c) Le premier élément {u(k)} du vecteur du signal de commande optimale {u(k+i/k), i=0,1,...,N-1} issu du problème précédent est appliqué au système et le reste est rejeté car à l'instant suivant la nouvelle sortie {y(k+1)} est disponible et en conséquence l'étape 1 est répétée. Ceci est connu comme le concept de l'horizon fuyant (ou mobile).

# 4) Éléments du MPC

Dans cette figure on montre la structure basique, commune à toutes les stratégies de commande prédictive.

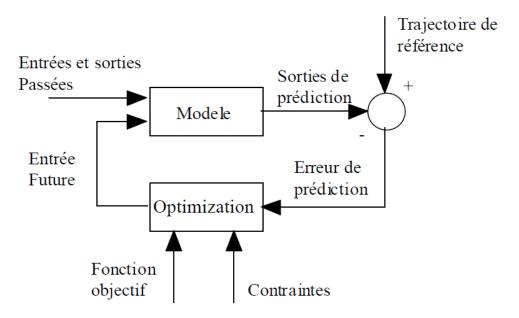


Figure 8. Les éléments du MPC.

Tous les algorithmes du MPC ont:

- Un modèle de prédiction.
- Une fonction objective pour calculer la stratégie optimale de commande.

Les différences portent sur le type de la fonction objectif, le traitement de l'erreur de prédiction et sur le modèle de prédiction.

# 5) Modèle de prédiction

Le modèle joue un rôle décisif dans le calcul de la commande. Il doit reproduire avec une exactitude suffisante les caractéristiques dynamiques du processus aux futurs moments du temps  $\{y(k+i/k)\}$  en se servant à des valeur passées de la commande, de la sortie et des valeurs optimales de la commande future  $\{u(k+i/k)\}$ . Les différentes stratégies du MPC emploient différents modèles pour représenter la relation entre la sortie et l'entrée du système. Parmi les signaux d'entrée sont les variables manipulées (ou commande) et les perturbations mesurables qui peuvent être "traitées" par compensation par "avance" ("feedforward"). De plus, doivent être pris en considération les composantes non considérées par le modèle du système, ce qui inclut l'effet des entrées non mesurables, des bruits et des erreurs de modélisation. Ainsi, le modèle peut être divisé en deux parties: le modèle de processus et le modèle des perturbations (exogènes ou endogènes). Les prédictions de la sortie seront en fonction des deux.

#### **❖** Modèle du processus

Dans l'approche classique de la commande prédictive toute forme de modélisation est utilisée, mais le plus souvent linéaire. La réponse impulsionnelle ou celle à un échelon, sont les plus utilisées, mais existent aussi les représentations par fonction de transfert et par modèle d'état. Donnons une vision rapide de ces types de modélisation.

- Réponse impulsionnelle: elle apparaît dans l'algorithme des problèmes de "la commande heuristique prédictive" appelée "Model Algorithmic Control" (MAC) et dans les cas spéciaux de "Generalized Predictive Control" GPC et de "Extended Prediction Self Adaptive Control" EPSAC, notamment pour les systèmes stables. Le modèle (tronqué) à utiliser pour la prédiction, est celui obtenu de la réponse impulsionnelle du système. Un inconvénient de ce type de modélisation est le nombre élevé des paramètres nécessaires pour une précision appropriée. Néanmoins c'est le modèle le plus appliqué dans l'industrie, peut être parce qu'il est tout à fait intuitif et compréhensible. Un grand avantage pour utiliser ce modèle est qu'il n'a pas besoin d'information à priori et que l'identification est simple. De plus des dynamiques complexes telles que celles à phase non minimale ou en présence de retards considérables, sont facilement pris en compte.
- **Réponse indicielle:** elle est utilisée dans l'algorithme "Dynamic Matrix Control" (DMC), et ce cas est assez semblable au précédent à la différence près que le signal d'entrée est un échelon. A nouveau, le modèle tronqué, pour les systèmes stables, est utilisé pour la prédiction de la sortie. Le modèle a les mêmes avantages et inconvénients que ceux expliqués précédemment.

Fonction de transfert: utilisée par exemple dans "Generalized Predictive Control" (GPC),
 "Unified Predictive Control" (UPC), "Extended Prediction Self Adaptive Control" (EPSAC)...etc. Le modèle de prédiction est le suivant:

$$y(k+i/k) = \frac{B(Z^{-1})}{A(Z^{-1})}u(k+i/k)$$

$$A(Z^{-1}) = 1 + a_1 Z^{-1} + a_2 Z^{-2} + \dots + a_{na} Z^{-na}$$

$$B(Z^{-1}) = 1 + b_1 Z^{-1} + b_2 Z^{-2} + \dots + b_{nb} Z^{-nb}$$

Cette représentation est valide également pour des processus instables et elle a l'avantage d'avoir besoin de peu de paramètres, néanmoins il est nécessaire une connaissance a priori du processus, particulièrement pour déterminer l'ordre des polynômes  $A(Z^{-1})$  et  $B(Z^{-1})$ .

• L'espace des états: utilisé dans "Predictive Functional Control" (PFC), elle a la représentation suivante:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k)$$
$$y(k) = cx(k)$$

Où x(k) est le vecteur d'état, u(k) le vecteur des entrées et y(k) des sorties, A, B, et C sont les matrices du système, de l'entrée et de la sortie respectivement. Alors la prédiction de la sortie s'écrit sous cette forme:

$$y(k+i/k) = C[A^{i}x(k) + \sum_{i=1}^{i} A^{j-1}Bu(k+i-j/k)]$$

Ce modèle a l'avantage de pouvoir être utilisé pour les systèmes multi variables. Son utilisation présuppose la mesure de l'état global ce qui n'est pas toujours possible, dans ce cas un observateur des états doit être envisagé.

➤ Remarque: Des modèles non linéaires peuvent être employés pour représenter le processus, ce qui est déjà le cas de notre travail, où on va utiliser un modèle cinématique non linéaire pour modéliser le véhicule, néanmoins, le problème d'optimisation peut alors devenir très compliqué. Les réseaux neuromimétiques peuvent également être utilisés où la modélisation floue pour tenter d'atténuer la difficulté imposée par la non linéarité.

## 6) Fonction objectif et obtention de la loi de commande

Les divers algorithmes MPC proposent différentes fonctions de coût pour obtenir la loi de commande. L'objectif principal consiste à faire en sorte que la sortie future pour l'horizon de prédiction considéré s'approche de la meilleure façon possible de la trajectoire de référence {w(k)}

tout, en même temps, pénalisant l'effort de commande  $\{\Delta u(k)\}$  nécessaire. Une expression générale de fonction objectif adaptée à cette tâche est donnée par:

$$J(N_1, N_2, N_u) = E\{\sum_{i=N_1}^{N_2} \sigma(i) [y(k+i/k) - w(k+i/k)]^2 + \sum_{i=1}^{N_u} \lambda(i) [\Delta u(k+i-1/k)]^2]\}$$

N<sub>1</sub> et N<sub>2</sub> définissent l'intervalle de temps où l'on désire que la sortie se rapproche de la référence.

 $N_U$  est l'horizon de commande. Les coefficients  $\sigma$  et  $\lambda$  sont des valeurs qui pénalisent le comportement futur, habituellement sont utilisées comme des valeurs constantes ou des valeurs exponentielles.

Dans quelques méthodes le deuxième terme, relatif à l'effort de commande, n'est pas pris en compte.

La fonction objective ou la fonction de coût peut être aussi représentée sous sa forme quadratique, qui est la présentation la plus connue, définie à chaque instant de l'horizon d'étude "k" par ;

$$J = \sum_{i=K}^{K+Np-1} e_i^T * Q * e_i + \sum_{i=K}^{K+Np-1} u_i^T * R * u_i$$

Avec; Q et R les matrices de pondération, "e" l'erreur de suivi de la référence et  $N_p$  la longueur de l'horizon de prédiction.

#### 7) La trajectoire de référence

L'un des grands avantages des commandes prédictives est que, si l'on connaît l'évolution future de la trajectoire de référence, le système peut commencer à répondre avant que le changement ne soit détecté.

L'évolution future de la référence est bien connue dans beaucoup d'applications, comme en robotique, ou les processus batch. La plupart des méthodes habituelles, ont utilisé une trajectoire de référence qui n'est pas nécessairement égale à la vraie référence.

#### 8) Les contraintes

Dans la pratique, les processus sont sujets à des contraintes qui doivent, bien sûr, être prises en compte dans le problème d'optimisation afin d'obtenir des commandes admissibles.

Les techniques de la commande MPC intègrent les contraintes pendant la phase de synthèse et d'implantation du contrôleur, permettant à l'ingénieur de présenter les contraintes d'une façon directe de sorte que l'algorithme trouve automatiquement la meilleure solution admissible.

Le système de commande, particulièrement dans le cas de la commande prédictive avec de grands horizons de prédiction, doit prévoir la violation des restrictions et corriger d'une forme appropriée.

Bien que les restrictions à l'entrée et à la sortie du processus se traitent de la même manière, les implications de chaque type de contraintes sont différentes.

Les restrictions en sortie sont fondamentalement dues à des raisons de sécurité opérationnelles, et doivent être contrôlées à l'avance puisqu'elles peuvent endommager les équipements physiques et causer des pertes dans la production. Dans le cas des variables d'entrée, elles peuvent toujours être bornées dans leurs limites permises en fonction des mécanismes de saturation.

