

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



**Département du Génie Electrique
Spécialité Automatique**

Projet de fin d'études

**Pour l'obtention du diplôme
D'Ingénieur d'Etat en Automatique**

THÈME

**Commande hybride des systèmes interconnectés :
Application à la gestion du trafic autoroutier**

Etudié par :

Proposé et dirigé par :

**DJOHOR Faris
CHENTIR Med Amokrane**

**Pr. D. BOUKHETALA
Pr. F. BOUDJEMA**

Juin 2009

*Laboratoire de Commande des Processus
Ecole Nationale Polytechnique, 10, AV. Hassen Badi, El-Harrach, Algérie*

Remerciements

Nous remercions vivement Pr. Boukhetala et Pr. Boudjema pour avoir proposé et dirigé ce sujet fort intéressant.

Nous tenons également à remercier l'ensemble de nos enseignants d'automatique et de sciences fondamentales qui, durant nos 5 années de formation, se sont dévoués pour nous délivrer une formation de qualité.

Enfin, nous remercions tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour la réalisation de ce projet

Dédicaces :

Je dédicace ce travail à mes parents, qui m'ont soutenu tout au long de mes études ; mon grand frère Ahmed ; mes grands parents maternels, ma grand-mère paternelle et mon grand père paternel, allah yerahmo, dont je porte fièrement le prénom.

Je dédicace ce travail également à mon assistante Word personnelle, Souad, sans toi ce rapport n'aurait certainement pas eu la même forme. Merci du fond du cœur !

Je dédicace enfin ce travail, à tous mes proches et ami, et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

Mohamed Amokrane Chentir

Dédicaces :

*A mes parents,
A mes grands parents.*

Faris Djohor

INTRODUCTION GENERALE.....	1
<u>Chapitre I :</u>	
GENERALITES SUR LES SYSTEMES INTERCONNECTES ET LA COMMANDE HYBRIDE	
I.1. Introduction.....	4
I.2. Systèmes interconnectés.....	4
I.2.1. Définition d'un système interconnecté.....	4
I.2.2.Types d'interconnexions.....	6
I.2.2.A. Interconnexions périodiques.....	6
I.2.2.B. Interconnexions infinis.....	6
I.3. Etude des systèmes hybrides.....	7
I.3.1. Introduction.....	7
I.3.2. Origine des systèmes hybrides.....	7
I.3.3. Justification de l'approche hybride pour la commande des systèmes interconnectés.....	8
I.3.4. Modélisation.....	9
I.3.4.1. Classification.....	9
I.3.4.1.A. Système à commutation autonome : système à hystérésis.....	9
I.3.4.1.B. Système à commutation commandée : un réservoir.....	10
I.3.4.1.C. Système à saut commandé : circuit RC.....	10
I.3.4.2. Les formalismes hybrides.....	11
I.3.4.2.A. L'automate hybride.....	11
I.3.4.2.B. Les réseaux de Pétri.....	12
I.3.4.2.C. Statecharts hybrides.....	16
I.3.4.2.D. Modèle affine par morceaux : PieceWise Affine (PWA).....	17
I.3.4.2.E. Modèle Mixed Logical Dynamical (MLD).....	17
I.3.5. Les types de commandes hybrides.....	18
I.3.5.2. Types de commande hybrides.....	18
I.3.5.2.A. Commande prédictive hybride.....	19
I.3.5.2.B. Commande basée sur la théorie des jeux.....	21
I.3.5.2.C. Commande optimale par le principe du maximum.....	21
I.3.5.2.D. Commande stabilisante des systèmes en commutation.....	22
I.3.5.2.E. Commande par supervision.....	22
I.3.5.2.F. Commande séquentielle.....	22
I.3.5.3. Répartition de la commande.....	22
I.3.5.3.1. Introduction.....	22
I.3.5.3.2. Système multi-agents.....	23
I.3.5.3.3. Approche centralisée et décentralisée.....	24

I.4. Recherche bibliographique étendue.....	25
I.5. Conclusion	26

Chapitre II :**APPLICATION : SYSTEME AUTOROUTIER AUTOMATIQUE (AHS)**

II.1. Introduction.....	29
II.2. Description du système.....	29
II.2.1. Fonctionnement d'un AHS.....	30
II.2.2. Système complètement automatisé.....	32
II.2.2.1. Le concept du peloton.....	32
II.2.2.2. Scénario de l'AHS.....	34
II.2.3. Architecture d'un AHS.....	35
II.2.3.1. Architecture générale.....	35
II.2.3.2. Couche de planification.....	39
II.2.3.2.1. Protocole de fusion.....	41
II.2.3.2.2. Protocole de séparation.....	42
II.2.3.2.3. Protocole de changement de voie.....	43
II.2.3.3. Couche de régulation.....	44
II.2.3.3.1. Lois de commande.....	45
II.2.3.3.1.1. Loi de commande de vitesse : rég_vitess.....	45
II.2.3.3.1.1.1. Introduction.....	45
II.2.3.3.1.1.2. Modélisation du système.....	45
II.2.3.3.1.1.3. Synthèse de la commande et résultats....	46
II.2.3.3.1.1.4. Discussion.....	48
II.2.3.3.1.1.5. Conclusion.....	48
II.2.3.3.1.2. Loi de commande en position : rég_pos.....	48
II.2.3.3.1.2.1. Introduction.....	48
II.2.3.3.1.2.2. Modélisation du système.....	49
II.2.3.3.1.2.3. Synthèse de la commande et résultats....	50
II.2.3.3.1.2.4. Discussion.....	52
II.2.3.3.1.2.5. Conclusion.....	56
II.2.3.3.1.3. Loi de commande latérale : rég_direction.....	56
II.2.3.3.1.3.1. Introduction.....	56
II.2.3.3.1.3.2. Modélisation du système.....	57
II.2.3.3.1.3.3. Synthèse de la commande et résultats....	60
II.2.3.3.1.3.4. Discussion.....	71
II.2.3.3.1.3.5. Conclusion.....	72
II.3. Conclusion.....	72

Chapitre III :**ASPECTS PRATIQUES D'UN SYSTEME AUTOROUTIER
AUTOMATIQUE**

III.1. Introduction.....	75
III.2. Les actionneurs.....	75
III.2.1. Système de freinage.....	75
III.2.2. Système d'accélération.....	76
III.2.3. Système de gouvernance.....	77
III.3. Systèmes de communication	78
III.3.1. Introduction.....	78
III.3.2. Les différents types de systèmes de communication	78
III.3.2.1. Rayonnement Infrarouge (IR).....	78
III.3.2.2. Les Micro-Ondes.....	79
III.3.2.3. Les ondes radio.....	79
III.3.2.4. Dedicated Short Range Communication (DCRS).....	80
III.4. Les dispositifs de mesure.....	80
III.4.1. Introduction.....	80
III.4.2. Les capteurs.....	81
III.4.2.1. Le télémètre Laser.....	81
III.4.2.2. Le capteur à ultrasons.....	82
III.4.2.3. Le système Radar.....	82
III.4.2.4. L'accéléromètre.....	83
III.4.2.5. Le gyroscope et gyromètre.....	84
III.4.2.6. Les systèmes de vision.....	84
III.4.2.7. Global Positionning System (GPS).....	85
III.4.3. Les dispositifs d'aide à la décision.....	87
III.4.3.1. Détecteur de pluie et de neige.....	87
III.4.3.2. Détecteur de verglas.....	88
III.4.3.3. Détecteur de visibilité.....	88
III.5. Réalisabilité d'un AHS et tests sur le terrain.....	88
III.6. Conclusion.....	90

Chapitre IV :**PRESENTATION DE AHSIMULATOR : NOTRE LOGICIEL DE SIMULATION DE L’AHS**

IV.1.Introduction.....	92
IV.2. Objectifs et cahiers des charges.....	92
IV.3. Technologies et langage utilisés.....	93
IV.3.1. Partie métier : C++ et STL.....	93
IV.3.2. Partie graphique : L’ API OpenGL.....	93
IV.4. Architecture du logiciel.....	94
IV.4.1. L’approche multi-tâche.....	94
IV.4.2. Diagrammes de classes (UML).....	96
IV.4.3. Modélisation des éléments du système.....	97
IV.5. Fonctionnement de la simulation.....	97
IV.5.1. Fichiers de configuration.....	97
IV.5.1.1. Présentation de l’eXtended Markup Language (XML).....	97
IV.5.1.2. Configuration du système.....	98
IV.5.1.3. Configuration de l’ autoroute.....	98
IV.5.1.4. Configuration de la couche « Lien ».....	98
IV.5.2. Tests et observations.....	98
IV.6. Projets similaires.....	99
IV.7. Conclusion et perspectives.....	100
CONCLUSION GENERALE.....	101
BIBLIOGRAPHIE	

Liste des tableaux

Tableau-1.1 : <u>Avantages et inconvénients des approches centralisées et décentralisées</u>	25
Tableau-2.1 : <u>Décisions des conducteurs et fonctions du AHS</u>	31
Tableau-2.2 : <u>Flux de véhicules atteint en fonction du nombre de véhicule par peloton</u>	33
Tableau-2.3 : <u>Organisation de la couche de planification</u>	40
Tableau-2.4 : <u>Variables et symboles pour le modèle simplifié</u>	57
Tableau-2.5 : <u>Paramètres liés au modèle de commande latérale</u>	69
Tableau-3.1 : <u>Paramètres de freinage de certains types de véhicule</u>	76
Tableau-4.1 : <u>Paramètres de simulation</u>	99

Liste des figures

Figure-1.1 : <u>Représentation schématique d'un système interconnecté</u>	05
Figure-1.2 : <u>Bloc à une dimension</u>	05
Figure-1.3 : <u>Interconnexion périodique, $N=20$</u>	06
Figure-1.4 : <u>Interconnexion finie</u>	06
Figure-1.5 : <u>Systèmes hybrides</u>	08
Figure-1.6 : <u>Fonction hystérésis</u>	09
Figure-1.7 : <u>L'automate discret de l'hystérésis</u>	09
Figure-1.8 : <u>Réservoir</u>	10
Figure-1.9 : <u>Circuit RC parallèle</u>	10
Figure-1.10 : <u>Saut commandé de la tension V</u>	10
Figure-1.11 : <u>Thermostat modélisé sous forme d'un Automate Hybride</u>	12
Figure-1.12 : <u>Exemple de réseau de Pétri</u>	13
Figure-1.13 : <u>Réseau de Pétri hybride</u>	15

Figure-1.14 : <u>Statechart d'un traitement thermique</u>	16
Figure-1.15 : <u>Modèle de représentation</u>	18
Figure-1.16 : <u>Principe de la commande prédictive</u>	20
Figure-1.17 : <u>Structure du contrôleur prédictif</u>	21
Figure-1.18 : <u>Objectif de l'optimisation : minimiser la surface grisée</u>	21
Figure-1.19 : <u>Un groupe d'agents et leurs interactions dans un SMA à tableau noir</u>	24
Figure-2.1 : <u>Le concept du peloton</u>	33
Figure-2.2 : <u>Un itinéraire est une succession de segment</u>	35
Figure-2.3 : <u>Changement de voie</u>	35
Figure-2.4 : <u>Architecture du AHS</u>	36
Figure-2.5 : <u>Fusion (merge), Séparation (split) et Changement de voie (lane change)</u>	38
Figure-2.6 : <u>Détection frontale, latérale et arrière</u>	43
Figure-2.7 : <u>Organigramme de la fusion</u>	Annexe
Figure-2.7b : <u>Schéma du modèle de véhicule</u>	46
Figure-2.8 : <u>Schéma de commande en vitesse</u>	47
Figure-2.9 : <u>Un véhicule suiveur demande une manœuvre de séparation</u>	Annexe
Figure-2.10 : <u>Organiqramme du changement de voie</u>	Annexe
Figure-2.10b : <u>Schéma de simulation de commande en position pour un peloton de 20 véhicules</u>	Annexe
Figure-2.16 : <u>Résultat de simulation de la régulation de vitesse</u>	48
Figure-2.17 : <u>Schéma représentatif des véhicules sur la même voie d'autoroute</u>	49
Figure-2.18 : <u>Schéma de commande pour la commande en position</u>	51
Figure-2.19 : <u>Distance entre les deux véhicules</u>	51
Figure-2.20 : <u>Accélération du véhicule A</u>	52
Figure-2.21 : <u>Vitesse du véhicule A</u>	52
Figure-2.22 : <u>Distance entre A et B si B décélère à -0.6 m/s^2 pendant 1 seconde</u>	53
Figure-2.23 : <u>Distance entre les 2 premiers véhicules du peloton</u>	53
Figure-2.24 : <u>Distance entre le 14^{ème} et le 15^{ème} véhicule du peloton</u>	54
Figure-2.25 : <u>Distance entre le 1^{er} et le 2^{ème} véhicule</u>	54

Figure-2.26 : <u>Distance entre le 2^{ème} et le 3^{ème} véhicule</u>	55
Figure-2.27 : <u>Boucle FOR permettant l'appel à la commande en position de manière séquentielle</u>	55
Figure-2.28 : <u>Répartition de la masse du véhicule</u>	58
Figure-2.29 : <u>Schéma bloc du système reformulé</u>	59
Figure-2.31 : <u>Modèle de route lissé</u>	60
Figure-2.32 : <u>Schéma de commande pour la commande latérale</u>	69
Figure-2.33 : <u>Scénario de simulation utilisé</u>	69
Figure-2.34 : <u>Ecart latéral entre l'axe du véhicule et l'axe de la route</u>	70
Figure-2.35 : <u>Angle d'embarquée du véhicule</u>	70
Figure-2.36 : <u>Vitesse d'embarquée du véhicule</u>	71
Figure-2.37 : <u>Angle de direction des roues avant du véhicule</u>	71
Figure-2.38 : <u>Les trois scénarios de changement de voie</u>	Annexe
Figure-2.39 : <u>Structure du régulateur Hybride</u>	Annexe
Figure-3.1 : <u>Schéma d'un ETC</u>	77
Figure-3.2 : <u>Schéma synoptique du calculateur D.E.A.</u>	77
Figure-3.3 : <u>Emetteur-récepteur infrarouge</u>	79
Figure-3.4 : <u>Antenne ondes radio</u>	79
Figure-3.5 : <u>Différentes communications via le DCRS</u>	80
Figure-3.6 : <u>Télémètre laser à balayage installé sur un véhicule</u>	81
Figure-3.7 : <u>Capteur à ultrasons</u>	82
Figure-3.8 : <u>Radars installé sur un véhicule</u>	83
Figure-3.9 : <u>Accéléromètre</u>	84
Figure-3.10 : <u>Exemple de gyroscopes</u>	84
Figure-3.11 : <u>Exemple de caméra embarquée sur un véhicule</u>	85
Figure-3.12 : <u>Schéma de principe d'un GPS</u>	86
Figure-3.13 : <u>Détection de pluie/neige par radar</u>	87
Figure-3.14 : <u>Peloton de voiture sur une autoroute dans le cadre d'un AHS</u>	89
Figure-4.1 : <u>Cycle de fonctionnement de la simulation</u>	95

Figure-4.2 : Fonctionnement du processus de supervision.....95

Figure-4.3 : Diagrammes de classes de fonctionnement.....Annexe

Figure-4.4 : Diagrammes de classes métier.....Annexe

Figure-4.5 : Diagramme de la classe Vehicule.....Annexe

Figure-4.6 : Diagrammes de classes de la couche de configuration.....Annexe

Figure-4.7 : Changement de voie en début de simulationAnnexe

Figure-4.8 : Première fusion et formation du premier peloton.....Annexe

Figure-4.9 : Formation d'un deuxième pelotonAnnexe

Liste des abréviations

IDCOM: Identification-COMmand

PFC: Predictive Functionnal Control

MPC: Model Predictive Control

GPC: Generalized Predictive Control

CARMA : Control AutoRegressive Moving Average

IA: Intelligence Artificielle

CORBA: Common Objet Request Broker Architecture

AHS: Automated Highway System

EPP: European Prometheus Program

PM: Path Monitor

FDN: Fonction Définie Négative

FDP: Fonction Définie Positive

ABS: Anti Blockier System

ETC: Electronic Throttle Control

TPS: Throttle Position Sensor

ECU: Electronic Control Unit

DAE: Direction Assistée Electrique

IR: Infrarouge

LED: Light-Emitting Diode

DCRS: Dedicated Short Range Communications

GPS: Global Positioning System

NAHSC: National Automated Highway System Consortium

STL: Standard Template Library

OpenGL: Open Graphics Library

GLFW: Graphics Library Framework

INTRODUCTION GENERALE :

Le contrôle des systèmes dynamiques interconnectés, ou systèmes distribués à grande échelle, est l'un des plus gros défis auxquels les automaticiens sont confrontés de nos jours. Ces systèmes sont fréquemment rencontrés dans certaines applications comme le contrôle des processus chimiques, de la génération et distribution de l'énergie électrique, du trafic routier et aérien. L'un des challenges les plus importants à résoudre dans le cadre des systèmes interconnectés est celui de la gestion dite multi-agents des ressources rares, dans lequel un grand nombre d'agents équipés de moyens de communication et de contrôle doivent exploiter une ou plusieurs ressources données d'une manière efficace ou optimale. La taille et la complexité de ces systèmes rend leur étude particulièrement difficile par l'utilisation des méthodes classiques du domaine de l'automatique. Afin de pouvoir composer avec la complexité de ces systèmes, il est préférable d'adopter une approche hybride, c'est-à-dire une approche qui prend en compte à la fois des dynamiques discrètes et continues du système.

Par réciproque, l'intérêt de coupler la théorie des systèmes hybrides à l'étude des systèmes interconnectés est poussé par l'ampleur des enjeux économiques et environnementaux auquel le monde fait face actuellement. En effet, la majorité des systèmes interconnectés de part leur nature de distribution à grande échelle sont souvent associés à la problématique d'optimisation. C'est le cas des réseaux de trafic urbain, où il faut optimiser l'espace routier disponible ainsi que les temps de déplacement de l'ensemble des véhicules, ou des réseaux de trafic aérien où il faut cette fois ci, optimiser l'espace aérien disponible ainsi que les temps de vols de ces avions là. L'enjeu environnemental est évident, étant donné qu'un temps de voyage réduit de la part d'un véhicule ou d'un avion impliquera un rejet moindre des gaz à effets de serre, principale cause du réchauffement planétaire. Cette étude est donc à l'intersection de deux sujets importants et effervescents qui sont : les systèmes hybrides et les systèmes interconnectés.

Notre travail est divisé en quatre parties distinctes.

La première partie, consiste à jeter les notions de bases des systèmes hybrides d'un côté et des systèmes interconnectés de l'autre. Ensuite, le couplage entre les deux systèmes sera discuté notamment en introduisant quelques notions importantes comme les degrés de centralisation et de décentralisation accordés lors de la modélisation du problème. Nous terminons cette partie, en citant plusieurs sources bibliographiques qui traitent de la question.

La deuxième partie, introduit l'application choisie dans le cadre de notre étude, à savoir les systèmes autoroutiers automatiques dont les premiers principes et résultats ont été trouvés au sein de l'Université de Berkeley, en Californie (Etats Unis). Le but ultime de ce système, est de pouvoir automatiser l'ensemble des véhicules sur une autoroute tout en assurant la sécurité et le confort des passagers. L'automatisation des véhicules est faite de telle manière à

optimiser l'espace urbain disponible. Dans cette partie, nous décrivons chaque couche de l'architecture du système, notamment celles de planification et de régulation qui sont les deux plus importantes couches du système. La régulation des véhicules est donc abondamment abordée, en vue d'une automatisation totale nécessitant : La commande en position, en vitesse et latérale des véhicules.

La troisième partie, aborde quant à elle la couche matérielle devant être utilisée en vue d'assurer la réalisation de l'architecture proposée. Capteurs, systèmes de mesure ou d'aide à la décision y sont décrits. Cette partie mentionne également la réalisation effectuée aux Etats Unis (Santa Diego) en 1997 par le « National Automated Highway System Consortium (NAHSC) » et cite également les raisons pour lesquelles ce genre de scénarii pourraient devenir une réalité.

Enfin, la quatrième partie de notre étude, consiste en l'élaboration d'un prototype de simulation pour les systèmes autoroutiers automatiques. L'objectif sur le court terme est de pouvoir visualiser graphiquement le comportement des véhicules soumis à cette automatisation en fonction des paramètres injectés en entrée de chacune des couches de l'architecture décrite. Mais l'intérêt de ce logiciel s'inscrit sur le long terme, où son évolution pourrait donner lieu à une plateforme de simulation complète intégrant non seulement une autoroute mais un réseau d'autoroutes interconnectées et donc d'un réseau de trafic urbain. C'est pourquoi une approche orientée objet est considérée, permettant d'ajouter des briques aisément par la suite.

Ce travail est ensuite clôturé par une conclusion rappelant les principaux résultats obtenus et faisant apparaître les perspectives en matière de réalisation et d'études pour l'application proposée.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes interconnectés et la
commande hybride

I.1. Introduction :

Les systèmes hybrides sont des systèmes dont l'évolution est régie par deux événements, l'un continu et l'autre discret.

Les systèmes à événements discrets sont caractérisés par un nombre fini d'état, leur modélisation est obtenue par l'utilisation de méthodes états-transitions : graphes d'état, réseaux de Pétri, Grafcet. Les systèmes continus sont quant à eux caractérisés par une mesure pouvant prendre une infinité de valeurs : température d'une pièce, vitesse d'un mobile, niveau d'un réservoir etc. La gestion de ces systèmes se fait via l'utilisation d'outils mathématiques aptes à la représentation de la dynamique continue, principalement les équations différentielles et équations d'état.

Toutes fois cette séparation des systèmes en deux catégories, présente certaines failles. En effet elle ne permet pas l'étude des systèmes intégrant les deux types d'événements (exemple : les distributeurs et électrovannes proportionnels). De plus les problèmes étudiés en ingénierie de l'automatique, se sont avérés être de plus en plus complexes mettant en interaction un nombre astronomique de grandeurs. Ces systèmes sont très souvent déployés à grande échelle, et sont composés de plusieurs sous systèmes à dynamique continue, interconnectés. Il est alors nécessaire de commuter entre chacune des entités composant ce système complexe.

De là est né le besoin de recourir à une nouvelle classe de systèmes, dits « systèmes hybrides » dont l'évolution est régie par l'association des deux dynamiques : discrète et continue. Ce besoin est d'autant plus grand, que l'outil informatique massivement utilisé dans l'industrie est à même capable de résoudre les différentes problématiques qui en découle. Il n'existe malheureusement pas une théorie permettant l'étude globale de tels systèmes, mais plutôt plusieurs approches basées sur l'extension de résultats obtenus dans les théories continues et discrètes.

On étudiera donc succinctement au cours de ce chapitre, les différentes méthodes permettant la modélisation et la commande des systèmes hybrides en nous concentrant plus spécifiquement sur leurs applications dans le cadre des systèmes interconnectés.

I.2. Systèmes interconnectés :

I.2.1. Définition d'un système interconnecté :

Les systèmes interconnectés sont également appelés : « Systèmes distribués à grande échelle », et peuvent être décomposés en plusieurs sous systèmes. Ces sous systèmes, sont des unités similaires pouvant communiquer chacune d'elle avec leur voisin le plus proche. Nous pouvons citer plusieurs exemples comme : les systèmes de réseaux urbains, les systèmes de trafic aérien, les réseaux électriques, les réseaux de constellations satellitaires etc.

Une schématisation générale d'un système interconnecté est donnée par la figure-1.1.

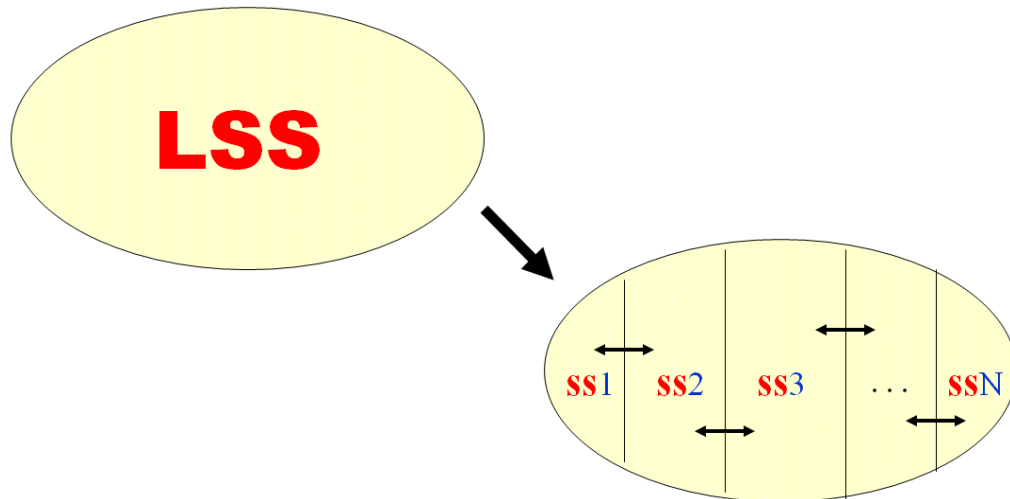


Figure-1.1 : Représentation schématique d'un système interconnecté

Soit le diagramme de la figure-1.2, qui consiste en un système à dimension finie, linéaire et invariant dans le temps gouverné.

Les entrées du système sont d et les sorties du système sont : z . v et w peuvent être considérées comme étant des variables internes du système.

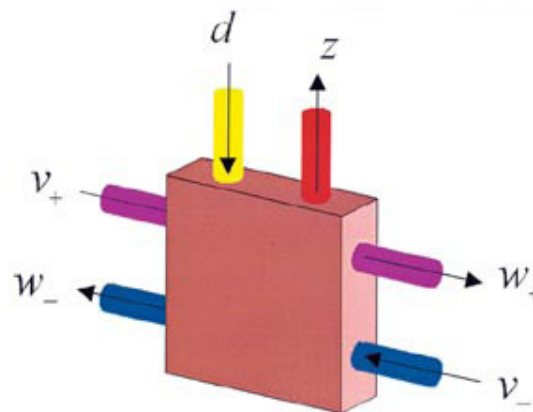


Figure-1.2 : Bloc à une dimension

Ce système est défini par les équations d'états suivantes : $1 \leq s \leq N-1$

$$\begin{pmatrix} \dot{v}(t,s) \\ \dot{w}(t,s) \\ \dot{z}(t,s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{TT} & A_{TS} & B_T \\ A_{ST} & A_{SS} & B_S \\ C_T & C_S & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v(t,s) \\ w(t,s) \\ d(t,s) \end{pmatrix}$$

$$v(t,s) = \begin{pmatrix} v_+(t,s) \\ v_-(t,s) \end{pmatrix} w(t,s) = \begin{pmatrix} w_+(t,s) \\ w_-(t,s) \end{pmatrix}$$

On suppose, que $v_+(t,s)$ et $w_+(t,s)$ d'une part et $v_-(t,s)$ $w_-(t,s)$ d'autre part, ont la même taille. On distingue ensuite, deux types d'interconnexions basées sur des copies identiques de chaque unité, soit le nombre de sous systèmes égal à N.

I.2.2.Types d'interconnexions :

I.2.2.1. Interconnexion périodique :

Une interconnexion périodique est définie comme suit :

$$\begin{aligned} v_+(s+1) &= w_+(s), & v_+(s=1) &= w_+(s=N) \\ v_-(s-1) &= w_-(s), & v_-(s=N) &= w_-(s=1) \end{aligned}$$

Un exemple d'interconnexion, avec $N=20$ est montré sur la figure-2.3.

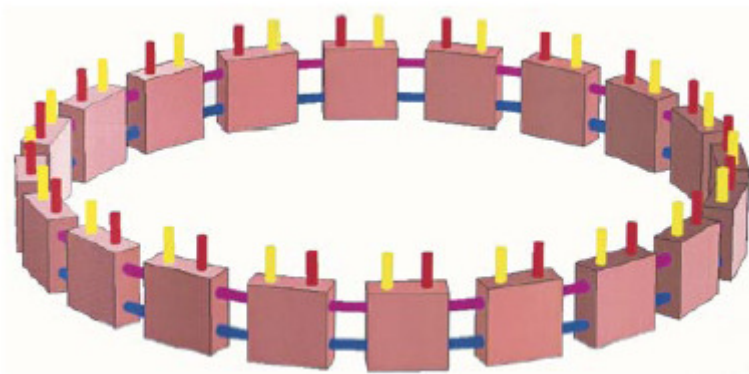


Figure-1.3 : Interconnexion périodique, N=20.

I.2.2.2. Interconnexion infinie :

Considérons un nombre infini de sous systèmes, interconnectés de la manière représentée sur la figure 2.4.

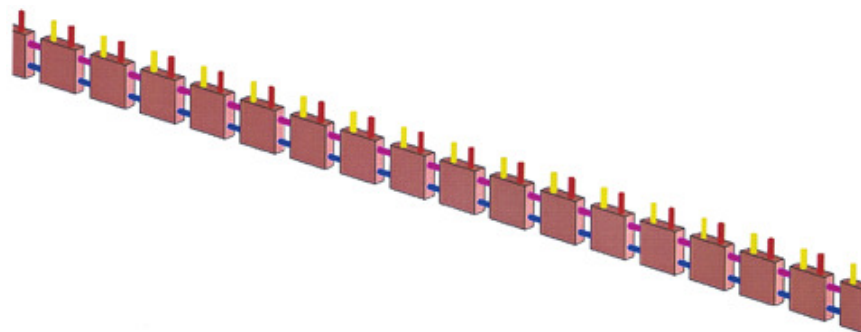


Figure-1.4 : Interconnexion infinie

Les interconnexions sont représentées par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} v_+(s+1) &= w_+(s) \\ v_-(s-1) &= w_-(s) \end{aligned}$$

Ce type d'interconnexion, est pratiquement similaire à celui décrit dans [1], une approximation infinie devrait être suffisante lorsque l'on travaille avec un très grand nombre de sous systèmes.

D'une manière générale, un système interconnecté est associé à 3 éléments importants : La décomposition, la centralisation et la complexité. Ce sont ces 3 éléments qui seront le plus souvent discutés tout au long de ce chapitre.

I.3. Etude des systèmes hybrides:

I.3.1. Introduction :

Au cours de ce chapitre les systèmes hybrides sont étudiés, en présentant succinctement les problématiques desquelles la notion de systèmes hybrides tient ses origines, puis en donnant quelques exemples, pour ensuite justifier l'approche hybride pour la commande des systèmes interconnectés. On terminera par une classification et une présentation des différents formalismes et commandes associées.

I.3.2. Origine des systèmes hybrides :

L'automatique s'intéresse à la manipulation des variables d'un système afin d'atteindre un objectif qui peut être formulé en terme de stabilité, robustesse, etc. La plupart des méthodologies et techniques d'automatique ont été développées pour des systèmes dont l'évolution peut être modélisée par des équations différentielles (à temps continu), ou des équations aux différences (à temps discret ou échantillonné) linéaires ou non linéaires.

Toutefois, cette classification ne correspond pas souvent à la réalité où le système à analyser ou à commander comporte la plupart des fois des variables prenant leurs valeurs dans les ensembles continus et d'autres dans les ensembles discrets, on parle alors de **systèmes hybrides**. A titre d'exemple nous pouvons citer les systèmes associant des événements de type Marche/Arrêt et des dynamiques continues comme les vannes, les interrupteurs et les sélecteurs de positions.

Généralement, un système hybride résulte très souvent d'un démarrage, reconfiguration et arrêt par une commande logique à états discrets (ordinateur, automate programmable). En effet l'étude des systèmes à variables discrètes est liée aux domaines de l'informatique et de la logique, tandis que l'étude des systèmes à variables continues est liée à la théorie des systèmes et à l'automatique. Les systèmes hybrides sont donc la résultante de la fusion de ces deux domaines (cf *figure-1.5*)

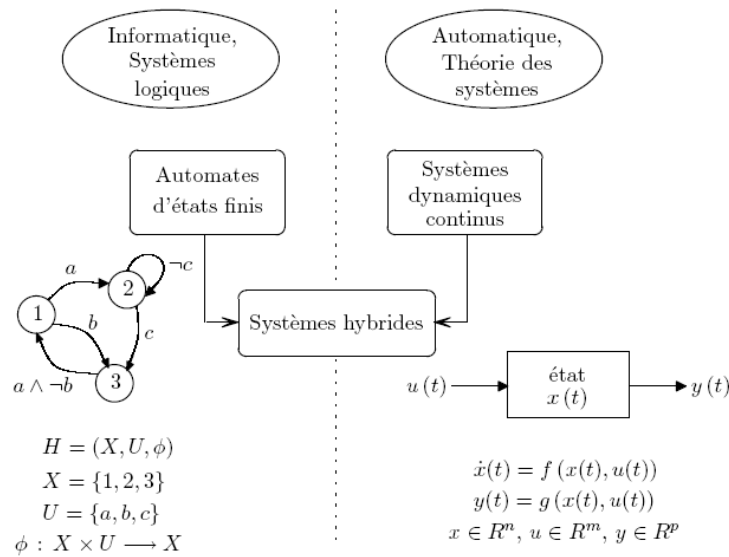


Figure-1.5 : Systèmes hybrides

Cette rencontre entre ces deux domaines majeurs, a placé l'étude des systèmes hybrides au cœur de l'intérêt de la communauté scientifique, en atteste les sessions accordées à ce domaine aux différents congrès internationaux en automatique. Les domaines voisins à l'automatique y portent également une attention particulière, on peut citer l'électrotechnique où un certain nombre d'applications sont le siège de phénomènes relevant des systèmes hybrides (ex : commande hybride des convertisseurs multi cellulaires). Il est à noter également, la naissance récente de conférences exclusivement réservées aux systèmes hybrides comme le « Hybrid Systems : Computation and Control (HSCC) », dont l'édition 2009 s'est tenue à San Francisco entre le 13 et 15 avril [2].

La quantité appréciable d'informations sur le sujet, témoigne également de l'intérêt qui en est porté par la communauté scientifique.

I.3.3. Justification de l'approche hybride pour la commande des systèmes interconnectés :

La commande des systèmes interconnectés peut être effectuée de différentes manières, toutes fois l'approche hybride est la plus justifiée car la dynamique de chaque agent est modélisée par des équations différentielles continues, nous obtenons une combinaison entre une dynamique à événements discrets et continus, de plus :

- Elle permet de réduire la complexité du système, grâce à l'incorporation de modèles dynamiques ayant différents niveaux d'abstraction. Ainsi, au lieu de travailler avec des systèmes d'équations non linéaires, l'approche hybride nous permet de subdiviser les systèmes en plusieurs parties linéaires et de commuter entre ces parties.
- Elle permet d'être en phase avec les outils de simulation actuels (les ordinateurs, dont leurs processeurs sont à événements discrets qui interagissent avec le monde physique à événements continus).

- Elle permet une approche hiérarchique (ou superviseur) lors de la modélisation et contrôle du système, cette approche est déterminante en vue de la résolution d'un grand nombre de problématiques induites par les systèmes complexes à grande échelle.

I.3.4. Modélisation :

I.3.4.1. Classification :

Un modèle est une traduction de la réalité pour pouvoir lui appliquer les outils, les techniques et les théories issues de l'automatique en vue de l'analyse et la commande d'un système réel. Cette modélisation doit tenir compte du sens physique et de la causalité des interactions, qui sont issues dans le cas de systèmes hybrides, de l'interdépendance d'éléments dynamiques continus et discrets.

Il n'y a pas de théorie universelle permettant de formaliser un modèle hybride, mais une multitude de formalismes dépendant de l'application qui ont été élaborés par de nombreux scientifiques. La première formulation a été proposée par Branicky [3]. Cette formulation, consiste à considérer un système hybride avec un état continu $x(t)$ et à passer d'un état discret à l'autre par commutation ou saut. La différence est que le saut implique la transition à la fois de la vitesse et de l'état, tandis que la commutation est concernée par la transition de l'état seulement.

Le saut, implique donc une discontinuité de l'état $x(t)$ au changement d'état discret. Ce dernier pouvant se produire de façon contrôlée ou autonome (ie : Avec ou sans action externe sur le système). Les commutations/sauts autonomes surviennent lorsque l'état continu atteint une hyper surface spécifique dans l'espace d'état continu.

Prenons un exemple de chaque, afin d'illustrer cette classification.

I.3.4.1.A. Système à commutation autonome : Système à hystérésis

Soit le système représenté par l'équation : $x_p(t) = H(x(t))$, avec H une fonction hystérésis décrite par la figure-1.6 où a et h sont deux constantes positives. A travers l'étude de cette fonction, on peut conclure que la présence de l'hystérésis induit des commutations autonomes, et le comportement séquentiel du système ne peut pas être modélisé par une équation différentielle ordinaire mais peut l'être simplement par un automate à deux états comme le montre la figure-1.7.