En pratique il est habituel d'employer le "Generalized Predictive Control" (GPC) standard pour calculer le signal u(k), sans contraintes, puis, de le saturer à ses limites permises. Cette façon de procéder ne garantit pas que soit obtenue l'optimalité quand les restrictions sont violées par la solution sans contraintes. La proposition principale du GPC, qui est d'appliquer la meilleure action de commande possible en vue de minimiser la fonction objective, ne sera pas atteinte de cette façon. Le fait de ne pas considérer les restrictions dans les variables manipulables peut causer une détérioration de la fonction objective et conduire à un comportement peu désirable du système commandé.

## 9) L'application du MPC dans notre problème

En utilisant le MPC d'une façon centralisée, on peut optimiser la commande de l'agent de l'intersection, qui va être sous la forme des trajectoires optimales pour tous les véhicules dans l'environnement. Des trajectoires sous la forme des points cibles dynamiques qui fixent les positions, les vitesses et les vitesses angulaires souhaitées à chaque instant de la navigation pour tous les véhicules. En jouant sur les contraintes et la fonction de coût on peut introduire les critères temps et confort, ainsi que la sécurité contre les collisions. On va en plus utiliser le MPC d'une façon décentralisée pour optimiser la commande des agents de véhicules pour assurer un suivi avec précision de la commande du maître de l'intersection.

Cette solution va être plus détaillée dans le prochain chapitre.

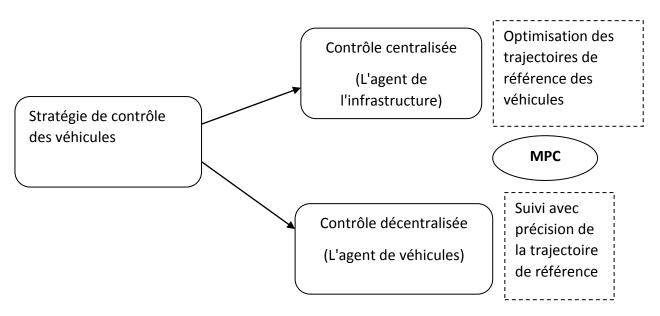


Figure 9. Stratégie de contrôle proposée

#### IV. Conclusion

Dans ce chapitre on a mis l'accent sur les grands problèmes que posent les intersections des flux de trafic pour la circulation routière et surtout pour la navigation des véhicules autonomes, qui correspondent aux causes des embouteillages, les files d'attentes et les accidents avec les plus grands dégâts. On va essayé donc de proposer une solution pour assurer une meilleure navigation pour les véhicules autonomes dans un tel environnement, en se basant sur la méthode de génération des trajectoires, et en essayant surtout de garantir un franchissement en minimum de temps et en toute sécurité pour tous les véhicules. Une solution basée sur la méthode d'optimisation, très connue et utilisée dans le domaine de la robotique mobile, "la commande prédictive basée sur modèle", qu'on a aussi introduit dans ce chapitre.

Mais le défie reste toujours l'application complexe d'une telle méthode et comment la rendre compatible avec notre travail, surtout coté optimisation du temps de navigation et comment introduire un tel critère dans la fonction de coût de la MPC.

# Chapitre 3 : Construction du problème & Algorithme

- I. Introduction
- II. Construction du problème
- III. Commande prédictive centralisée et génération des trajectoires
- IV. commande prédictive décentralisée et la suivie des références

#### I. Introduction

Dans ce chapitre on va développer la solution proposée pour la résolution de problème des véhicules autonomes dans les intersections. Comme on a dit dans le deuxième chapitre notre problème est un problème d'optimisation et notre travail se base sur la commande prédictive qui va nous permettre de trouver la meilleure méthode pour gérer un groupe des véhicules autonomes dans une intersection, et d'optimiser la commande de ces véhicules pour un passage en minimum de temps et en toute sécurité. Dans ce chapitre on va alors essayer d'appliquer la méthode MPC sur notre problème, ce qui nécessite une définition détaillée du problème; la construction de la zone de travail (l'intersection), la modélisation des véhicules...etc. On va essayer, en plus d'évaluer l'utilisation d'une telle méthode et son efficacité pour la résolution d'un tel problème, par les résultats de la simulation.

# II. Construction du problème

On va considérer qu'on a une intersection d'un angle de 90° formée par 4 routes de même largeur, chacune d'elle se divise en deux voies de sens inverses et de même largeur.

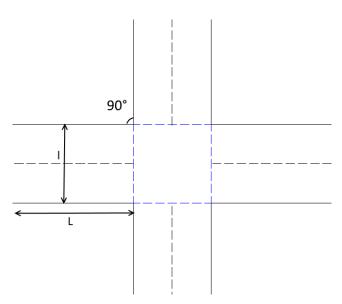


Figure 10. L'intersection étudiée.

On considère que tous les véhicules ont la même forme rectangulaire de même longueurs "L\_v" et de même largeurs " l\_v ".

La trajectoire d'un véhicule dans notre cas ne va prendre que deux formes ; la forme linéaire (un mouvement rectiligne) ou bien la forme d'un arc de cercle (en tournant pour changer la direction; une action n'est possible que dans la zone partagée ou la zone de croisement).

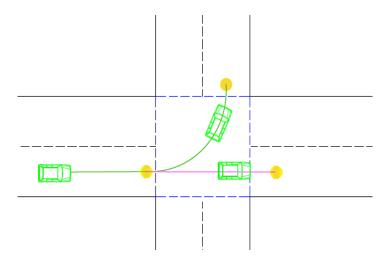


Figure 11. Les trajectoires possibles d'un véhicule.

On va considérer qu'on a seulement deux véhicules autonomes dans la zone d'étude qui vont passer par la zone de collision, mais le travail réalisé peut être adapté pour n'importe quel nombre de véhicules.

#### 1) La zone d'étude

Elle est fixée par la portée de réseau utilisé pour la communication (V2X): qui réfère à la communication inter-véhicules (vehicle to vehicle communication (V2V)) ou communication de véhicule et infrastructure (vehicle to infrastructure communication (V2I)) c'est à dire que tous les véhicules dans cette zone doivent être capables de communiquer entre eux et avec l'agent extérieur qui représente le maître de l'intersection.

Cette zone peut être définie comme étant le cercle de centre le centre de l'intersection et de rayon la distance qui peut garantir une communication de tous les véhicules à l'intérieur de cette zone.

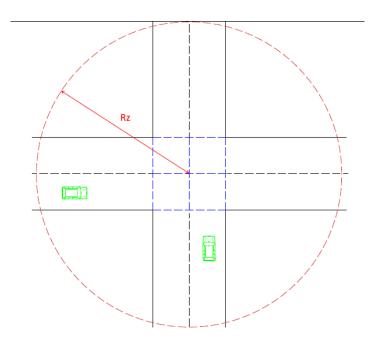


Figure 12. La zone d'étude.

## 2) La zone de croisement ou zone de collision

C'est la zone partagée par tous les véhicules passant par cette intersection ; dans notre cas elle prend la forme d'un carré de côté la largeur des routes. Et donc, la trajectoire de chaque véhicule dans notre zone d'étude se divise en deux parties une trajectoire à l'intérieur de la zone de croisement et une autre en dehors de la zone de croisement.

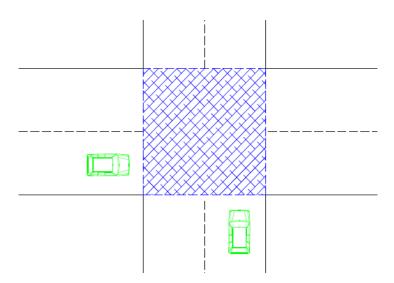


Figure 13. La zone de croisement.

**Remarque**; Les trajectoires des véhicules sont connues par tout le monde dans la zone d'étude. Elles sont parmi les informations échangées entre véhicules comme les vitesses, les directions et même les états prédits des véhicules sur l'horizon d'étude (cela va être expliqué dans le reste de travail)...etc. C'est à dire que chaque véhicule connait exactement les informations nécessaires sur les autres et la

même chose pour le maître de l'intersection, par la communication V2X assurée dans la zone d'étude.

#### 3) Le véhicule

Nous supposons que le véhicule est conduit sur une route d'asphalte et en milieu urbain encombré avec une vitesse relativement faible (de l'ordre de 3 m/s par exemple). Par conséquent, l'utilisation du modèle cinématique (qui repose sur un roulement pur sans glissement) de véhicule est suffisante.

On représente le véhicule par le fameux modèle dans le domaine de la robotique mobile, le modèle de robot à quatre roues, mais un peu simplifié qu'on appelle le modèle tricycle. Un modèle très utilisé pour la détermination du modèle cinématique d'un robot mobile. Dans ce cas les deux roues en avant sont remplacées par une roue virtuelle au milieu qui représente l'orientation du véhicule avec l'angle " $\gamma$ " l'angle d'orientation de cette roue.

La position de véhicule  $(x,y,\theta)$  est détectée par le centre d'essieu de véhicule (le milieu des roues de l'arrière) dans le repère orthonormé global  $X_GY_G$  de l'intersection.