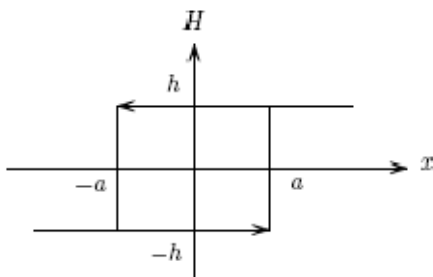


Figure-1.6: fonction hystérésis

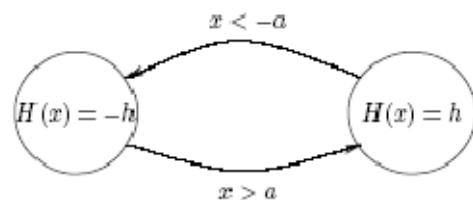


Figure-1.7 : L'automate discret de l'hystérésis

I.3.4.1.B. Système à commutation commandé : Un réservoir

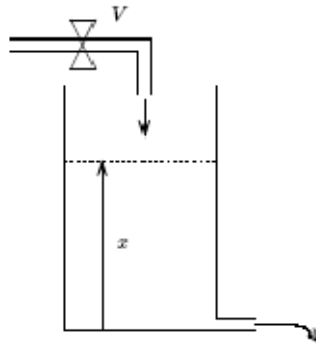


Figure-1.8 : Réservoir

Le réservoir de la figure-1.8 est équipé d'une vanne d'alimentation V et d'un orifice d'évacuation. Soit l'état $x(t)$ qui représente le niveau du liquide dans ce réservoir et $u(t)$ le signal de commande discret qui ouvre/ferme la vanne d'alimentation.

L'équation d'état du modèle s'écrit alors : $\dot{X}_p = -a * x + b * u$.

Avec a et b , des constantes positives liées aux grandeurs physiques du réservoir.

La dérivée de l'état passe de $(-a * x)$ à $(-a * x + b)$, respectivement, lorsque u passe de $u = 0$ (vanne fermée) à $u = 1$ (vanne ouverte). Dans ce cas là, la commutation est bien commandée.

I.3.4.1.C. Système à saut commandé : Circuit RC

Considérons le circuit RC parallèle de la figure-1.9.

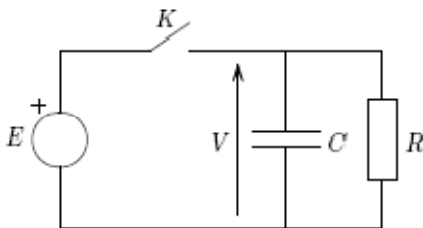


Figure-1.9 : Circuit RC parallèle

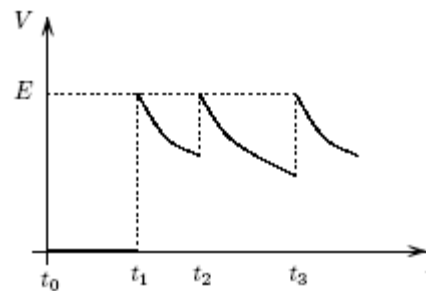


Figure-1.10: Saut commandé de la tension V

Une source de tension continue, E alimente une capacité C , qui est branchée en parallèle avec une résistance R . Un interrupteur K est placé en série avec la source d'alimentation afin d'ouvrir et fermer le circuit.

Le concept énoncé ici, est celui de la charge et décharge d'un condensateur. Supposons qu'à t_0 , la capacité soit déchargée et l'interrupteur K ouvert. A t_1 , on ferme K brièvement, provoquant la charge instantanée de la capacité C . Cette même capacité va se décharger dans la résistance R jusqu'à t_2 où la même action sur K est effectuée et ainsi de suite. Ainsi on

obtient des sauts commandés par l'interrupteur K , sur la tension V , qu'on peut vérifier sur la courbe suivante de la figure-1.10.

I.3.4.2. Les formalismes hybrides :

Les travaux de recherche concernant les systèmes hybrides ont abouti à différents formalismes mais pas à un formalisme unifié. L'ensemble de ces formalismes sont construits autour des principes suivants :

- Étendre les approches continues pour intégrer le comportement discret (cas des bond-graphs à commutation par exemple) ou étendre des approches discrètes classiques pour inclure du comportement continu (cas des réseaux de Pétri hybrides).
- Combiner les approches discrètes et continues dans une même représentation (automates hybrides, statecharts hybrides, grafcet hybride), la structuration se faisant à partir du discret, dans la plupart des problèmes industriels.

Nous allons décrire brièvement les formalismes les plus répandus en nous focalisant sur ceux dont leurs applications sur la modélisation des systèmes interconnectés est possible.

I.3.4.2.A. L'automate hybride :

Les automates hybrides ont été introduits dans l'étude des systèmes hybrides dans le début des années 90. Ils sont principalement utilisés pour modéliser des systèmes hybrides, dont l'association continue/discrète vient de l'interaction entre l'ordinateur et le système continu en temps réel.

Ils consistent en des automates d'état finis pour lesquels une dynamique continue est associée à chaque état discret. Chaque transition entre deux états discrets est constituée d'une condition de transition et d'une relation de saut. Ainsi à chaque instant, l'état de l'automate est donné par l'état discret et l'état continu. La trajectoire de l'automate évolue donc par transitions instantanées entre états discrets, et dans chaque état discret l'état continu évolue suivant la dynamique continue associée. Concrètement, un système hybride est formalisée par le 6-uplet (V, X, L, E, A, I) tel que:

- 1- V ensemble fini de nœuds (états discrets).
- 2- X ensemble fini de variables réelles.
- 3- L ensemble fini d'actions de synchronisation, avec τ , appartenant à L et représentant l'action silencieuse.
- 4- E ensemble fini d'arcs de la forme (v, a, P, R, v') , avec :
 - i. $v, v' \in V$ les nœuds source et destination.
 - ii. $a \in L$ une action de synchronisation.
 - iii. P un ensemble de gardes (prédicats sur X).
 - iv. $R : R^{|X|} \rightarrow R^{|X|}$ un ensemble d'affectations (réinitialisation de variables de X)
- 5- A fonction qui associe à chaque nœud et chaque variable continue un ensemble activité :

$$A : V \times X \rightarrow \sigma(R^+ \rightarrow R).$$
- 6- I , ensemble fini d'invariants (prédicats sur X associés aux nœuds).

L'état de l'automate évolue alors de deux manières différentes, soit par transition entre deux états discrets (*event driven dynamics*) avec réinitialisation éventuelle des variables continues, soit par la progression du temps, c'est-à-dire l'évolution temporelle des variables continues (*time driven dynamics*).

Illustrons ce formalisme sur un exemple simple, qui est le thermostat de la figure-1.11.

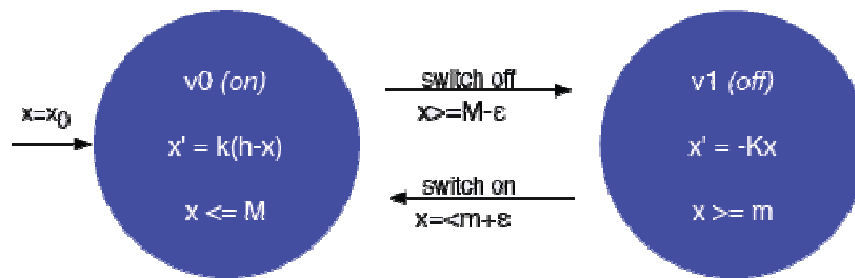


Figure-1.11 : Thermostat modélisé sous forme d'un Automate Hybride

Dans cet exemple, l'automate hybride est défini par :

- $V = \{v_0, v_1\}$ états discrets : selon que le thermostat soit On ou Off.
- $X = \{x\}$, variable représentant la température.
- $L = \{switch_on, switch_off\}$, qui représente les actions de synchronisations.
- $E = \{e_0, e_1\}$ avec $e_0 = (v_0, switch_off, x \geq M - \epsilon, I, v_1)$ et $e_1 = (v_1, switch_on, x \leq m + \epsilon, I, v_0)$.
- $A : (v_0, x) \rightarrow \{x_p = k(h - x)\}$ et $A : (v_1, x) \rightarrow \{x_p = -k * x\}$.
- $I(v_0) = x \leq M$ et $I(v_1) = x \geq m$.

Ajoutons à cela les définitions suivantes : Prédicats, gardes et invariants.

1/ Les prédicats utilisés sont des relations entre les variables continues (relations sur $\mathbb{R}^{|X|} \times \mathbb{R}^{|X|}$).

Dans notre cas les prédicats sont : $x' = K * (h - x)$ et $x' = -K * x$.

2/ L'invariant d'un nœud v : condition devant toujours être satisfaite lorsque l'on se trouve dans v .

3/ Garde (d'un arc) : condition nécessaire pour effectuer une transition.

Exemples : la garde $(x \geq M - \epsilon)$ et l'invariant $x \leq M$ dans le cas du thermostat.

I.3.4.2.B. Les réseaux de Pétri :

Le réseau de Pétri est un outil graphique et mathématique qui s'applique à un grand nombre de domaines où les notions d'événements et d'évolutions simultanées sont importantes. C'est une théorie relativement récente, proposée par Carl Adam Pétri et son groupe entre 1968 et 1976 au Massachusetts Institute of Technology (MIT).

Il existe différents types de réseaux de Pétri, synchronisés, temporisés, stochastiques, continus, colorés, hybrides et les réseaux de Pétri à Prédicats Transitions Différentiels.

Les réseaux de Pétri sont couramment utilisés pour modéliser des systèmes à événements discrets (systèmes logiques, systèmes de communication, systèmes industriels), leurs extension récente en : réseaux de Pétri continus, ont permis d'envisager des réseaux de Pétri hybrides, composés d'une partie discrète et d'une partie continue.

Un réseau de Pétri est en fait un graphe orienté ayant deux types de noeuds : des places représentées par des cercles, et des transitions représentées par des rectangles. Les arcs du graphe ne peuvent relier que des places vers des transitions, ou des transitions vers des places (pas d'arcs entre places ni entre transitions).

Un réseau de Pétri est un graphe muni d'une sémantique opérationnelle, c'est à dire qu'un comportement est associé au graphe, ce qui permet de décrire la dynamique du système représenté. Pour cela un troisième élément est ajouté aux places et aux transitions : les jetons.

Les places permettent la description des états discrets et les transitions permettent la description des événements (changements d'état).

Une répartition des jetons dans les places à un instant donné est appelée le marquage du réseau de Pétri. Un marquage donne l'état du système. Le nombre de jetons contenus dans une place est un entier positif ou nul. Il ne peut être négatif.

Pour un marquage donné, une transition peut être sensibilisée ou non. Une transition est sensibilisée si chacun de ses places d'entrée contient au moins un jeton. L'ensemble des transitions sensibilisées pour un marquage donné définit l'ensemble des changements d'états possibles du système depuis l'état correspondant à ce marquage. C'est un moyen de définir l'ensemble des événements auxquels ce système est réceptif dans cet état.

Quand une transition est sensibilisée, elle peut être franchie. Le franchissement d'une transition se fait en enlevant un jeton à chacune des places d'entrée de la transition et en ajoutant un jeton à chacune des places de sortie de cette même transition. Le franchissement d'une transition décrit le changement d'état du système à événements discrets lors de l'occurrence de l'événement associé à la transition.

Un exemple d'un réseau de Pétri est donné à la figure-1.12.

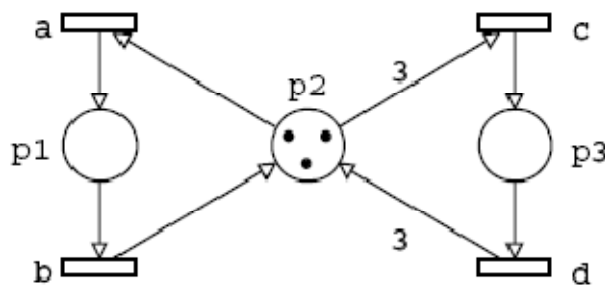


Figure-1.12 : Exemple de réseau de Pétri

Ainsi concrètement un réseau de Pétri est défini par un quadruplet : $R = \langle P, T, Pre, Post \rangle$, où :

- P : est un ensemble fini de places.
- T : est un ensemble fini de transitions.
- $Pre : P \times T \rightarrow N$ est l'application places précédentes,
- $Post : P \times T \rightarrow N$ est l'application places suivantes.

On utilise également la notation :

$$C = Post - Pre$$

Avec C : Matrice d'incidence du réseau de Pétri.

Nous pouvons définir également, un **réseau marqué** par le couple : $N = \langle R, M \rangle$ où :

- R : réseau de Pétri.
- M est le marquage initial, c'est une application $M : P \rightarrow N$
 $M(p)$ est le nombre de marques (jetons, tokens) contenus dans la place p .

A titre d'exemple, considérons le réseau de Petri de la figure-1.12. Il est formé de 3 places $\{p_1, p_2, p_3\}$ et de 4 transitions $\{a, b, c, d\}$, formant des boucles élémentaires.

Le marquage initial est défini par la répartition suivante :

- 3 jetons dans la place p_2 .
- Aucun jeton dans les places p_1 et p_3 .

Ce marquage définit l'état initial du système.

Sur ce réseau, seuls les transitions a et c sont sensibilisés. Ces deux transitions sont donc les seules à être franchissables.

Les réseaux de Pétri continus (RdPC) ont été introduits à cause de la difficulté que soulève l'exploitation des réseaux de Pétri, due à l'augmentation rapide de la complexité du modèle, induite par la possibilité d'avoir un nombre quelconque de jetons dans les places.

Dans les RdPC, le marquage devient un nombre réel positif. Après les RdPC, suivirent les réseaux de Pétri continus temporisés, puis enfin les réseaux de Pétri hybrides (RdPH) [3].

Un exemple de RdPH est donné graphiquement par la figure-1.13.

Ce RdPH, traduit le fonctionnement d'une fontaine décorative à deux bassins.

Sur le RdPH de la figure-1.13, on remarque, la présence de doubles cercles, qui représentent des places continues. Les rectangles, représentent des transitions continues, associées à une vitesse de franchissement (ici, un débit d'eau).

Le franchissement d'une transition continue se traduit par le retrait d'une quantité de la ou des places d'entrée et l'ajout de cette quantité à la ou aux places de sortie. La quantité en cause est ici un taux de franchissement, une « vitesse » nombre réel et pas nécessairement constant. Les différents types des RdPH vont différer entre eux par les propriétés des vitesses dans la partie continue (indépendantes ou non du marquage, indépendantes ou non du temps) et par les modes d'introduction explicite du temps, complément indispensable de la partie discrète

(associé aux transitions, associé aux places). L'appellation réseau de Pétri à vitesses constantes est réservée à des réseaux où les vitesses ne dépendent pas des marquages.

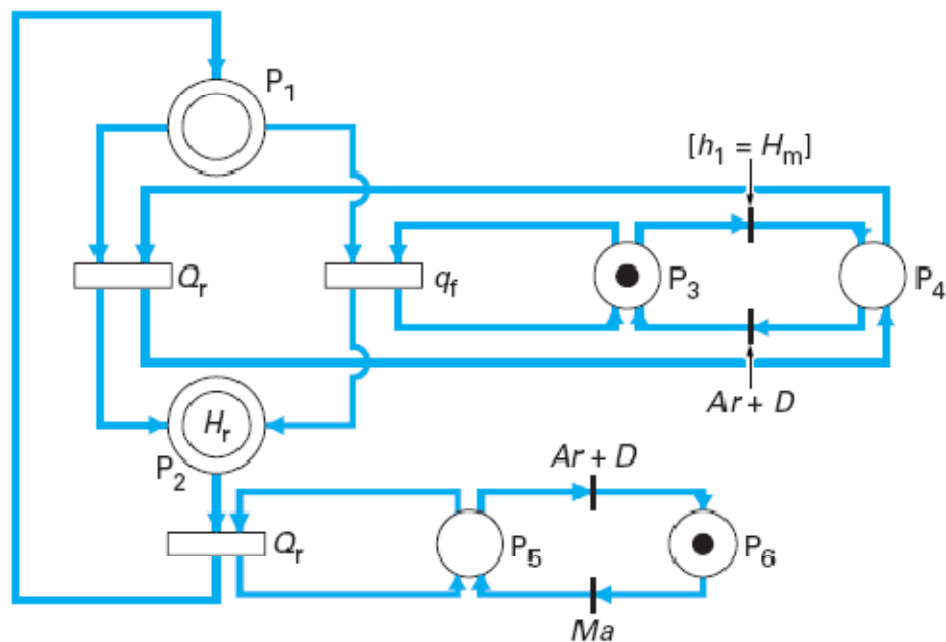


Figure-1.13: Réseau de Pétri Hybride

Les RdPH autonomes (sans le temps ni les conditions de franchissement des transitions) permettent, comme leurs homologues discrets, de vérifier certaines propriétés structurelles, telles que les caractères :

- vivant** : aucune transition ne peut devenir infranchissable ;
- borné** : aucun marquage ne peut devenir infini ;
- sans blocage** : aucun marquage ne peut bloquer toute évolution.

Ces propriétés sont indispensables à une spécification correcte du système étudié, pour éviter des situations inacceptables. L'exploitation des RdPH se fait surtout par l'étude de l'évolution des marquages, qui permet de détecter des situations anormales et de mettre en évidence des comportements périodiques. Cette évolution s'obtient souvent par simulation. La recherche de propriété peut s'effectuer à travers la génération d'un automate hybride équivalent. Dans les exemples industriels, les RdPH apportent une aide appréciable à l'analyse et permettent alors la simulation d'un modèle structuré grâce à des logiciels spécialisés (logiciel Sirphyco par exemple).

Pour les systèmes qu'ils sont aptes à représenter, les RdPH constituent un modèle monobloc : les parties discrètes et continues sont toutes deux figurées graphiquement dans un même ensemble. Nombre de propriétés établies pour les RdP discrets peuvent se généraliser.

Toutefois, des limitations sont perceptibles dans ces modèles :

- Ils conviennent pour une dynamique continue simple, basée sur des équations différentielles d'ordre 1.
- Ils ne sont pas adaptés aux systèmes nécessitant un degré de hiérarchisation (comme les systèmes interconnectés).

I.3.4.2.C. Statecharts hybrides :

Les Statecharts (traduisez : diagrammes d'état transitions), ont été définis par D.Harel en 1987 [4], ils représentent un formalisme à base d'état-transitions qui utilise les concepts suivants :

- Hiérarchie : un état peut inclure des sous-états.
- Orthogonalité: plusieurs sous états peuvent être simultanément actifs.
- Historique : en cas de transitions possibles vers plusieurs sous états, on revient dans le dernier sous état actif.

Les transitions se font toujours sur événement et/ou condition, les événements étant diffusés partout au même instant.

De part les concepts précédents, on remarque que les Statecharts offrent de meilleures possibilités de structuration des systèmes complexes (interconnectés par exemple).

La figure-1.14 présente un exemple très simple d'un procédé qui effectue la chauffe en deux temps, préchauffage, puis mise à température (chauffage), de pièces métalliques.

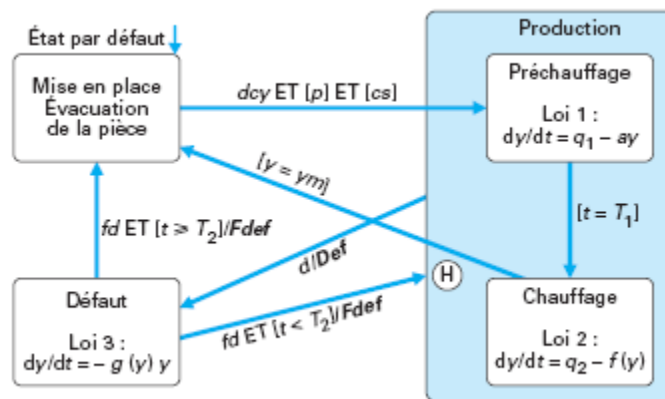


Figure-1.14: Statechart d'un traitement thermique

- 1) Si la pièce est prête (p) et les conditions de sécurité (cs) remplies, ce qui est détecté par des capteurs appropriés, on lance par l'événement commandé dcy un préchauffage par convection pendant une durée T_1 ; d'où une loi 1 d'évolution de la température y .
- 2) On effectue alors le « chauffage » jusqu'à la température voulue, ym , par des radiants (Loi 2).
- 3) La pièce est alors évacuée.
- 4) En cas d'apparition de défaut (événement d), on coupe toute chauffe et on signale ce défaut (Def) ; si l'incident est réparé (fa) avant une durée T_2 , on reprend le cycle où il s'était

interrompu (grâce à l'utilisation de la notion d'historique dans le super-état) et on coupe la signalisation de défaut (F_{def}), sinon on évacue la pièce. Pendant cet arrêt, la pièce se refroidit (Loi 3).

Pour simplifier le schéma, les opérations d'alimentation et d'évacuation de la pièce ne sont pas détaillées.

Les règles d'évolution dans les Statecharts hybrides sont plus souples que dans les automates hybrides : Un événement déclenché par une action associée à une transition peut provoquer le franchissement d'une transition dans un sous-état actif en parallèle sans remettre en cause le franchissement de la transition d'origine. Cela résulte du large usage des événements dans les statecharts :

- Comme facteur déclenchant du franchissement d'une transition (les événements d et dcy de la figure 15).
- Comme action accompagnant ce franchissement (Les événements Def , F_{def} , etc.).

L'existence possible de plusieurs modèles continus associés à des états simultanément actifs devra être manipulée avec prudence car elle peut provoquer des incohérences au niveau de l'évolution et de l'affectation des variables. On notera que la hiérarchisation, assortie d'une traduction graphique par emboîtement de rectangles-états (chauffage et préchauffage dans production, figure 15), facilite la structuration de modèles complexes. L'exploitation des statecharts, là encore, se fait surtout par simulation (logiciels Stateflow ou Statemate).

I.3.4.2.D. Modèle affine par morceaux: PieceWise Affine (PWA)

Ce formalisme se caractérise par un découpage de l'espace d'état commande en différentes régions polyédrales. Dans chacune de ces régions, le comportement du système est décrit par un système d'équations linéaires ou plus généralement affines. Ainsi, une région est définie par un ensemble d'inégalités linéaires constituant des contraintes additionnelles du modèle d'état.

Dans le cadre de l'automatique des systèmes non linéaires, le comportement d'un système non linéaire peut être approximé par un ensemble de modèles affines pour différentes régions contiguës centrées sur des points de fonctionnement donnés. Le formalisme PWA est surtout utilisé pour l'élaboration d'un modèle de commande pour les systèmes à distribution d'énergie.

I.3.4.2.E. Modèle Mixed Logical Dynamical (MLD) :

Le formalisme MLD a été proposé par Bemporad et Morari en 1999 [5]. Ce modèle repose sur l'interaction d'un sous-système discret et d'un sous-système continu, qui sont interconnectés par l'intermédiaire d'interfaces continu/discret et discret/continu, comme le montre la figure-1.15.

Le formalisme MLD repose sur les idées clefs suivantes :

- Représentation du couplage entre les dynamiques discrètes et continues par des inégalités linéaires mixtes.
- Représentation des relations logiques sous forme d'inégalités linéaires binaires.

- Inclusion des variables binaires dans des équations aux différences.

Dynamique discrète : La partie discrète du modèle permet de décrire des dynamiques typiquement représentées par un automate d'état fini. Les relations logiques peuvent être transformées en inégalités linéaires par l'intermédiaire de transformations, décrites dans [6].

Interfaces : Elles permettent de représenter les interactions entre la partie discrète et la partie continue du modèle.

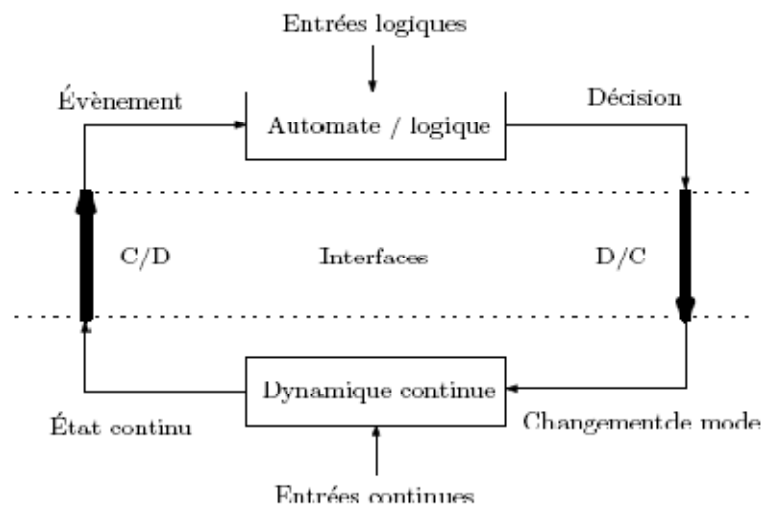


Figure-1.15 : Modèle de représentation

I.3.5. Les types de commandes hybrides:

I.3.5.1. Introduction :

Le thème de ce projet est : « Commande hybride des systèmes interconnectés », la première partie : Commande hybride, peut dans certains cas prêter à confusion, car il n'y a pas de commande hybride mais plutôt une exploitation des lois de commande habituelles par une approche hybride. Dans cette partie on va décrire quelques lois de commande généralement utilisées lors de l'élaboration d'une stratégie hybride en vue de la commande d'un système interconnecté. Un bref aperçu de chaque type de commande sera donné ci-après.

I.3.5.2. Types de commande hybrides :

I.3.5.2.A. Commande prédictive hybride :

La notion de prédiction intervient dans toute activité où l'on désire anticiper une trajectoire. Les principes de la commande prédictive sont issus du comportement humain, des exemples simples de la vie quotidienne permettent d'illustrer ce concept. Lorsque l'on conduit par exemple, par apprentissage, par expérience, on sait que telle action sur l'accélérateur, sur le frein ou sur le volant modifie, après un certain temps, la vitesse et la position du véhicule.

Comme l'on a devant soi un objectif glissant qui change en permanence, on fixe de façon continue un projet de trajectoire à son véhicule, et l'on sait que pour satisfaire cet objectif, malgré toutes sortes de perturbations (pente, vent, état de la roue..), il convient d'appliquer une certaine action. Connaissant l'inertie du véhicule, on a également appris qu'il fallait anticiper, c'est-à-dire regarder non pas au niveau du pare-chocs mais « loin » devant, et qu'il ne fallait pas attendre d'être sur l'obstacle pour freiner. On sait que telle action produit tel effet, et en inversant la proposition, on sait quelle action appliquer pour obtenir tel comportement.

Les premiers résultats théoriques et pratiques liés à la commande prédictive ont été obtenus par Richalet en 1970 [7], à l'aide du logiciel IDCOM (Identification-COMmand) puis avec la commande prédictive fonctionnelle (PFC pour Predictive Fonctionnal Control) qui utilise un modèle soit sous forme de représentation d'état à temps discret, soit faisant intervenir les coefficients de la réponse impulsionnelle.

Durant les années 1980, différentes techniques de commande prédictive ont été développées et regroupées sous l'acronyme (MPC, Model Predictive Control), nous pouvons citer à titre d'exemple : la commande prédictive généralisée (GPC pour Generalized Predictive Control), développée par Clarke qui utilise un modèle de type CARMA (Control AutoRegressive Moving Average) [8]. Par ailleurs la commande prédictive est très largement utilisée dans plusieurs secteurs industriels (industrie pétrolière, défense, chimique etc.), son succès étant également dû au développement des techniques d'identification de processus, facilitant l'obtention du modèle de processus à commander, condition importante pour la réussite d'une commande prédictive.

Les principes fondamentaux de la commande prédictive sont :

- Connaissance du comportement du processus à piloter en réponse à un stimulus connu, qui sera mémorisé et formalisé par un modèle mathématique.
- Projet de comportement désiré du processus, qui sera exprimé sous forme d'une trajectoire de référence.
- Action par inversion de la relation : action->effet, qui devient effet désiré->action à appliquer.
- Modification éventuelle du modèle interne du système de commande.

Nous pouvons illustrer le principe de la commande prédictive sur la figure-1.16.

Le principe général de la commande prédictive peut se formuler de la manière suivante :

- Utilisation explicite d'un modèle pour prédire le comportement futur du système.
- Le calcul d'une séquence d'échantillons futurs de commande minimisant une fonction de coût sur un horizon glissant. Seul le premier échantillon de commande est appliqué au système.
- Toute la séquence est recalculée à chaque pas.

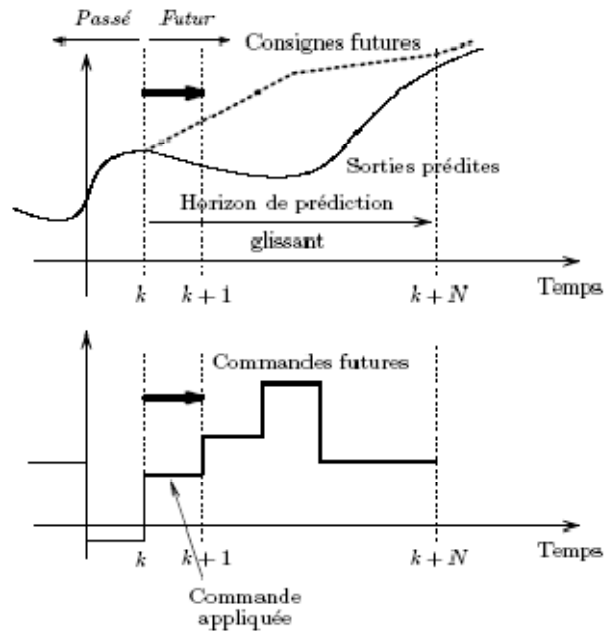


Figure-1.16 : Principe de la commande prédictive

La structure du contrôleur couplé au procédé est représentée sur la figure-1.17.

On remarque la présence d'un bloc d'Optimisation sur le schéma de structure du modèle, qui consiste en la minimisation d'un critère comportant des sommes quadratiques, basés sur l'écart entre les sorties prédit et les consignes futures. Cet écart, correspond sur un horizon de prédiction à la partie grisée de la figure-1.18.

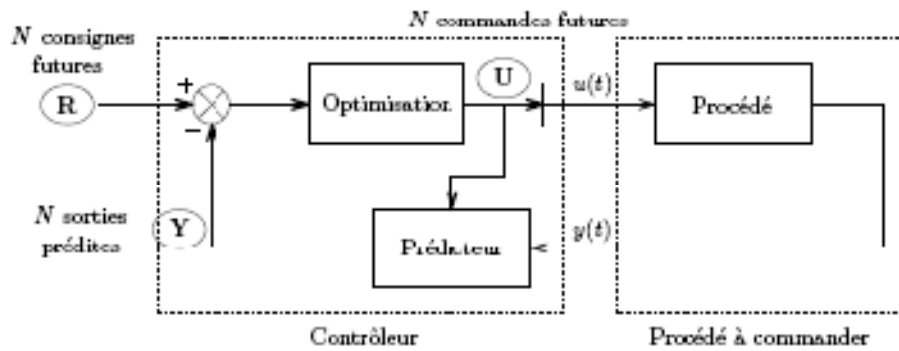


Figure-1.17 : Structure du contrôleur prédictif

Pour réduire la charge de calcul, le nombre de commandes futures peut être choisi inférieur à la longueur de l'horizon de prédiction. Cette longueur est appelée horizon de commande. Les commandes restantes jusqu'à la fin de l'horizon de prédiction sont alors supposées constantes.

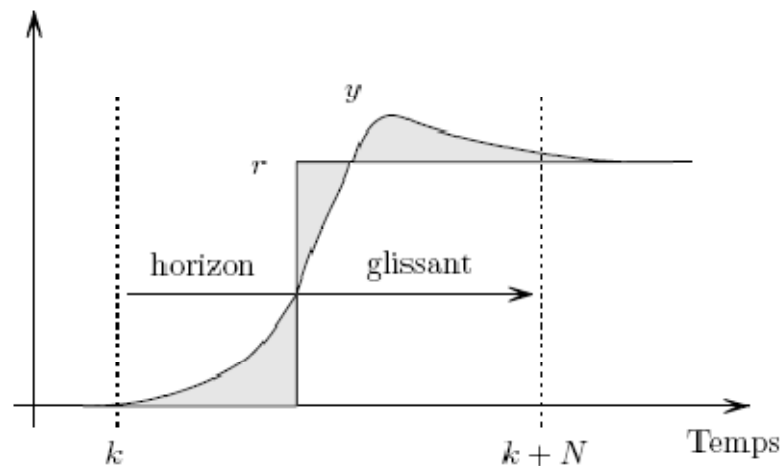


Figure-1.18: Objectif de l'optimisation : minimiser la surface grisée.

I.3.5.2.B. Commande basée sur la théorie des jeux :

Dans cette approche, la problématique de commande est considérée comme un jeu de type « évitement poursuite », entre la commande et la perturbation. Lorsque la commande hybride est effectuée avec une approche basée sur la théorie des jeux, la conception hybride est vue comme un jeu entre 2 joueurs. L'un des joueurs est la perturbation, qui entre dans la dynamique. Les perturbations peuvent coder l'action des autres agents (dans une configuration multi-agents), les actions de contrôleurs ou les perturbations inhabituelles non modélisées. Le second joueur est le contrôleur qui doit être choisi par le concepteur. Les deux joueurs rivalisent sur une fonction de coût qui code les propriétés que la boucle fermée hybride doit satisfaire. Le contrôleur gagne le jeu, s'il arrive à maintenir le système stable, pour n'importe quelle perturbation.

La solution au problème de théorie des jeux, fournit au concepteur un contrôleur continu, ainsi qu'un ensemble d'états, où le contrôle est certain de gagner la partie. L'ensemble de ces états, peuvent permettre la conception d'une interface qui garantit l'opération sûre du système hybride. Il faut également, savoir qu'il n'y a pas forcément de vainqueur ou de perdant dans un jeu de ce type. Les principes impliqués dans la conception d'une commande basée sur la théorie des jeux sont très similaires à ceux de la commande optimale. Grossièrement, le concepteur doit trouver le meilleur contrôleur possible, en envisageant la pire des perturbations. Si les conditions ne sont pas satisfaites le problème ne sera pas résolu tel qu'il est, vu qu'il existe au moins une perturbation pour laquelle, quelque soit le contrôleur, la boucle fermée échouera à satisfaire les exigences de commande.

Pour plus d'informations concernant ce type d'approche, le lecteur peut se référer à [9].

I.3.5.2.C. Commande optimale par le principe du maximum :

L'objet de cette méthode est d'étendre le principe du maximum de Pontryagin, énoncé dans le cas des systèmes continus, au cas des systèmes hybrides dans un cadre général [10]. La prise en compte des discontinuités provoquées par les événements discrets est intégrée et

garantit alors une optimisation globale du critère. La mise en œuvre de cette méthode est complexe et requiert la mise en place d'algorithmes appropriés [11].

I.3.5.2.D. Commande stabilisante des systèmes en commutation :

Les systèmes en commutation sont des systèmes pour lesquels les variables de commande sont uniquement discrètes et définissent un mode. À chaque mode correspond un modèle différent. Agir sur le système consiste donc à commuter entre les modes possibles. Dans un cadre général, des résultats ont été proposés pour des systèmes linéaires [12]. Ces résultats ont été partiellement étendus à des systèmes affins caractérisés par des points d'équilibres différents en utilisant la notion d' q -practical stability (caractérisation de la fonction de Lyapunov par des techniques LMI (Linear Matrix Inequalities)). Pour des systèmes physiques tels que des convertisseurs de puissance, des considérations énergétiques permettent de déterminer une fonction dont la dérivée peut être rendue négative par un choix correct du mode [13].

I.3.5.2.E. Commande par supervision :

Cette approche issue des systèmes à événements discrets trouve son origine dans la théorie de Supervision [14]. Cette théorie est basée sur le principe de la séparation des concepts de fonctionnement en boucle ouverte et en boucle fermée. Elle a permis d'établir pour les systèmes à événements discrets des principes analogues à ceux de la théorie de la commande des procédés continus. On trouve les notions de commandabilité, d'observabilité et de commande optimale en employant des techniques issues des langages formels et des automates. L'objectif principal de cette théorie et la synthèse de la stratégie de commande (sous forme d'automate) la plus permissive possible par rapport aux spécifications désirées de fonctionnement.

I.3.5.2.F. Commande séquentielle :

C'est une approche de synthèse d'un superviseur discret pour un système continu basée sur la méthode de commande par supervision. Le procédé continu est modélisé par des équations différentielles alors que le superviseur discret est décrit par un automate d'états fini. Une interface est définie entre ces deux sous-systèmes par une fonction appelée générateur d'événements (sens continu vers discret) et une fonction appelée actionneur qui transforme les événements provenant du superviseur en signaux continus par morceaux utilisés en tant qu'entrée du procédé (sens discret vers continu). Un modèle à événements discret est alors construit en considérant une abstraction du procédé continu et de l'interface, permettant la synthèse d'un superviseur discret [15].

I.3.5.3. Répartition de la commande :

I.3.5.3.1. Introduction :

La commande d'un système hybride interconnecté peut être répartie différemment dépendant de l'approche choisie.

Il convient alors de parler des concepts suivants : l'approche multi agents, décentralisée/centralisée, superviseur/égalitaire. Chaque approche possède ses avantages et ses inconvénients, dépendant de l'application.

I.3.5.3.2. Systèmes Multi-Agents :

Commençons par l'approche multi-agents qui est un nouveau concept faisant partie des théories de l'Intelligence Artificielle (I.A), elle est utilisée dans un environnement pas nécessairement prévisible. Quand l'I.A s'occupait de modéliser le comportement intelligent d'un seul agent, l'approche S.M.A sert à distribuer l'intelligence sur plusieurs entités (Agents), ce passage du comportement individuel aux comportements collectifs permet de combler les limites de l'I.A classique à résoudre des problèmes complexes. Ainsi chaque agent est doté d'une certaine intelligence, autonomie, réactivité, rationalité, adaptabilité et possède une motivation qui lui est propre. L'approche multi agents, est souvent utilisée dans le cadre de notre application pour optimiser l'utilisation des ressources rares intervenant dans la commande du système [16], (voir les enjeux de la commande hybride des S.I).

L'applicabilité de cette approche sur les systèmes interconnectés, consiste en l'intégration d'un agent autonome par zone (sous système), de telle sorte à ce que ces agents puissent communiquer entre eux en vue de respecter un objectif commun. On dit qu'ils travaillent en mode **coopératif**. Un agent intelligent doit être doté de capacités lui permettant, de résoudre les différents problèmes auquel il sera confronté lors de la commande, de comprendre l'information qui lui sera envoyé, d'avoir des objectifs et des motivations, de savoir faire la différence entre les différentes situations auxquelles il sera confronté, de généraliser et synthétiser de nouvelles idées, de modéliser l'environnement dans lequel il opère, de prédire les conséquences de chaque action et d'évaluer leurs alternatives.

Alors que de nombreux efforts sont dévoués à la compréhension des interactions entre un petit nombre d'agents, et la conception d'agents ayant pour but la résolution de problèmes simples, peu de connaissances sont disponibles concernant leur comportement global, spécialement lorsqu'ils composent un système réel et complexe. A ce titre, il existe une quantité de problèmes résultants de la répartition des agents autonomes, et de leurs tâches. Une des difficultés, rencontrées dans la conception de tels systèmes, résultent de l'absence d'une commande centralisée ce qui a pour conséquence l'émergence de conflits, dus aux problèmes de communication résultant du manque de partage d'information entre les agents.

Or lorsqu'un groupe d'agents doit effectuer des choix et décider d'actions à entreprendre en présence d'informations incomplètes ou retardées, concernant l'état interne du système leurs dynamiques deviennent extrêmement complexes. Une partie de la complexité de leurs comportements est due à la nature du système, autrement dit la décision d'un agent dépend des choix effectués par l'ensemble des autres agents. Par conséquent, la coordination est un élément primordial pour avantager les interactions bénéfiques, pour éviter les interactions dangereuses ainsi que pour le fait qu'une décision faite par un agent peut avoir un impact global sur le système. La question majeure est de savoir alors, quels problèmes choisir et surtout avec quels agents coopérer. Il est évident donc que la priorité des agents est de trouver une solution optimale globale, et non seulement locale (des mauvaises décisions peuvent engendrer des complications irréversibles sur le système global, même si elles paraissent optimales d'un point de vue local). Pour cela, deux solutions peuvent être envisagées: les systèmes multi agents hiérarchiques et les systèmes multi agents à tableau noir.

La première consiste à organiser la répartition des agents de manière hiérarchique afin de réduire le champ de liberté de leurs actions. Les agents à haut niveau hiérarchique auront la possibilité d'examiner les performances des agents de leurs groupes, ainsi que d'ajuster leurs objectifs. La conception de la loi de contrôle, gouvernant le comportement de chaque agent pris individuellement est crucial pour la conception de groupes d'agents coopératifs. Quant à

l'approche par tableaux noirs, elle est bâtie de façon centralisée, et est composée de 3 éléments : Les connaissances, le tableau noir et le mécanisme de contrôle.

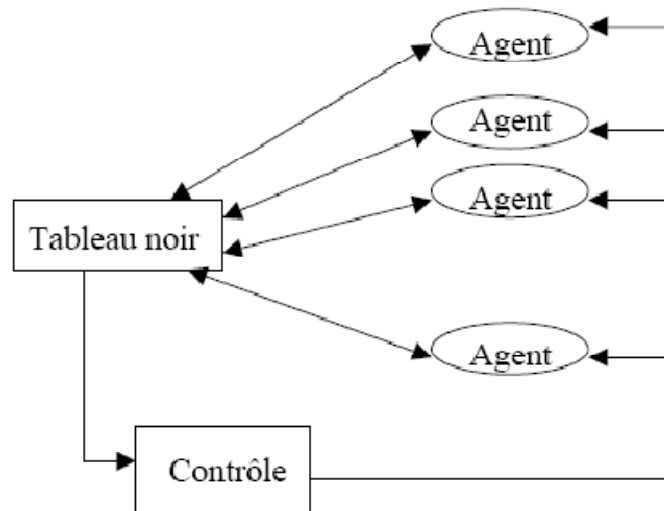


Figure-1.20 : Un groupe d'agents et leurs interactions dans un SMA à tableau noir

Dans cette architecture, il n'y a pas de communication directe entre les agents. Ces derniers utilisent exclusivement un lieu d'échange commun d'information : le tableau. Ainsi, chaque agent a la possibilité d'y insérer des informations donnant la possibilité à d'autres agents d'y accéder et de vérifier si de nouvelles données y sont présentes.

Enfin, un protocole de communication est nécessaire dans tous les cas. L'approche multi-agents étant l'approche choisie dans le cadre de notre application, nous reviendrons plus amplement sur l'ensemble des concepts inhérents à ce sujet.

I.3.5.3.3. Approche centralisée et décentralisée:

Parlons maintenant, du concept de « décentralisation/centralisation » et hiérarchisation de la commande. La commande d'un système interconnecté, requiert un certain niveau de coordination entre les différents agents, le nombre de décisions sur la commande à faire, et la complexité qui découle de ces décisions fait appel à une solution décentralisée superviseur. La complexité de commande de tels systèmes, est surmontée en allant de modèles décentralisés détaillés à un niveau bas, à un niveau plus haut et centralisée d'un modèle abstrait. Pour des raisons économiques et de fiabilités quant au transfert d'information entre les agents et la commande centralisée, la coordination entre les agents est usuellement réalisée à l'aide de protocoles de communication modélisés sous la forme de systèmes à événements discrets. Il convient dès lors d'évaluer le degré de décentralisation de l'architecture de commande, un compromis entre ces deux approches doit être fait afin d'aboutir au modèle de commande le plus optimale. En effet, une solution totalement décentralisée est inefficace et mène à des conflits, tandis qu'une solution complètement centralisée s'avère être non tolérante aux erreurs au niveau de la commande centrale, en plus d'être de conception compliquée et répondant trop lentement en cas d'urgence. Les avantages et inconvénients des deux approches sont illustrés au niveau du tableau-1.1.

	Approche centralisée	Approche décentralisée
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Rends le problème plus complexe. - Requier une puissance de calcul très grande. - Plus grande est la responsabilité assignée à une commande centrale, plus grand sera le risque d'accidents. - Réduit l'extensibilité du système. 	Absence de coopération entre les différents sous-systèmes, pouvant mener à l'émergence de conflits.
Avantages	Meilleure coopération entre les différents agents.	Simplification du problème de commande, grâce à la modélisation séparée des sous-systèmes, évitant la modélisation du système complet.

Tableau-1.1 : Inconvénients et avantages des approches centralisées/décentralisées

On en déduit qu'une solution partiellement décentralisée et partiellement centralisée garantit de meilleurs résultats, ceci nous mène à envisager une solution **décentralisée hiérarchisée**. Bien évidemment, l'application déterminera avec exactitude les besoins en matière de centralisation et décentralisation.

I.4. Recherche bibliographique étendue :

Après avoir introduit, les différentes notions nécessaires à l'étude de la commande hybride des systèmes interconnectés (incluant formalismes, types de commande, d'approches etc.), nous allons passer en revue les différents résultats publiés par la communauté scientifique concernant ce sujet. Cette liste, sera associée d'un court résumé. Bien évidemment, nous n'avons pas la prétention de présenter l'intégralité des recherches dans ce domaine, mais seulement les plus importantes que nous avons pu trouver lors de notre recherche bibliographique.

Commençons par la publication de Ye et al. 1998, dans laquelle un modèle approprié à l'analyse des systèmes dynamique hybrides est présenté. La notion d'un ensemble invariant et différents types de stabilité sont définis (stabilités de type Lyapunov). Des conditions nécessaires et suffisantes pour la stabilité uniforme, stabilité uniforme asymptotique et stabilité exponentielle ainsi que l'instabilité sont établies. Des exemples incluant des systèmes de commutation ainsi que des systèmes muni d'effet d'impulsion sont donnés.

Dans le travail mené par Branicky, 1998 quelques outils d'analyse pour les systèmes hybride à commutation sont présentés. En particulier, les fonctions de Lyapunov multiples sont utilisés

pour l'analyse de la stabilité des systèmes de commutation et des fonctions itératives sont utilisées pour la stabilité lagrangienne.

Dans [21] *Lemmon, M.D. and P.J. Antsaklis*, ont intégré les automates temporisés ainsi que la commande robuste pour la commande des systèmes interconnectés (et complexes en général). Des résultats publiés par la communauté travaillant sur la commande robuste sont présentés et l'intégration de ces méthodes est utilisée pour étudier la stabilité et les problèmes de performances liés aux amplitudes bornés des systèmes de commutation. Les méthodes de commandes robustes ont été utilisées dans le cadre de la commande hybride, à ce titre on peut se référer à [22].

Dans [23], Sylvain Leirens a entrepris le développement de nouvelles approches et méthodes d'analyse et de synthèse pour les réseaux électriques. Les réseaux électriques résultent de l'interconnexion d'éléments de natures variées (avec un aspect fortement hybride).

Dans [24], Lygeros J. et al ont synthétisé une commande hybride multi-objectif, et ont étudié son application sur un système complexe interconnecté (contrôle aérien). La méthode employée est basée sur le principe de la commande optimale. Ce principe est utilisé pour déterminer, une classe de commande la moins restrictive qui satisfasse la plus importante condition (par exemple la sécurité). Les performances du système concernant le plus bas niveau d'exigence (en l'occurrence, l'efficacité), peut alors être optimisé dans cette classe.

Lygeros J. et al, présentent également une méthode de conception et de vérification pour les systèmes dynamiques hybrides et plus particulièrement les systèmes complexes interconnectés. La conception hybride est considérée comme étant une confrontation entre deux joueurs, la commande et la perturbation. Les perturbations peuvent résulter des actions d'autres agents (dans une configuration multi-agents) ainsi que des actions des contrôleurs de plus haut niveau, ou peuvent être des perturbations environnementales usuelles non modélisées. La commande, quant à elle qui doit être choisie par le concepteur. Les deux entités rivalisent à travers une fonction de coût qui représente les critères que la boucle fermée hybride doit satisfaire (à titre d'exemple : la sécurité). La commande gagne la partie, dans le cas où elle arrive à garder le système stable quelque soit la perturbation La solution pour le problème de la théorie des jeux, consiste en l'association d'une commande continue et d'un ensemble d'état où la commande est sûre de gagner la partie. L'ensemble de ces états sûrs, peut être utilisé pour concevoir une interface qui garantit la sécurisation du système hybride. Cette méthode de contrôle optimale peut aussi être utilisée pour la vérification des systèmes hybrides. Lygeros J. et al, ont appliqué leurs méthodes sur un système interconnecté de type trafic urbain.

I.5. Conclusion :

Comme dit précédemment, la commande hybride, résulte typiquement de la commande de processus réels assistés par ordinateur, ou de l'organisation hiérarchique résultant de la commande des systèmes complexes (incluant systèmes interconnectés donc), ce qui a pour avantage la réduction de la complexité du modèle. L'étude de la commande hybride est essentielle pour la conception de commande superviseur pour les systèmes continus, et primordial pour la conception de commandes intelligentes avec un haut niveau d'autonomie.

Le domaine des systèmes hybrides, est une nouvelle et fascinante discipline rassemblant 3 branches essentielles qui sont : l'automatique, les mathématiques et l'informatique.

Malgré la nouveauté de ce domaine, nombre de catégories de systèmes commandables de manière hybride ont été étudiés auparavant. Les ancêtres de la commande hybride, étaient alors : les modes glissants, la commande à structure variable et la commande numérique. Des approches aux systèmes hybrides ont été faites dans [17]. Plus récemment, les systèmes hybrides ont été étudiés dans [18], [19], [20].

Chapitre II:

**Application : Système autoroutier automatique
AHS (Automated Highway System)**

II.1. Introduction :

Durant ces dernières années les questions de sécurité au niveau des routes ont suscité un engouement considérable. L'engorgement des routes continue d'augmenter et devient une préoccupation de premier plan. Alors que le nombre de transports routiers a presque doublé depuis 1970, l'espace routier disponible pour accommoder le nombre grandissant de véhicules est demeuré pratiquement inchangé. Parmi les conséquences inévitables d'une telle situation : un encombrement routier sans cesse grandissant et des répercussions désastreuses sur l'économie et l'environnement.

La solution la plus évidente à ce problème semble être l'agrandissement de l'espace autoroutier en parallèle à l'accroissement du nombre de véhicules, mais cela relève de l'impossible, dans la mesure où la plupart des autoroutes ont été construites autour des zones urbaines et des villes où la moindre parcelle de terrain vaut une fortune et où il serait irraisonnable d'envisager une quelconque expansion de l'espace autoroutier. Une alternative serait d'améliorer la gestion du trafic au niveau des espaces déjà existants en ajoutant aux véhicules et aux autoroutes des systèmes de coordination de sorte à augmenter de manière significative la sécurité et améliorer la circulation en réduisant les temps de trajet.

Plusieurs recherches concernant les systèmes hybrides ont été motivées par des applications dans le domaine de l'automobile, l'électronique, l'informatique temps réel, les protocoles de communication et le domaine des transports. Les systèmes autoroutiers automatiques font partie des ces applications, leur but principal est d'augmenter la fluidité du trafic en maintenant au moins le même niveau de sécurité et de confort pour les passagers qu'auparavant. Ceci peut être possible en automatisant le trafic routier. [25]

Cependant, un tel système introduit forcément des problèmes complexes principalement à cause de sa nature distribuée et multivariable. Le système consiste en un certain nombre d'agents (véhicules) équipés de capteurs et de modules de communication et de contrôle, qui essayent d'utiliser efficacement l'espace autoroutier existant. Le système de contrôle doit faire en sorte de satisfaire certaines spécifications parfois contradictoires. Un exemple simple est que pour diminuer les temps de trajet, il faut diminuer les espaces entre les véhicules et augmenter leurs vitesses, alors que pour assurer la sécurité il est nécessaire de diminuer les vitesses des véhicules et augmenter les espaces entre eux [25].

II.2. Description du système :

Les systèmes autoroutiers automatiques sont des systèmes qui combinent de manière adéquate les techniques de l'automatique et de la communication à travers des modules placés au niveau des autoroutes et des véhicules pour assister les conducteurs dans leurs prises de décision, de manière à optimiser la capacité des autoroutes et améliorer la sécurité des usagers, sans avoir à construire de nouvelles structures routières. Ceci dit, il y a une divergence d'opinion sur ce que serait le plus approprié en terme « d'automatisation », et cette diversité émerge des différentes approches du point de vue :

- Fonction : le degré d'automatisation imposé.
- Architecture : la décomposition des fonctions en plusieurs tâches et leurs assignement aux différents sous-systèmes composant l'AHS.
- Stratégie : le partage de l'automatisation entre les véhicules et les routes, et la manière avec laquelle il faudrait les combiner pour réaliser une architecture efficace.

Nous allons dans ce qui suit présenter les différentes architectures de l'AHS et nous comparerons leurs influences sur la décision des usagers. Certaines de ces structures peuvent ne pas soulever de problématique d'un point de vue automatique, puisqu'elles ont pour objectifs d'informer et de conseiller les usagers, d'autres ont un degré d'automatisation plus élevé et ne laissent que quelques décisions aux conducteurs.

Nous verrons un AHS de degré d'automatisation élevé qui aspire à augmenter sensiblement la capacité des espaces autoroutiers. La conception d'un tel système va s'avérer être un vrai challenge du point de vue automatique.

Nous proposerons un modèle hiérarchique à cinq couches qui décompose le problème en plusieurs unités plus facilement gérables. A commencer par la couche la plus basse et en remontant vers la plus haute les couches sont appelées : « couche physique », « couche de régulation », « couche de planification », « couche lien » et « couche réseau ». La couche la plus basse, qui est la couche physique, est spécifique au modèle dynamique des véhicules, la couche de régulation s'occupera d'appliquer les lois de commande pour l'accélération, le freinage et la direction du véhicule. La couche de planification aura comme objectif la coordination entre les différents véhicules voisins. La couche lien est responsable de la gestion du flux du trafic. Et enfin, la couche réseau s'occupe d'assigner les routes aux différents véhicules et de leurs admission au niveau du réseau d'autoroutes automatiques.

II.2.1. Fonctionnement d'un AHS :

Le tableau-2.1 montre une séquence de six décisions qui peuvent être prises par un automobiliste en conduisant son véhicule (pour les véhicules de types commercial d'autres décisions seront ajoutées). Les décisions sont réparties en amont, pendant et en aval du trajet. Pour chaque décision de l'utilisateur, le tableau montre les objectifs de l'AHS correspondantes. Enfin la dernière colonne indique les différentes stratégies envisageables afin d'accomplir la tâche assignée, l'une des stratégies consiste à informer et conseiller l'utilisateur (assistance à la décision) tandis que la deuxième stratégie consiste en une prise de contrôle totale du véhicule.

Les six décisions citées dans le tableau-2.1 qui suit seront celles prises en compte par l'AHS, d'autres décisions peuvent éventuellement être rajoutées notamment : Règlement des frais de péages de manière automatique et de cette manière éviter de devoir s'arrêter, réserver une place de parking en cours de trajet afin réduire encore plus les temps de voyage.

Phases	Décisions de l'utilisateur	Objectifs de l'AHS	Tâches accomplies par l'AHS	Stratégies envisageables
Avant trajet	*Choix de destination	*Efficacité accrue *Utilisation de la ressource		*Informé ou conseiller
Pendant trajet	*Choix de l'itinéraire *Planification de l'itinéraire * Manœuvres *Régulation	*Réduire le temps de trajet *Fluidifier le trafic *Augmenter la sécurité et le débit de véhicule *Augmenter la sécurité et le débit de véhicule	*Système de guidage et contrôle du trafic *Gestion des bouchons *Coordination entre véhicules *Assurer les distances de sécurité et la direction	*Informé, conseiller ou contrôler *Informé, conseiller ou contrôler *Informé ou contrôler *Informé ou contrôler
Après trajet	*Stationnement	*Une valeur ajoutée	*Utilisation efficace	*Informé, conseiller ou contrôler

Tableau-2.1: Décisions des conducteurs et fonctions du AHS

Le tableau indique comment ces décisions peuvent être améliorées pour augmenter la capacité autoroutière et la sécurité des passagers. En premier lieu, un bon choix d'itinéraire pourrait réduire le temps du trajet. Ce choix peut être amélioré d'abord en mettant à disposition des conducteurs des cartes des réseaux routiers, puis en les informant *en temps réel* des changements du trafic (causés par des accidents ou des bouchons récurrents). Des études expérimentales ont démontré que l'influence de telles mesures était limitée dans le cas des bouchons récurrents et peu satisfaisantes pour les encombrements dus aux accidents.

L'AHS a également comme rôle principal d'opérer des manœuvres (changement de voie, entrée et sortie de l'espace autoroutier etc.). Elles requièrent une coordination parfaite entre les différents véhicules voisins, autrement le risque de collisions et d'accidents augmente ce qui peut causer des dégâts considérables.

Actuellement, au niveau des espaces autoroutiers la coordination entre les véhicules se fait principalement par la signalisation (plaques, feu de signalisation. etc.) et autre conventions. Un système autoroutier partiellement automatisé pourrait améliorer les manœuvres en introduisant un signal de prévention des collisions, aussi il est possible d'avoir des systèmes anticollision qui peuvent prendre temporairement le contrôle du véhicule et agir de la manière la plus efficace afin d'éviter tout accident.

L'AHS peut également prendre en main la régulation des véhicules sur l'autoroute, et cela concerne les ajustements de vitesse que le conducteur peut imposer au véhicule en étant sur une voie d'autoroute. La vitesse d'un véhicule $v(d)$ est une fonction croissante de la distance entre ce véhicule de celui qui se trouve devant lui. Dans ce cas là, le flux de véhicule/voie/minutes est le produit de la vitesse en mètre/minute et le nombre de véhicule par mètre, comme le montre l'équation-2.1.

$$\varphi(d) = v(d) * \frac{1}{d + s} \quad (2.1)$$

Avec : s la longueur du véhicule. La vitesse du véhicule est étroitement liée aux conditions physiques de la route (largeur de la voie, éclairage, conditions météorologiques), ceci étant des études empiriques ont suggéré un débit maximum de 40 véhicule/voie/minute.

En prenant en compte toutes ces considérations, on peut estimer qu'un système autoroutier semi-automatique qui laisse au conducteur le contrôle de son véhicule peut mener à un dépassement de capacité de 15% de plus que les 40 véhicule/voie/minute, le conducteur serait susceptible de causer les bouchons dans ce cas là constituant alors, le talon d'Achille de ce système [26].

Les données montrent que 90% des accidents sont causés par les décisions inappropriées des conducteurs. Ceci souligne que l'efficacité du système décrit précédemment en matière de détection et prévention des accidents serait inexorable. [26]

II.2.2. Système complètement automatisé :

Nous allons tout d'abord discuter de l'influence de l'organisation du trafic en peloton, qui augmente significativement la capacité de l'espace autoroutier. Nous allons par la suite illustrer un scénario autour d'un AHS où les décisions sont complètement automatisées, pour finalement poser la problématique du point de vue automatique.

II .2.2.1. Le concept du peloton :

La clé d'une capacité accrue de l'espace autoroutier et d'une réduction des temps de trajet, s'obtient par l'organisation du trafic en pelotons, comme illustrée à la figure-2.1.

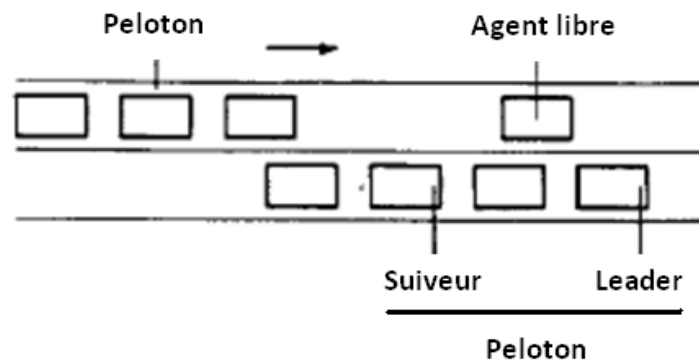


Figure-2.1 : le concept du peloton

Définition II.1: Un peloton, dans son sens général désigne un regroupement de plusieurs éléments en petits espaces. Ce terme est très utilisé dans le monde du cyclisme où l'on désigne un peloton de cyclistes, et également dans le jargon militaire pour désigner groupe de soldats.

Afin de prendre conscience de l'avantage que pourrait avoir l'adoption d'une configuration peloton sur les autoroutes, nous pouvons calculer le flux de circulation moyen en prenant des pelotons de tailles différentes. En prenant d l'espace entre les véhicules à l'intérieur du peloton, D l'espace qui sépare deux pelotons successifs, s la longueur du véhicule et v la vitesse moyenne en mètre/minute, on peut écrire le flux de circulation comme sur l'équation-2.2 en véhicule/voie/minute.

$$\varphi = v * \frac{n}{n * s + (n - 1) * d + D} \quad (2.2)$$

Avec : n le nombre de véhicule dans chaque peloton. Certaines valeurs sont listées dans le tableau-2.2 pour $s = 5 \text{ m}$ et une vitesse moyenne $v \approx 72 \text{ km/h}$. Dans le cas où $n = 1$ avec $\varphi = 35$ on est dans une configuration qui représente les limites d'une autoroute non automatisée. Le cas $n = 20$ qui apparaît comme étant faisable et arrive à quadrupler la capacité de l'espace autoroutier.

L'équation-2.2 suggère aussi l'existence d'autres paramètres qui pourraient influencer la capacité, notamment la longueur des véhicules ainsi que leurs vitesses moyennes. Aussi deux aspects sont à prendre en considération : la sécurité et la formation ainsi que les manœuvres à l'intérieur d'un même peloton.

n	d	D	φ
1	---	30	35
5	2	60	64
15	2	60	105
20	1	60	133
∞	1	---	200

Tableau-2.2 : Flux de véhicules atteint en fonction du nombre de véhicule par peloton

Une brève analyse relative à la possibilité et à l'effet d'une collision entre deux véhicules appartenant au même peloton, à cause notamment d'une décélération soudaine d'un véhicule, nous permet de nous assurer de la sécurité du peloton.

En effet si un véhicule qui se trouve devant décélère de $a_1 m/s^2$ et que le véhicule qui le suit décélère de $a_2 m/s^2$. Si $\delta a = a_1 - a_2 > 0$ il y aura une collision entre les deux véhicules avec une vitesse relative exprimée par l'équation-2.3.

$$\delta v = \sqrt{2 \delta a \delta x} \quad (2.3)$$

Avec: $\delta x = d$ la distance initiale intra-peloton. Dans un cas extrême, $a_1 = 10 m/s^2$ et $a_2 = 7 m/s^2$ avec une distance intra-peloton $d = 1m$ on aura une vitesse relative d'impacte de $\delta v = 7 km/heure$ ce qui est considéré comme étant un impacte non dangereux.

Un conducteur humain met en moyenne entre 0.25 et 1.2 secondes pour réagir à un obstacle devant lui [26], il apparaît donc clairement que l'automatisation de cette procédure qui induit une décélération immédiate en cas de besoin, améliorerait sensiblement la sécurité des usagers. Néanmoins le système de contrôle du véhicule doit être informé en temps réel de la vitesse et de l'accélération du véhicule qui se trouve devant. Concrètement un tel objectif de commande est parfaitement envisageable.

II.2.2.2 Scénario de AHS :

Imaginons un réseau automatisé d'autoroutes interconnectées. Des véhicules correctement équipés ont la possibilité d'entrer et de sortir de ce réseau grâce à des systèmes d'échangeurs bien adaptés, et font leurs trajets sous la gouvernance de l'AHS distribué entre les modules embarqués à bord des véhicules et ceux intégrés à la structure autoroutière.

Ce réseau est relié au reste du réseau de transport routier (réseau hétérogène), des dispositions doivent être prises à l'entrée des espaces autoroutiers automatiques pour vérifier que les véhicules qui entrent sont correctement équipés. Un véhicule sortant de l'autoroute automatique peut emprunter une voie non automatisée.

En entrant dans l'espace autoroutier automatique, un véhicule doit impérativement annoncer sa destination. Le système répond en lui attribuant un itinéraire R à travers l'autoroute.

$$R = (H_1, s_1, f_1), (H_2, s_2, f_2) \dots \quad (2.4)$$

L'itinéraire se décompose ainsi en segments. Le premier segment de l'itinéraire est sur l'autoroute H_1 , en commençant à l'entrée s_1 et se termine à la sortie f_1 . Le second segment de l'itinéraire est sur l'autoroute H_1 , en commençant à l'entrée s_1 et se termine à la sortie f_1 et ainsi de suite comme illustre la figure-2.2.

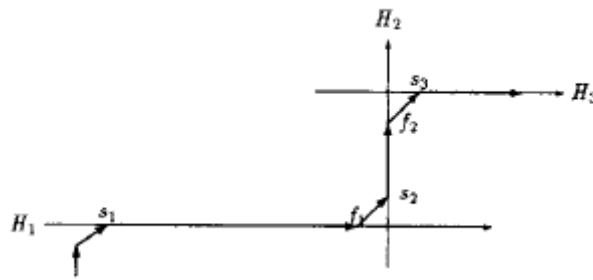


Figure-2.2 : Un itinéraire est une succession de segment

Un segment se compose de plusieurs sections. On suppose qu'un véhicule connaît en temps réel la section sur laquelle il roule. Une section est un vecteur (H, l, d) , avec H : le nom de l'autoroute. l : Le numéro de voie et d : le numéro de la section.

Une section a une longueur moyenne de 100 m. On suppose que le véhicule entre sur l'autoroute H à travers une entrée s à une section (H, l_1, d_1) et annonce (en se basant sur son itinéraire) qu'il va prendre la sortie f . l'AHS va lui assigner une route (l_2, d_2, l_3) , par conséquent le véhicule doit changer de voie et va prendre la voie l_2 qu'il empruntera jusqu'à ce qu'il arrive à la section d_2 où il changera encore une fois de voie et ira sur la voie l_3 à partir de laquelle il a la possibilité de sortir (voir figure-2.3). Une fois son itinéraire transmis un véhicule est évidemment dans l'obligation de le suivre minutieusement.

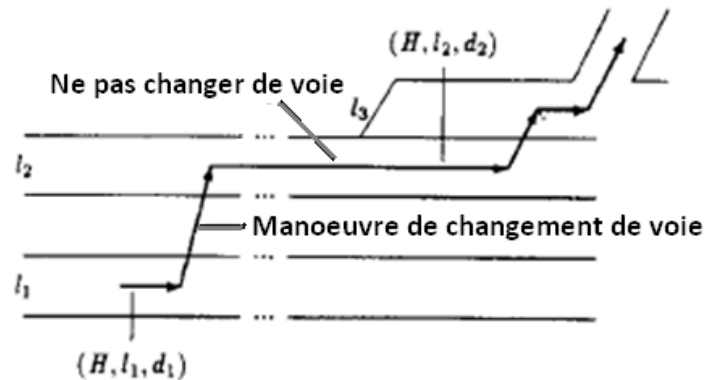


Figure-2.3 : Changement de voie

En nous basant sur ce scénario, l'objectif de commande serait donc d'amener le véhicule à exécuter de manière automatique l'itinéraire qui lui a été attribué et manière à réorganiser le trafic en forme de pelotons.

II.2.3 Architecture d'un AHS :

II.2.3.1. Architecture générale :

Le figure-2.4 illustre une architecture à 5 couches du système autoroutier automatique. Ces couches sont, de haut en bas, la couche : réseau, lien, de planification, de régulation et enfin la couche physique. Leurs fonctions correspondent aux 4 tâches vues précédemment à la

quatrième colonne du tableau-2.1 pour la phase « pendant trajet ». Toutes fois nous parlerons d'une architecture à 4 couches tout au long de ce rapport étant donné que la dernière couche, physique, n'a pas de rôle métier vis-à-vis de l'évolution du système vu qu'elle est une représentation du modèle de chaque véhicule sur l'autoroute.

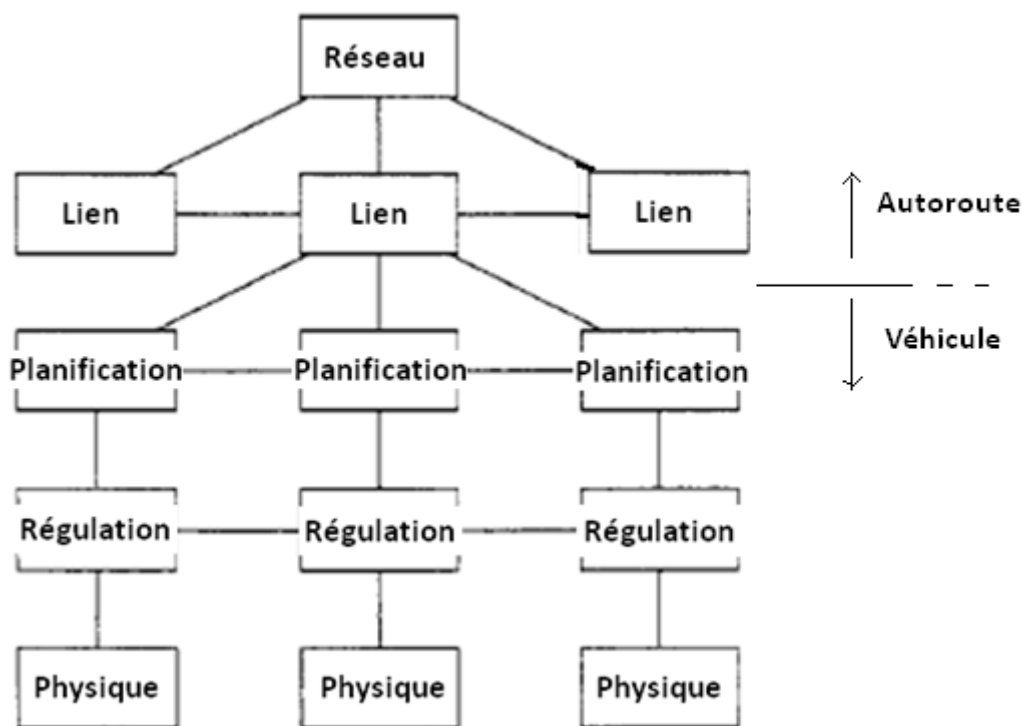


Figure-2.4 : Architecture du AHS

Il existe une seule couche réseau qui contrôle la totalité du réseau autoroutier automatique, son principal objectif est d'assigner à chaque véhicule un itinéraire approprié en fonction de sa destination et de sa position sur le réseau. Ainsi d'un point de vue global, cette couche doit constituer une table de routage de la forme : (origine, destination) → itinéraire.

Cette table va être mise à jour dès que nécessaire de telle sorte à optimiser le trafic routier. La mise à jour sera basée sur l'état du trafic. Une large littérature s'est intéressée à la gestion du trafic et au calcul de la table de routage, certaines recherches ont des approches opposées à d'autres : itinéraires statiques versus itinéraires dynamiques qui seraient calculés en fonction de la position en temps réel, optimum local qui minimise le temps de trajet de chaque véhicule individuellement versus optimum global qui minimise le temps de trajet total. La couche réseau est aussi responsable de l'admission des véhicules au niveau des autoroutes automatiques, et peut refuser l'admission de véhicules s'ils représentent un risque de perturbation pour le trafic.

Chaque long segment possède sa propre couche de lien. Son rôle est de répartir les véhicules de manière homogène sur les différentes voies, et de fixer une vitesse de référence pour chaque section pour fluidifier le trafic, fixer un nombre de véhicule par peloton, éviter les bouchons et prévenir les incidents. La couche sera mise à jour de manière à s'adapter aux

changements de l'état du trafic. Un exemple de conception d'une couche *lien* est donné dans [27].

La couche de planification et la couche de régulation sont spécifiques à chaque véhicule, autrement dit, elles sont embarquées à bord de chaque agent du réseau. Leurs tâches respectives seront pour la première : de faire évoluer le véhicule suivant un itinéraire le plus proche possible de celui assigné par la couche réseau et pour la deuxième de suivre les consignes de la couche de planification.

Deux remarques sont à souligner à propos de l'architecture à 4 couches : la première est que plus on monte dans la hiérarchie plus les modules de l'AHS supportent le poids du contrôle et de la supervision, et plus leurs décisions ont un impact sur le trafic. Il serait donc nécessaire du point de vue contrôle d'ajuster ces modules (du point de vue puissance de calcul et temps d'échantillonnage) pour pouvoir supporter ce poids (voir tableau-2.3). La deuxième remarque est que les 4 couches sont des entités logiques et peuvent donc être implémentées physiquement de différentes manières, notamment suivant le choix de répartition des tâches entre le véhicule et l'autoroute. Les critères déterminants dans ce cas là seront : les coûts de réalisation, les performances et la robustesse.

Une large gamme de contrôleurs et de régulateurs ont été proposés pour accomplir les tâches des couches de: planification et régulation. D'une part il y a ceux qui se basent sur une stratégie de centralisation où le contrôleur détermine à chaque instant la position de chaque unité, à la manière des systèmes de contrôle des trains urbains adoptés dans les années 1970. D'autre part, les méthodes qui se basent sur la robotique et *l'intelligence artificielle* qui ont fait apparition dans les années 1980, et qui préconise des véhicules autonomes, ces méthodes favorisent l'apprentissage et la planification de trajectoire en présence d'obstacles aléatoires.

L'approche centralisée a pour avantage d'assurer le contrôle et la prédiction des événements mais à un prix assez chère en matière de volume de calcul et de communication. L'approche des véhicules autonomes d'un autre côté propose une architecture complètement décentralisée mais un très haut niveau d'*intelligence* est requis pour que les véhicules arrivent à éviter avec précision les obstacles qui se tiennent devant eux de manière aléatoire. Un moyen de résoudre ce problème serait de trouver un compromis qui éviterait les points faibles de chacune des approches. Ainsi contrairement à une approche totalement centralisée, elle distribuerait la gouvernance de la planification et de la régulation aux véhicules. Et contrairement à l'approche des véhicules autonomes, réduirait l'aspect aléatoire des obstacles en coordonnant les mouvements des véhicules avoisinants. Dans ce cas là les mouvements des véhicules deviendraient prédictibles et *l'intelligence* embarquée serait réduite considérablement.

Nous allons à présent décrire la partie contrôle. L'idée principale est de répartir la commande et restreindre et coordonner les mouvements des véhicules pour simplifier leurs commandes. On définit deux restrictions :

1^{ère} restriction : Consiste en 3 séquences :

1. Changements de voie de l_1 à l_2 . un changement à la fois.
2. Maintient de la voie jusqu'à l'arrivée à la section d_2
3. Manœuvres de changement de voie l_2 à l_3

2^{ème} restriction : Seuls les agents libres (1 véhicule libre ou un peloton à 1 véhicule) peuvent exécuter un changement de voie. Donc si un véhicule à besoin de changer de voie, il doit impérativement se séparer de son peloton.