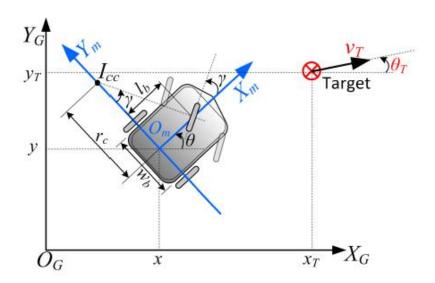


Figure 14. Modèle tricycle de véhicule.

(Om,Xm,Ym); le repère orthonormé local de véhicule

I<sub>cc</sub> ; le centre instantané de courbure de la trajectoire de véhicule

 $r_c$ ; et le rayon de courbure.

**Remarque;** L'état de véhicule est représenté par un vecteur qui contient la position la vitesse angulaire et la vitesse à chaque instant de l'horizon de travail  $[x,y,\theta,\omega,v]$ , avec:  $\omega$  la vitesse angulaire.

## 4) Zone de sécurité pour véhicule

Elle est définie pour chaque véhicule comme étant le cercle de centre le centre d'essieu de véhicule, et de diamètre la longueur de véhicule, avec une petite marge de sécurité pour assurer une zone privée pour véhicule.

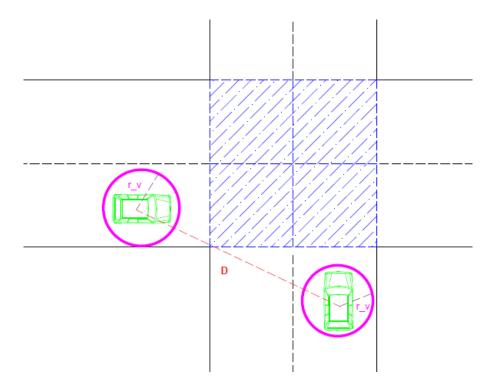


Figure 15. Cercles de sécurité des véhicules.

On définie cette zone pour l'utiliser dans la définition des contraintes de distance inter véhicule; en assurant que cette distance soit toujours supérieure à la somme des rayons des zones de sécurités de deux véhicules, on peut garantir donc une navigation sans collision.

La commande de véhicule est sous la forme d'un vecteur qui contient la vitesse et la vitesse angulaire de véhicule (U\_V).

# 5) Trajectoire et points cibles (Targets)

Pour la planification des trajectoires des véhicules on va utiliser la méthode la plus connue et la plus utilisée dans la navigation des robots mobiles, c'est la méthode des points cibles ou en Anglais "Targets" où les trajectoires sont présentées sous la forme des points cibles à suivre par le véhicule. Ces points peuvent être soit statiques; fixes qui ont des coordonnées bien connues et à atteindre, à chaque instant, par le véhicule ou bien dynamique où les points cibles ont des vitesses et changent leurs positions et les véhicules doivent les suivre.

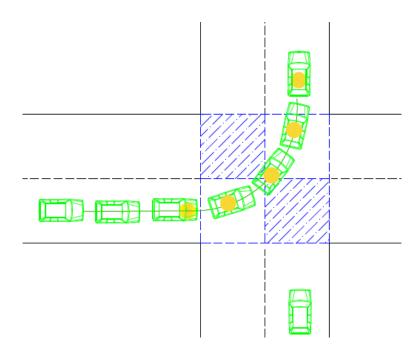


Figure 16. Les points cibles d'une trajectoire.

## III. La commande prédictive centralisée et génération des trajectoires

## 1) Construction de problème

Le but de cette partie, est la génération des trajectoires optimales de référence pour tous les véhicules de l'intersection. Elle représente donc le rôle de l'agent extérieur ou le maître de l'intersection qui va contrôler tous les véhicules autonomes dans la zone d'étude et gérer les flux de la circulation.

Comme on a dit dans les deux premiers chapitres, c'est une stratégie très utilisée dans la navigation en formation des véhicules autonomes et dans les systèmes de transport intelligents. C'est une stratégie de gestion coopérative de l'intersection où le maître du groupe génère les trajectoires de tous les véhicules de groupe, en prenant en compte les états de tous les participants. Des informations qu'il les obtienne par les communications inter-véhicules et entre les véhicules et l'infrastructure assurées par les réseaux de communication.

Les trajectoires sont générées sous forme des points cibles à suivre à chaque instant de l'horizon de contrôle. Des points cibles dynamiques qui décrivent non seulement les positions mais aussi les orientations, les vitesses et les vitesses angulaires souhaitées à chaque instant de la navigation.

Notre problème d'optimisation centralisé est basé sur la commande prédictive (MPC), qu'on a trouvé comme meilleure solution pour optimiser la génération de la trajectoire de référence pour un véhicule. Comme tout problème d'optimisation de ce genre le MPC consiste à minimiser une fonction de coût "*J*" pour générer la commande optimale (Trouver la commande U qui minimise le plus la fonction de coût).

$$Uopt = \underset{U}{\operatorname{argmin}}(J)$$

La première étape est l'étape la plus importante dans un tel problème d'optimisation qui consiste à construire une fonction de coût qui répond à nos besoins. Notre objectif principal dans cette partie de travail, est l'optimisation du temps de la navigation, c'est à dire diminuer le plus possible le temps de franchissement de l'intersection pour tous les véhicules, et donc la durée totale de la navigation dès l'entrée dans la zone d'étude jusqu'à la sortie de l'intersection. Le défi était, en fait, d'introduire la notion du temps dans le fonctionnement du MPC. D'autres méthodes sont proposées dans la littérature comme la méthode d'optimisation, très connue par son nom en Anglais "Bang-Bang", qui permet d'optimiser le temps de fonctionnement d'un système, mais cette méthode ne convient pas à notre problème surtout qu'elle consiste à converger l'entrée de commande à 0 à la fin de l'horizon d'optimisation qui va introduire dans notre cas le freinage de véhicule. Un résultat non souhaité pour

une telle application. Des autres critères de même importance dans notre problème sont ajoutés à la fonction de coût de la méthode MPC, comme par exemple l'optimisation de la variation de l'entrée de commande entre deux instants consécutifs de l'horizon de contrôle. Il s'agit de l'optimisation de facteur de confort qui assure une navigation plus lisse des véhicules. C'est à dire qu'on ne doit pas avoir des changements remarquables de l'entrée de commande, entre deux instants successifs de l'horizon de l'optimisation. Un autre critère, d'une grande importance aussi, est ajouté, qui est l'inverse de la distance inter-véhicules; un critère qui va assurer la sécurité des véhicule contre les collisions. En effet, il va garantir que les trajectoire générées ne se croisent jamais et gardent une distance suffisante entre les véhicules.

Alors on a eu comme résultat la fonction de coût suivante :

$$J = \sum_{i=1}^{Nv} \{ w(1) \times Temps \ de \ sortie(i) + w(2)$$

$$\times \sum_{k=1}^{Nopt} \frac{1}{\min(\left| \left( X_{i,k} - X_{j \neq i,k} \right)^{2} + \left( Y_{i,k} - Y_{j \neq i,k} \right)^{2} \right|)} + w(3)$$

$$\times \sum_{j=1}^{Nopt-1} |U(j) - U(j+1)|^{2} \}$$

Avec:

W(i) les poids des critères de la fonction de coût,  $N_v$  le nombre des véhicules,  $N_{opt}$  la longueur de l'horizon d'optimisation.

Temps de sortie(i) = (indice de sortie – 1) 
$$\times$$
 Ts +  $\varepsilon$   $\times$  Ts

Où:

L'indice de sortie  $\in [1..N_{opt}]$ , il correspond à l'instant de l'horizon d'optimisation au quel le véhicule sort de la zone de collision.

 $T_s$ ; la période d'échantillonnage.

$$\varepsilon = \left| \frac{X_{f-1} - X_{sortie}}{X_{f-1} - X_f} \right|$$
 Un exemple de  $\varepsilon$  qui sera sur cette forme si le véhicule se déplace sur l'axe

de abscisse seulement (en ligne droite horizontale), où:

# Chapitre 3 : Construction du problème & Algorithme

- $X_{f-1}$ : L'avant dernier abscisse de trajectoire de véhicule dans la simulation (valeur calculée en temps réel).
- $X_f$ : Le dernier abscisse de trajectoire de véhicule dans la simulation (valeur calculée en temps réel).
- $X_{sortie}$ : Le dernier abscisse qui correspond à l'indice de sortie définie dès le début de programme.

Cette fonction va nous permettre alors de calculer le temps exact de sortie de l'intersection. On ne doit pas accorder moins de temps et surtout pas plus.

C'est le rôle de la commande prédictive centralisée de calculer les commandes optimales pour tous les véhicules dans la zone d'étude en minimisant cette fonction de coût qui contient les critères mentionnés, tout en respectant les contraintes.

En effet, On ne peut pas négliger, la grande importance des contraintes dans le fonctionnement du MPC. On a définie des contraintes à l'entrée de commande à tout instant pour assurer que l'entrée optimale calculée par le MPC reste toujours entre ses valeurs limites à ne pas dépasser pour le bien être de tout le système. Donc dans notre cas la vitesse et la vitesse angulaire ont des valeurs maximales et des valeurs minimales à ne pas dépasser à tous les instants d'optimisation. La même chose pour la distance inter-véhicules qui doit être toujours supérieur à la valeur de la distance de sécurité qui est la somme de deux rayons des zones de sécurité pour deux véhicules.

$$d \geq (2 \times r_v + \delta)$$

Avec:

 $r_{\nu}$  le rayon de la zone de sécurité et  $\delta$  une petite marge de sécurité.