De cette manière la formation/décomposition de peloton a lieu uniquement durant les phases de changement de voie. Pour cela on définit deux manœuvres : fusion et séparation. Dans une manœuvre de fusion deux pelotons se regroupent pour former un seul peloton de plus grande taille, et dans une manœuvre de séparation un peloton se divise pour former deux pelotons de plus petite taille. Si un véhicule appartenant à un peloton veut effectuer un changement de voie il doit d'abord devenir un agent libre, ce qui requière une manœuvre de séparation. Ceci va nous permettre de décomposer un itinéraire en une série de manœuvres de fusion, de séparation et de changement de voie.

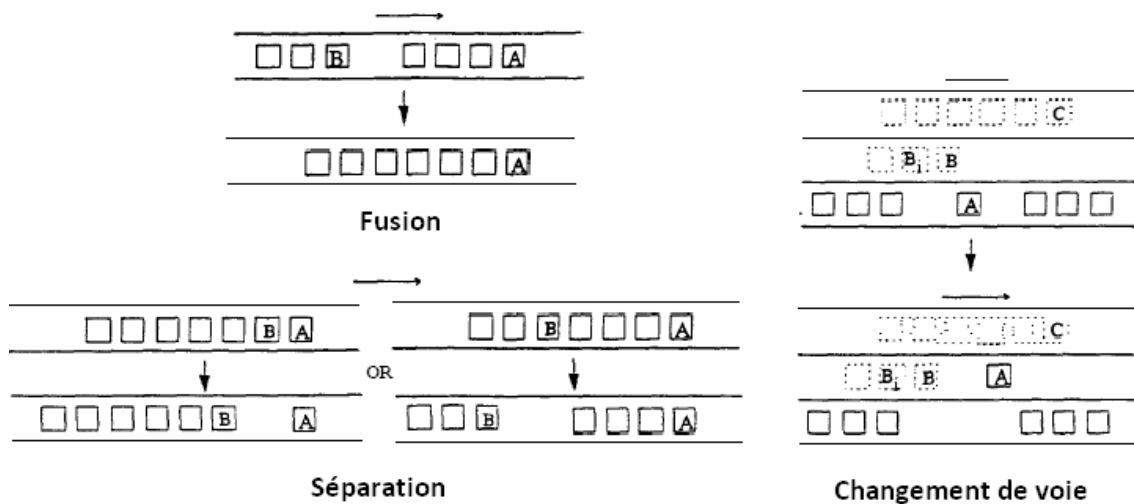


Figure-2.5 : Fusion, séparation et changement de voie

Dans une manœuvre de fusion un peloton dirigé par **B** rejoint celui dirigé par **A**. deux variantes de la manœuvre de séparation peuvent être considérées : En fonction du véhicule qui veut se séparer du peloton, le véhicule leader ou d'un des véhicules qui suivent. Voir figure-2.5.

La couche lien assigne à chaque section de l'autoroute une taille de peloton N et une vitesse de référence v . Les véhicules leader doivent respecter le plus fidèlement possible ces consignes, qui sont en adéquation avec les objectifs de sécurité. Certaines restrictions doivent aussi être prises en compte pour une sécurité accrue :

1. Uniquement les leaders et les agents libres ont la possibilité d'effectuer des manœuvres les autres véhicules ont pour obligation de suivre.
2. Un leader effectue au maximum une manœuvre à la fois.

3. Un leader coordonne ses manœuvres avec les autres leaders des autres pelotons pour assurer la sécurité.
4. Uniquement après acceptation de la manœuvre, le leader peut entamer la procédure qu'il veut exécuter.

En d'autres termes, si un véhicule **B** se situant au milieu du peloton veut devenir un agent libre pour pouvoir changer de voie, il doit faire part d'une demande au près du leader **A** de son peloton, qui engagera une procédure de séparation du peloton en deux peloton dont **A** et **B** seront les leaders respectifs, après quoi le véhicule **B** a la liberté de devenir agent libre et ainsi changer voie. Aussi la restriction 2 permet de simplifier la commande du fait que si un leader a la permission d'effectuer deux manœuvres simultanément cela rendrait la tâche de coordination plus complexe. La restriction 3 assure que lorsqu'un agent libre change de voie celle-ci soit vacante et aucun autre véhicule ne l'utilise déjà.

Toutes les restrictions prises en compte, on s'intéresse à présent au design de la couche de planification et de la couche de régulation. On suppose que la couche de planification connaît en temps réel la vitesse de référence fixée par la couche lien, la taille du peloton, l'itinéraire du véhicule et sa position sur l'autoroute (la section sur laquelle il se trouve), mais aussi si le véhicule est leader, agent libre ou suiveur. En se basant sur ces informations elle entreprend les décisions de manœuvres (fusion, séparation ou changement de voie) pour arriver à exécuter la trajectoire la plus proche possible de l'itinéraire. En échangeant des messages avec les leaders avoisinants pour coordonner leurs mouvements de sorte qu'un véhicule puisse mener à bien la manœuvre qu'il entreprend. En plus de devoir trouver un compromis entre les pelotons avoisinants, la couche de planification ordonne sa couche de régulation d'implémenter les lois de commande nécessaires à la manœuvre.

Comme il sera détaillé plus loin 5 types de lois de commande seront nécessaires. La couche de régulation doit implémenter une de ces 5 lois suivant les consignes de sa couche de planification. A la fin de la manœuvre la couche de planification doit être informée pour permettre de passer à la manœuvre suivante. Les lois de commande s'occupent de générer les valeurs nécessaires à la commande de l'accélération, le freinage et la direction du véhicule via des actionneurs adéquats en fonction de l'état du véhicule.

Important : Il est à souligner que *la couche de planification* combinée à *la couche de régulation* constitue un **régulateur hybride (automate hybride)**, à partir du moment où la couche de planification est un système à événement discret, qui contrôle la couche de régulation constitué de régulateurs à événement continu. [26] (Voir figure-2.39 en annexe).

II.2.3.2. Couche de planification :

La couche de planification a pour objectifs 3 tâches principales :

- Décider quelle manœuvre doit être exécutée pour suivre l'itinéraire assigné.
- Coordonner cette manœuvre avec les couches de planification des véhicules avoisinants pour assurer la sécurité de l'ensemble des véhicules.
- Superviser la couche de régulation lors de l'exécution de la manœuvre.

Afin de pouvoir réaliser ces tâches la couche de planification doit avoir accès certaines informations, on parlera de l'état de la couche de planification ou *planning_state* :

$$planning_state = (N, v, l, d, véh_{ID}, pltn_{ID}, pltn_{size}, pltn_{posi}, busy)$$

Avec : N, v sont respectivement la taille du peloton et la vitesse de référence assignés par la couche lien à atteindre par le peloton. l, d : sont respectivement le numéro de voie et la section et qui définissent la position du véhicule à l'aide de capteurs. $véh_{ID}, pltn_{ID}$: sont les identifiants de chaque véhicule et de chaque peloton. $pltn_{size}$: est la taille actuelle du peloton. $pltn_{posi}$: est la position du véhicule dans le peloton ($pltn_{posi} = 1$ position du véhicule leader). $busy$: est un drapeau mis à 1 si le véhicule est en cours de manœuvre et mis à 0 sinon.

PM : path monitor	
SUPR : supervisor	
BFRE : become free agent	
BPCmerge	APRmerge
APCsplit	APRsplit
BPCsplit	BPRsplit
APCchg	BPRchg
	BLPRchg
	CPRchg

Tableau-2.3 : Organisation de la couche de planification

Les 3 tâches de planification sont de nature hiérarchique, la commande est sous forme d'organigrammes couplés de la manière hiérarchique montrée sur le tableau-2.3. La couche supérieure PM (path monitor) s'occupe de comparer la position du véhicule avec l'itinéraire assigné, sélectionner une manœuvre et donner l'ordre à la couche SUPR (supervisor) de l'exécuter.

Si la manœuvre est un changement de voie et si le véhicule n'est pas un agent libre, SUPR ordonne à la couche BFRE (become free agent) d'entamer une procédure de séparation en deux pelotons à la fin de laquelle le véhicule deviendra un agent libre. La coordination entre les véhicules avoisinants se fait (après avoir reçu l'ordre du SUPR ou BFRE) à l'aide d'une des 10 procédures de la couche inférieure BPCmerge, APCsplit, APRmerge, etc. Dans ce qui suit nous expliquerons le fonctionnement de ces 10 procédures.

Ces procédures assurent la coordination en échangeant des messages qu'on nommera : protocoles, par analogie aux protocoles de communication. Tout d'abord nous allons considérer la manœuvre de fusion de la figure-2.5. Cette manœuvre requière un protocole entre deux véhicules, le véhicule B demande une séparation et le véhicule A doit répondre. La demande de fusion émanant du véhicule B est appelée BPCmerge (B protocol command merge), et celle de A est appelée APRmerge (A protocol respond merge), il est évident que chaque véhicule doit avoir les deux protocoles puisqu'il est amené à être leader ou bien suiveur.

Sur la même figure-2.5 la procédure de séparation un véhicule peut se trouver dans l'un des cas suivants : leader et commander une séparation ou répondre à une demande de séparation (via les protocoles : APCsplit et APRsplit), suiveur et demander une séparation ou répondre à une commande de séparation (via les protocoles : BPCsplit et BPRsplit).

Aussi pour un changement de voie, en considérant la figure-2.5 le véhicule peut prendre un des rôles suivants : en tant que véhicule A qui commande le changement de voie (APCchg), en tant que leader sur la voie suivante et répondre à la demande de changement de voie du véhicule A (BPRchg), en tant que suiveur sur la voie suivante et répondre à la demande de changement (BLPRchg) ou bien en tant que leader sur la troisième voie (CPRchg).

II.2.3.2.1. Protocole de fusion

Nous allons maintenant étudier de plus près le protocole de fusion. Le schéma de la figure-2.7 (en annexe) représente la procédure suivie par les véhicules A et B lors d'une demande de fusion.

Le fonctionnement de l'organigramme est le suivant :

On suppose qu'initialement l'organigramme est dans l'état de non fonctionnement (*idle*). On suppose que le véhicule B fasse soumettre une demande de fusion. Dans ce cas, il détermine si un véhicule se trouve devant lui avec lequel il peut fusionner et former un peloton et observe son drapeau, si *busy* est à 0 (ce qui veut dire que le véhicule n'est pas engagé dans une manœuvre). Si la réponse à ces deux tests est *non* l'organigramme retourne à l'état de non fonctionnement. Si par contre la réponse est *oui* le véhicule B met le flag *busy* à 1 et fait la transition *SEND_request_merge* ce qui veut dire qu'il envoie une requête de fusion au leader (véhicule A) du peloton devant lui, puis se met dans l'état d'attente (*wait*).

Si B reçoit une réponse négative (*REC_Nack_request_merge*) provenant du leader A du peloton, il remet le drapeau *busy* à l'état 0 et transite vers l'état de non fonctionnement (*idle*). Si B reçoit une réponse positive (*REC_ack_request_merge*) de la part du véhicule A, il franchit une transition pour aller à un état qui va ordonner à sa couche de régulation d'accélérer le véhicule via *reg_posi* (qui sera détaillé dans la section réservée à la couche de régulation) pour fusionner avec le peloton dirigé par le véhicule A. Après que la couche de régulation ait terminé son action le véhicule B envoie une confirmation de fusion (*SEND_confirm_merge*) au véhicule A, remet le drapeau *busy* et retourne à l'état de non fonctionnement (*idle*).

Quand le véhicule A reçoit une requête *request_merge* de la part du véhicule B, il vérifie s'il est déjà engagé dans une manœuvre, puis si les deux pelotons réunis ne dépassent pas la taille de peloton fixée par la couche lien, i.e. $pltn_size(A) + pltn_size(B) < N$, si la réponse aux deux tests est *non*, le véhicule A envoie une réponse négative au véhicule B. par contre si la réponse est *oui*, le véhicule A met son flag *busy* à l'état 1, envoie une réponse positive au véhicule B, et passe à l'état d'attente d'une réponse. Une fois que le véhicule A reçoit la confirmation *confirm_merge* de la part de B, le véhicule A met à jour le *planning_state* qui contient toutes les informations à propos du nouveau peloton qu'il dirige à présent, met à 0 le

flag *busy* et retourne à l'état de non fonctionnement (idle). La manœuvre se termine quand les deux véhicules A et B retournent à l'état de non fonctionnement (idle). Pour plus de clarté se référer à la figure-2.7.

Remarque : Le véhicule B représente un agent libre ou un peloton de véhicules, dans les deux cas la procédure reste inchangé.

II.2.3.2.2. Protocole de séparation :

Pour une procédure de séparation 2 cas sont à envisager :

- Le véhicule demandeur de séparation est le véhicule leader (appelé A)
- Le véhicule demandeur de séparation est un véhicule suiveur (appelé B et les véhicules qui se trouvent derrière le véhicule B seront les véhicules C_n)

1^{er} cas : le véhicule leader entame une manœuvre séparation :

Un véhicule leader s'il n'est pas engagé dans une manœuvre quelconque peut si besoin démarrer une procédure de séparation. La figure-2.8 (annexe) illustre la procédure suivie :

Le véhicule **A** commence par vérifier que son drapeau *busy* est à 0 sinon il doit attendre jusqu'à ce qu'il passe à l'état 0, il met *busy* = 1 pour tout les véhicules appartenant au peloton et fait décélérer les véhicules se trouvant derrière lui en faisant appel à : *reg_vitess* (qui sera détaillé dans la section réservée à la couche de régulation) jusqu'à une distance de sécurité. Le véhicule **B** qui suit immédiatement le véhicule **A** envoie une confirmation *SEND_confirm_split* dès que la distance de sécurité est atteinte, le véhicule **A** ordonne le changement du statut du véhicule **B** de suiveur à leader. Les deux véhicules **A** et **B** mettent à jour leurs *planning_state*.

2^{ème} cas : un véhicule suiveur demande une manœuvre de séparation :

Un véhicule suiveur se trouvant en milieu ou en fin de peloton **B** peut soumettre une demande de séparation à son véhicule leader **A**. la figure-2.9 (en annexe) illustre la procédure suivie :

Le véhicule **B** teste le drapeau du véhicule **A** si *busy* = 1 il doit attendre jusqu'à sa mise à 0, puis il envoie *SEND_request_split* au véhicule **A** et se met en état d'attente. En accordant la permission de manœuvrer au véhicule B, le véhicule A met son flag *busy* = 1 et envoie *SEND_ack_request_split* (Dans le cas où *SEND_request_split* survient pendant que le flag *busy* de **A** est à 1, le véhicule **A** revoit automatiquement *SEND_nack_request_split* au véhicule **B**) et entame une action de décélération sur les véhicules **B** et C_n en faisant appel à *reg_vitess* jusqu'à une distance de sécurité. Une fois la distance de sécurité atteinte le véhicule **B** envoie *SEND_confirm_split* au véhicule **A** qui suspend la décélération, met son *busy*=0, change le statut du véhicule **B** de suiveur à leader et met à jour son *planning_state*.

Le véhicule B met à jour son *planning_state* et entame maintenant une procédure de séparation en tant que leader (vue dans le 1^{er} cas) qui se termine par sa séparation en agent libre et laisse un peloton (dans le cas où il se trouvait en milieu de peloton) qui sera dirigé par

le véhicule qui vient immédiatement derrière lui. Ce dernier peloton peut fusionner avec le peloton de **A** dans le cas où le véhicule **B** quitte la voie.

II.2.3.2.3. Protocole de changement de voie :

Le véhicule leader d'un peloton peut initier un changement de voie en concordance avec l'itinéraire qui lui a été fixé, ou initier un changement de voie pour un véhicule qui appartient à son peloton. Dans le cas où ce véhicule n'est pas un agent libre, le protocole commence par une procédure de séparation, à la fin de laquelle le véhicule devient un agent libre.

Supposons que le véhicule **A** est un agent libre sur la voie 1 et doit transiter vers la voie 2 (Voir figure-2.5). Cette transition n'est possible que si un espace adéquat est disponible sur la voie 2, et aucun véhicule de la voie 2 ou de la voie 3 n'envisage d'occuper cet espace. Le protocole doit donc s'assurer d'intégrer cette vérification. On suppose que le véhicule **A** est équipé des capteurs nécessaires qui lui permettent de détecter la présence d'un véhicule à une distance de 30 mètres sur la voie 2 et 18 mètres sur la voie 3. (Voir figure-2.6).

Le véhicule peut changer de voie sous l'une des conditions suivantes :

1. Aucun véhicule n'est détecté sur les voies 2 et 3. **A** peut aller sur la voie 2.
2. Aucun véhicule n'est détecté sur la voie 2, mais il y a un véhicule sur la voie 3. **A** doit demander à ce dernier de ne pas aller sur la voie 2.
3. Un peloton est détecté sur la voie 2. Dans ce cas là, **A** demande un échange avec le peloton.

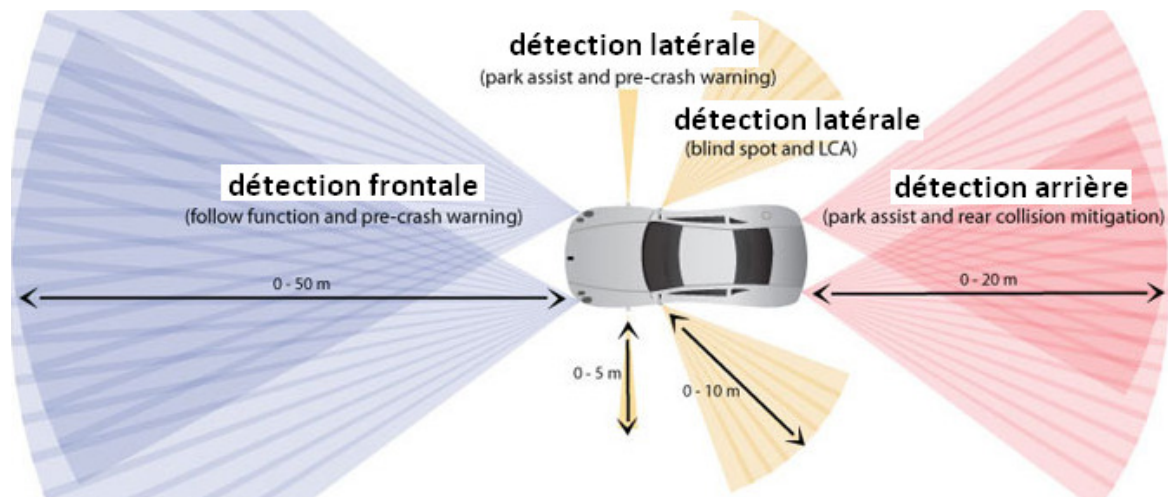


Figure-2.6 : Détection frontale, latérale et arrière

Nous allons décrire la procédure à suivre avant que le véhicule **A** ne change de voie et la figure-2.10 (en annexe) illustre le fonctionnement du protocole sous forme d'organigramme.

Supposons que le véhicule **A** ait détecté un véhicule **D** sur la voie 2 appartenant au peloton dirigé par le véhicule **B**. **A** envoie un *SEND_request_change_lane* au véhicule **D**, qui

transmet la demande à son leader B. Si le flag busy du véhicule B est à 1, B envoie *SEND_nack_request_change_lane* au véhicule A. Dans le cas contraire, B envoie *SEND_ack_request_change_lane* et détermine le moyen le plus simple pour créer de l'espace pour le véhicule A. 3 possibilités sont à envisager :

- A est à hauteur du premier tiers du peloton dirigé par B. le peloton de B doit décélérer pour créer de l'espace.
- A est à hauteur du troisième tiers du peloton dirigé par B. le peloton de B demande à A de décélérer pour avoir de l'espace.
- A est à hauteur du deuxième tiers du peloton dirigé par B. Le véhicule B décide d'aborder une procédure de séparation à la hauteur du véhicule D pour créer un espace adéquat pour le changement de voie du véhicule A. (voir figure-2.38 en annexe)

Quand l'espace nécessaire est créé, le leader du peloton de A ordonne à sa couche de régulation de faire appel à *reg_direction*, pour exécuter le changement de voie. Les capteurs de A continuent à détecter la présence d'un véhicule, si tel est le cas, la procédure de changement de voie sera annulée, et le véhicule B sera informé.

Si la manœuvre se déroule normalement A envoie *SEND_confirm_change_lane* à B qui met à jour son *planning_state*, et fait appel à *reg_posit* pour réduire à distance réglementaire l'espace existant entre les véhicules de son nouveau peloton.

II.2.3.3. Couche de régulation :

Le design de la couche de planification présenté précédemment présuppose que la couche de régulation est à même d'implémenter 5 lois de commande pour accomplir certaines tâches. Nous décrivons ces tâches brièvement :

1. Respect des distances intra-peloton par les suiveurs et inter-peloton par les leaders :

Quand un véhicule est suiveur il doit être commandé de sorte à maintenir impérativement une certaine distance entre lui et le véhicule se trouvant devant lui dans le peloton, en rejetant tout dépassement qui peut mener à des collisions. La même chose est valable pour un leader de peloton vis-à-vis de la queue de peloton qui se trouve devant lui. Cette tâche sera assurée par le processus *reg_posi* qui sera détaillé dans cette section.

2. Poursuite de référence en vitesse pour un véhicule leader

Le leader doit être en mesure d'atteindre une vitesse de référence imposé par la couche lien, en maintenant une distance de sécurité inter-peloton (de 60 m environs). Cette tâche sera assurée par le processus *reg_vitess* qui sera détaillé plus tard.

3. Accélérer pour fusionner:

Cette loi de commande est utilisée par un leader pour accélérer et fusionner avec le peloton se trouvant devant lui. Elle est assurée par *reg_posi*.

4. Décélérer pour se séparer :

Cette loi de commande est implémentée pour commander un véhicule qui doit se séparer de son peloton sous les ordres de la couche de planification. Elle est assurée par le processus *rég_vitess*.

5. Contrôle latéral après un changement de voie :

Rappelons que seul un agent libre a le droit de changer de voie et qu'un agent libre est un véhicule leader, de ce fait il est considéré comme un véhicule semi-autonome (le véhicule est contrôlé par l'AHS et le conducteur).

Le contrôle latéral est actif pour tous les véhicules dès leur accès aux espaces autoroutiers automatiques, mais doit être *désactivé* lors d'un changement de voie, permettant au conducteur de diriger le véhicule de manière à rejoindre la voie de destination. Le AHS réactive le contrôle latéral *rég_direction* dès que le véhicule se rapproche de l'axe de la voie de destination, grâce aux capteurs de position disposés sur chaque véhicule.

II.2.3.3.1. Lois de commande :

Les lois de commande que nous allons voir dans ce qui suit, font partie de la couche de régulation, et sont activées ou désactivées par la couche de planification (système à événement discret) suivant les besoins, ce qui fait de l'ensemble une commande hybride. Trois lois de commande sont nécessaires pour accomplir les tâches dictées par la couche de planification : la commande en vitesse *rég_vitess*, la commande en position *rég_posi* et la commande latérale *rég_direction*.

II.2.3.3.1.1. Loi de commande en vitesse : *rég_vitess*

II.2.3.3.1.1.1. Introduction

Cette loi de commande a été conçue pour permettre la commande en vitesse d'un véhicule donné par un donneur d'ordre (les donneurs d'ordre peuvent être soit le AHS qui commande les véhicules leader ou bien un véhicule leader qui commande ses propres suiveurs). Le donneur d'ordre peut imposer à un véhicule donné une vitesse de référence répondant aux consignes de la couche de planification.

II.2.3.3.1.1.2. Modélisation du système :

Plusieurs modèles de voiture sont proposés dans la littérature, certains plus précis que les autres. Dans [27] on propose un modèle de véhicule non linéaire complexe à 12 états, qui sera simplifié à un modèle de 4 états puis 3 états à des fins de commande.

Dans notre étude nous avons choisi de faire la synthèse de commande sur un modèle développé par les ingénieurs de MathWorks (Matlab R2007b & Simulink) disponible sous Simulink/Help/demo/simulink/SimDriveline. Le modèle en question « Full Car » est un modèle précis et assez élaboré, il reflète avec une certaine acuité le comportement réel d'un véhicule.

La figure-2.7b montre la structure globale du modèle.

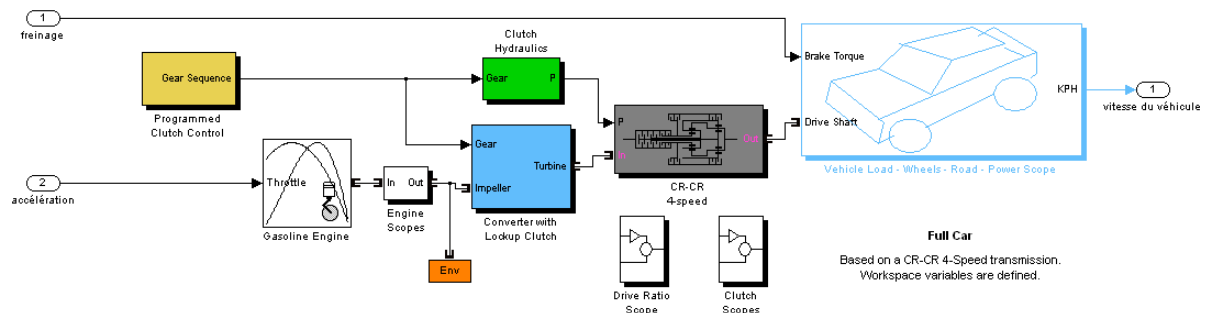


Figure-2.7b : Schéma du modèle de véhicule

Avec comme entrées : la force exercée sur la pédale d'accélération et le couple de freinage appliqués sur les roues, et en sortie la vitesse du véhicule.

Les sous-systèmes principaux constituant le modèle sont :

- Le moteur.
- Le réducteur.
- La transmission.
- Le groupe motopropulseur : qui englobe l'inertie du véhicule, les roues, le couplage des roues avec la route et enfin le freinage.

En ce qui concerne la modélisation du véhicule, on se fie au travail des développeurs de MathWorks qui sont actuellement leader dans le calcul mathématique. Leurs outils sont largement utilisés à travers le monde par les scientifiques et les ingénieurs. A titre d'exemple la firme automobile « *Tesla Motors* » qui a construit la première voiture de sport le *Roadster Tesla*, entièrement électrique, affirme avoir exploité le travail des ingénieurs de Mathworks. (Pour plus d'informations cf. www.Teslamotors.com).

II.2.3.3.1.1.3. Synthèse de la commande et résultats :

A cause de la nature du modèle utilisé dans notre étude une commande non linéaire classique (linéarisation entrée/sortie, commande par mode de glissement etc.) s'avère être inappropriée, puisque le modèle dispose de 2 entrées qui représentent respectivement : l'accélération et le freinage. Ces deux entrées de commande fonctionnent impérativement en commutation. En d'autres termes, il serait inadéquat d'appliquer des commandes sur les 2 entrées simultanément pour la simple raison que dans la réalité on ne peut pas appliquer une telle commande à un véhicule.

La commande en commutation semble s'imposer donc pour ce modèle. D'autres approches ont été adoptées dans [27] notamment : la linéarisation entrée/sortie et la commande par modes glissants. La figure-2.8 montre la stratégie de commande développée pour ce modèle.

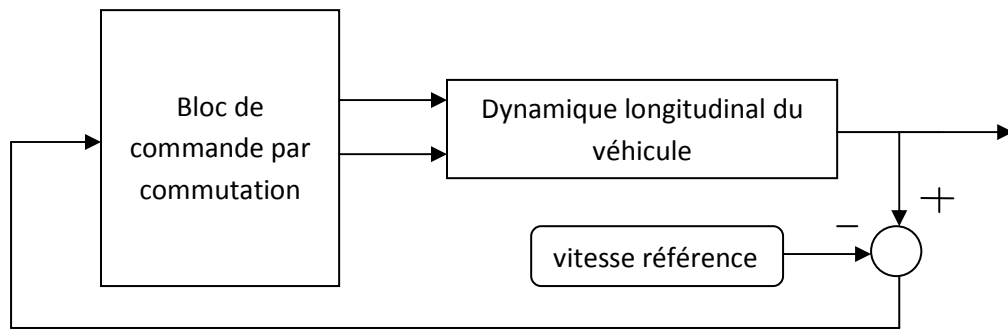


Figure-2.8 : Schéma de commande pour la commande en vitesse

Le principe sur lequel se base cette commande est très simple : il consiste à comparer la vitesse en temps réel du véhicule à la vitesse de référence imposée par un donneur d'ordre, la différence déterminera dans le bloc de commutation l'action à entreprendre pour maintenir le véhicule à la vitesse voulue. Le bloc de commutation est un bloc programmable, on peut y définir les intervalles de commutation de manière flexible suivant les exigences du terrain.

```

1 function [f,a] = fcn(u,e)
2 % This block supports the Embedded MATLAB subset.
3 % See the help menu for details.
4 a=0.0001;
5 f=0;
6 for i=1;1000000;
7     if u>0 && u<=1
8         f=0;
9         a=0.0001*e;
10    end
11    if u>=-10 && u<=0
12        f=0;
13        a=0.05*e;
14    end
15    if u>=1 && u<2
16        a=0;

```

Le bloc de commutation contient un programme qui permet de situer la différence entre la vitesse du véhicule et la vitesse de référence dans un certain intervalle et d'agir en conséquence. Après plusieurs essais, on a pu paramétrer ce bloc de manière à ne pas trop solliciter les actionneurs (moteur, freins) et à assurer une réponse suffisamment rapide et précise.

Les résultats de la simulation sont montrés sur la figure-2.16, en réponse à une référence de vitesse progressive pendant les 20 premières secondes, jusqu'à atteindre la vitesse voulue (60 Km/h), puis à l'instant 40 secondes un changement de référence se produit (vitesse de référence 30 Km/h).

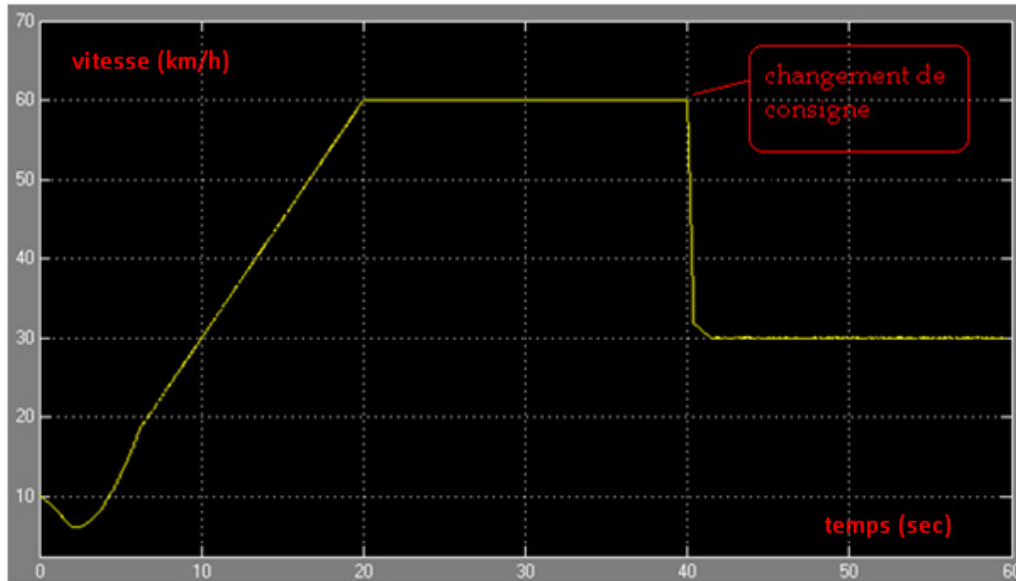


Figure-2.16 : Résultat de simulation de la régulation de vitesse.

II.2.3.3.1.1.4. Discussion :

Cette commande en vitesse est destinée entre autres à faire décélérer un ou plusieurs véhicules simultanément en cas de besoin. Notamment en cas de freinage d'urgence du véhicule leader, tous les véhicules de son peloton doivent freiner exactement de la même manière et simultanément. Pour cette raison le temps de freinage (ou le temps d'arrêt des véhicules) admis est extrêmement important afin d'éviter les éventuelles collisions. Le *temps d'arrêt théorique* obtenu par cette commande à 60 km/h de vitesse initiale est inférieur à 2 secondes.

II.2.3.3.1.1.5. Conclusion :

Une commande à commutation a été synthétisée pour la commande en vitesse d'un véhicule. Ce choix de commande s'est imposé eu égard à la structure du modèle choisi et qui ne permet pas l'application des deux commandes simultanément (accélération et freinage). Cette commande est robuste et sollicite de manière permanente les actionneurs (freins et moteur), néanmoins les résultats de simulation ont validé son efficacité en permettant un temps de freinage et d'arrêt assez satisfaisant pour un dépassement quasi nul.

II.2.3.3.1.2. Loi de commande en position : *rég_posi*

II.2.3.3.1.2.1. Introduction

Dans un système autoroutier automatique la couche de régulation est amenée à préserver une certaine distance de sécurité entre les véhicules (intra-peloton ou inter-peloton), pour ce faire une commande en position d'un véhicule relativement au véhicule qui se trouve devant lui est nécessaire. On doit donc modéliser le système constitué de 2 véhicules et parvenir à maintenir entre eux une distance minimale de sécurité sous toutes circonstances.

II.2.3.3.1.2.2. Modélisation du système :

On considère 2 véhicules A et B roulant sur la même voie d'autoroute. Nous nous intéresserons en premier lieu à l'interaction entre ces 2 véhicules. Supposons que les véhicules A et B ont des longueurs respectives L_A et L_B et x_A et x_B seront respectivement leurs position par rapport à un repère fixe sur la route. On suppose aussi que le véhicule B est leader et le véhicule A est suiveur. L'intérêt de la commande en position est de permettre au véhicule A de poursuivre le véhicule B, on supposera donc aussi que l'on contrôle le véhicule A et qu'on n'a aucun contrôle sur le véhicule B.

La dynamique du véhicule poursuivant sera approximer par une équation différentielle ordinaire du troisième ordre [25], comme le montre l'équation (2.5).

$$\ddot{x}_A = b_A(\dot{x}_A, \ddot{x}_A) + a_A(\dot{x}_A)v_A \quad (2.5)$$

Avec : a_A et b_A des fonctions non linéaires du vecteur d'état avec $a_A(\dot{x}_A) \neq 0$. Les deux premières dérivés de x_A sont liées aux lois mouvement, la troisième a une relation avec l'action résultante au freinage et à l'accélération moyennant les actionneurs (moteurs et freins) [25]. Selon [25] les dynamique non linéaires introduites par a_A et b_A ne sont pas importantes et supposent que le feedback linéarisant a déjà été fait, ce qui veut dire que l'entrée v_A serait donnée par l'équation (2.6).

$$v_A = \frac{-b_A(\dot{x}_A, \ddot{x}_A) + u}{a_A(\dot{x}_A)} \quad (2.6)$$

Pour obtenir : $\ddot{x}_A = u$

On s'intéresse donc à la commande du système linéaire résultant. La dynamique du système et la synthèse de la commande sont indépendants de la position absolue du véhicule dans l'autoroute. Pour éliminer la position absolue du problème, on introduit une autre variable mesurable : la distance D entre les deux véhicules, donnée par l'équation (2.7).

$$D = x_B - x_A - L_B \quad (2.7)$$

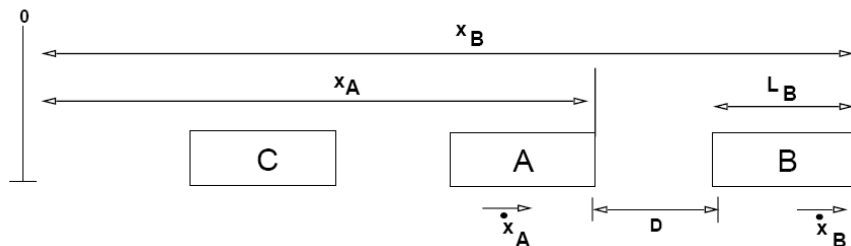


Figure-2.17 : Schéma représentatif des véhicules sur la même voie d'autoroute

Toutes les informations pertinentes sur le comportement du véhicule peuvent être réunies dans le vecteur d'état de l'équation (2.8).

$$x = \begin{pmatrix} \dot{x}_A \\ \ddot{x}_A \\ D \\ \dot{D} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

On peut donc écrire : $\dot{x} = \begin{pmatrix} x_2 \\ u \\ x_4 \\ -x_2 + \ddot{x}_B \end{pmatrix}$ (2.9)

A partir de là on peut écrire le système sous la forme donnée en (2.10)

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} u + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \ddot{x}_B \\ &= Ax + Bu + V\ddot{x}_B \end{aligned} \quad (2.10)$$

Notre objectif de commande sera de réguler la distance et la vitesse relative du véhicule à un point fixe désiré, mais aussi d'arriver à une poursuite de vitesse qui soit tolérable. On prendra comme sorties les paramètres suivants : \dot{x}_A , \ddot{x}_A et D .

$$\begin{aligned} y &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} x \\ &= Cx \end{aligned} \quad (2.11)$$

II.2.3.3.1.2.3. Synthèse de la commande et résultats :

Pour cette commande nous avons à faire à un système linéaire (après avoir pratiqué un feedback linéarisant) sous perturbations. L'objectif de la commande sera donc avant tout de stabiliser le système et d'assurer le rejet de perturbation et puis aussi d'assurer une réponse relativement rapide et sans dépassement. La manière la plus simple et la plus efficace pour arriver à atteindre cet objectif de commande est d'appliquer une commande par retour d'état. Le comportement dynamique d'un système dépend essentiellement des valeurs propres de sa matrice dynamique (la matrice A). Dans ce qui suit nous allons développer une commande par retour d'état :

$$u = -Kx + v$$

Avec : K : matrice de gain et v : la nouvelle commande en boucle fermée. Afin de modifier le comportement du système en *plaçant arbitrairement* les modes du système en boucle fermée de manière à satisfaire le plus possible nos objectifs de départ.

Le placement de pôle choisi pour cela est le suivant :

```
-2.297927250890901e+002
-5.400374554549647e-001 +3.481414487777253e-001i
-5.400374554549647e-001 -3.481414487777253e-001i
-2.562261692597077e-017
```

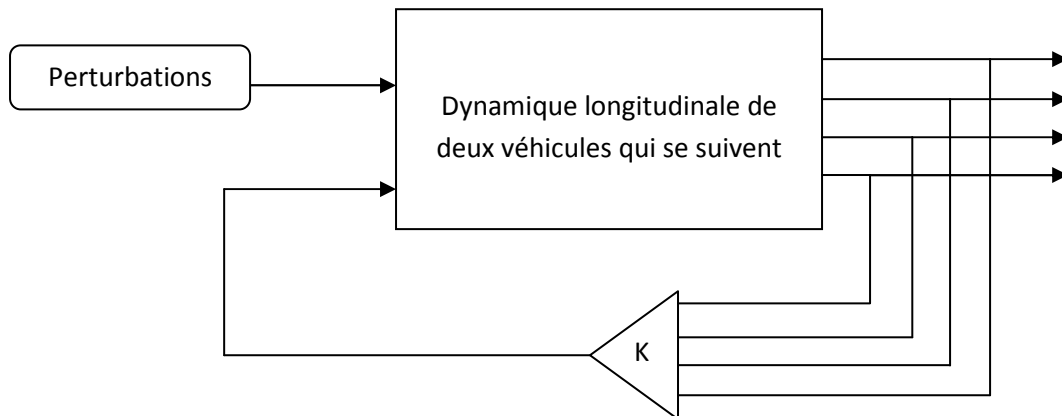


Figure-2.18 : Schéma de commande pour la commande en position

Le schéma de commande qui permet de réaliser cela est représenté par la figure-2.18. Les résultats de simulation sont présentés sur les figures-2.19, 2.20 et 2.21 sous les conditions suivante : vitesse initiale des véhicules A et B : 70 km/h (19.44 m/s), distance initiale entre les deux véhicules 10 m, distance désirée 1 m. A l'instant $t = 30$ secondes, une perturbation intervient : le véhicule B accélère de 10 m/s^2 pendant 1 seconde et atteint la vitesse de 106 km/h (29.44 m/s).

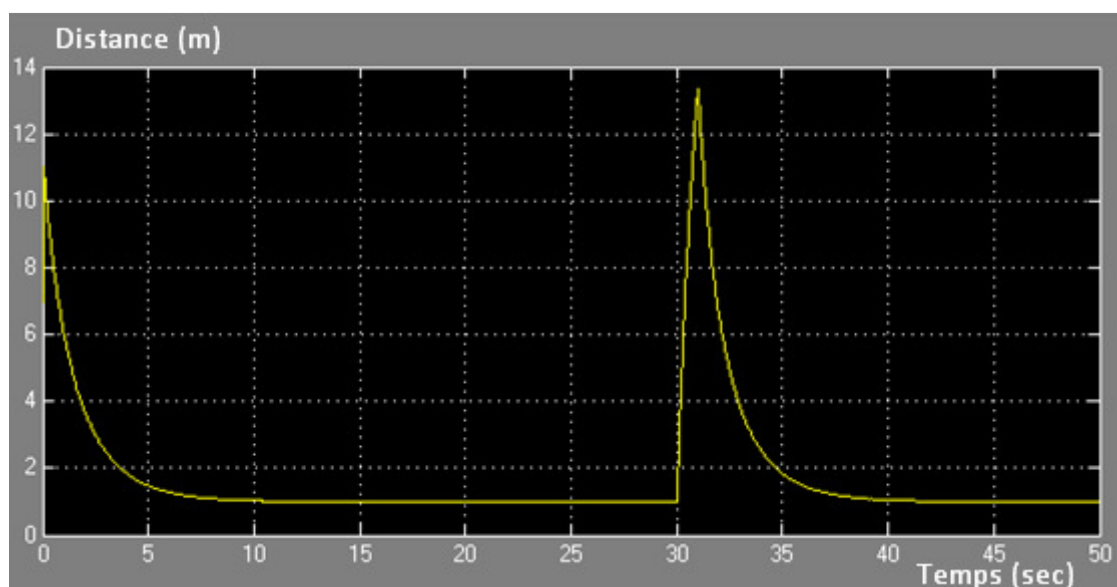


Figure-2.19 : Distance entre les deux véhicules

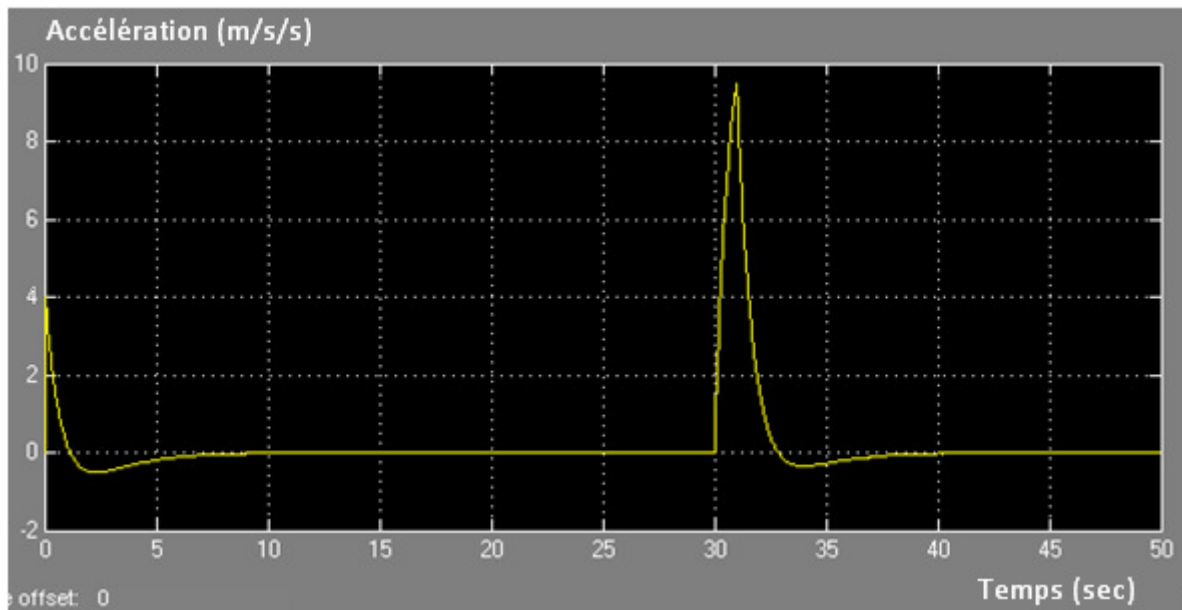


Figure-2.20 : Accélération du véhicule A

II.2.3.3.1.2.4. Discussion:

On remarque sur la figure-2.19 que la distance entre le véhicule A et le véhicule B a été réduite de 10 m à 1 m en l'espace de 10 secondes (pour une distance initiale entre les deux véhicules de 60 m, des simulations ont montré que 15 secondes sont nécessaires pour réduire cette distance à 1m). Ceci s'est traduit par l'accélération du véhicule A comme on peut le voir sur la figure-2.20, le véhicule B ayant une vitesse constante de 60 km/h (pour $t < 30s$) donc une accélération nulle. La figure-2.21 nous montre le changement de vitesse du véhicule A, qui lui permet de réduire la distance initiale à la distance désirée. Ce profil de vitesse sera donc utilisé comme vitesse de référence pour commander le véhicule de la manière décrite précédemment.

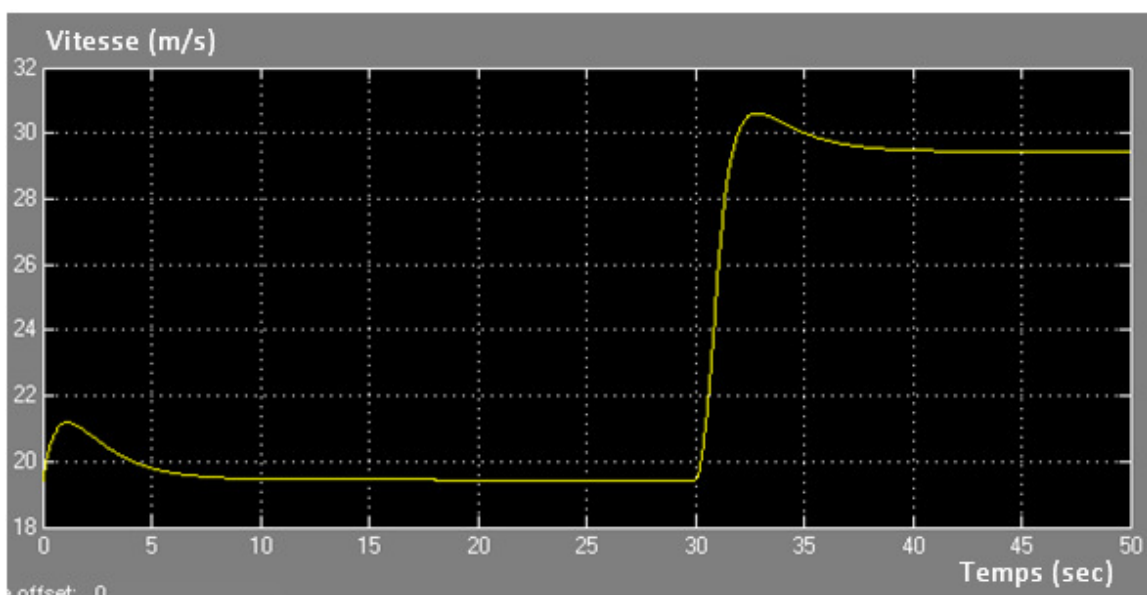


Figure-2.21 : Vitesse du véhicule A

La commande en position doit pouvoir maintenir la distance de sécurité imposée lors d'un freinage du véhicule B (de faible amplitude). On imposera donc au système les mêmes conditions que le test précédent sauf que cette fois-ci à l'instant $t = 30$ secondes, le véhicule B décélère de -0.6 m/s^2 pendant 1 seconde. Les résultats sont présentés sur la figure-2.22.

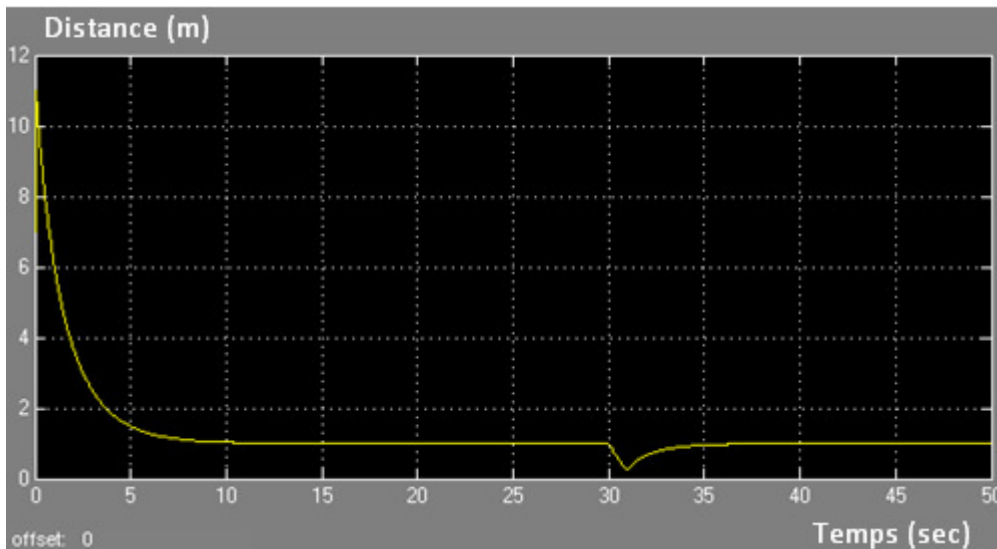


Figure-2.22 : Distance entre A et B si B décélère à -0.6 m/s^2 pendant 1 seconde

On s'intéresse à présent au comportement d'un peloton vis-à-vis de la commande en position. Supposons un peloton de taille maximale (20 véhicules) soumis à une perturbation sous forme d'accélération du véhicule leader. Voir schéma figure-2.10b en annexe. Les véhicules sont numérotés de 1 à 20, 1 étant le véhicule leader. A l'instant $t = 30$ secondes le véhicule B prend une accélération de 0.8 m/s^2 pour une durée de 1 seconde. Les distances entre les 2 premiers véhicules et entre le 15^{ème} et le 14^{ème} véhicule sont montrées sur les figures-2.23 et 2.24 respectivement.

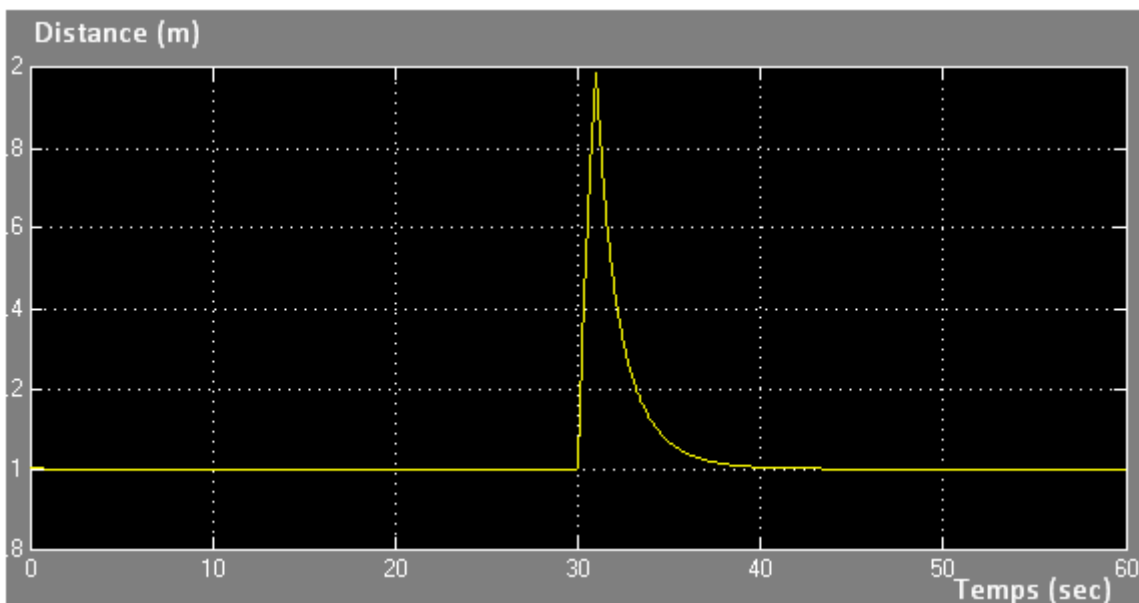


Figure-2.23 : Distance entre les 2 premiers véhicules du peloton

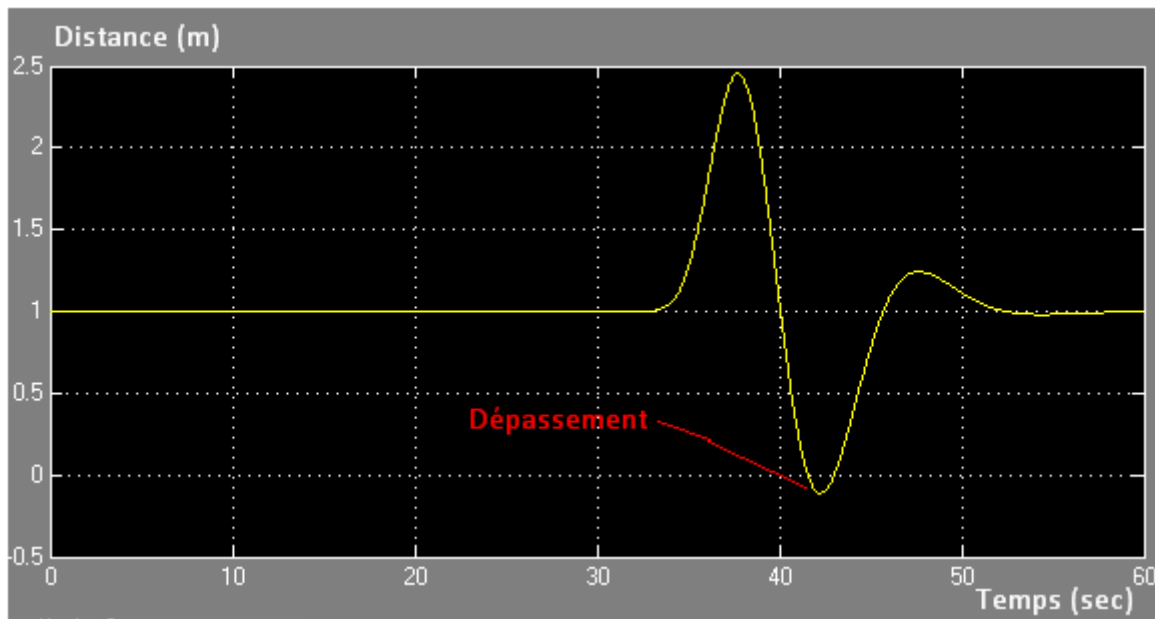


Figure-2.24 : Distance entre le 14^{ème} et le 15^{ème} véhicule du peloton

Ce dépassement en distance est évidemment intolérable. Il mène en réalité à une collision entre le 14^{ème} et le 15^{ème} véhicule jusqu'au 20^{ème} véhicule. Ces collisions peuvent vraisemblablement causer des dégâts matériels considérables. Une solution doit être établie pour remédier à cela, elle consiste à réduire le nombre de véhicule auquel la commande est appliquée simultanément. La distance creusée par l'accélération du véhicule leader sera de cette manière comblée au fur et à mesure. Selon nos essais, si on considère la commande en position pour 3 véhicules à la fois, et même si le leader prend une accélération de 10 m/s^2 pour une durée de 10 secondes (qui lui permet de passer de 0 à 100 m/s soit 360 km/h en 10 secondes) aucun dépassement n'est constaté. Les résultats sont montrés sur les figure-2.25 et 2.26.

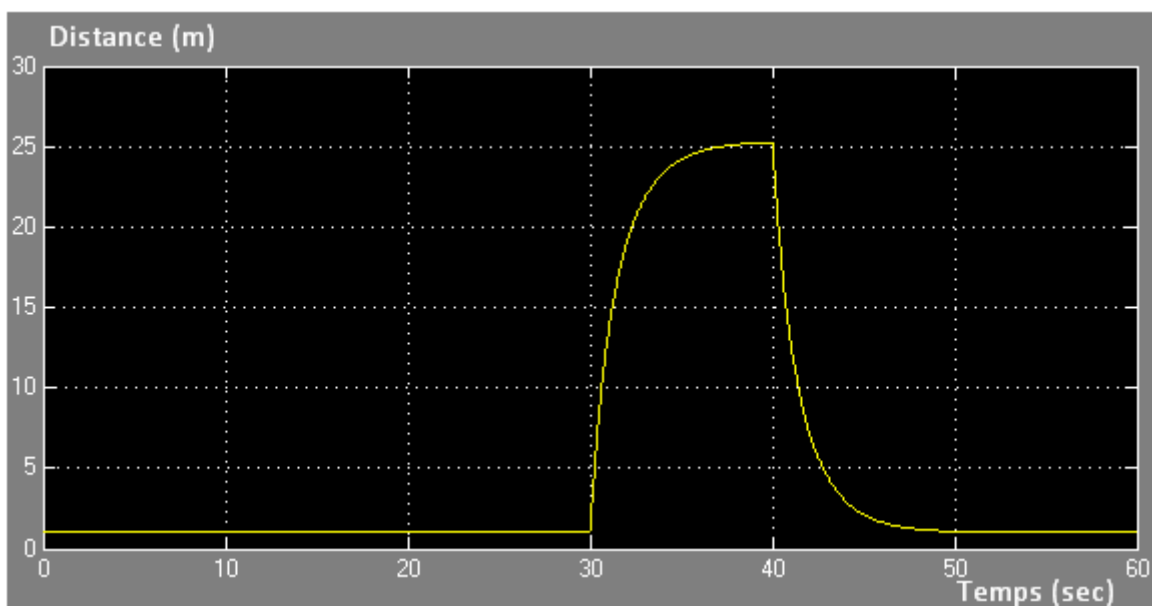


Figure-2.25 : Distance entre le 1^{ème} et le 2^{ème} véhicule

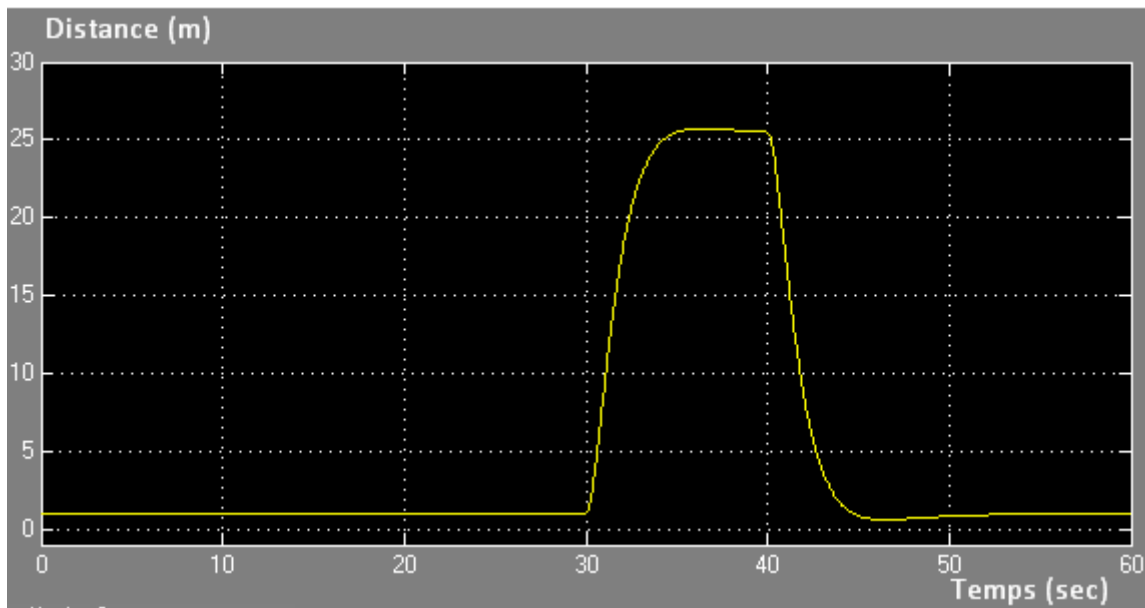


Figure-2.26 : Distance entre le 2^{ème} et le 3^{ème} véhicule

On remarque aussi sur les figures-2.25 et 2.26 que la distance *inter-véhicule* est quasiment réduite à 1 mètre après environs 15 secondes de l'arrivée de la perturbation, ce qui est assez satisfaisant. La solution proposée préconise d'activer la commande en position pour au maximum 3 véhicules simultanément, dès que la distance entre les véhicules 1, 2 et 3 atteint 1 mètre entre chaque véhicule, on doit activer la commande en position pour les véhicules 3, 4 et 5 et ainsi de suite jusqu'à atteindre notre objectif qui est de régler la distance entre tous les véhicules du peloton à 1 mètre. Ceci peut être réalisé en faisant appel à une boucle « FOR » parcourant la totalité des véhicules du peloton et dont l'exécution reviendrait au véhicule leader. Cette boucle est programmée suivant la figure-2.27 :

```

1   var1=floor(pltn_size,3); %calcule le nombre de triplets
2   var2=mod(pltn_size,3); % calcule le nombre de véhicules restants
3
4   for pltn_posi=1:(var1)-2
5
6       reg_posi(pltn_posi,pltn_posi+1,pltn_posi+2)
7
8   end
9   if var2==2
10
11       reg_posi(var1,var1+1,var1+2);
12
13   elseif var2==1
14
15       reg_posi(var1,var1+1);
16
17   end

```

Figure-2.27 : Boucle FOR permettant l'appel à la commande en position de manière séquentielle

On estime donc que le temps maximal pour qu'un peloton de 20 véhicules qui vient de subir une perturbation sous forme d'accélération du véhicule leader (accélération extrême de 10 m/s^2 pendant 10 secondes) reprenne la position désirée est de 2 minutes.

II.2.3.3.1.2.5. Conclusion :

Une commande de position se basant sur un feedback linéarisant suivi d'un retour d'état a pu être synthétisée. Nous avons d'abord considéré le cas de deux véhicules qui se suivent avec une distance initiale de 10 m, où l'on a vu que la commande était capable de réduire cette distance à celle désirée qui est de 1 m, mais aussi qu'elle rejette assez bien les perturbations en accélération.

Par la suite nous avons vu l'effet de la commande par rapport à une perturbation en décélération où l'on a pu constater ces limites puisque une décélération de valeur absolue supérieure à 0.8 m/s^2 pour une durée de 1 seconde est à même d'amener les 2 véhicules à une collision puisque la distance entre eux dans ce cas là peut descendre en dessous de zéro. Pour remédier à cela on remplace la commande en position par la commande en vitesse en cas de décélération du véhicule leader. La commande en vitesse qui, comme on l'a vu dans la section II.2.3.3.1.1, est à même d'éviter les éventuelles collisions en commandant la vitesse de tous les véhicules du peloton, et en les contraignant à freiner avec la même intensité exactement au même moment.

Nous nous sommes par la suite intéressés à l'effet de la commande en position sur un peloton de taille maximale (20 véhicules), où l'on a vu que les performances qu'elle offre sont assez peu satisfaisantes, puisque pour une certaine perturbation en accélération du véhicule leader on observe un phénomène d'oscillation en queue de peloton du à son retard de réaction par rapport aux perturbations. Nous avons donc proposé une alternative après avoir fait la constatation que pour une perturbation assez forte (accélération du véhicule leader de 10 m/s^2 pendant une durée de 10 secondes) on n'observe aucun dépassement au niveau des 3 premiers véhicules du peloton et un temps de réaction aux alentours de 15 secondes. Le problème peut donc être contourné en utilisant une boucle « FOR » qui va parcourir la totalité du peloton et activer la commande en position pour chaque trois véhicules qui se suivent, on évite de cette manière les éventuelles collisions en gardant un temps de réponse du peloton maximal de 2 minutes.

II.2.3.3.1.3. Loi de commande latérale : *rég_direction*

II.2.3.3.1.3.1. Introduction

Dans cette section la conception d'une commande à même de maintenir un véhicule dans l'axe de la voie qu'il emprunte, est réalisée.

Le confort et la sécurité du véhicule reposent sur cette commande qui sera appliquée pour chaque véhicule à tout instant, sauf lors d'une manœuvre de changement de voie où elle doit être désactivée pour permettre au véhicule (impérativement un agent libre) de rejoindre la voie de destination. Elle sera réactivée dès que la manœuvre est terminée.

Le déplacement latéral d'un véhicule est affecté par l'angle d'embarquée par rapport à l'axe de la route. L'angle d'embarquée sera contrôlé par la direction des roues avant du véhicule.

II.2.3.3.1.3.2. Modélisation du système : [29]

Deux types de modèles dynamiques sont développés dans [28] pour l'analyse et la synthèse d'une commande latérale d'un véhicule. D'abord un modèle complexe qui reflète de la manière la plus réelle possible le comportement du véhicule, puis un modèle simplifié qui fait apparaître uniquement les dynamiques importantes pour la commande (dynamique latérale et dynamique d'embarquée). Le modèle simplifié est un 4^{ème} ordre et est représenté par les deux équations suivantes :

$$m\dot{y}_{CG} + \frac{2}{V}(C_{\alpha f} + C_{\alpha r})\dot{y}_{CG} + \frac{2}{V}(l_f C_{\alpha f} - l_r C_{\alpha r})\Delta\dot{\epsilon} - 2(C_{\alpha f} + C_{\alpha r})\Delta\epsilon = 2C_{\alpha f}\delta + \left(\frac{-2}{V}(l_f C_{\alpha f} - l_r C_{\alpha r}) - mV\right)\dot{\epsilon}_d \quad (2.12)$$

$$I\Delta\ddot{\epsilon} + \frac{2}{V}(l_f C_{\alpha f} - l_r C_{\alpha r})\dot{y}_{CG} + \frac{2}{V}(l_f^2 C_{\alpha f} + l_r^2 C_{\alpha r})\Delta\dot{\epsilon} - 2(l_f C_{\alpha f} - l_r C_{\alpha r})\Delta\epsilon = 2l_f C_{\alpha f}\delta - \frac{2}{V}(l_f^2 C_{\alpha f} + l_r^2 C_{\alpha r})\dot{\epsilon}_d \quad (2.13)$$

Les variables et les symboles sont listés sur le tableau-2.4. Ce modèle peut être considéré comme étant linéaire par rapport à la variable vitesse de translation du véhicule V , et les perturbations liées la route, $\dot{\epsilon}_d$ qui affecte la dynamique latérale du véhicule et sa dynamique d'embarquée.

variable	Description
δ	Angle de direction des roues avant du véhicule
V	Vitesse de translation du véhicule
y_{CG}	Déplacement latéral du centre de gravité/ repère lié à la route
\dot{y}_{CG}	Vitesse latéral du centre de gravité/repère lié à la route
$\Delta\epsilon$	Angle d'embarquée du véhicule dans le repère lié à la route
$\Delta\dot{\epsilon}$	Vitesse d'embarquée du véhicule dans le repère lié à la route
$\dot{\epsilon}_d$	Vitesse angulaire du repère lié à la route par rapport au repère fixe

Tableau-2.4 : Variables et symboles pour le modèle simplifié

Afin de pouvoir appliquer au système une commande par *backstepping*, nous devons reformuler le modèle après avoir posé l'hypothèse suivante :

On suppose que la masse du véhicule peut être réparti en deux masses m_f et m_r chacune d'elles s'appuyant sur les roues avant et arrière respectivement de la manière montrée sur la figure-2.28.

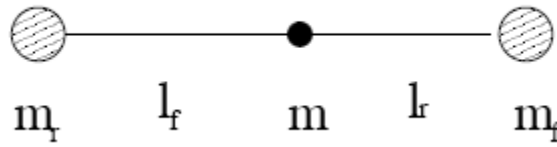


Figure-2.28 : Répartition de la masse du véhicule

On peut donc facilement voir que :

$$m = m_f + m_r \quad (2.14) \quad \text{et} \quad l_f m_f = l_r m_r \quad (2.15)$$

De ces deux équations on peut donc écrire : $m_f = \frac{l_r}{l_f + l_r} m$ (2.16)

Et aussi que : $m_r = \frac{l_f}{l_f + l_r} m$ (2.17)

De cette manière le moment d'inertie peut être exprimé de la manière suivante :

$$I = m_f l_f^2 + m_r l_r^2 = m l_f l_r \quad (2.18)$$

La dynamique latérale peut donc être reformulée sous forme de cascade de systèmes après quelques modifications algébriques, et redéfinition des sorties du système :

La soustraction de $1/l_f \times$ équation (2.13) à partir de l'équation (2.12) donne :

$$m \ddot{y}_{CG} - \frac{1}{l_f} \Delta \ddot{\epsilon} + \frac{2}{V} C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) \dot{y}_{CG} - \frac{2}{V} l_r C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) \Delta \dot{\epsilon} = 2 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) \Delta \epsilon + \left(\frac{2}{V} l_r C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) - mV\right) \dot{\epsilon}_d \quad (2.19)$$

Suivant l'hypothèse précédente nous avons : $m l_r = I/l_f$ (2.20)

Des équations (2.19) et (2.20) on obtient :

$$m(\ddot{y}_{CG} - l_r \Delta \ddot{\epsilon}) + \frac{2}{V} C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) (\dot{y}_{CG} - l_r \Delta \dot{\epsilon}) = 2 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) \Delta \epsilon + \left(\frac{2}{V} l_r C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) - mV\right) \dot{\epsilon}_d \quad (2.21)$$

On redéfinit la sortie du système comme suit :

$$y_0 = y_{CG} - l_r \Delta \epsilon \quad (2.22)$$

Des équations (2.21) et (2.13) le modèle dynamique peut être présenté par les équations suivantes :

$$m \ddot{y}_0 + \frac{2}{V} C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) \dot{y}_0 = 2 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) \Delta \epsilon + \left(\frac{2}{V} l_r C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) - mV\right) \dot{\epsilon}_d \quad (2.23)$$

$$I\Delta\ddot{\epsilon} + \frac{2}{V}(l_f C_{\alpha f} - l_r C_{\alpha r})(\dot{y}_0 + l_r \Delta\dot{\epsilon}) + \frac{2}{V}(l_f^2 C_{\alpha f} + l_r^2 C_{\alpha r})\Delta\dot{\epsilon} - 2(l_f C_{\alpha f} - l_r C_{\alpha r})\Delta\epsilon = 2C_{\alpha f} l_f \delta - \frac{2}{V}(l_f^2 C_{\alpha f} + l_r^2 C_{\alpha r})\dot{\epsilon}_d \quad (2.24)$$

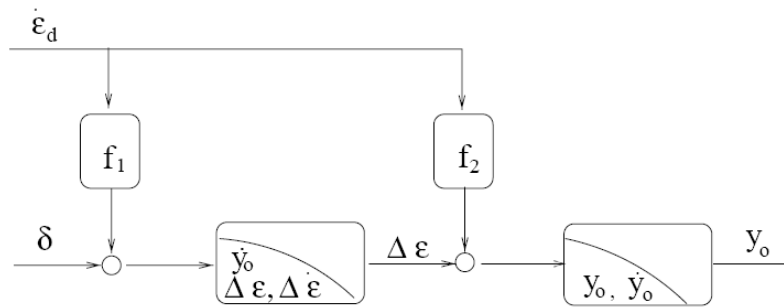


Figure-2.29 : Schéma bloc du système reformulé

Le figure-2.29 représente le schéma bloc du système résultant. Dans ce nouveau modèle, la sortie redéfinie y_0 est le déplacement de l'axe du véhicule par rapport à l'axe de la route. Ainsi quand y_0 converge vers zéro, y_{CG} converge vers $l_r \Delta\epsilon$ qui est très petit dans le cas des manœuvres sur autoroute [29].

En premier lieu nous observerons que l'angle d'embarquée $\Delta\epsilon$ joue le rôle de commande dans l'équation (2.23) et $\dot{\epsilon}_d$ le rôle de perturbation, aussi $\Delta\epsilon$ est commandé à son tour par l'angle de direction δ des roues avant du véhicule dans l'équation (2.24) avec $\dot{\epsilon}_d$ comme perturbation. Ce raisonnement semble être le même que suivrait un conducteur en voulant maintenir son véhicule sur l'axe de la route. Mathématiquement le backstepping est à même de pouvoir résoudre le problème de rejet des perturbations et des dynamiques non linéaires du système.

Modèle de route [5] :

Dans un système autoroutier automatique la courbure de la route est connue avec précision. Des équations (2.23) et (2.24), on sait que $\dot{\epsilon}_d$ affecte la dynamique latérale et la dynamique d'embarquée du véhicule. Sur la figure-2.30, $\dot{\epsilon}_d$ est définie comme la vitesse angulaire du repère lié à la route $O_r X_r Y_r$ par rapport au repère fixe $O_n X_n Y_n$. Ainsi $\dot{\epsilon}_d$ est déterminée par la vitesse de translation V et la courbure de la route.

La courbure de la route peut ne pas être totalement lissée, dans ce cas là on l'approxime par une fonction lisse $\omega(t)$ qu'on appellera *le modèle de route*. La déviation de $\omega(t)$ par rapport à $\dot{\epsilon}_d$ sera considérée comme une perturbation et devra être atténuée par la commande.