Des contraintes aussi sont mise en place pour le confort et la variation de l'entrée de commande entre deux instants de l'horizon d'optimisation.

$$|V(i+1) - V(i)| < 1m/s$$
 ,  $\forall i \in [1..N_{opt}]$ 

Si on parle des trajectoires rectilignes, où la vitesse et la seule entrée de commande, une variation de cette entrée ne doit pas dépasser 1m/s par exemple. Une valeur choisie selon la vitesse moyenne d'un véhicule, fixée par notre hypothèse dès le début (3m/s).

On comprend donc que tout le travail se base sur la fonction de coût. Cela est clair aussi par le schéma explicatif ci-dessous qui explique globalement notre travail dans cette partie.

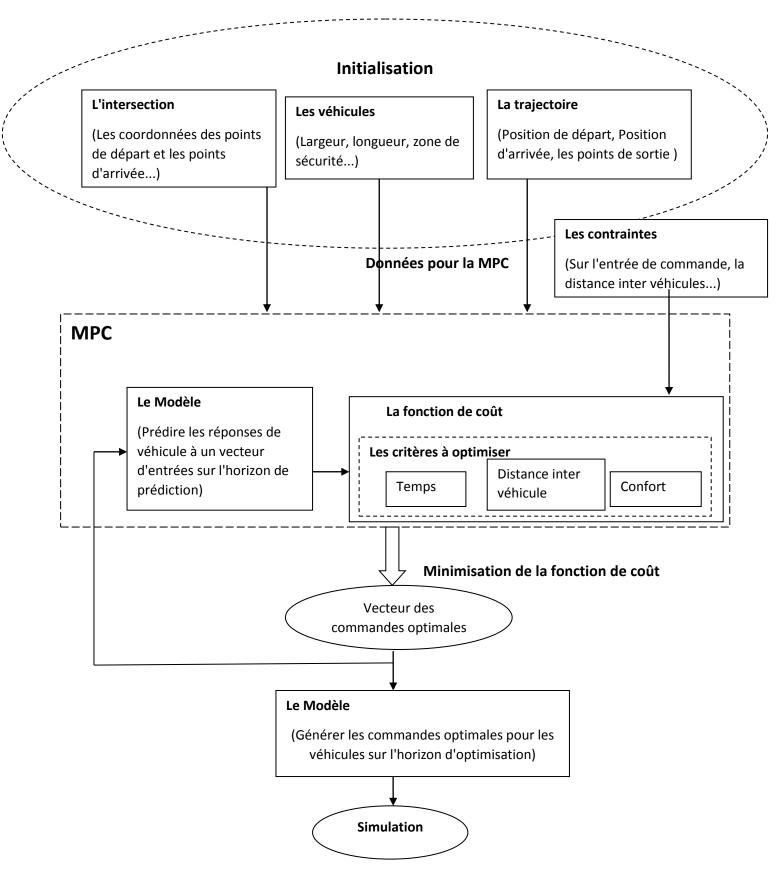


Figure 17. Schéma explicatif de la solution

Donc le problème se base principalement sur la construction de la fonction de coût et le choix de ces critères. Mais l'importance de minimiser l'un de ces critères par rapport à un autre peut changer selon le cas et va dépendre surtout de problème et ce qu'on veut avoir comme solution. Si on veut insister, par exemple, sur la précision de suivit de la référence, que sur le confort de la variation de l'entrée de commande, on ne va pas donner le même poids à ces deux critères. On peut donc voir l'importance des matrices de pondération pour mettre l'accent sur l'importance de chaque critère dans le problème.

Dans notre code on a définie un vecteur de poids qui contient les poids des critères de la fonction de coût "weights vector", il fixe l'importance de minimiser chaque critère pour optimiser le plus possible l'entrée de commande de notre système.

On a donné comme valeurs de départ les mêmes poids à tous les critères et donc ils ont la même importance dans notre fonction de coût, mais on va parler des différents cas dans la partie de simulation.

Un autre facteur, très important, peut influencer le fonctionnement de la méthode MPC, qui est le choix du model de système. Dans notre cas pour modéliser un véhicule on a choisi d'utiliser le fameux modèle cinématique non linéaire de modèle voiture à quatre roue d'un robot mobile, qu'on peut le présenter sous sa forme discrète suivante:

$$\begin{cases} X(i+1) = X(i) + V(i)*cos(\Theta)*Ts \\ Y(i+1) = Y(i) + V(i)*sin(\Theta)*Ts \\ \Theta(i+1) = \Theta(i) + W(i)*Ts \end{cases} \qquad \forall i \in [1..N_{opt}]$$

Ce modèle va nous permettre de prédire la réponse de système à toutes entrées de commande sur l'horizon de prédiction. Une réponse utilisée par la MPC pour calculer la commande optimale.

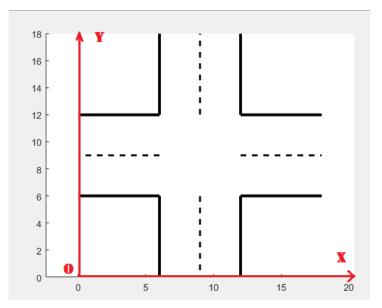
L'entrée de commande de notre système va être un ensemble des points cibles qui correspondent aux des états optimaux calculés sur un horizon d'optimisation de longueur bien défini. Ces points décrivent les positions, les vitesses et les vitesses angulaires désirées, à suivre à chaque instant de la navigation. Ils sont calculés en utilisant les vecteurs de commandes optimales (vitesse et vitesse angulaire) déterminés par le MPC, et en utilisant le modèle de véhicule pour déterminer les positions optimales qu'on peu l'atteindre en utilisant ces commandes. Ces positions avec leurs vitesses correspondantes vont former après l'entrée de commande pour le système globale (les trajectoires optimales).

La trajectoire optimale est calculée une fois pour toute pour tous les véhicules dans la zone d'étude et cela montre l'un des points fort du MPC, qui permet de réaliser un tel calcul complexe avec une grande rapidité. Cette méthode est donc très efficace pour ce genre des problèmes temps réel qui nécessitent un calcul très rapide et des résultats précis.

#### 2) Simulation & Résultats

Dans cette partie on a essayé de simuler la suivie des véhicules des trajectoires générées par la MPC.

On a commencé par la construction d'un environnement de travail; une intersection qui représente notre zone d'étude, et en fixant aussi le repère général de cette intersection qu'on va l'utiliser pour positionner tous les éléments de la zone d'étude.



La représentation d'un véhicules est faite par des points qui réfèrent à la position exacte à cet instant de la simulation dans l'intersection, qui est détectée par le centre d'essieu de véhicule (le milieu de deux roues arrières de notre véhicule).

Chaque véhicule est entouré par le cercle de sécurité, ou ce qu'on a appelé la zone de sécurité de véhicule.



Dans le programme réalisé et pour simplifier les choses on a considérer qu'on a simplement deux véhicules dans l'intersection à l'instant d'étude;  $V\{1\}$  en bleu venant de bas de l'intersection (du sud),  $V\{2\}$  en rouge venant de la gauche de l'intersection (de l'Ouest) .La trajectoire de véhicule est représentée sous forme des trais qui représentent les points cibles à chaque instant de la simulation.

<del>• + + + + + + | + +</del>

## > Remarque

Pour cette simulation et pour simplifier le travail on a choisi les points de sortie de chaque véhicule dans l'intersection d'une façon à avoir des trajectoires sous forme d'une ligne droite. Cela n'empêche que le programme réalisé est dédié pour n'importe quel nombre de véhicule et n'importe quel type de trajectoire.

#### Résultats de la simulation

## ✓ Le 1<sup>er</sup> essai ;

On a pris le véhicule rouge (venant du gauche) celui le plus proche de centre l'intersection. il roule à une vitesse de 3m/s. le deuxième véhicule en bleu (venant du bas), roule à une vitesse de 2m/s vers le centre.

Le MPC nous à permis de calculer l'ensemble des points cibles qui décrivent la trajectoire et nous a donné le profil des vitesses qui représentent les vitesses de commande à suivre par les deux véhicules.

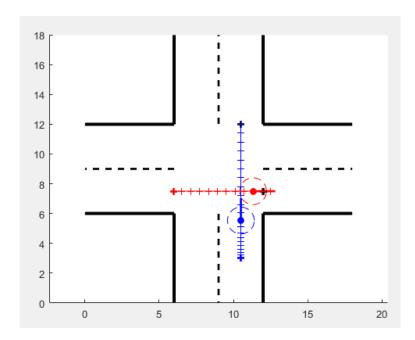


Figure 18. 1<sup>er</sup> essai : Simulation du franchissement de l'intersection par les véhicules.

Dans ce cas on peut remarquer que le véhicule {2} en rouge arrive en premier à sa position finale ce résultat parait logique, surtout qu'il roule à la vitesse la plus grande et son départ se fait de la position la plus proche au centre.

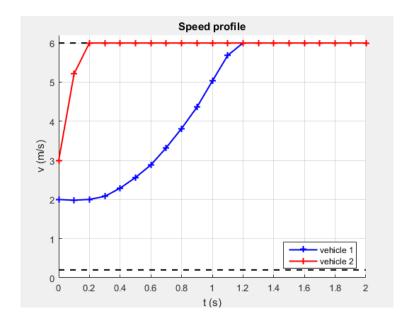


Figure 19. 1er essai : Les courbes des vitesses des véhicules (V1 en rouge V2 en bleu).

La vitesse du deuxième véhicule (rouge) atteint en premier la vitesse maximale, c'est à dire que le MPC lui a donné la priorité, alors que le premier véhicule reste à sa vitesse initiale pour un moment avant qu'il commence à accélérer jusqu'à qu'il arrive à sa vitesse maximale.

On remarque aussi que la vitesse maximale atteinte par les deux véhicules est la vitesse maximale imposée dès le début aux contrainte, qui est l'autre un résultat logique puisqu'on veut arriver à la position finale en minimum de temps et la trajectoire sous forme d'une ligne droite, donc les véhicules vont passer l'intersection à leurs vitesses maximales.

On peut remarquer aussi l'effet des contraintes sur la variation de commande et le critère du confort sur l'évolution dans les profils des vitesses surtout qu'on n'a pas eu où on n'a pas des variations remarquables entre deux instants successifs.

✓ Le 2ème essai: (Véhicule 1: (bleu) vitesse 3m/s, véhicule 2: (rouge) vitesse 2m/s):

Dans ce cas la on a choisi de donner une vitesse plus grande au véhicule plus éloigné du centre (véhicule bleu) que celle de véhicule 2 le plus proche. on a eu comme résultat le passage de véhicule 1 en premier malgré qu'il est le plus éloigné.

Le MPC a choisi de donner la priorité à ce véhicule.

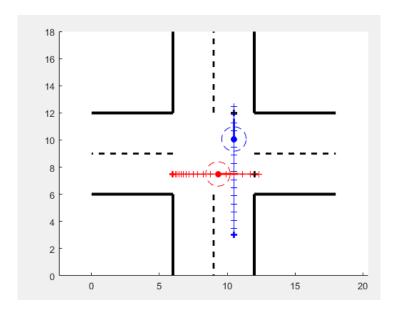


Figure 20. 2ème essai : Simulation du franchissement de l'intersection par les véhicules.

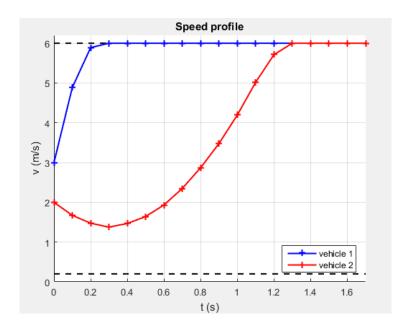


Figure 21. 2ème essai : Les courbes des vitesses des véhicules (V1 en rouge V2 en bleu).

On remarque que le deuxième véhicule rouge fait un freinage au début pour quelque fraction de secondes pour donner la priorité de passage au véhicule 1.

La même chose ici pour la remarque de critère de confort.

En changeant la vitesse maximale des véhicules à 8 m/s, on remarque que les véhicules prennent toujours la vitesse maximale donnée et donc ils tendent tous à avoir la vitesse 8m/s. Un résultat logique dans notre cas de ligne droite pour arriver au point final en minimum de temps.

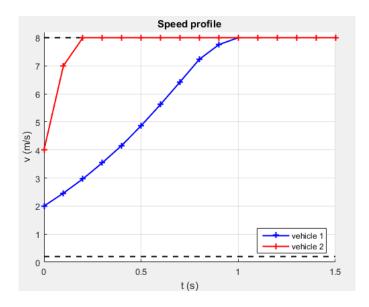


Figure 22. 3ème essai : Les courbes des vitesses des véhicules (V1 en rouge V2 en bleu).

✓ Le 4<sup>ème</sup> essai;

On a donné des poids différents pour les critères en gardant le même poids pour le temps et en minimisant celui de la distance et du confort. On remarque l'effet d'un tel changement sur la variation des vitesses au cours du temps où on a eu cette fois des changements brusques de vitesses.

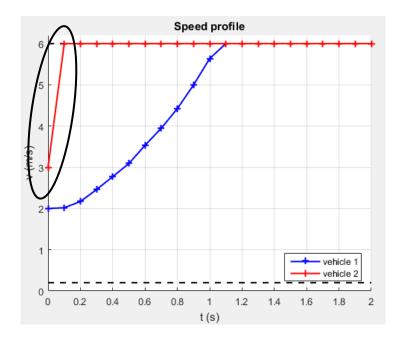


Figure 23. 4<sup>ème</sup> essai : Les courbes des vitesses des véhicules (V1 en rouge V2 en bleu).

✓ Le 5ème essai;

On a donné la même vitesse de départ pour les deux véhicules 4m/s. On a remarqué que le véhicule 2 rouge a freiné et a donner la priorité au véhicule bleu pour le passage dans l'intersection.

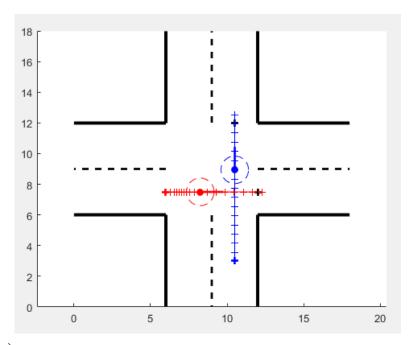


Figure 24. 5<sup>ème</sup> essai : Simulation du franchissement de l'intersection par les véhicules.

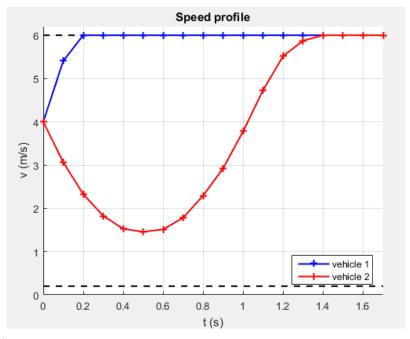


Figure 25. 5<sup>ème</sup> essai : Les courbes des vitesses des véhicules (V1 en rouge V2 en bleu).

Les résultats sont aussi clairs sur les profils des vitesses.

On a laissé le critère du confort le plus grand et on a diminué les deux autres critères. Le véhicule rouge arrive cette fois-ci en premier.

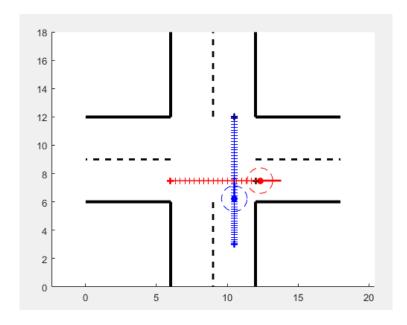


Figure 26. 6ème essai : Simulation du franchissement de l'intersection par les véhicules.

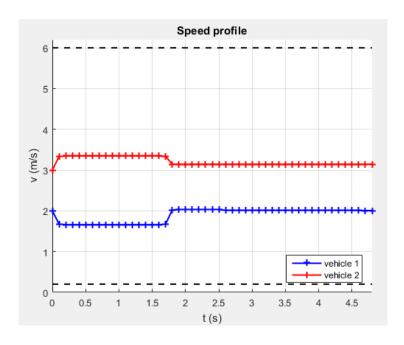


Figure 27. 6ème essai : Les courbes des vitesses des véhicules (V1 en rouge V2 en bleu).

On remarque que le MPC a essayé de garder les vitesses presque constantes pour plus de confort mais il a négligé le critère du temps surtout.

# ✓ Le 7ème essai;

Si on laisse seulement le poids du critère distance inter-véhicules élevée et on diminue les autres on remarque que le MPC donne la priorité au véhicule rouge et freine l'autre pendant toute la période pour assurer le maximum de sécurité, et le maximum de distance entre les deux véhicules.

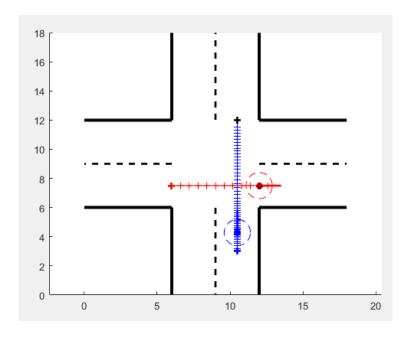


Figure 28. 7<sup>ème</sup> essai : Simulation du franchissement de l'intersection par les véhicules.

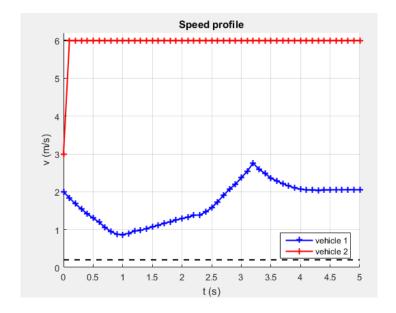


Figure 29. 7ème essai : Les courbes des vitesses des véhicules (V1 en rouge V2 en bleu).

On remarque à partir du profil de vitesse que le MPC empêche toujours le premier véhicule bleu d'accélérer, alors qu'elle accélère le maximum possible le deuxième véhicule rouge pour atteindre sa vitesse maximal en minimum du temps, surtout qu'on a négligé le critère temps et confort et donc tout sera possible pour assurer la sécurité.