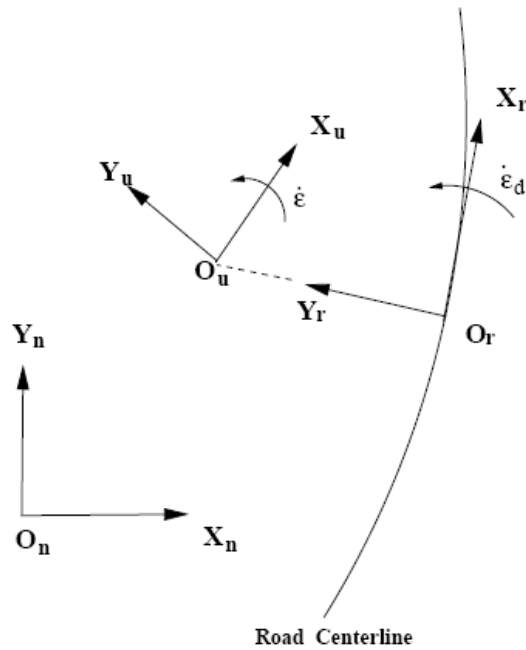


Figure-2.30 : Définition de $\dot{\epsilon}_d$

Le modèle de route est montré sur la figure-2.31. Dans cet exemple $\dot{\epsilon}_d$ est donnée par une fonction trapézoïdale, et donné un $h > 0$ on peut trouver une fonction $\omega(t)$ suffisamment lisse telle que :

$$|\omega(t) - \dot{\epsilon}_d(t)| \leq h \quad (2.25)$$

Ce qui veut dire qu'il existe un $\tilde{\Delta}(t)$ tel que :

$$\dot{\epsilon}_d(t) = \omega(t) + \tilde{\Delta}(t) \quad (2.26)$$

Et donc :

$$|\tilde{\Delta}(t)| \leq h \quad (2.27)$$

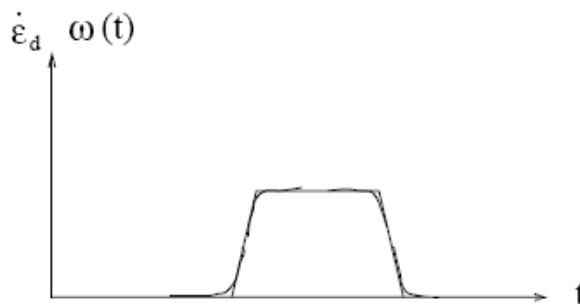


Figure-2.31 : Modèle de route lissé

II.2.3.3.1.3.3. Synthèse de la commande et résultats : [5]

Puisque chaque étape de la commande par backstepping suggère de calculer la dérivée de la *commande intermédiaire* de l'étape précédente, une loi de commande dérivable est nécessaire. Pour ce faire nous allons approximer la fonction $sign(.)$ par la fonction tangente

hyperbolique $\tanh(\cdot)$ [30, 31]. On utilise cette approximation résumée dans le lemme qui suit :

Lemme : $\forall e > 0$, l'inégalité suivante est valable :

$$0 \leq h * x * \text{sign}(x) - h * x * \tanh\left(\frac{khx}{e}\right) \leq e \quad (2.28)$$

Avec $k = 0.2785$ et h est un nombre positif quelconque.

Le design de la commande passe par les trois étapes suivantes. Dans la première étape, la dynamique latérale est stabilisée par $\Delta\epsilon$ comme *commande intermédiaire*. La deuxième étape, $\Delta\epsilon$ est amenée à converger vers la valeur désirée en utilisant $\Delta\dot{\epsilon}$ comme commande. Et finalement dans la troisième étape l'angle de direction δ est déterminé de manière à ce que $\Delta\dot{\epsilon}$ converge vers la valeur désirée, en assurant au moins la convergence globale asymptotique.

Etape 1 :

On considère d'abord $\Delta\epsilon$ comme étant une commande : $\Delta\epsilon = \alpha_1$

Commander la dynamique latérale (2.23) de manière à ce qu'elle soit globalement exponentiellement convergente sera notre premier objectif. Pour faciliter la synthèse on posera le changement de variable suivant :

$$s = \dot{y}_0 + \lambda_1 y_0$$

L'équation (2.23) deviendra :

$$\begin{aligned} m\dot{s} + \frac{2}{V}C_{ar}\left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)s - m\lambda_1\dot{y}_0 - \frac{2}{V}C_{ar}\left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)\lambda_1 y_0 \\ = 2C_{ar}\left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)\Delta\epsilon \\ + \left(\frac{2}{V}l_r C_{ar}\left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) - mV\right)(\omega(t) + \tilde{\Delta}(t)) \end{aligned} \quad (2.24)$$

Considérons la fonction de Lyapunov V_1 FDP (fonction définie positive) sur \mathbb{R}^2 candidate :

$$V_1 = \frac{1}{2}ms^2 + \frac{1}{2}C_{ar}\left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)\lambda_3 y_0^4 \quad (2.25)$$

Sa dérivée par rapport au temps serait donc :

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= ms\dot{s} + 2C_{ar}\left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)\lambda_3 y_0^3 \dot{y}_0 \\ &= ms\dot{s} + 2C_{ar}\left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)\lambda_3 y_0^3 s - 2C_{ar}\left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)\lambda_1 \lambda_3 y_0^4 \end{aligned} \quad (2.26)$$

(2.24) dans (2.26) nous donne :

$$\begin{aligned}
\dot{V}_1 = & s \left(-\frac{2}{V} C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f} \right) s + m\lambda_1 \dot{y}_0 + \frac{2}{V} C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f} \right) \lambda_1 y_0 + 2C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f} \right) \Delta\epsilon \right. \\
& + \left(\frac{2}{V} l_r C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f} \right) - mV \right) \left(\omega(t) + \tilde{\Delta}(t) \right) + 2C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f} \right) \lambda_3 y_0^3 s \\
& \left. - 2C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f} \right) \lambda_1 \lambda_3 y_0^4 \right) \quad (2.27)
\end{aligned}$$

On choisit la loi de commande suivante :

$$\begin{aligned}
\Delta\epsilon = \alpha_1 = & -\frac{\lambda_1}{V} y_0 - \frac{m\lambda_1}{2C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f} \right)} \dot{y}_0 - \lambda_3 y_0^3 - \left(\lambda_2 - \frac{1}{V} \right) s \\
& + \left(-\frac{l_r}{V} + \frac{mV}{2C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f} \right)} \right) \omega(t) - \frac{h_1}{2C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f} \right)} \tanh \left(\frac{kh_1 s}{e_1} \right) \quad (2.28)
\end{aligned}$$

Avec e_1 est un paramètre positif assez petit, et h_1 satisfait l'inégalité suivante :

$$\left(\frac{2}{V} l_r C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f} \right) - mV \right) \cdot \tilde{\Delta}(t) \leq h_1 \quad (2.29)$$

Pour cette loi de commande la dérivée de la fonction de Lyapunov choisie devient :

$$\begin{aligned}
\dot{V}_1 = & -2\lambda_2 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f} \right) s^2 - 2\lambda_1 \lambda_3 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f} \right) y_0^4 - h_1 \cdot s \cdot \tanh \left(\frac{kh_1 s}{e_1} \right) \\
& + \left(\frac{2}{V} l_r C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f} \right) - mV \right) \cdot s \cdot \tilde{\Delta}(t) \quad (2.30)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{V}_1 \leq & -2\lambda_2 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f} \right) s^2 - 2\lambda_1 \lambda_3 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f} \right) y_0^4 - h_1 \cdot s \cdot \tanh \left(\frac{kh_1 s}{e_1} \right) + h_1 |s| \\
\leq & -2\lambda_2 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f} \right) s^2 - 2\lambda_1 \lambda_3 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f} \right) y_0^4 + e_1 \quad (2.31)
\end{aligned}$$

Où la première et la deuxième inégalité ont été obtenues à partir du *lemme* et de l'équation (2.29). Et puisque e_1 peut être ajusté arbitrairement petit, \dot{V}_1 est FDN (fonction définie négative) sur \mathbb{R}^2 . Alors la dynamique latérale est stable et la sortie y_0 est exponentiellement convergente.

Il est aussi intéressant de remarquer que l'équation (2.24) devient après avoir introduit l'équation (2.28) :

$$\begin{aligned}
m\dot{s} + 2\lambda_2 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) s + 2C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) \lambda_3 y_0^3 \\
= -h_1 \cdot \tanh\left(\frac{kh_1 s}{e_1}\right) + \left(\frac{2}{V} l_r C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) - mV\right) \cdot \tilde{\Delta}(t) \quad (2.32)
\end{aligned}$$

Où le troisième terme de la partie gauche de l'équation introduit une dynamique non linéaire, et du côté droit de l'équation le \tanh atténue les perturbations causées par $\tilde{\Delta}(t)$.

Etape 2 :

Dans la première étape on a supposé que l'angle d'embarquée $\Delta\epsilon$ était l'entrée de commande. Dans cette étape nous allons considérer $\Delta\epsilon$ comme étant une entrée pour commander $\Delta\epsilon$. On définit l'écart entre $\Delta\epsilon$ et α_1 comme suit :

$$z_1 = \Delta\epsilon - \alpha_1 \quad (2.33)$$

Ainsi on peut écrire :

$$\Delta\epsilon = \alpha_1 + z_1 \quad (2.34)$$

En considérant (2.34), \dot{V}_1 dans l'équation (2.31) peut être réécrit comme suit :

$$\dot{V}_1 \leq -2\lambda_2 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) s^2 - 2\lambda_1 \lambda_3 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) y_0^4 + e_1 + 2C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) s z_1 \quad (2.35)$$

Puisqu'on veut que l'erreur z_1 soit petite, on augmente la fonction de Lyapunov telle que :

$$V_2 = V_1 + \frac{\gamma_1}{2} z_1^2 = \frac{1}{2} m s^2 + \frac{1}{2} C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) \lambda_3 y_0^4 + \frac{\gamma_1}{2} z_1^2 \quad (2.36)$$

En dérivant l'équation (2.35) par rapport au temps on aura :

$$\begin{aligned}
\dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + \gamma_1 z_1 \dot{z}_1 \\
&\leq -2\lambda_2 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) s^2 - 2\lambda_1 \lambda_3 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) y_0^4 + e_1 \\
&\quad + 2C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) s z_1 + \gamma_1 z_1 \dot{z}_1 \quad (2.37)
\end{aligned}$$

Notez que :

$$\dot{z}_1 = \Delta\dot{\epsilon} - \dot{\alpha}_1$$

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 = & \Delta\dot{\epsilon} + \frac{\lambda_1}{V}\dot{y}_0 + \frac{m\lambda_1}{2C_{ar}\left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)}\ddot{y}_0 + 3\lambda_3y_0^2\dot{y}_0 + \left(\lambda_2 - \frac{1}{V}\right)\dot{s} + \left(\frac{l_r}{V} - \frac{mV}{2C_{ar}\left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)}\right)\dot{\omega}(t) \\ & + \frac{h_1}{2C_{ar}\left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)}\frac{kh_1}{e_1}\operatorname{sech}^2\left(\frac{kh_1s}{e_1}\right)\dot{s} \end{aligned} \quad (2.38)$$

Avec : sech : fonction sécante hyperbolique

Et

$$\begin{aligned} \dot{s} = & -\frac{2}{m}\lambda_2C_{ar}\left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)s - \frac{2}{m}C_{ar}\left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)\lambda_3y_0^3 - \frac{h_1}{m}\tanh\left(\frac{kh_1s}{e_1}\right) \\ & + \frac{1}{m}\left(\frac{2}{V}l_rC_{ar}\left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) - mV\right) \cdot \tilde{\Delta}(t) + \frac{2}{m}C_{ar}\left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)z_1 \end{aligned} \quad (2.39)$$

Aussi :

$$\ddot{y}_0 = \dot{s} - \lambda_1\dot{y}_0 \quad (2.40)$$

En substituant les équations (2.39) et (2.40) dans (2.38) on obtient :

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 = & \Delta\dot{\epsilon} + \frac{\lambda_1}{V}\dot{y}_0 - \left(\frac{m\lambda_1}{2C_{ar}\left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)} + \lambda_2 - \frac{1}{V} + \frac{h_1}{2C_{ar}\left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)}\frac{kh_1}{e_1}\operatorname{sech}^2\left(\frac{kh_1s}{e_1}\right)\right) \\ & \cdot \left(\frac{2}{m}\lambda_2C_{ar}\left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)s + \frac{2}{m}C_{ar}\left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)\lambda_3y_0^3 + \frac{h_1}{m}\tanh\left(\frac{kh_1s}{e_1}\right)\right) \\ & - \frac{2}{m}C_{ar}\left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)z_1 - \frac{m\lambda_1^2}{2C_{ar}\left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)}\dot{y}_0 + 3\lambda_3y_0^2\dot{y}_0 \\ & + \left(\frac{l_r}{V} - \frac{mV}{2C_{ar}\left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)}\right)\dot{\omega}(t) \\ & + \left(\frac{m\lambda_1}{2C_{ar}\left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)} + \lambda_2 - \frac{1}{V} + \frac{h_1}{2C_{ar}\left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)}\frac{kh_1}{e_1}\operatorname{sech}^2\left(\frac{kh_1s}{e_1}\right)\right) \\ & \cdot \frac{1}{m}\left(\frac{2}{V}l_rC_{ar}\left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) - mV\right) \cdot \tilde{\Delta}(t) \end{aligned} \quad (2.41)$$

On substitue à présent l'équation (2.41) dans (2.37) :

$$\Delta\dot{\epsilon} = \alpha_2$$

$$\begin{aligned}
&= -\frac{2}{\gamma_1} C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) s - k_1 z_1 - \frac{\lambda_1}{V} \dot{y}_0 \\
&\quad + \left(\frac{m\lambda_1}{2C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)} + \lambda_2 - \frac{1}{V} + \frac{h_1}{2C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)} \frac{kh_1}{e_1} \operatorname{sech}^2 \left(\frac{kh_1 s}{e_1} \right) \right) \\
&\quad \cdot \left(\frac{2}{m} \lambda_2 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) s + \frac{2}{m} C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) \lambda_3 y_0^3 + \frac{h_1}{m} \tanh \left(\frac{kh_1 s}{e_1} \right) \right. \\
&\quad \left. - \frac{2}{m} C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) z_1 \right) + \frac{m\lambda_1^2}{2C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)} \dot{y}_0 - 3\lambda_3 y_0^2 \dot{y}_0 \\
&\quad - \left(\frac{l_r}{V} - \frac{mV}{2C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)} \right) \dot{\omega}(t) - h_2 \cdot \tanh \left(\frac{kh_2 z_1}{e_2} \right) \quad (2.42)
\end{aligned}$$

On remarque ainsi que la perturbation $\tilde{\Delta}(t)$ intervenant sur \dot{z}_1 est atténuée par le dernier terme de l'équation (2.42) qui est $h_2 \cdot \tanh \left(\frac{kh_2 z_1}{e_2} \right)$, avec e_2 est positif et arbitrairement petit, et tel que h_2 satisfait la condition suivante :

$$\begin{aligned}
&\left(\frac{m\lambda_1}{2C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)} + \lambda_2 - \frac{1}{V} + \frac{h_1}{2C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)} \frac{kh_1}{e_1} \operatorname{sech}^2 \left(\frac{kh_1 s}{e_1} \right) \right) \\
&\quad \cdot \frac{1}{m} \left(\frac{2}{V} l_r C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) - mV \right) \cdot \tilde{\Delta}(t) \leq h_2 \quad (2.43)
\end{aligned}$$

La dérivée par rapport au temps de la fonction de Lyapunov V_2 est donnée par :

$$\begin{aligned}
\dot{V}_2 &\leq -2\lambda_2 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) s^2 - 2\lambda_1 \lambda_3 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) \lambda_3 y_0^4 - \gamma_1 k_1 z_1^2 - h_1 \cdot s \cdot \tanh \left(\frac{kh_1 s}{e_1} \right) \\
&\quad + \left(\frac{2}{V} l_r C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) - mV \right) \cdot s \cdot \tilde{\Delta}(t) - \gamma_1 \cdot h_2 \cdot z_1 \cdot \tanh \left(\frac{kh_2 z_1}{e_2} \right) + \gamma_1 \\
&\quad \cdot \left(\frac{m\lambda_1}{2C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)} + \lambda_2 - \frac{1}{V} + \frac{h_1}{2C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)} \frac{kh_1}{e_1} \operatorname{sech}^2 \left(\frac{kh_1 s}{e_1} \right) \right) \\
&\quad \cdot \frac{1}{m} \left(\frac{2}{V} l_r C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) - mV \right) z_1 \cdot \tilde{\Delta}(t) \\
&\leq -2\lambda_2 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) s^2 - 2\lambda_1 \lambda_3 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) \lambda_3 y_0^4 - \gamma_1 k_1 z_1^2 + e_1 + \gamma_1 e_2 \quad (2.44)
\end{aligned}$$

De cette manière la convergence exponentielle de y_0 , s et z_1 est assurée puisque \dot{V}_2 est FDN sur \mathbb{R}^2 , e_1 et e_2 étant positifs et arbitrairement petit. ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \gamma_1$ et k_1 sont choisis positifs).

Etape 3 :

La troisième étape est similaire au développement fait pour l'étape 2. On définit l'écart entre $\Delta\dot{e}$ et α_2 par z_2 comme suit :

$$z_2 = \Delta\dot{e} - \alpha_2 \quad (2.45)$$

$$\text{Ou bien : } \Delta\dot{e} = \alpha_2 + z_2 \quad (2.46)$$

Grâce à (2.46), \dot{V}_2 dans l'équation (2.37) peut être exprimé sous :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 \leq & -2\lambda_2 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) s^2 - 2\lambda_1 \lambda_3 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) \lambda_3 y_0^4 - \gamma_1 k_1 z_1^2 + e_1 + \gamma_1 e_2 \\ & + \gamma_1 z_1 z_2 \quad (2.47) \end{aligned}$$

Puisqu'on veut que l'erreur z_2 soit petite, on augmente la fonction de Lyapunov de la manière suivante :

$$V_3 = V_2 + \frac{\gamma_2}{2} I z_2^2$$

$$V_3 = \frac{1}{2} m s^2 + \frac{1}{2} C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) \lambda_3 y_0^4 + \frac{\gamma_1}{2} z_1^2 + \frac{\gamma_2}{2} I z_2^2 \quad (2.48)$$

Donc sa dérivée par rapport au temps sera :

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_2 + I z_2 \dot{z}_2$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 \leq & -2\lambda_2 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) s^2 - 2\lambda_1 \lambda_3 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) y_0^4 - k_1 \gamma_1 z_1^2 + e_1 + \gamma_1 e_2 + \gamma_1 z_1 z_2 \\ & + \gamma_2 I z_1 z_2 \quad (2.50) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Avec : } I \dot{z}_2 = & I \Delta \ddot{e} - I \dot{\alpha}_2 = I \Delta \ddot{e} + \frac{2}{\gamma_1} C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) I \dot{s} + k_1 I \dot{z}_1 + \frac{\lambda_1}{v} I \ddot{y}_0 + \left(\frac{m \lambda_1}{2 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)} + \right. \\ & \left. \lambda_2 - \frac{1}{v} + \frac{h_1}{2 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)} \frac{k h_1}{e_1} \operatorname{sech}^2 \left(\frac{k h_1 s}{e_1} \right) \right) \cdot I \cdot \left(-\frac{2}{m} \lambda_2 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) \dot{s} - \frac{6}{m} C_{ar} \left(1 + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{l_r}{l_f}\right) \lambda_3 y_0^2 \dot{y}_0 - \frac{k h_1^2}{m e_1} \operatorname{sech}^2 \left(\frac{k h_1 s}{e_1} \right) \dot{s} + \frac{2}{m} C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) \dot{z}_1 \right) + \left(-\frac{m \lambda_1^2}{2 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)} + 3 \lambda_3 y_0^2 \right) I \ddot{y}_0 + \\ & \left(\frac{l_r}{v} - \frac{m v}{2 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)} \right) I \ddot{\omega}(t) + 6 \lambda_3 I y_0 \dot{y}_0^2 \dot{z}_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= -\frac{2}{V}(l_f C_{\alpha f} - l_r C_{\alpha r})(\dot{y}_0 + l_r \Delta \dot{\epsilon}) - \frac{2}{V}(l_f^2 C_{\alpha f} + l_r^2 C_{\alpha r})\Delta \dot{\epsilon} + 2(l_f C_{\alpha f} - l_r C_{\alpha r})\Delta \epsilon \\
&\quad + 2l_f C_{\alpha f} \delta - \frac{2}{V}(l_f^2 C_{\alpha f} + l_r^2 C_{\alpha r})\omega(t) - \frac{2}{V}(l_f^2 C_{\alpha f} + l_r^2 C_{\alpha r})\tilde{\Delta}(t) \\
&\quad + \frac{2}{\gamma_1} C_{\alpha r} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) I \dot{s} + k_1 I \dot{z}_1 + \frac{\lambda_1}{V} I \dot{y}_0 \\
&\quad + \left(\frac{m\lambda_1}{2C_{\alpha r} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)} + \lambda_2 - \frac{1}{V} + \frac{h_1}{2C_{\alpha r} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)} \frac{kh_1}{e_1} \operatorname{sech}^2\left(\frac{kh_1 s}{e_1}\right) \right) \cdot I \\
&\quad \cdot \left(-\frac{2}{m} \lambda_2 C_{\alpha r} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) \dot{s} - \frac{6}{m} C_{\alpha r} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) \lambda_3 y_0^2 \dot{y}_0 - \frac{kh_1^2}{me_1} \operatorname{sech}^2\left(\frac{kh_1 s}{e_1}\right) \dot{s} \right. \\
&\quad \left. + \frac{2}{m} C_{\alpha r} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) \dot{z}_1 \right) + \left(-\frac{m\lambda_1^2}{2C_{\alpha r} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)} + 3\lambda_3 y_0^2 \right) I \dot{y}_0 + 6\lambda_3 I y_0 \dot{y}_0^2 \\
&\quad + \left(\frac{l_r}{V} - \frac{mV}{2C_{\alpha r} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)} \right) I \ddot{\omega}(t) \quad (2.51)
\end{aligned}$$

Avec \dot{s} , \dot{y}_0 et \dot{z}_1 sont exprimés dans les équations (2.39), (2.40) et (2.41) respectivement. De (2.50) et (2.51) la loi de commande pour la direction des roues avant du véhicule peut être choisie telle que :

$$\begin{aligned}
\delta &= \frac{1}{2l_f C_{\alpha f}} \left(-\frac{\gamma_1}{\gamma_2} z_1 - k_2 z_2 + \frac{2}{V}(l_f C_{\alpha f} - l_r C_{\alpha r})(\dot{y}_0 + l_r \Delta \dot{\epsilon}) + \frac{2}{V}(l_f^2 C_{\alpha f} + l_r^2 C_{\alpha r})\Delta \dot{\epsilon} \right. \\
&\quad \left. - 2(l_f C_{\alpha f} - l_r C_{\alpha r})\Delta \epsilon + \frac{2}{V}(l_f^2 C_{\alpha f} + l_r^2 C_{\alpha r})\omega(t) - h \cdot \tanh\left(\frac{kh_3 z_2}{e_3}\right) \right. \\
&\quad \left. - \frac{2}{\gamma_1} C_{\alpha r} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) I \dot{s} - k_1 I \dot{z}_1 - \frac{\lambda_1}{V} I \dot{y}_0 \right. \\
&\quad \left. - \left(\frac{m\lambda_1}{2C_{\alpha r} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)} + \lambda_2 - \frac{1}{V} + \frac{h_1}{2C_{\alpha r} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)} \frac{kh_1}{e_1} \operatorname{sech}^2\left(\frac{kh_1 s}{e_1}\right) \right) \cdot I \right. \\
&\quad \left. \cdot \left(-\frac{2}{m} \lambda_2 C_{\alpha r} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) \dot{s} - \frac{6}{m} C_{\alpha r} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) \lambda_3 y_0^2 \dot{y}_0 - \frac{kh_1^2}{me_1} \operatorname{sech}^2\left(\frac{kh_1 s}{e_1}\right) \dot{s} \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \frac{2}{m} C_{\alpha r} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) \dot{z}_1 \right) - \left(-\frac{m\lambda_1^2}{2C_{\alpha r} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)} + 3\lambda_3 y_0^2 \right) I \dot{y}_0 - 6\lambda_3 I y_0 \dot{y}_0^2 \right. \\
&\quad \left. - \left(\frac{l_r}{V} - \frac{mV}{2C_{\alpha r} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)} \right) I \ddot{\omega}(t) \quad (2.52)
\end{aligned}$$

En adoptant cette loi de commande la dérivée de la fonction de Lyapunov \dot{c}_3 devient :

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 = & -2\lambda_2 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) s^2 - 2\lambda_1 \lambda_3 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) y_0^4 - \gamma_1 k_1 z_1^2 - \gamma_2 k_2 z_2^2 - h_1 \cdot s \\ & \cdot \tanh\left(\frac{kh_1 s}{e_1}\right) + \left(\frac{2}{V} l_r C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) - mV\right) s \tilde{\Delta}(t) - \gamma_1 \cdot h_2 \cdot z_1 \\ & \cdot \tanh\left(\frac{kh_2 z_1}{e_2}\right) \\ & + \gamma_1 \left(\frac{m\lambda_1}{2C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right)} + \lambda_2 - \frac{1}{V}\right) \frac{1}{m} \left(\frac{2}{V} l_r C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) - mV\right) z_1 \tilde{\Delta}(t) - \gamma_2 \\ & \cdot h_3 \cdot z_2 \cdot \tanh\left(\frac{kh_3 z_2}{e_3}\right) - \gamma_2 \frac{2}{V} (l_f^2 C_{af} + l_r^2 C_{ar}) z_2 \tilde{\Delta}(t) \quad (2.53) \end{aligned}$$

Donc :

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 \leq & -2\lambda_2 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) s^2 - 2\lambda_1 \lambda_3 C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) \lambda_3 y_0^4 - \gamma_1 k_1 z_1^2 - \gamma_2 k_2 z_2^2 + e_1 \\ & + \gamma_1 e_2 + \gamma_2 e_3 \quad (2.54) \end{aligned}$$

Et puisque e_1 , e_2 et e_3 sont positifs et arbitrairement petits, alors \dot{V}_3 est FDN sur \mathbb{R}^3 ce qui assure une convergence exponentielle de l'erreur de poursuite de la sortie [29].

Mise sous forme d'état du système :

A partir des équations (2.23) et (2.24) et en considérant les notations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{y}_0 = x_1 \\ \Delta\epsilon = x_2 \\ \Delta\dot{\epsilon} = x_3 \\ \delta = u \end{cases}$$

On peut écrire le système sous la forme d'état suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{-2}{mV} C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) x_1 + \frac{2}{m} C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) x_2 + \left(\frac{2}{mV} l_r C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) - V\right) \dot{\epsilon}_d \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = \frac{-2}{I * V} C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) x_1 - \left(\frac{2l_r}{I * V} C_{ar} \left(1 + \frac{l_r}{l_f}\right) + \frac{2}{I * V} (l_f^2 C_{af} + l_r^2 C_{ar})\right) x_3 \\ \quad + \frac{2}{I} (l_f C_{af} - l_r C_{ar}) x_2 + \frac{2}{I} C_{af} l_f u - \frac{2}{I * V} (l_f^2 C_{af} + l_r^2 C_{ar}) \dot{\epsilon}_d \end{cases}$$

Le schéma de commande est montré sur la figure-2.32.

Les paramètres du système sont présentés sur le tableau-2.5. Le scénario de simulation qu'on utilisera est présenté sur la figure-2.33 où le véhicule roule sur une ligne droite (avec un écart

latéral initial de 1 mètre) puis il aborde un virage à l'instant $t = 10$ secondes pour en ressortir à l'instant $t = 15$ secondes.

paramètres	Valeur
Masse (m)	1485 Kg
Moment d'inertie (I_x)	479.6 Kg.m ²
Moment d'inertie (I_y)	2594.3 Kg.m ²
Moment d'inertie (I_z)	2782.7 Kg.m ²
Rigidité au virage (C_{af})	43000 N/rad
Rigidité au virage (C_{ar})	43000 N/rad
Distance: roues avant C.G (l_f)	1.034 m
Distance: roues arrière C.G (l_r)	1.491 m

Tableau-2.5 : Paramètres liés au modèle de commande latérale

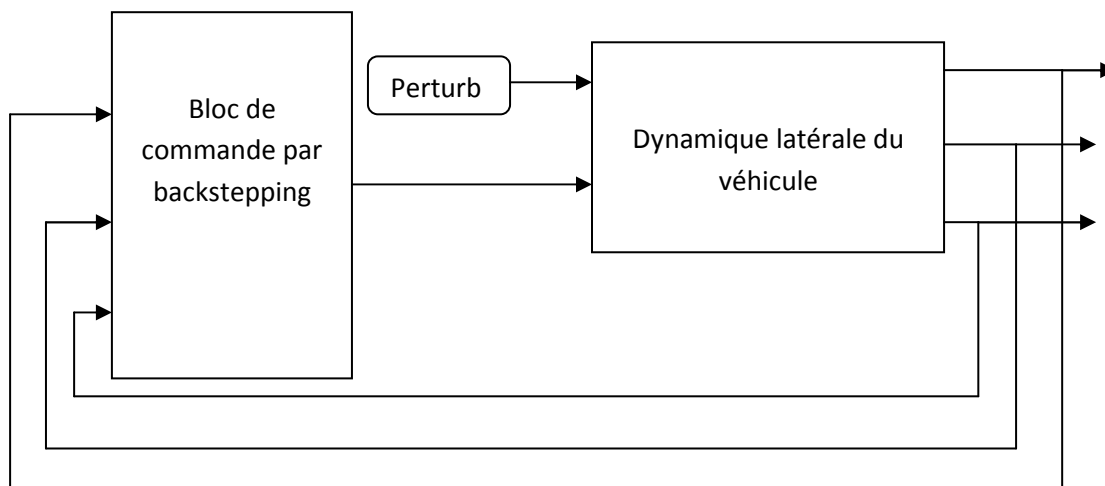


Figure-2.32 : Schéma de commande pour la commande latérale

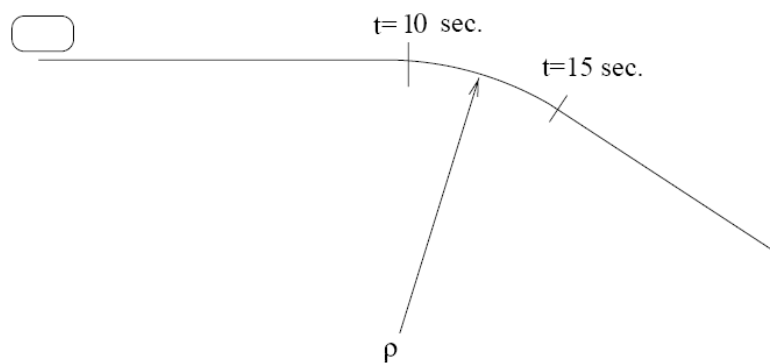


Figure-2.33 : Scénario de simulation utilisé

La vitesse de translation du véhicule utilisé pour nos simulations avoisine les 95 Km/h (vitesse qu'on considère assez forte pour faire apparaître les performances de la commande). Les résultats de simulation sont montrés sur les figures-2.34, 2.35, 2.36 et 2.37 :

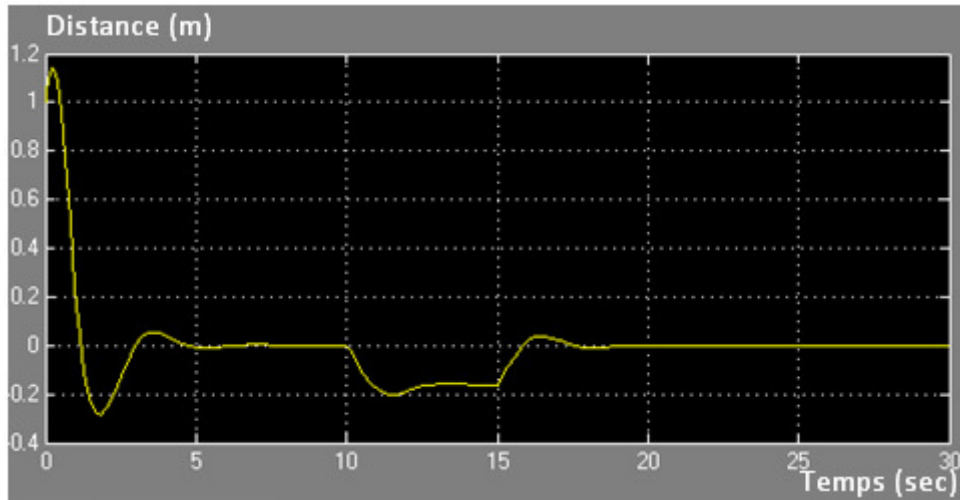


Figure-2.34 : Ecart latéral entre l'axe du véhicule et l'axe de la route (en mètre)

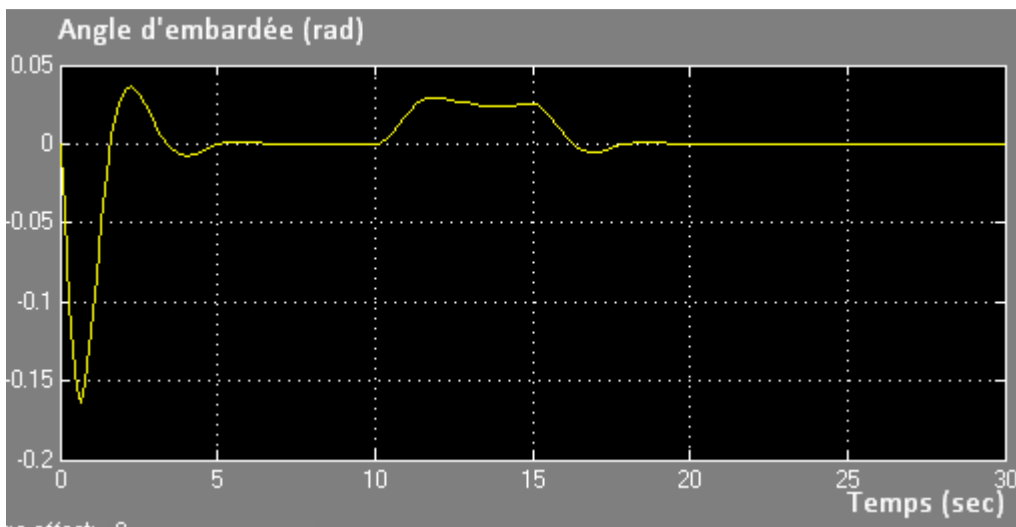


Figure-2.35 : Angle d'embarquée du véhicule (en radian)

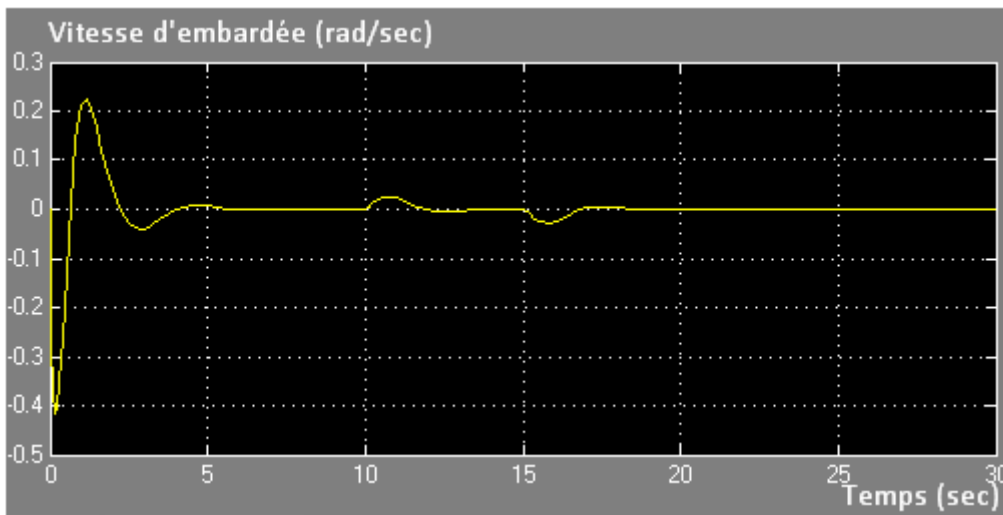


Figure-2.36 : Vitesse d'embarquée du véhicule (en radian/seconde)

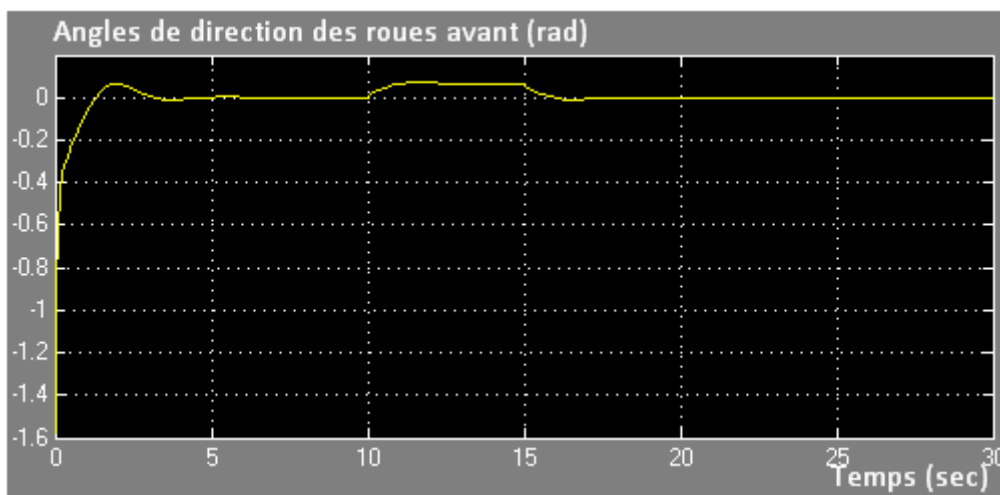


Figure-2.37 : Angle de direction des roues avant du véhicule (en radian)

II.2.3.3.1.3.4. Discussion :

L'idée d'utiliser la commande en cascade de la direction des roues avant, a été introduite en premier par Guldner dans [32], où la commande a été faite en deux étapes. En premier lieu la vitesse d'embarquée a été considérée comme commande fictive par rapport au déplacement latéral, ensuite la vitesse d'embarquée sera commandée par la direction des roues avant du véhicule. Il existe donc deux différences majeures entre cet approche et celle que nous avons adopté :

- Dans [32] le degré relatif entre la vitesse d'embarquée et le déplacement latéral y_{CG} est de 1. Dans notre approche le degré relatif entre la vitesse d'embarquée et le déplacement latéral y_0 est de 3. Il y a une dynamique de second ordre interne dans [32]

- L'écart entre la vitesse d'embarquée et sa valeur désirée n'est pas considéré dans [32]. Dans notre approche les écarts z_1 et z_2 sont quantifiés et atténué par la boucle fermée. [29]

On peut considérer que les résultats obtenus pour la commande latérale du véhicule sont satisfaisants à partir du moment où nos objectifs de départ ont été atteint i.e. maintenir l'écart entre l'axe du véhicule et l'axe de la route nul en toute circonstance, comme le montre la figure-3.34.