## IV. La commande prédictive décentralisée et la suivie des références

L'agent de l'intersection organise la circulation en générant les trajectoires optimales et même les vitesses et les vitesses angulaires pour chaque véhicule dans notre zone d'étude, sur tout l'horizon d'optimisation.

Mais comment peut-on garantir que les véhicules vont suivre avec une précision les données reçues de la part de l'intersection?

En effet, on a choisi d'utiliser, une autre fois, la technique d'optimisation "la commande prédictive basée sur modèle" MPC pour résoudre ce problème. Une stratégie de contrôle cette fois-ci décentralisée, à implémenter à chaque véhicule dans notre zone d'étude.

Cette partie de travail a pour rôle de suivre la trajectoire optimale générer par l'intersection intelligente construite à la première partie, c'est à dire que le rôle de ce code est d'assurer que le véhicule suit à chaque instant de l'horizon d'optimisation les points cibles de référence, aussi que la vitesse et la vitesse angulaire optimales désirées, générées par le maître, avec une grande précision et éviter d'avoir des erreurs au cours de la navigation qui peuvent introduire des problèmes de collision.

Cette fois-ci, on a choisi d'utiliser une fonction de coût qui va être sous la forme classique d'un problème d'optimisation quadratique, où on a un terme qui représente l'erreur entre la valeur de référence à suivre et la valeur actuelle de variable. Dans notre cas ça va être l'erreur de position entre la position et l'angle d'orientation généré par le MPC centralisé et la position et l'orientation actuelle de véhicule. Donc en minimisant cette fonction on va minimiser cette erreur pour calculer le vecteur de commande optimale de véhicule. La fonction de coût va être sous cette forme;

$$J = \sum_{i=K}^{k+Np+1} e_i \times Q \times e_i^T$$

Avec:  $e_i = |y_{ref,i} - y_i|$  où  $y_{ref,i}$  la position de référence et  $y_i$  la position de véhicule, Q la matrice de pondération et  $N_p$  la longueur de vecteur de prédiction.

L'organigramme au dessous explique le principe du problème d'optimisation dans cette deuxième partie de travail.

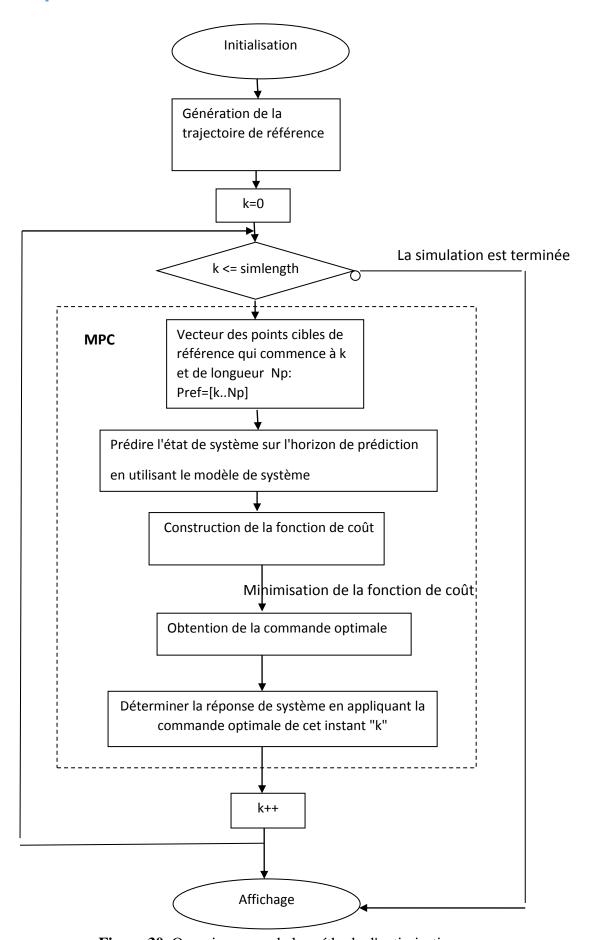


Figure 30. Organigramme de la méthode d'optimisation.

Pour réaliser la simulation, on a fixé nous même l'état initial et l'état final de véhicule.

On fixe de même la longueur de l'horizon de simulation ou bien la durée de simulation.

L'un des paramètres les plus important dans notre travail, est la longueur de vecteur d'optimisation ou on peut l'appelé aussi vecteur d'optimisation, l'horizon sur le quel on va prédire à chaque instant de simulation, les états de véhicule sur "N<sub>p</sub>" pas de futur, en utilisant le modèle de système qui est dans notre cas l'ensemble des équations cinématiques de mouvement et sur cet horizon aussi on va calculer le vecteur des commandes optimales à appliquer à chaque instant de la simulation.

$$U_{opt} = [U_{opt,i}(k)...U_{opt,i}(k+N_p-1)]$$
 K=1..simlength, i=1..N<sub>v</sub>

Avant de commencer, on a calculé les positions de référence de véhicule en divisant la distance entre le point initial et final sur un nombre de pas ou bien un nombre de points cibles que le véhicule doit suivre au cours du temps qui est dans notre cas choisi égale au longueur de la simulation c'est à dire avoir des points cibles équidistants entre le point initial et le point final pour réaliser la simulation et tester l'efficacité de notre programme. C'est le rôle de la première partie de programme à stratégie centralisée, mais comme les deux partie de code ne sont pas liées, coté programmation, on a du passé par cette étape pour préparer la simulation.

À chaque instant de la simulation, on prend le vecteur de position de référence qui commence à cet instant de simulation et de longueur "Np" la longueur de vecteur d'optimisation choisi dès le début.

Ce vecteur va garder sa longueur mais il va avancer avec les pas de simulation, c'est à dire changer sa valeur initial qui va être toujours l'instant actuel de simulation.

$$U_{opt} = [Y_{reft,i}(k)...Y_{reft,i}(k+N_p-1)]$$

On va utiliser l'ensemble de ces points de références pour calculer un vecteur de commandes optimales sur cet horizon d'optimisation mais finalement on ne va prendre que la première valeur qui correspond à la valeur de la commande optimale pour cet instant de la simulation jusqu'à le dernier point cible  $U_{opt,i}(k)$ .

Par la suite, on commence à appliquer le MPC, où la première étape consiste à prédire l'état de système sur l'horizon d'optimisation et en prend la sortie de notre système qui est la position instantanée de véhicule pour construire le vecteurs des positions prédites pour cet horizon.

Et donc en faisant la différence entre ces positions et les positions de référence sur l'horizon on peut construire la fonction de coût de notre système.

En minimisant cette fonction de coût on va donc minimiser l'erreur de position avec la référence, en utilisant la fonction "fmincon" qui va permettre de générer le meilleur vecteur de commande qui minimise la fonction de coût et permet de tendre l'erreur vers zéro tout en respectant tous les contraintes mises sur l'entrée de commande, l'erreur de position ...etc.

$$(U(i) < 6m/s, |y_{ref,i}-y_i| < 10cm)$$

Mais on déterminant le vecteur de commande optimale on ne va prendre que la première valeur de ce vecteur qu'on va l'utiliser pour prédire le prochain état de système, c'est à dire que le rôle de ce code est d'assurer que le véhicule suit à chaque instant de l'horizon d'optimisation les points cibles optimales, aussi que la vitesse et la vitesse optimale désirées générées par le MPC centralisée de l'agent extérieur de l'intersection avec une grande précision et éviter d'avoir des erreurs qui peuvent introduire des problèmes de collision.

#### • Résultats de la simulation

Dans cette partie on s'est concentré sur la suivie des positions de références d'un véhicule et on n'a pas introduit la vitesse optimale à suivre ou l'orientation surtout qu'on a choisie de garder les trajectoires sous forme de ligne droite.

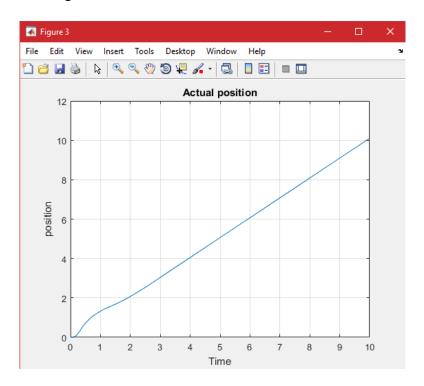


Figure 31. La position actuelle de véhicule.

Ce graphe affiche la position de véhicule au cours de temps et on remarque qu'à la fin de la simulation qu'il arrive à la position finale fixée dès le début (10m) de programme avec précision.

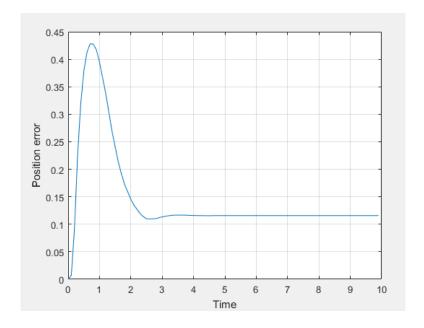


Figure 32. L'erreur de la suivie de référence

Ce graphe affiche l'erreur de position entre la position de référence et la position de véhicule au cours du temps. On peut remarquer que le véhicule est un peu en retard par rapport au point cible au début de la simulation, et puis il rattrape un peu et diminue la différence de position qui reste sur 10cm. Une erreur acceptable dans notre cas.

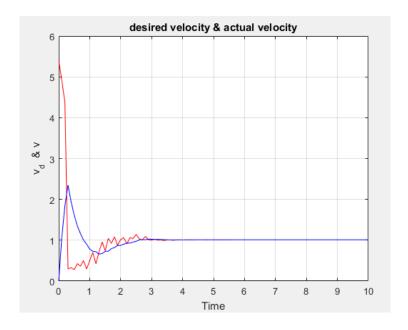


Figure 33. Les courbes de la vitesse souhaitée (en rouge) et la vitesse actuelle (en bleu).

Ce graphe nous permet de faire une comparaison entre la vitesse désirée (en rouge) pour le véhicule calculée par le MPC, et la vitesse actuelle de véhicule (en bleu). On peut remarquer que la vitesse actuelle de véhicule tend à être égal à la vitesse désirée après 3s de la simulation.

# Chapitre 3 : Construction du problème & Algorithme

La valeur de la vitesse calculée 1m/s atteinte par le véhicule est liée à la vitesse de la génération des points cibles de référence. Donc cette vitesse est calculée pour rendre le véhicule capable de suivre les points cibles instantanément et n'a aucune relation avec la vitesse optimale.

#### V. Conclusion

En guise de conclusion, on peut dire que l'utilisation de la commande prédictive pour l'organisation de la circulation et la génération des trajectoires pour les véhicules a montré une grande efficacité à la résolution de notre problème, une grande précision, et une réponse comme souhaitée à tous les changements, justifiés par les résultats de la simulation.

Le MPC centralisé de l'agent contrôle toute la circulation en assurant tous nos objectifs cherchés, et la stratégie décentralisée a assuré un suivie des commandes de l'agent.

Le programme réalisé est caractérisé par sa flexibilité. En effet, on peut toujours choisir le nombre de véhicules, les points de sortie de l'intersection, et les critères sur les quelles on veut mettre l'accent dans l'optimisation. En plus, on peut essayer plusieurs autres cas à la simulation pour vérifier tous les cas possibles. Tout cela n'empêche que le problème dans notre cas est très simplifié et ne résout pas tous les problèmes.

# Conclusion générale

Dans ce travail on a introduit les différentes études et les différentes solutions proposées pour le problème de la navigation des véhicules autonomes, et surtout dans les milieux dynamiques. En prenant comme exemple dans notre travail la navigation des véhicules autonome dans les intersections qui posait toujours un problème pour ce genre des véhicules qui représente le futur de transport routier.

Notre travail a consisté à trouver une solution pour la gestion des flux de trafic de ce genre des véhicules dans les intersections et organiser la circulation pour assurer une navigation en toute sécurité et essayer de trouver une solution pour le problème des embouteillages, les temps d'arrêts et les longues queues d'attentes devant les intersections en assurant en minimum du temps pour le franchissement de tous les véhicule.

Notre problème est donc un problème d'optimisation, où on a proposé l'utilisation de la commande prédictive basée sur model connue par le nom "Model Predictive control" (MPC), pour le résoudre. On a proposé une stratégie de contrôle hybride avec une partie centralisée, présentée sous la forme d'un maître de l'intersection ou bien un agent d'infrastructure qui a pour rôle d'organiser la circulation et générer les trajectoires optimales des véhicules qui permettent la réalisation de nos objectifs. Cette partie nous a permis d'introduire la notion du temps dans notre problème d'optimisation, d'assurer la sécurité contre les collisions inter-véhicules et une navigation fluide et intuitive.

La deuxième partie, représente une stratégie décentralisée qui correspond à la commande bas niveau de chaque véhicule et qui consiste à optimiser la suivie des points cibles de références générés par l'agent de l'intersection avec une grande précision.

Malgré qu'on a simplifié beaucoup le problème, et le cas pris dans la simulation ne contient que les trajectoires sous forme des lignes droites, un nombre réduit de véhicules et on a pris en considération que les contraintes principales pour la navigation en négligeant d'autres contraintes comme les bords de la route par exemple, notre solution et le programme réalisé reste efficace selon les résultats de la simulation et répond à nos besoins. Cela n'empêche qu'on doit le tester sur des autres cas plus complexes; contenant plus de véhicules, dans des environnements où la navigation sera plus complexe (des intersections d'un angle différent de 90° ou des ronds-points), et en prenant en considération plus des contraintes réelles... pour tester encore l'efficacité et améliorer le programme réalisé.

# **Bibliographie**

- [1]: ERBS. F, BARTH. A, et FRANKE. U, "Moving vehicle detection by optimal segmentation of the dynamic stixel world. In Intelligent Vehicles Symposium (IV)", Article, IEEE (juin 2011), pp. 951–956.
- [2]: WU. Q, WEI. J., et LI. X., "Research progress of obstacle detection based on monocular vision", communication, 2014 la 10ème conférence internationale "Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing (IIH-MSP)", pp. 195–198, (Août 2014).
- [3]: DOH. N, CHOSET. H, et CHUNG. W. K, "Accurate relative localization using odometry". IEEE International Conference in Robotics and Automation, 2003. (Septembre 2003), vol.2, pp. 1606–1612.
- [4]: BULUSU. N, HEIDEMANN.J, et ESTRIN. D, "Gps-less low-cost outdoor localization for very small devices". Communication, IEEE 7, pp 28–34, (Octobre 2000).
- [5]: GUTMANN.J.S, BURGARD.W., FOX.D., et KONOLIGE.K. "An experimental comparison of localization methods". 1998 IEEE/RSJ International Conference, vol. 2, pp.736–743, (Octobre 1998).
- [6]: GONZÁLEZ.J, BLANCO.J, GALINDO.C, DE GALISTEO.A.O, FERNÁNDEZ-MADRIGAL.J, MORENO.F, et MARTÃNEZ.J. "Mobile robot localization based on ultra-wideband ranging: A particle filter approach". "Robotics and Autonomous Systems" 57, 5, pp. 496 507, (2009).
- [7]: INOUE.R.S., TERRA.M.H., et GRASSI JR.V. "Robust state-space estimation for mobile robot localization". communication, "Latin American Robotics Symposium and Intelligent Robotics Meeting" (2008), IEEE, pp. 85–90.
- [8]: ALAMI.R, CHATILA.R, FLEURY.R, GHALLAB.M, et INGRAND.F, "An architecture for autonomy". "The International Journal of Robotics Research" 17, 4, pp. 315–337, (1998).
- [9]: DAFFLON.B., et GECHTER.F, "Making decision with reactive multi-agent systems: A possible alternative to regular decision processes for platoon control issue". communication, "Mexican International Conference on Artificial Intelligence" (2014).
- [10]: WANG.R, et WANG.J, "Fault-tolerant control for electric ground vehicles with independently-actuated in-wheel motors". article, "Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control" 134, 2 (2012).
- [11]: NILSSON.N. J, "Principles of Artificial Intelligence". article, "Springer", (1982).

- [12]: ALBUS.J, MCCAI.H, et LUMIA R, "NASA/NBS standard reference model for telerobot control system architecture (nasrem)". Tech. Rep. 1235, National Institute of Standards and Technology, (1989).
- [13]: ARKIN.R. C, "Behavior-Based Robotics". Article, "The MIT Press", (1998).
- [14]: ADOUANE. L, "Architectures de contrôle comportementales et réactives pour la coopération d'un groupe de robots mobiles". Thèse, "Université de Franche-Comté", LAB CNRS 6596, (Avril 2005).
- [15]: YUTA.S, et PREMVUTI.S, "Coordinating autonomous and centralized decision making to achieve cooperative behaviors between multiple mobile robots". Article, "Intelligent Robots and Systems", (1992), vol. 3, IEEE, pp. 1566–1574.
- [16]: JIN.K, LIANG.P, et BENI.G, "Stability of synchronized distributed control of discrete swarm structures". Communication, "IEEE International Conference on Robotics and Automation" (1994), IEEE, pp. 1033–1038.
- [17]: SIMMONS.R, SINGH.S, HERSHBERGER.D, RAMOS.J., et SMITH.T, "First results in the coordination of heterogeneous robots for large-scale assembly". Article, "Experimental Robotics VII. Springer", (2001), pp. 323–332.
- [18]: HEGER.F.W, HIATT L.M, SELLNER..B, SIMMONS.R, et SINGH.S, "Results in sliding autonomy for multi-robot spatial assembly". Communication, "The 8th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space" (2005).
- [19]: CHEN.Q, et LUH.J. "Distributed motion coordination of multiple robots". Article, "Advanced Robotic Systems and the Real World, IROS 1994". Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference (Septembre 1994), vol. 3, pp. 1493–1500.
- [20]: BENZERROUK. A, "Architecture de Contrôle Hybride pour les Systèmes Multi-robots Mobiles". Thèse, "École Doctorale Sciences pour l'Ingénieur de Clermont-Ferrand", (2011).
- [21]: BEARD.R, LAWTON.J, et HADAEGH.F. "A coordination architecture for spacecraft formation control". Article, "IEEE Transactions on Control Systems Technology 9" (2001), pp 777 790.
- [22]: SCHÖNER.G, DOSE.M, et ENGELS.C. "Dynamics of behavior: Theory and applications for autonomous robot architectures". Article, "Robotics and Autonomous Systems" 16, 4 (1995), pp 213 245.
- [23]: CORTES.J, MARTINEZ.S, KARATAS.T, et BULLO.F. "Coverage control for mobile sensing networks". Article, "Robotics and Automation (2002). Proceedings ICRA. IEEE International Conference (2002), vol. 2, pp. 1327–1332.