II.2.3.3.1.3.5. Conclusion :

On a pu établir un backstepping pour la commande latérale d'un véhicule sur un système autoroutier automatique. On a vu que le déplacement latéral est affecté par l'angle d'embarquée par rapport à l'axe de la route, ce dernier est commandé par l'angle de direction des roues avant du véhicule. Les performances obtenues par cette commande sont approuvables.

II.3. Conclusion :

Le deuxième chapitre a été consacré à l'application de la commande hybride sur un système autoroutier automatique. Ce système considéré comme un système à grande échelle a une structure hiérarchique qui permet de faciliter sa gestion. Cette architecture hiérarchisée est constituée de plusieurs couches sur lesquelles la commande est répartie. Chaque couche a été détaillée selon la complexité de la tâche qu'elle a à accomplir. La couche réseau qui contrôle la totalité du réseau autoroutier et qui assigne à chaque véhicule un itinéraire adéquat en fonction de sa destination et de sa position sur le réseau. En dessous la couche lien doit répartir les véhicules de manière homogène sur les voies de l'autoroute et fixer des vitesses de référence pour chaque section d'autoroute de manière à fluidifier le trafic. Viennent alors les couches embarquées : La couche de planification, qui fait évoluer le véhicule suivant l'itinéraire qui lui est assigné, la couche de régulation qui implémente les commandes nécessaires à l'exécution des consignes de la couche de planification. Ces deux couches combinées constituent *un bloc hybride* qui présente des variables continues et discrètes.

Dans ce deuxième chapitre le *concept peloton* a également été expliqué, ainsi que son influence sur la maîtrise du flux de trafic. En effet, l'organisation des véhicules en peloton permet d'éviter les bouchons en augmentant le débit de véhicules passant sur un tronçon d'autoroute et permettant d'obtenir donc une *capacité accrue* de l'espace autoroutier.

La conception des deux couches : Planification et régulation a été ensuite abordée. La première a été définie par l'ensemble des protocoles qui y sont gérés : La fusion, la séparation et le changement de voie. La couche de régulation elle, implémente les lois de commande dont elle dispose suivant *l'état* de chaque protocole (organigramme) : Commande en position, en vitesse et latérale, afin de mener à bien le suivi de l'itinéraire assigné par la couche lien.

La commande en vitesse se base sur le principe de la commutation, imitant le comportement d'un conducteur humain qui alterne accélération et freinage pour maintenir une vitesse de

référence. La commande en position a été synthétisée après l'introduction d'un feedback linéarisant du système, via un retour d'état qui assure une distance de sécurité entre deux véhicules successifs et génère un profile de vitesse dont l'exécution incombe à la commande en vitesse. La commande latérale quant à elle, a été synthétisée par la méthode du backstepping qui est une commande non linéaire adaptée donc à la nature du modèle, offrant d'assez bonnes performances.

Chapitre III

Aspects pratiques d'un système autoroutier
automatique (AHS)

III.1. Introduction :

La réalisation d'un système autoroutier automatique nécessite un matériel spécifique installé sur les espaces autoroutiers ou embarqué au niveau des véhicules. Ces dispositifs englobent notamment des actionneurs installés sur chaque véhicule mais aussi des systèmes de communication et des capteurs qui récoltent en temps réel une quantité assez importante d'informations essentielles à la gestion d'un système autoroutier automatique. Dans ce qui suit nous allons parcourir les différentes gammes d'équipement que l'on peut éventuellement exploiter dans un AHS.

III.2. Les actionneurs :

Les actionneurs nécessaires pour un véhicule voyageant dans un espace autoroutier automatique sont ceux qui permettent d'accélérer le véhicule, de le freiner ou de changer sa direction suivant la commande et ce de manière automatique. Ce type d'équipement existe déjà sur tous les véhicules : Système de freinage, d'accélération et de direction. Ils doivent être adaptés à la commande automatique.

III.2.1. Système de freinage :

Les systèmes de freinage ont évolué et deviennent de plus en plus accessibles depuis quelques années. La plupart des nouveaux véhicules sont équipés de systèmes de freins antiblocage également connus par le système ABS (*Antiblockiersystem*).

L'ABS a été conçu à l'origine pour aider le conducteur à conserver la maîtrise de son véhicule dans le cas d'un freinage, dans des conditions d'adhérence précaires (pluie, neige, verglas, gravier...). Celui-ci permet d'une part de garder la directivité du véhicule afin d'effectuer une manœuvre d'évitement éventuelle, tout en optimisant la distance de freinage celle-ci augmentant considérablement lorsque les roues se bloquent et que les pneumatiques glissent sur la chaussée. [34]

Lors d'un freinage d'urgence, l'ABS régule la pression dans le circuit de freinage en adaptant le niveau de pression hydraulique maximum pour chaque roue par le biais d'électrovannes : Si une roue ralentit anormalement, il relâche instantanément la pression du circuit de freinage au niveau de cette roue et ce, tant que celle-ci ne ré-accélère pas suffisamment.

L'ABS empêchant les roues de se bloquer, le conducteur garde la capacité maximale de ralentissement, le coefficient d'adhérence perdu au freinage d'un pneu qui glisse avoisine les 30 %. De même les pneumatiques, ne glissant pas, gardent leur capacité directionnelle. Dans le cadre d'un système autoroutier automatique, un véhicule équipé d'un ABS facilite le contrôle latéral et longitudinal notamment lors des freinages d'urgence puisqu'il permet d'une part de préserver la directivité du véhicule et donc au système de commande latéral de garder le véhicule sur l'axe de la route, et d'autre part d'optimiser les distances d'arrêt facilitant la commande longitudinale.

La commande longitudinale embarquée sur le véhicule communique avec le système de freinage de manière assez rapide pour une efficacité accrue. Le système ABS monté sur un véhicule roulant sur une autoroute automatique doit donc pouvoir admettre une entrée liée au dispositif de commande longitudinal.

Le tableau-3.1 [25] montre néanmoins les paramètres de freinage de quelques véhicules notamment leurs décélération maximale et leurs distance d'arrêt minimale sous différentes conditions de route (sèche ou humide). Dans le cas des routes enneigées la capacité de freinage des véhicules ne dépasse pas 2 m/s^2 . Ces paramètres peuvent être pris en considération par la couche lien en fixant les vitesses de référence pour chaque section d'autoroute, afin d'éviter les éventuels accidents.

véhicule	Distance d'arrêt min (m) (route sèche)	Décélération max m/s^2 (route sèche)	Distance d'arrêt min (m) (route mouillée)	Décélération max m/s^2 (route mouillée)
Berline (Ford Contour)	42	8.43	50	7.16
Berline (Toyota Avalon)	38	9.12	44	8.04
Berline lowcost (Nissan Sentra)	43	8.33	48	7.45
Coupé moyen (Ford Thunderbird)	39	9.02	46	7.75
4x4 (Jeep Cherokee)	43	8.24	47	7.45
Sous-compacte (Geo Metro)	45	7.84	52	6.86
Bus scolaire	112	3.14		
Autobus	87	4.02		
Camion	158	3.23		
Tracteur 4x2	87	4.12		
Semi-remorque	130	2.74		

Tableau-3.1 : paramètres de freinage de certains types de véhicule

III.2.2 Système d'accélération :

L'accélération d'un véhicule peut aussi être commandée via des signaux électriques. Le ETC (*Electronic Throttle Control ou contrôle électronique de l'accélération*) est une technologie utilisée dans l'industrie automobile qui joue le rôle de liaison entre la pédale d'accélération et la valve qui contrôle l'admission du combustible au niveau du moteur. Dans certains véhicules il existe un dispositif appelé TPS (Throttle position sensor) qui est un capteur de

position de la valve d'admission du combustible utilisant un câble pour relier la pédale d'accélération à la valve d'admission. Dans un véhicule équipé d'un ETC ce câble est remplacé par une unité de contrôle électronique (ECU) qui calcule la position de la valve d'admission en fonction de la mesure prélevée sur la pédale d'accélérateur. Le moteur électrique relié à la valve se charge par la suite d'atteindre cette position via une boucle fermée implémenté au niveau de l'ECU [35]. La figure-3.1 illustre un ETC. Ce type de système peut être exploité pour une commande automatique de l'accélération du véhicule dans le cadre des systèmes autoroutiers automatiques (AHS).

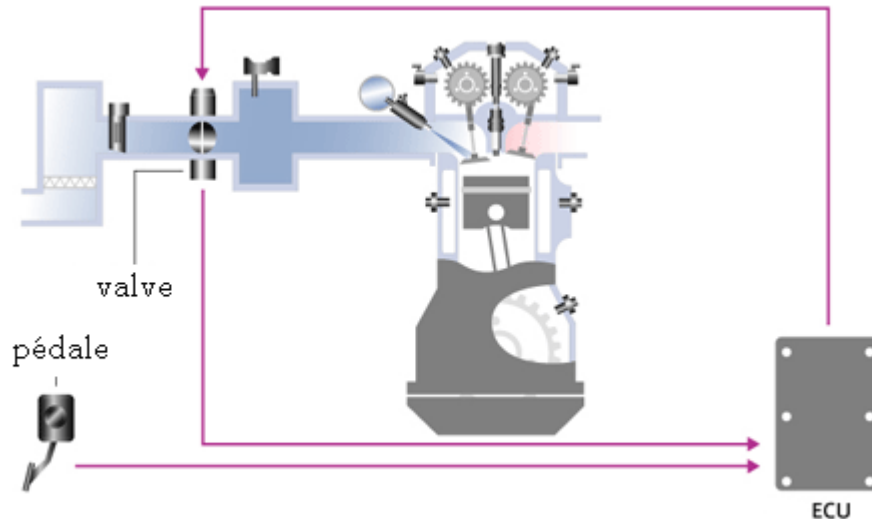


Figure-3.1 : schéma d'un ETC

III.2.3 Système de gouvernance (direction) :

La commande latérale nécessite un dispositif qui soit à même d'actionner la direction du véhicule de manière à suivre avec précision l'axe de la route. La plupart des véhicules récents sont équipés de Direction Assistée Electrique (DAE). La direction assistée électrique assiste les efforts de manœuvre dès la sollicitation du volant. Le couple d'assistance est fourni à l'aide d'un moteur électrique.

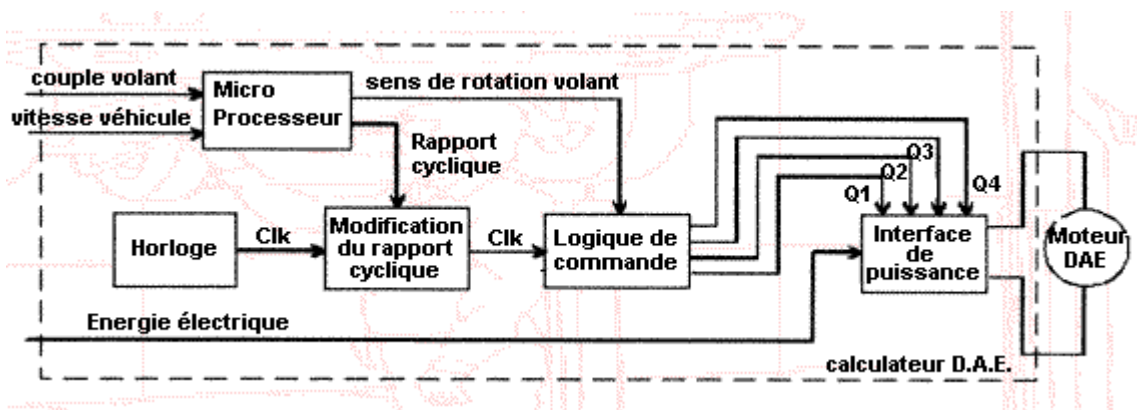


Figure-3.2 : schéma synoptique du calculateur D.E.A

Ce couple est transmis au pignon de la crémaillère par un réducteur et s'ajoute au couple volant appliqué par le conducteur. La force exercée par le conducteur sur le volant est transmise mécaniquement à la crémaillère via le pignon. Ce couple conducteur est mesuré par l'intermédiaire d'un capteur de couple est envoyé au calculateur de direction assisté, qui alimente les moteurs de direction en fonction du couple volant et de la vitesse du véhicule [36]. La figure-3.2 montre le schéma synoptique du module de contrôle d'alimentation des moteurs. Ainsi dans le cadre d'un AHS, le module de commande latérale doit interagir avec le calculateur D.E.A afin de prendre possession de la direction du véhicule et l'orienter suivant le comportement désiré.

III.3. Systèmes de communication :

III.3.1. Introduction :

Dans le cadre d'un AHS la communication sans fil joue un rôle primordial en reliant les différents éléments et couches le constituant. La communication sans fil ou à distance englobe toute les procédures de transmission de données, sur des distances qui vont de quelques mètres à plusieurs milliers de kilomètres. Dans ce qui suit nous allons proposer quelques méthodes adaptées à cette application.

Les communications mise en place entre les véhicules circulant sur un espace autoroutier automatique peuvent se faire de plusieurs manières en se basant sur les communications sans fil.

III.3.2. Les différents types de systèmes de communication :

III.3.2.1. Infrarouge :

Le rayonnement infrarouge (IR) est un rayonnement électromagnétique de longueur d'onde supérieure à celle de la lumière visible mais plus courte que celle des micro-ondes. Une utilisation plus commune est leur usage dans les commandes à distance (télécommandes), où ils sont préférés aux ondes radio, car ils n'interfèrent pas avec les autres signaux électromagnétiques comme les signaux de télévision.

Dans ce domaine, il existe plusieurs codages des informations (RC5 pour Philips, SIRCS pour Sony, etc.). Les infrarouges sont largement utilisés dans le domaine de la robotique ou dans les appareils nécessitant des transmissions de données à courte distance sans obstacle.

Un émetteur infrarouge est constitué d'une diode électroluminescente (LED) qui émet des radiations infrarouges concentrées par une lentille en plastique, le récepteur est une photodiode qui converti les radiations en un signal électrique. La photodiode répond uniquement aux variations rapides des radiations émises par l'émetteur, et filtre donc les variations lentes causées par la modification de la lumière ambiante. Ce type de technologie

peut très bien être utilisé pour la communication point-à-point entre véhicules qui se suivent dans un AHS [37].

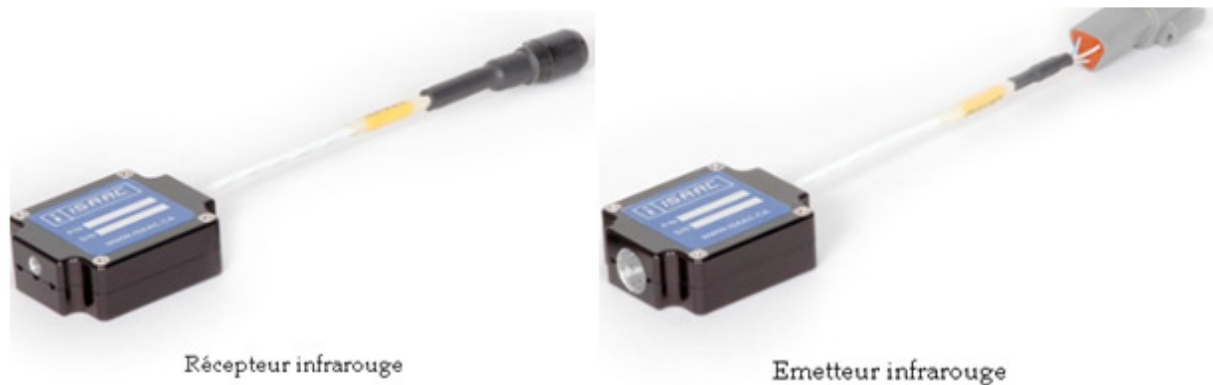


Figure-3.3 : Emetteur-récepteur infrarouge

III.3.2.2. Les Micro-Ondes :

Ce sont des ondes électromagnétiques de fréquence variante entre : 0.3 GHz et 300 GHz. Les micro-ondes sont utilisées dans la transmission et la diffusion point à multipoint d'information, leur spectre dispose d'une bande passante plus large que celle des ondes radio. Les antennes utilisées dans cette technologie sont relativement compactes eu égard à leurs longueur d'ondes plus courte par rapport aux basses fréquences [38].

III.3.2.3. Les ondes radio :

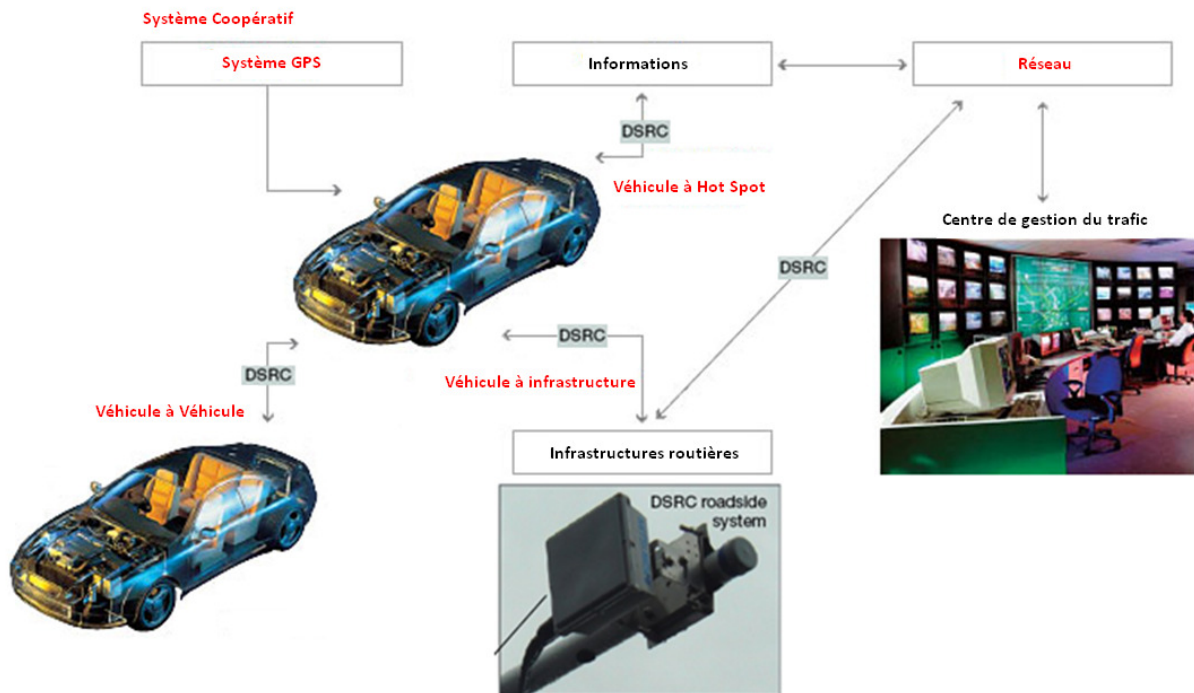
Ce sont des ondes électromagnétiques dont la fréquence est inférieure à 3000 GHz, soit une longueur d'onde supérieure à 0.1 mm. Comme toutes les ondes électromagnétiques, les ondes radio se propagent dans l'espace vide à la vitesse de la lumière et avec une atténuation proportionnelle au carré de la distance parcourue [39]. Aussi bien utilisées pour les transmissions point-à-point comme pour la diffusion d'information point-à-multipoint, cette technique peut être envisageable pour établir les communications entre véhicule sur un AHS. La figure-3.2 montre une antenne onde radio pouvant être installée sur un véhicule.



Figure-3.4 : Antenne ondes radio

III.3.2.4. DCRS (Dedicated Short Range Communications) :

C'est une norme de communication dédiée à l'industrie automobile pour la communication aussi bien entre véhicules mais aussi entre les infrastructures routières (signalisation, balises, radars, contrôle vidéo, centre de gestion du trafic) et les véhicules. Possédant ses propres protocoles et standards, cette technologie peut être unidirectionnelle ou bidirectionnelle et admet un temps de réponse très court [40]. Elle se base sur l'identification radio fréquence et travaille sur une fréquence de 5.9GHz. La figure-3.4 montre les différentes possibilités de communication DSRC.



Figur-3.5 : Différentes communications via le DSRC

III.4. Les dispositifs de mesure :

III.4.1. Introduction :

Plusieurs dispositifs de mesure sont primordiaux dans la gestion d'un AHS. Un certain nombre de grandeurs qui doivent être quantifiés en temps réel et avec précision sont la clé d'une commande efficace, notamment la mesure de:

- Position absolue du véhicule
- Distance longitudinale entre deux véhicules
- Variation de la distance longitudinale entre deux véhicules
- Position latérale du véhicule par rapport à l'axe de la route
- Angle d'embarquée du véhicule
- Vitesse d'embarquée du véhicule

- Vitesse de translation du véhicule
- Angle de roulis du véhicule
- Angle de direction des roues avant du véhicule
- Accélération du véhicule

Ajouté à cela un certain nombre de détecteurs :

- Détecteur d'obstacle
- Détecteur de présence latéral pour le changement de voie
- Détecteur de pluie et de neige
- Détecteur de visibilité et de verglas

III.4.2. Les capteurs

Nous allons dans ce qui suit donner une brève description des différents capteurs permettant toutes ces mesures.

III.4.2.1. Le télémètre Laser :

Le télémètre laser est un équipement qui permet de mesurer les distances. Un rayon laser est projeté sur une cible qui renvoie à son tour le rayon lumineux. Un boîtier électronique se charge après cela de calculer le déphasage entre l'émission et la réception et obtenir ainsi la distance. Plusieurs types de télémètres laser existent, notamment les télémètres laser à balayage pour la perception et qui sont bien adaptés à la navigation dans des espaces structurés [41]. Voir figure-3.6. Ce procédé peut vraisemblablement être utilisé dans la mesure de distance aussi bien latérale que longitudinale dans le cadre d'un AHS.

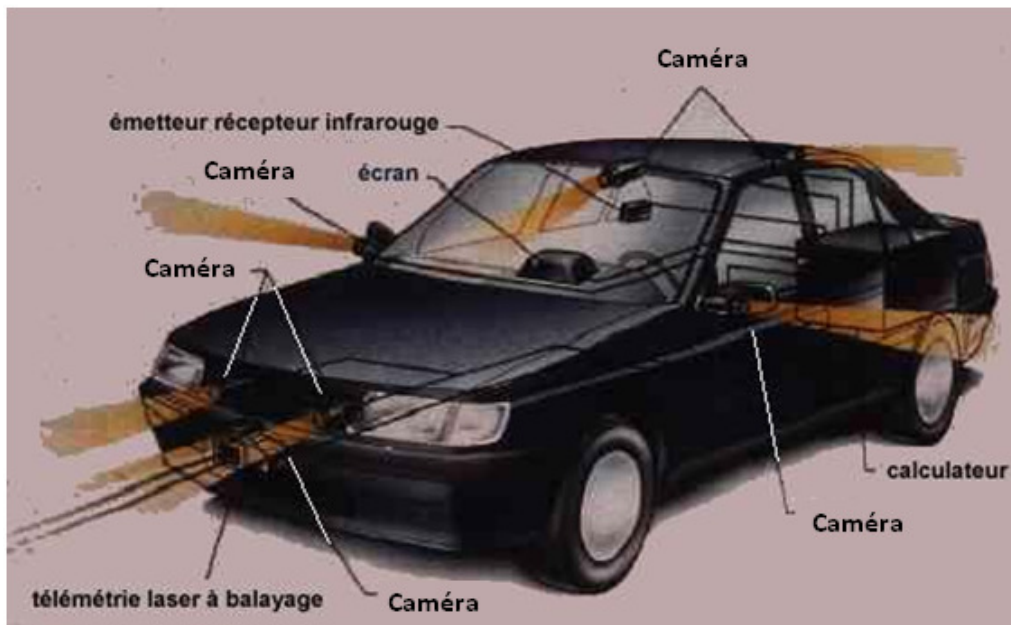


Figure-3.6: Télémètre laser à balayage installé sur un véhicule

III.4.2.2. Le capteur à ultrasons :

Les capteurs à ultrasons, appelés également télémètres à ultrasons, font partie des capteurs qui permettent de mesurer les distances sans contact. Ces capteurs se révèlent particulièrement complémentaires des capteurs infrarouges, puisqu'à l'inverse de ceux-ci, ils permettent de surveiller un cône large. Ils sont relativement bien présents dans la communauté robotique de par leur bon rapport efficacité/prix.

Le télémètre à ultrasons est basé sur la mesure du temps écoulé entre l'émission et le retour de l'écho. Lorsque l'onde ultrasonore est émise elle se propage à la vitesse du son, dans l'air environnant, à 342 m/sec. Dès qu'un obstacle est rencontré, l'écho revient vers le transducteur qui calcule alors le temps écoulé entre l'émission et la réception de l'onde. Ces ondes sont inaudibles pour l'oreille humaine [42]. Ces dispositifs peuvent être utilisés pour la mesure de distance aussi bien que pour la détection de présence latérale lors d'un changement de voie. Exemple de télémètre à ultrasons, voir figure-3.5.



Figure-3.7 : Capteur à ultrasons

III.4.2.3. Le système Radar :

Le radar (**RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging) qu'on peut traduire par « détection et estimation de la distance par ondes radio » est un système qui utilise les ondes radio pour détecter et déterminer la distance et/ou la vitesse d'objets tels que les avions, bateaux, ou encore la pluie. Un émetteur envoie des ondes radio, qui sont réfléchies par la cible et détectées par un récepteur, souvent situé au même endroit que l'émetteur. La position est estimée grâce au temps de retour du signal et la vitesse est mesurée à partir du changement de fréquence du signal par effet Doppler [43].

Actuellement, sur certaines voitures modernes, un radar de régulation de distance embarqué (voir figure-3.6) est ajouté au système de régulateur automatique de vitesse. L'appareil utilise un *radar* ou un *laser* pour mesurer la distance et la vitesse d'approche d'un véhicule précédant l'utilisateur ce qui permet d'ajuster la vitesse automatiquement afin d'éviter la collision, puis de reprendre la vitesse initiale lorsque l'obstacle est disparu. Cette technologie est appelée à se répandre au cours des prochaines années, et peut aussi être utilisée dans le cadre de véhicules roulant sur un AHS pour la mesure de la vitesse de translation d'un véhicule voisin, mesure de vitesse des véhicules par le AHS, pour la mesure de distance latérale et pour la détection d'obstacle et de présence latérale.



Figure-3.8 : Radar installé sur un véhicule

III.4.2.5. Accéléromètre :

Le principe de tous les accéléromètres est basé sur la loi fondamentale de la dynamique $\sum F = m\gamma$ (F : force (N), m : masse (kg) et γ : accélération (m/s^2)). Plus précisément, ce principe repose sur l'égalité entre la force d'inertie de la masse sismique du capteur et une force de rappel appliquée à cette masse [44].

Il existe plusieurs types d'accéléromètres notamment les accéléromètres piézoélectriques dont le principe de fonctionnement repose sur la propriété de certains cristaux (quartz, sel de Seignette) et certaines céramiques de se charger électriquement lorsqu'elles sont soumises à une déformation. Inversement, elles se déforment si on les charge électriquement, le phénomène est réversible. Ce signal électrique est utilisé pour calculer la force exercée et donc l'accélération. (Voir figure-3.7). Une fois la mesure effectuée, elle peut être diffusée via les différents moyens de communication dont dispose le véhicule.

L'accéléromètre à deux axes peut aussi être utilisé pour la mesure de l'inclinaison (grâce à la force de gravité de la Terre). En effet, certains accéléromètres à détection capacitive à masse sismique pendulaire permettent aussi d'assurer la fonction d'inclinomètre. Cette dernière est rendue possible par la configuration mécanique des accéléromètres capacitifs pendulaires et la gravité terrestre. Cette procédure peut tout aussi bien être utilisée pour la mesure de l'angle de roulis du véhicule.



Figure-3.9 : Accéléromètre

III.4.2.5. Le gyroscope et le gyromètre :

Un gyroscope est un appareil qui exploite le principe de la conservation du moment angulaire en physique (ou encore stabilité gyroscopique ou effet gyroscopique). Dans les capteurs : un gyroscope est un capteur de position angulaire et un gyromètre un capteur de vitesse angulaire [45]. Le gyroscope donne la position angulaire (selon un, deux ou les trois axes) de son référentiel par rapport à un référentiel inertiel (ou galiléen). L'essentiel du dispositif est une roue (ou tout objet correctement équilibré) tournant sur un axe qui, une fois lancée tend à résister aux changements de son orientation. Exemples figure-3.8.

D'autres méthodes ont montré leur efficacité notamment : les gyroscopes à fibre optique. Deux rayons laser parcourent la fibre dans des directions opposés. Le parcours du rayon allant dans le sens inverse de la rotation est plus court que celui de l'autre rayon. On a ainsi un déphasage à l'intersection des rayons et l'intensité de la lumière résultante dépend de la rotation de l'ensemble.



Gyroscope horizontal pour avion



Gyroscope de petite taille

Figure-3.10 : Exemple de gyroscopes

III.4.2.6. Les systèmes de vision :

De plus en plus de véhicules sont équipés actuellement de systèmes de caméras. Que ce soit pour l'aide au stationnement (appelé créneau automatique) ou pour la détection d'obstacles, les systèmes de vision font peu à peu leur apparition dans le domaine de l'automobile. Une ou plusieurs caméras installées à l'avant, à l'arrière et/ou sur le côté du véhicule permettent de capturer des images du milieu environnant, des techniques de traitement d'image sont ensuite

utilisées pour extraire des informations à partir de ces images en temps réel. Figure-3.9 montre un exemple de caméra embarquée sur un véhicule.



Figure-3.11 : Exemple de caméra embarquée sur un véhicule

III.4.2.7. GPS (Global positioning system) :

Le GPS permet à un nombre illimité d'utilisateurs de déterminer leur position et de synchroniser leur montre en tout point du globe, à tout instant et indépendamment des conditions climatiques en se basant sur une référence géographique et temporelle universelle. Le système GPS se compose de 3 segments qui sont :

- Le segment spatial : il s'agit d'un réseau de 28 satellites qui émettent sur 2 fréquences appelées L1 (1575.42 MHz) et L2 (1227.6 MHz) ; ils se meuvent sur 6 plans orbitaux, à environ 20 000 km d'altitude. *La fréquence L1 est modulée par les codes C/A et P, la fréquence L2 est modulée par le code P.*
- Le segment contrôle : il est constitué de 5 stations qui calculent l'orbite des satellites, contrôlent leur bon fonctionnement ainsi que la qualité de l'horloge à bord de chaque satellite.
- Le segment utilisateur : Il est composé des récepteurs GPS, appareils permettant de calculer la position, la vitesse et l'heure d'un observateur, partout et à tout moment sur Terre et dans ses environs, quelles que soient les conditions climatiques. [46]

Le principe de base de la détermination GPS d'un point est similaire au principe de triangulation, si ce n'est que l'on utilise non pas des angles mais des distances. Les satellites

envoient des ondes électromagnétiques qui se propagent à la vitesse de la lumière. Connaissant la vitesse de propagation de la lumière, on peut alors calculer la distance qui sépare le satellite du récepteur en connaissant le temps que l'onde a mis pour parvenir du satellite au récepteur grâce à la formule suivante :

$$d = t * C$$

Avec : d la distance, t : le temps mis par l'onde pour arriver au récepteur. Et C : la vitesse de la lumière. Pour mesurer le temps mis par l'onde pour lui parvenir, le récepteur compare l'heure d'émission (inclus dans le signal) et de réception de l'onde émise par le satellite (code C/A et/ou P). Cette distance est appelée *pseudo distance*. Avec trois satellites on obtient trois pseudo distance qui permettent de retrouver la position du récepteur.

Néanmoins deux problèmes subsistent avec cette mesure :

- Les horloges du récepteur et du satellite ne sont pas parfaitement synchronisées, cela introduit un délai d'horloge qui apparaît comme une erreur de mesure de distance au satellite. C'est pourquoi quatre satellites sont nécessaires pour déterminer trois coordonnées et un délai d'horloge.
- Le code C/A a une longueur d'onde de $\pm 300\text{km}$, ce qui implique que les observations brutes ne peuvent théoriquement donner des distances qu'entre 0 et 300 km. Hors le satellite se trouve à 20 000 km, la mesure doit donc être corrigée par le récepteur de 300 km modulo n .

Le signal émis par le satellite se propage à une vitesse de 300 000 km/s une erreur de 1 ms sur l'horloge introduirait une erreur de positionnement de 300 km. Les satellites disposent donc d'horloges atomiques ayant une précision de 1 ns sur laquelle doit se caler le récepteur GPS. La figure-3.10 schématise le fonctionnement du GPS. [47]

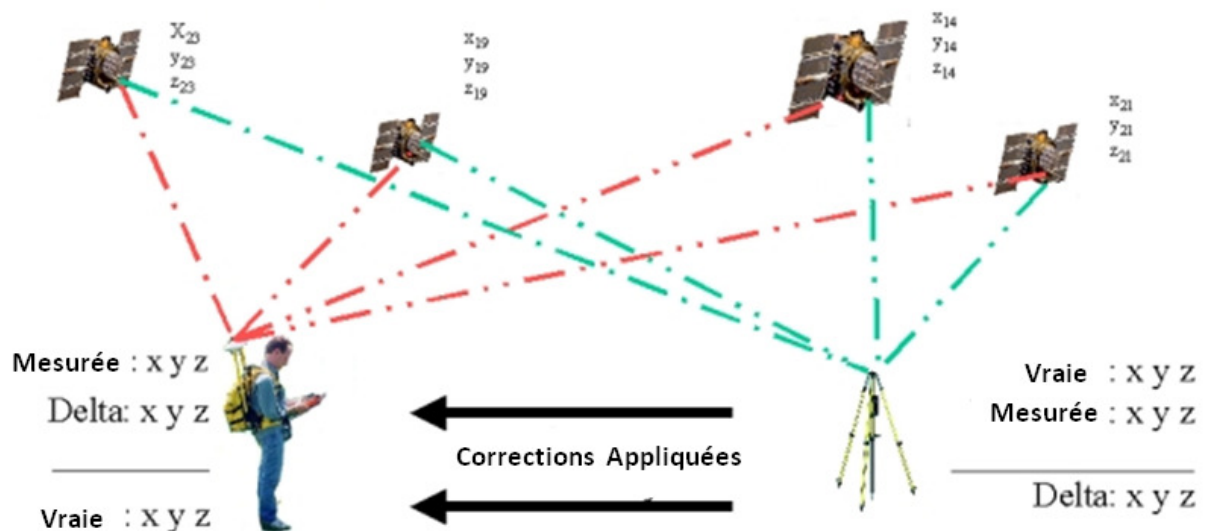


Figure-3.12 : schéma de principe d'un GPS

III.4.3. Les dispositifs d'aide à la décision :

Ajouté à cette panoplie de capteurs aussi performants les uns que les autres, un AHS doit aussi disposer d'un certain nombre de détecteurs (ou dispositifs d'aide à la décision) qui définissent l'état de l'autoroute par rapport notamment aux conditions météorologiques. Ces détecteurs sont :

III.4.3.1. Détecteur de pluie et de neige :

La détection de pluie et neige est primordiale pour un AHS, elle permet de modifier le comportement des véhicules afin d'éviter les accidents de voiture causé par la mauvaise adhérence des pneus due à la pluie. Sachant que la détection de pluie et de neige se fait par radar.

La détection de pluie/neige par radar repose sur le principe de base de toute détection de cible. Un radar météorologique émet une série d'impulsions électromagnétiques très brèves qui sont focalisées par l'antenne du radar sous forme d'un faisceau très fin (avec une ouverture de l'ordre de 1° à 2°). L'orientation de ce faisceau dans l'espace est caractérisée par son *site* (l'angle par rapport à l'horizontale) et par son *azimut* (l'angle par rapport au nord). La longueur d'onde des impulsions émises varie de 3 à 10 cm selon les types de radar utilisés.