- [24]: KIM.D.-H., et KIM.J.-H. "A real-time limit-cycle navigation method for fast mobile robots and its application to robot soccer". Article, "Robotics and Autonomous Systems" 42, pp. 17–30, (2003).
- [25]: ADOUANE, L. "Orbital obstacle avoidance algorithm for reliable and on-line mobile robot navigation". Communication, "9th Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions", (Portugal, Mai 2009).
- [26]: VILCA.J. M., ADOUANE.L., et MEZOUAR.Y. "Adaptive leader-follower formation in cluttered environment using dynamic target reconfiguration". Article, "Springer Tracts in Advanced Robotics", "International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems DARS" (2014) (Daejeon Korea, November 2014), pp. 727–734.
- [27]: A.SIMS et K.DOBINSON, "The Sydney Coordinated Adaptive Traffic (SCAT) system philosophy and benefits", article, "IEEE Trans. Veh. Technol.", vol. 29, no. 2, pp. 130–137, Mai (1980).
- [28]: Hundelshausen.F.V., Himmelsbach.M., Hecker.F., Mueller.A., et Wuensche, H.-j. "Driving with Tentacles: Integral Structures for Sensing". Article, "Journal of Field Robotics", 25(9), (2008) pp. 640–673.
- [29]: P. Stone et M. Veloso, "Multiagent systems: A survey from a machine learning perspective", Article, "Auton. Robots", vol. 8, no. 3, pp. 345–383, (Juin. 2000).
- [30]: J. Niittymäki et M.Pursula, "Signal control using fuzzy logic", article, "Fuzzy Sets Syst.", vol. 116, no.1, pp. 11–22, (Nov. 2000).
- [31]: G. Newell, "The rolling horizon scheme of traffic signal control", article, "Transp. Res. Part A, Policy Pract.", vol. 32, no. 1, pp. 39–44, (Jan. 1998).
- [32]: A.Stubberud, "Markovian decision control for traffic signal systems", Article, "Proc. 36th IEEE Conf. Decision Control", vol. 5, pp. 4782–4787, (Dec. 1997).
- [33]: J.Spall et D.Chin, "Traffic-responsive signal timing for systemwide traffic control", Article, "Proc. 1997 Amer. Control Conf.", 1997, vol. 4, pp. 2462–2463 (1997).
- [34]: G. F. List et M. Cetin, "Modeling traffic signal control using Petri nets," IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 5, no. 3, pp. 177–187, (Sep. 2004).
- [35] P. B. Mirchandani et N. Zou, "Queuing models for analysis of traffic adaptive signal control" Article, "IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.", vol. 8, no. 1, pp. 50–59, (Mar. 2007).
- [36]: F. Zhu, H. M. A. Aziz, X. Qian, et S. V. Ukkusuri, "A junction-tree based learning algorithm to optimize network wide traffic control: A coordinated multi-agent framework," Transportation Research Part C: Emerging Technologies, (to be published).

- [37]: P. Varaiya, "Max pressure control of a network of signalized intersections", Article, "Transp. Res. Part C, Emerging Technol.", vol. 36, pp. 177–195, (Nov. 2013).
- [38]: J. Gregoire, E. Frazzoli, A. de La Fortelle et T.Wongpiromsarn, "Backpressure traffic signal control with unknown routing rates" Article, "Proc. IFAC World Congress", pp. 11332–11337 (2014).
- [39]: J. D. Schmöcker, S. Ahuja, et M. G. H. Bell, "Multi-objective signal control of urban junctions—Framework and a London case study", Article, "Transp. Res. Part C, Emerging Technol.", vol. 16, no. 4, pp. 454–470, (Août. 2008).
- [40]: O. M. J. Carsten, D. J. Sherborne, et J. A. Rothengatter, "Intelligent traffic signals for pedestrians: Evaluation of trials in three countries", Article, "Transp. Res. Part C, Emerging Technol.", vol. 6, no. 4, pp. 213–229, (Août. 1998).
- [41]: D. DeVoe et R. W. Wall, "A distributed smart signal architecture for traffic signal controls", communication, "Proc. IEEE ISIE", pp. 2060–2065, (2008).
- [42]: G. De Ruwe et R. Wall, "Pedestrian navigation and integration with distributed smart signal traffic controls", communication", communication, "Proc. 34th Annu. Conf. IEEE IECON", pp. 2923–2928 (2008).
- [43]: A. Benmimoun, J. Chen, D. Neunzig, T. Suzuki, et Y. Kato, "Communication-based intersection assistance", "Proc. IEEE Intell. Veh. Symp.", pp. 308–312 (2005).
- [44]: C. Englund, L. Chen, et A. Voronov, "Cooperative speed harmonization for efficient road utilization", "Proc. 7th Int. Workshop Commun. Technol. Veh.", pp. 19–23, (2014).
- [45]: K. Dresner et P. Stone, "Multiagent traffic management: A reservationbased intersection control mechanism", "Proc. 3rd Int. Joint Conf. Auton. Agents Multiagent Syst.", pp. 530–537, (2004).
- [46]: H. Schepperle, K. Böhm, et S. Forster, "Towards valuation-aware agent-based traffic control", "Proc. 6th Int. Joint Conf AAMAS", pp. 185:1–185:3, (2007).
- [47]: S. Heiko, B. Klemens, et F. Simone, "Traffic management based on negotiations between vehicles—A feasibility demonstration using agents", Article, "Proc. 9th Workshop AMEC", vol. 13, pp. 90–104 (2009).
- [48]: R. Naumann, R. Rasche, J. Tacken, et C. Tahedi, "Validation and simulation of a decentralized intersection collision avoidance algorithm", "Proc. Conf. Intell. Transp. Syst.", pp. 818–823, (1997).
- [49]: R. Naumann, R. Rasche, et J. Tacken, "Managing autonomous vehicles at intersections", Article, "IEEE Intell. Syst. Appl.", vol. 13, no. 3, pp. 82–86, (Mai/Juin. 1998).

- [50]: F. Zhu et S. V. Ukkusuri, "A linear programming formulation for autonomous intersection control within a dynamic traffic assignment and connected vehicle environment" Transp. Res. Part C, Emerging Technol.", vol. 55, pp. 363–378, (Juin. 2015).
- [51]: H. Conceição, L. Damas, M. Ferreira, et J. A. Barros, "Large-scale simulation of V2V environments", "Proc. ACM SAC", pp. 28–33, (2008),.
- [52]: T.-C. Au, C.-L. Fok, S. Vishwanath, C. Julien, et P. Stone, "Evasion planning for autonomous vehicles at intersections", "Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst.", pp. 1541–1546, (2012).
- [53]: M. A. Abid, O. Chakroun, et S. Cherkaoui, "Pedestrian collision avoidance in vehicular networks", "Proc. IEEE Int. Conf. Commun.", pp. 2928–2932, (2013).
- [54]: X. Wu et al., "Cars talk to phones: A DSRC based vehicle-pedestrian safety system", "Proc. IEEE 80th VTC-Fall", pp. 1–7, (2014).
- [55]: M. Yamamoto, K. Fujita, et K. Ohnishi, "Development of vehicleinfrastructure cooperative systems using infrared beacon and DSRC: Hiroshima DSSS field operational test", Communication, "Proc. 15th World Congr. Intell. Transp. Syst. ITS Amer. Annu. Meet.", (2008).
- [56]: K. Fuerstenberg, "Intersection safety—The EC project INTERSAFE," "Proc. Adv. Microsyst. Autom. Appl.", pp. 437–449, (2006).
- [57]: B. Roessler and K. Fuerstenberg, "Cooperative intersection safety—The EU project INTERSAFE-2", "Proc. Adv. Microsyst. Autom. Appl.", pp. 77–86, (2009).
- [58]: L. Bouraoui, S. Petti, A. Laouiti, T. Fraichard, et M. Parent, "Cyber car cooperation for safe intersections", "Proc. IEEE Intell. Transp. Syst. Conf.", pp. 456–461, (2006).
- [59]: O. Mehani et A. D. L. Fortelle, "Trajectory planning in a crossroads for a fleet of driverless vehicles", Article, "Comput. Aided Syst. Theory EUROCAST", vol. 4739, pp. 1159–1166, (2007).
- [60]: A. de La Fortelle, "Analysis of reservation algorithms for cooperative planning at intersections", "Proc. 13th Int. IEEE Conf. Intell. Transp. Syst.", pp. 445–449, (2010).
- [61]: M. Goldhammer et al., "Cooperative multi sensor network for traffic safety applications at intersections", "Proc. 15th Int. IEEE Conf. Intell. Transp . Syst.", pp. 1178–1183, (2012).
- [62]: L. C. Bento, R. Parafita, et U. Nunes, "Intelligent traffic management at intersections supported by V2V and V2I communications", Article, "Proc. 15th Int. IEEE Conf. Intell. Transp. Syst.", pp. 1495–1502, (2012).
- [63]: J. Richalet, A. Rault, J.L. Testud, J. Papon. "Model Predictive Heuristic Control: Applications to Industrial processes". Automatica, 14, pp.413-428, (1978).
- [64]: D. W. Clarke, C. Mohtadi, et P. S. Tuffs. "Generalized Predictive control", "Automatica", (1987)