La détection de pluie/neige sur une section (ou la totalité) de l'autoroute entraîne automatiquement la modification par la couche lien de l'AHS de certains paramètres de route, notamment les vitesses de référence afin d'éviter les éventuelle pertes de contrôle des véhicules. La figure-3.11 illustre la détection de pluie/neige.

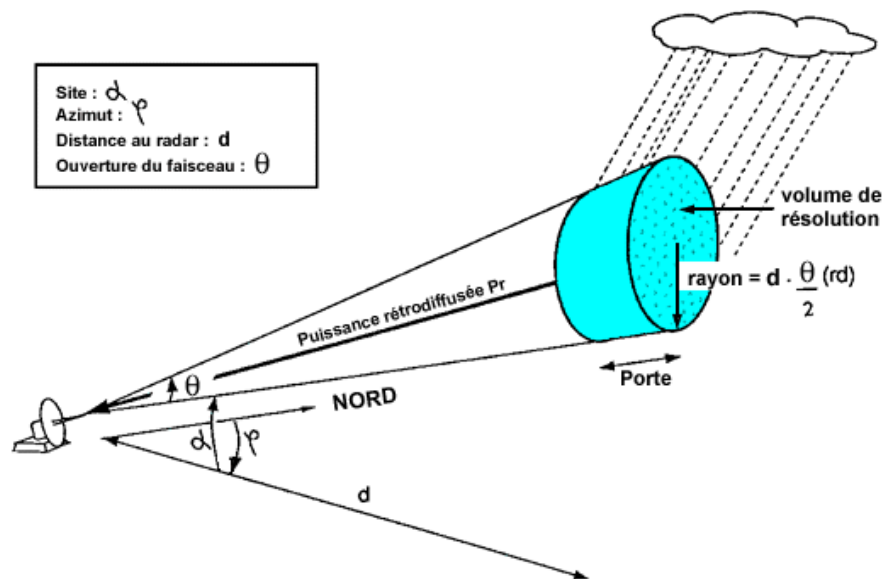


Figure-3.13 : détection de pluie/neige par radar

III.4.3.2. Détecteur de verglas :

Le verglas se forme lorsque la pluie entre en contact avec le sol ou une surface proche du sol très froide, les gouttelettes d'eau gèlent alors immédiatement créant le verglas. La glace formée ajoute rapidement un poids supplémentaire sur les structures et forme une surface extrêmement glissante sur le sol. Ces plaques de verglas entraînent très souvent la perte de contrôle du véhicule. Néanmoins certains véhicules, actuellement sont équipés de détecteurs de verglas qui indiquent au conducteur la présence éventuelle de verglas sur la route. En analysant la température extérieure et notamment la température de la surface sur les différentes surfaces, on peut détecter les risques de formation de plaques de verglas. La détection est effectuée grâce à une sonde placée sous le capot à l'avant du véhicule. Le même procédé peut être utilisé de manière plus généralisé sur l'espace autoroutier ou du moins dans les zones exposées aux risques de verglas.

III.4.3.3. Détecteur de visibilité :

La visibilité sur la route peut être altérée par plusieurs facteurs météorologiques ou autres (brouillard, fumée, poussière ou smog), notamment les plus fréquents dans certaines régions : le brouillard. Le brouillard peut en effet réduire considérablement la visibilité ce qui entraîne parfois des accidents. Le détecteur de visibilité permet de fournir une mesure en temps réel et en fonction de la distance, de la transmission de la lumière au travers des particules en suspension dans l'air. De ce profil de transmission est déduite la visibilité. Cet instrument peut être entièrement autonome ou contrôlé à distance pour fournir une information d'aide à la décision. La mesure de la visibilité va permettre à la couche lien de l'AHS d'ajuster les vitesses de références sur les différentes sections de l'autoroute.

III.5 Réalisabilité d'un AHS et tests réels : [48]

Plusieurs essais ont été menés dans le cadre de la réalisation d'un AHS notamment en Californie aux Etats-Unis. Commenant en 1997 le « National Automated Highway System Consortium (NAHSC) » voulait illustrer une vision d'un AHS qui pourrait accroître à la fois l'efficacité et la sécurité au niveau des espaces autoroutiers. En conduisant des tests grandeur nature le NAHSC a donné la preuve de réalisabilité d'un AHS, avec un projet de démonstration qui a été mené au nord de San Diego en Californie, et qui a conclu à envisager une automatisation des autoroutes comme solution à l'engorgement des routes. La démonstration en question s'est déroulée du 7 au 10 Aout 1997, en utilisant des véhicules ordinaires disponibles sur le marché et a pu aussi prouver que la technologie nécessaire à la réalisation d'un AHS existait déjà.



Figure-3.14 : peloton de voiture sur une autoroute dans le cadre d'un AHS

La démonstration a comporté 8 véhicules (de type Buik LeSabre) sous contrôle automatique, à distance réduite et avec une vitesse appréciable. Un certain nombre de conducteurs ont fait l'expérience de voyager à bord de véhicules totalement automatisé sur un AHS, et ont constaté que le confort et l'efficacité qu'offre un AHS est envisageable dans un futur proche.

Le peloton de démonstration a été conçu par les chercheurs du projet PATH (Partners for Advanced Transit and Highways) de l'université de Californie, pour suggérer l'automatisation comme solution à l'encombrement des autoroutes. Les huit véhicules du projet PATH roulant à une distance fixe inter-véhicule de 6.5 mètres (maintenue avec une précision de 10 cm en fonctionnement normal et 20 cm pendant les manœuvres. Avec une estimation de réduction de l'espace inter-véhicule à 2 m) à différentes vitesses dont le maximum est le maximum de vitesse autorisé sur cette portion d'autoroute.

Avec cette configuration et avec un espace inter-peloton de 60 m (distance minimale de sécurité) et en roulant à une vitesse aux environs de 100 km/h le débit de véhicule est estimé à 5700 véhicule/voie/heure. En réduisant ce débit par 25 % due aux manœuvres et aux entrées et sorties de l'autoroute, les chercheurs ont estimé à 4300 véhicule/voie/heure le débit de véhicule obtenu grâce au projet. En sachant que le débit de voiture habituellement mesuré sur la même voie d'autoroute à la même vitesse en conduite manuelle est estimé à 2000 véhicule/voie/heure.

La réduction de distance entre les véhicules peut aussi induire une réduction significative en des contraintes aérodynamiques pour l'ensemble du peloton. En effet des études menées par des chercheurs de l'université de Californie du sud ont montré que les contraintes aérodynamiques peuvent être réduites de moitié si l'espace inter-véhicule atteignait la moitié de la longueur du véhicule. La réduction de ces contraintes peut introduire un gain de 20 à 25 % en consommation carburant.

La coordination étroite entre les véhicules en manœuvre a nécessité l'utilisation d'un radar pour la mesure des distance et d'un système de communication par ondes radio qui transmet

la vitesse et l'accélération du véhicule mis à jour 50 fois par seconde, ce qui implique que le véhicule peut réagir au changement de vitesse du véhicule devant lui extrêmement rapidement par rapport à un être humain. Par conséquent, les variations de distances sont tellement faibles qu'elles ne sont pas perceptibles par le passager.

Le test a commencé par les véhicules à l'arrêt pour voir le comportement d'un peloton face au contrôle longitudinal, il se termine aussi par un ralentissement des véhicules jusqu'à l'arrêt. La démonstration a aussi montré que les véhicules ont la possibilité de quitter/rejoindre un peloton (fusion, séparation et changement de voie) en coordonnant la manœuvre via la communication radio entre les véhicules concernés. En effet le dernier véhicule du peloton a entamé une procédure de séparation, en réduisant sa vitesse jusqu'à une certaine distance du peloton. Par la suite, ce même véhicule a réussi à faire un changement de voie puis est retourné sur la voie initiale, et enfin il a accéléré et entamé une procédure de fusion qui s'est déroulé normalement.

Le système de contrôle a ainsi montré son efficacité améliorant la qualité de conduite. Les commandes longitudinale et latérale offrent des performances largement supérieures à celle d'un conducteur humain aussi qualifié qu'il soit.

Pour la commande latérale des marqueurs magnétiques ont été enterrés sous la route. Des capteurs magnétiques installés sur les véhicules permettent donc de repérer l'axe de la route et donc de le suivre avec une précision obtenue environnant les 8 cm.

Une interface homme/machine a été aussi conçue à bord des véhicules pour fournir certaines informations aux conducteurs, notamment un bouton pour désactiver la commande latérale et un écran qui indique les différents paramètres du véhicule (destination, position, vitesse, manœuvres pour ne pas surprendre les passagers etc.) en temps réel.

Les chercheurs du projet PATH ont ainsi développé le concept et la commande de l'AHS, ont spécifié le matériel nécessaire, et ils ont conçu le système de marqueurs magnétique, le système de contrôle électronique de l'accélération et les protocoles de communication.

III.6. Conclusion :

Ce chapitre a été consacré aux aspects pratiques autour d'un système autoroutier automatique. Nous nous intéressé à détailler les différents moyens matériels dont doit disposer un AHS afin d'assurer son bon fonctionnement. Dans un premier temps nous avons brièvement introduit la gamme des actionneurs, protocoles de communication, capteurs et autres dispositifs d'aide à la décision. Par la suite nous avons abordé la question de la réalisabilité d'un AHS en évoquant l'exemple du projet PATH initié par des chercheurs de l'université de Californie, et qui a eu pour but principal de prouver que la technologie permettant l'automatisation complète des véhicules sur autoroute existait déjà.

Chapitre IV :

**Présentation de l'AHSimulator :
Logiciel de simulation de l'AHS.**

IV.1. Introduction :

Dans le cadre de notre étude portant sur l'automatisation du trafic autoroutier nous avons mis au point un prototype de logiciel de simulation permettant de visualiser graphiquement le comportement des agents semi-autonomes (où véhicules) sous les contraintes des algorithmes et protocoles cités au cours des chapitres précédents, et des différents paramètres de simulation. Etant donné que l'intérêt est focalisé sur le comportement, la simulation a été conçue en considérant la disponibilité des éléments suivants : les véhicules et autoroutes sont équipés des capteurs et des moyens de communication appropriés et peuvent donc communiquer avec fiabilité. Pour plus d'informations sur la couche matérielle utilisée, le lecteur peut se reporter au Chapitre III.

Le développement de cette simulation en complément de l'étude théorique réalisée va permettre d'apprécier le degré de fiabilité du système étudié, de savoir comment l'AHS se comportera lors d'une affluence automobile conséquente et enfin d'apprécier l'évolution d'un tel système sous l'influence des paramètres et perturbations divers. Sur un plan pédagogique, le développement de cette simulation nous a également permis de mieux comprendre le fonctionnement des différents protocoles et algorithmes mis en jeu ainsi que l'intérêt d'une architecture hybride pour ce système.

La première partie de ce chapitre concerne l'élaboration du cahier des charges, suivie d'une explication technique qui détaillera les outils et technologies utilisées ainsi que l'architecture générale du logiciel. Ensuite nous lancerons quelques jeux de tests qui nous permettront de visualiser et d'observer le comportement des véhicules en fonction du temps et de comprendre l'intégration des lois de régulation implémentées dans II.2.3.3., dans le système globale. Enfin, nous citerons les différents outils de simulation existants actuellement avant de parler des perspectives d'évolution de notre logiciel.

IV.2. Objectifs et cahier des charges :

Les spécifications fonctionnelles et techniques du logiciel à développer sont les suivantes :

- Application portable, multi-plateformes (Windows, Linux, Mac OS).
- Visuel graphique en 2 dimensions.
- Implémentation des couches Lien, Planification et Régulation avec les 5 lois suivantes : fusion, suivi, séparation, changement de voie et conservation des distances de sécurité.
- Modèle de véhicules simplifié, le contrôle est appliqué sur des points matériels et non sur des modèles de véhicules réels étant donné l'objectif de la simulation.
- Possibilité de paramétrer les données de la simulation à volonté.
- Architecture orientée objet et ouverte, permettant plus tard l'ajout de briques supplémentaires (couche réseau, modèles réels etc.) et lui donnant un cycle de vie appréciable.

Les spécifications citées ont grandement influencé sur le choix du langage et des outils utilisés détaillés au paragraphe suivant.

IV.3. Technologies et langages utilisés :

IV.3.1. Partie métier :

La simulation a été développée à l'aide du langage C++ dans sa version standard ISO/IEC 14882 : 2003 [49]. L'intérêt d'utiliser le C++ est la possibilité d'obtenir des logiciels dits multiplateformes, c'est-à-dire opérant sur des machines ayant des architectures ou systèmes d'exploitation différents, tout en ayant la possibilité de programmer en utilisant la conception orientée objet. Nous avons également utilisé la Standard Template Library (STL) qui est une librairie C++ normalisée par l'ISO qui fournit le support nécessaire à l'utilisation des structures de données et des algorithmes sous jacents. Concrètement la STL fournit :

- Un ensemble de classes conteneurs (listes chaînées, vecteurs, piles de données, queues de priorité, tables de hachage etc.) qui peuvent être utilisées pour contenir n'importe quel type de données (y compris les types de données abstraits dont la description se fera plus bas).
- Des itérateurs qui permettent de parcourir ces classes de conteneurs.
- Des algorithmes génériques sur ces itérateurs : tri, insertion, suppression, recherche etc.

Nous reviendrons ultérieurement en détail sur la manière avec laquelle les différents objets constituant la simulation ont été modélisés à l'aide de la STL.

IV.3.2. Partie graphique :

Malheureusement le C++ seul, ne fournit pas de librairies permettant la programmation graphique. Nous avons donc eu recours à OpenGL (Open Graphics Library) qui est une spécification qui définit une API (Application Programming Interface) multi-plateforme pour la conception d'applications implémentant des rendus en 3D ou 2D. OpenGL a été initialement développée par la *Silicon Graphics, Inc.* et est actuellement surveillée par l'*Architecture Review Board* formé en 1992 et composé d'entreprises ayant un profond intérêt pour la création d'une API cohérente et largement disponible, on peut citer : *Microsoft* (retiré), *3DLabs*, *Apple*, *ATI*, *Dell*, *Evans & Sutherland*, *Hewlett-Packard*, *IBM*, *Intel*, *Matrox*, *nVidia*, *SGI* et *Sun Microsystems*. Actuellement OpenGL est largement utilisée dans l'industrie multimédia et notamment dans l'industrie du jeu vidéo.

Etant donné qu'OpenGL se limite strictement qu'au rendu 2D/3D, nous avons eu recours à une librairie tierce permettant de gérer le fenêtrage, les interruptions claviers/souris, la temporisation etc.

Notre choix s'est porté sur la librairie GLFW (Graphic Library FrameWork) qui est distribuée sous une licence libre non restrictive. Les atouts majeurs de GLFW sont :

- Simplicité d'utilisation.
- Portabilité (Windows, Linux, Mac OS X, FreeBSD..).
- Supporte la programmation multitâche.
- Bon support du mode plein écran.
- Licence libre.

Le C++ couplé donc à OpenGL via GLFW nous a permis donc de développer ce logiciel de simulation graphique et multiplateforme.

IV.4. Architecture du logiciel :

IV.4.1. Introduction :

De part sa nature la simulation a été développée sous une approche multitâche ou multithreadée en anglais. Le multithreading consiste à exécuter de façon simultanée plusieurs processus à la fois. La simultanéité n'est toutes fois qu'une impression, étant donné qu'elle ne peut être atteinte réellement qu'en programmation parallèle exploitant plusieurs cœurs de processeurs à chaque cycle de calcul.

Le cycle de fonctionnement du logiciel est représenté au niveau de la figure-4.1. Ce cycle peut être résumé de la façon suivante : Avant chaque lancement du logiciel il est possible de configurer les paramètres de la simulation, qui une fois lancée passe par une étape dite d'initialisation. Trois processus se mettent ensuite en route, l'un dont le rôle est de créer les véhicules au bon moment au bon endroit (dépendamment des paramètres du fichier de configuration), un deuxième processus dont le rôle est de superviser chaque véhicule durant toute la durée de son cycle de vie et enfin un troisième processus qui permet de quantifier le temps écoulé depuis le lancement de la simulation.

Il est nécessaire de revenir en détail sur le processus de supervision, dont la schématisation est donnée à la figure-4.2 étant donné son rôle central dans le fonctionnement de la simulation. Pour résumer à chaque cycle de calcul on vérifie, pour un agent donné, si les conditions pour une fusion, un changement de voie, un suivi, une poursuite ou une séparation sont remplies si c'est le cas on exécute le mode correspondant suivant les protocoles introduits dans II.2.3.2.

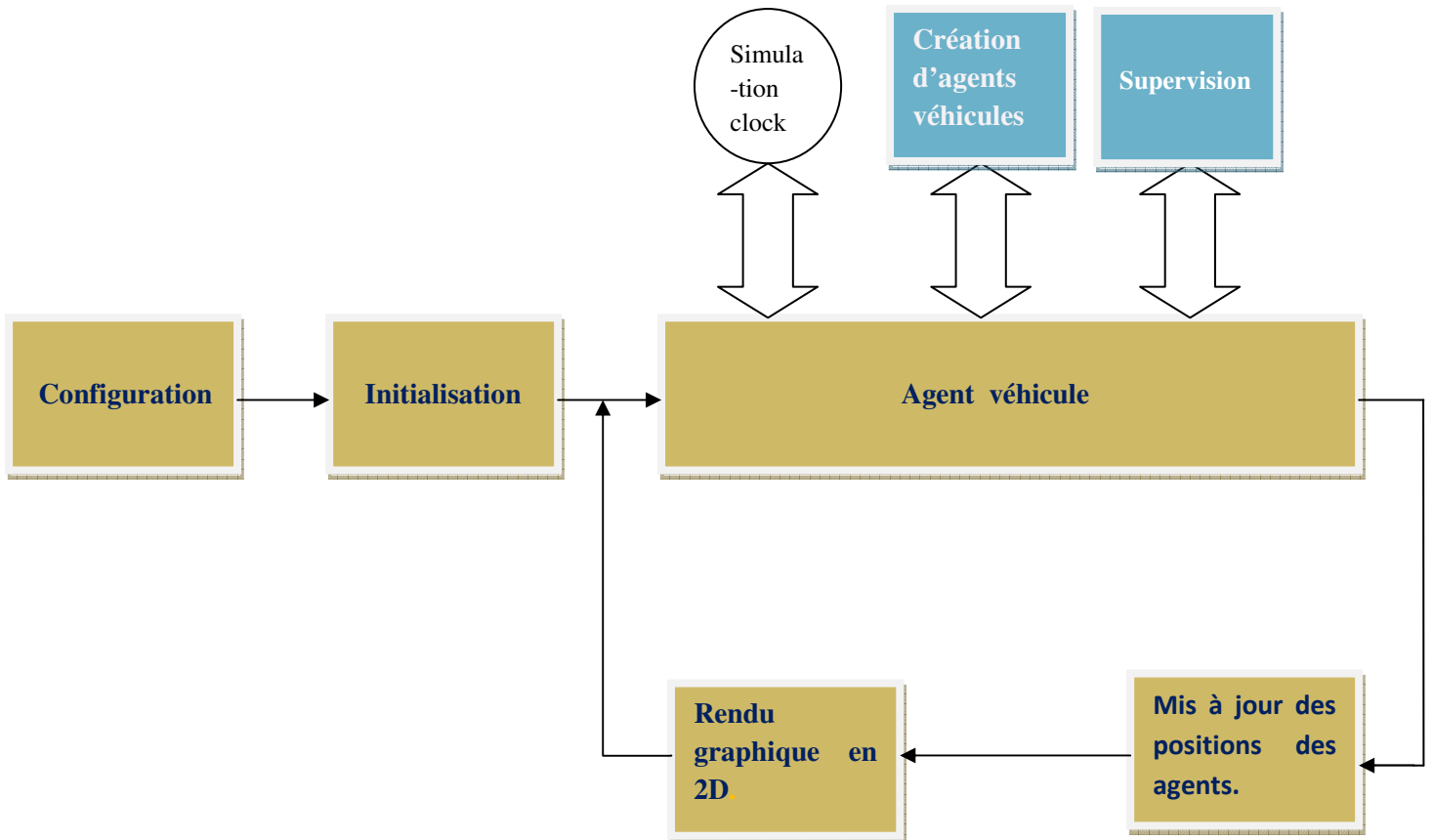


Figure-4.1 : Cycle de fonctionnement de la simulation

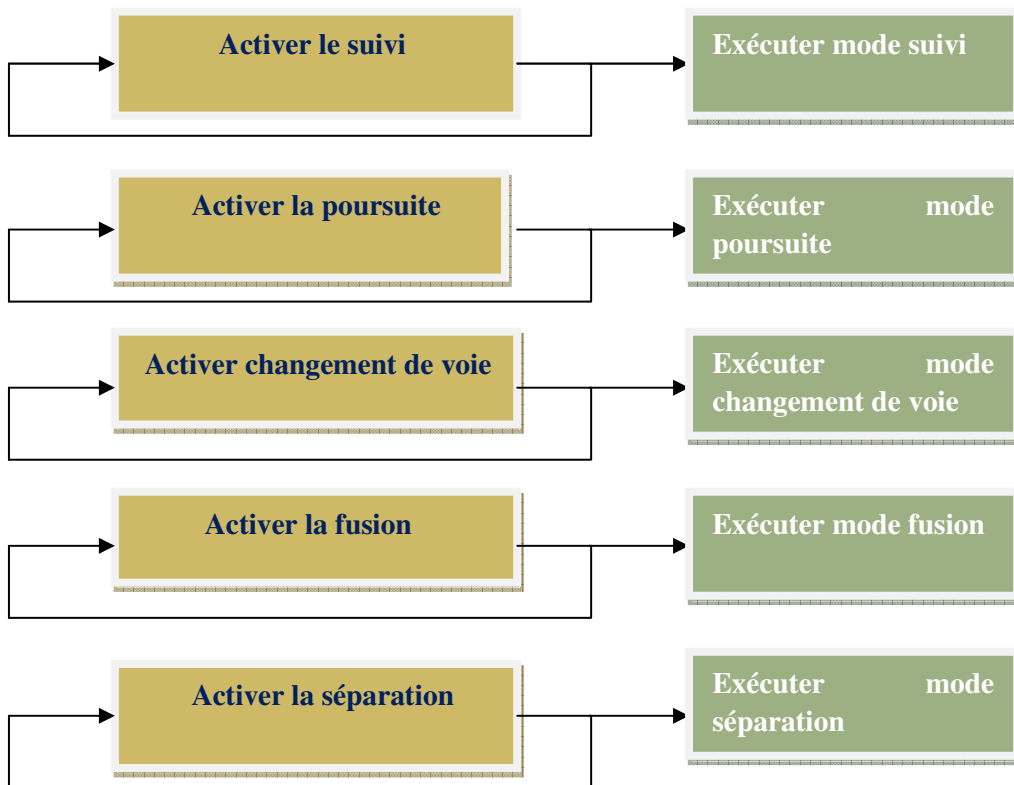


Figure-4.2 : Fonctionnement du processus de Supervision

IV.4.2. Diagrammes de classes UML (Unified Modeling Language) :

Des diagrammes de classes sont proposés afin d'avoir une idée sur la conception objet de la simulation. Pour des soucis de lisibilités nous avons évité de surcharger le diagramme avec l'ensemble des classes composant l'application. Nous avons donc procédé à l'élaboration de plusieurs diagrammes de classes. Il est à noter que le projet compte 17 classes en tout, classifiées de la manière suivante :

- Classes de fonctionnement : Elles servent à mettre en place le contexte OpenGL sur lequel la simulation opère. Elles gèrent notamment le rendu graphique, la gestion des calculs sur chaque cycle de boucle principal, la gestion des événements etc. Ces classes sont au nombre de 3 : *GLAbstract*, *AppEngine* et *WinGlfw*, elles sont représentées au niveau du diagramme de la figure-3.3 (annexe). Elles sont liées entre elles par une relation d'héritage. *GLAbstract* étant la classe la plus abstraite de la hiérarchie, elle est abstraite dans le sens où elle peut être implémentée pour n'importe quelle librairie graphique. *WinGlfw* est justement l'implémentation de *GLAbstract* pour la librairie : GLFW. Enfin *AppEngine* permet de faire l'interface entre la couche métier de l'application et la couche de fonctionnement.
- Classes métier : Elles représentent le cœur de la simulation. Elles sont représentées au niveau du diagramme de la figure-3.4 (annexe). L'attention est attiré sur l'utilité de l'approche objet pour le système étudié où nous remarquons que chaque entité de l'AHS a été représentée sous forme d'une classe. Un véhicule est une classe (*Vehicle*) qui instanciera des véhicules, un gestionnaire de véhicule est une classe (*VehicleManager*) dont le rôle est de gérer l'ensemble des véhicules présents sur l'autoroute depuis leurs créations jusqu'à leurs sortie (suppression). Une autoroute est également une classe aussi bien que la plupart des couches de l'architecture en couches de l'AHS figure-2.4. C'est le cas des couches Lien et Planification représentés par les classes *Link* et *Supervisor*.
- Classes utilitaires : Elles n'ont pas de sens métier pour la simulation, mais fournissent un certain nombre d'outils indispensables à la programmation des différents algorithmes utilisés. A titre d'exemple nous pouvons citer la classe *CVecteur2D* qui comme son nom l'indique implémente un type abstrait de vecteur sur un plan. La classe *xmlParser* nous a permis de manipuler le format XML (eXtensible Markup

Language) qui nous a servi à implémenter une couche de configuration simple et extensible.

IV.4.3. Modélisation des éléments du système :

Les diagrammes de classes cités précédemment nous permettent de mieux comprendre comment la simulation a été conçue. Nous décrivons maintenant, l'ensemble des structures de données utilisées afin de montrer la manière avec laquelle chaque donnée a été modélisée au niveau de la simulation :

- `std::vector`: L'utilisation d'un vecteur de données (équivalent d'une liste chaînée) a permis de représenter : la liste de véhicules présents sur l'autoroute, la liste de pelotons présents sur l'autoroute et les véhicules composant chaque peloton.
- `std::queue`: La structure de données file (ou queue en anglais) dont les données suivent une loi dite : FIFO (First In First Out) a été utilisée pour gérer les événements par ordre de priorité, gérer les messages d'erreurs également par ordre de priorité et enfin stocker les messages de chaque véhicules dans une boîte aux lettres virtuelle, et ce par ordre de réception.
- `std::map`: Le conteneur associatif `std::map` de la STL est en quelques sortes l'équivalent d'une table de hashage. Une table de hashage est une structure de données qui permet une association clé-élément (key-value). L'intérêt d'utiliser une telle structure est premièrement d'éviter tous doublons, et deuxièmement de pouvoir accéder rapidement à une information (complexité $O(n)$) évitant d'avoir recours à des algorithmes de tri de complexité exponentielle $O(n^2)$ ce qui aurait pour conséquence de consommer trop de cycles de calculs inutilement engendrant une baisse de performance au niveau de la simulation. La `std::map` a donc été utilisée pour stocker en continu des entrées de la forme : `<id_vehicule, distance>` où `id_vehicule` est l'identificateur du véhicule et `distance`, sa position par rapport au début de l'autoroute.

IV.5. Fonctionnement de la simulation :

IV.5.1. Présentation de l'eXtended Markup Language (XML):

La simulation s'exécute sur une fenêtre _contenant le rendu de la scène 2D dessinée. Avant chaque lancement de l'application il est nécessaire de paramétrer les données de la simulation. Pour cela un système de configuration extensible a été mis en place à l'aide du langage XML. Le langage XML, est un langage dit : « extensible de balisage » dont le rôle est essentiellement à stocker des données structurées en champs arborescents. Son intérêt pour la configuration de la simulation est alors évident, étant donné qu'il est possible de définir assez

facilement les paramètres sous forme de balises, c'est ce que nous allons voir pour chacun des fichiers de configuration retenus.

IV.5.1.1. Configuration du système :

Le premier fichier de configuration utilisé concerne la classe *IvhsSystem*. Il permet de configurer tous les paramètres généraux de la simulation, à savoir : la distance inter pelotons optimale, la distance séparant deux véhicules à l'intérieur d'un même peloton, la distance de sécurité ainsi que la portée de communication et des capteurs. Le format XML est donné en annexe.

IV.5.1.2. Configuration de l'autoroute :

Le deuxième fichier de configuration concerne toutes les données relatives à l'autoroute.

Il ya d'abord les paramètres relatifs à la l'architecture physique de l'autoroute : taille de l'autoroute, nombre de voies, nombre de voies automatiques, nombre de voies de transition, nombre d'entrées, nombre de sorties, distance de chaque entrée et sortie par rapport au début de l'autoroute. On peut également paramétrer le flux de véhicules entrant au niveau de chaque entrée ainsi que leurs temps de création, grâce au format suivant :

numéro_voie : temps_initial : temps_final # flux_vehicules (par heure). Le format de fichier de configuration de l'autoroute est donné en annexe.

IV.5.1.3. Configuration de la couche Lien :

Le troisième fichier de configuration est celui de la couche Lien, décrite dans II.2.3.1.

Fidèlement à son rôle, il est possible de paramétrer la taille de peloton optimale ainsi que la valeur de la vitesse optimale. Le fichier de configuration au format XML est donné en annexe.

Le diagramme de classes de la figure-4.6 (annexe), permet de voir la représentation en classes de ces différentes parties de la simulation et de comprendre la manière avec laquelle les données leurs sont transmises à partir des fichiers de configuration. Ainsi la classe *Config*, a comme rôle de charger chaque fichier de configuration, de les analyser et de transmettre les données extraites aux différentes classes qui en dépendent.

IV.5.2. Tests et observations :

La simulation a été testée en prenant les paramètres du tableau-4.1. Ces paramètres ont été choisis de telle manière à pouvoir observer les principales manœuvres mises en jeu sous les contraintes du système étudié, à savoir : Le changement de voie, la fusion, la poursuite de référence, le suivi et la séparation. L'autoroute est composée de deux voies : une voie dite de transition et une voie automatique. Les véhicules entrent par la voie de transition en mode

conduite manuelle, une fois le mode automatique enclenché les véhicules tentent immédiatement de rejoindre la voie automatique. La voie étant libre, le changement de voie est lancé Figure-4.7 (annexe).

Paramètres	Valeurs
Taille de l'autoroute (<i>m</i>)	1200
Nombre de voies	2
Nombre d'entrées secondaires	1
Flux de véhicules (<i>numéro_voie : temps_initial : temps_final # flux_vehicules</i>)	0:1:21#700-0:23:32#800
Vitesse optimale (<i>m/s</i>)	15
Taille des pelotons optimale	10
Distance intra-peloton (<i>m</i>)	2
Distance inter-peloton (<i>m</i>)	20
Portée des capteurs (<i>m</i>)	75
Portée des antennes de communication (<i>m</i>)	75

Tableau-4.1 : Paramètres de simulation

A ce stade là, aucune fusion (qui est la manœuvre principale du système) n'a été effectuée étant donné qu'une action ne peut être menée pendant qu'une autre action se déroule. Ainsi, une fois que les deux premiers véhicules ont complété leurs manœuvres de changement de voie, on assiste à la formation d'un premier peloton composé des véhicules 1 et 2 figure-4.8 (annexe). Le véhicule 3, vient ensuite fusionner avec ce premier peloton, donnant un peloton à 3 véhicules. Bien entendu afin d'établir une fusion toutes les conditions énumérées dans II.2.3.2.1 doivent être réalisées. Un quatrième véhicule entre ensuite en jeu, mais ne fusionne pas avec le premier peloton étant donné que la distance le séparant de ce dernier est supérieure à la portée du capteur embarqué à son niveau. Ceci donne lieu à la formation d'un deuxième peloton séparé du premier peloton par la distance inter-peloton autorisée, figure-4.9. Enfin tous les véhicules restent sur la voie automatique jusqu'à leurs sortie de l'autoroute où un autre changement de voie intervient afin de revenir sur la voie de transition en mode conduite manuelle.

IV.6. Projets similaires :

En marge de notre réalisation, de nombreux projets ont été développés durant les dernières années nous pouvons citer le projet SmartPath [50] développé dans le début des années 90, à l'université de Berkeley en Californie. Un autre projet de nature académique nommé DYNVIMTS [51] développé dans le cadre d'une thèse de doctorat sur le sujet en 1998. Enfin d'autres projets similaires ont vu le jour dans un cadre plus professionnel, l'on peut citer l'excellent logiciel de simulation : Paramics, de l'entreprise anglaise Quadstone Paramics [52]. Paramics est un outil de micro-simulation complet qui couvre l'ensemble des 4

couches décrites dans II.2.3, qui permet donc de simuler un réseau routier complet avec une excellente gestion du trafic urbain.

7. Conclusions et perspectives :

L'avantage d'une conception orientée objet est d'avoir un niveau d'extensibilité assez important, il est donc nécessaire de souligner que ce projet est appelé à évoluer vers un logiciel de simulation beaucoup plus étendu. Sur le court terme les améliorations et fonctionnalités suivantes pourraient être apportées :

- Développement d'une interface graphique où la fenêtre graphique serait incrustée, afin de permettre une meilleure expérience utilisateur.
- Inclure la possibilité de sélectionner n'importe quel agent véhicule de visualiser ses paramètres en temps réel et surtout de pouvoir les modifier afin d'observer l'évolution du système lorsqu'il est soumis à des comportements imprévisibles.
- Etendre la simulation à la problématique de la gestion du trafic urbain en implémentant la couche supérieure de l'architecture générale. Ainsi il sera possible de gérer non pas seulement une parcelle autoroute mais un réseau d'autoroutes interconnectées.
- Enregistrer l'évolution des véhicules dans des fichiers LOG afin de pouvoir les importer via Matlab et observer les courbes des différentes variables mises en jeu.
- Modifier la couche physique en transformant les modèles ponctuels en modèles se rapprochant de ceux de véritables véhicules et exploiter ainsi la couche de régulation.
- Inclure une couche Lien intelligente, en effet pour le moment nous nous contentons de considérer la vitesse optimale sur l'autoroute ainsi que la taille optimale des pelotons comme des consignes utilisateurs.
- Inclure une ligne de temps et donner la possibilité à l'utilisateur de pouvoir se déplacer n'importe où entre le temps initial et le temps actuel de la simulation.

Il est tout à fait possible de développer toutes ces fonctionnalités à partir du travail réalisé dans le cadre de ce projet, on espère par conséquent avoir posé la première brique d'un outil de simulation assez fiable qui pourrait évoluer au fil des ans.

Conclusion générale :

L'étude effectuée dans le cadre de ce mémoire a porté sur la commande hybride des systèmes interconnectés. Le premier chapitre, a été exploité de manière à exposer certaines notions de base ayant attiré aux systèmes interconnectés et aux systèmes hybrides. Une recherche bibliographique, y a également été proposée.

Au cours du deuxième chapitre, l'étude d'un système autoroutier automatique a été effectuée. L'introduction de l'architecture générale d'un AHS a été effectuée où une étude poussée a été effectuée au niveau des couches de planification et de régulation. La couche de planification a pour rôle de coordonner les manœuvres de chaque véhicule en fonction de la disposition actuelle des autres agents (véhicules) sur l'autoroute. Ces manœuvres (fusion, changement de voie, séparation..) sont effectuées sous les contraintes d'algorithmes ayant pour but d'assurer leurs bons déroulements en matière de sécurité et de confort pour les passagers des véhicules. Afin d'effectuer ces manœuvres, il est nécessaire de pourvoir les véhicules des moyens de régulation et de commande nécessaires. C'est le rôle de la couche de régulation, où trois lois principales ont été développées : La commande en vitesse, en position et latérale. La première, a été implémentée grâce à une loi de commutation simulant le comportement humain (alternance : freinage/accélération), la seconde a été quant à elle implémentée après introduction d'un feedback linéarisant via une commande par retour d'état. Enfin la commande latérale a été effectuée par la méthode du backstepping. Les résultats théoriques étant encourageants, il convient lors d'une prochaine étude de les appliquer sur des prototypes réels.

Le troisième chapitre a été consacré aux aspects pratiques inhérents au système autoroutier automatique. La description des différents moyens matériels dont doit disposer un Système Autoroutier Automatique, afin d'assurer son bon fonctionnement, a été effectuée. Cette couche matérielle est représentée par la gamme des actionneurs, protocoles de communication, capteurs et autres dispositifs d'aides à la décision. Par la suite nous avons abordé la question de la réalisabilité d'un AHS en évoquant l'exemple du projet PATH initié par des chercheurs de l'université de Californie, ayant eu pour but principal de prouver que la technologie permettant l'automatisation complète des véhicules sur autoroute existait déjà.

La dernière partie de notre étude, a consisté en l'élaboration d'un prototype de simulation pour un système autoroutier automatique dont le but est de permettre la visualisation du comportement des différents agents autonomes soumis aux contraintes du système étudié. Ce prototype est appelé à évoluer afin de permettre son exploitation sur des jeux de tests réels au niveau d'un réseau d'autoroutes.

Enfin de manière générale, il convient de continuer le travail effectué afin d'appliquer les concepts étudiés ici, sur des prototypes de véhicules réels roulant sur une autoroute disposant de la couche matérielles adéquate.

Références bibliographiques

- [1] S. M. Melzer and B. C. Kuo, "Optimal regulation of systems described by a countably infinite number of objects", *Automatica*, vol. 7 pp.359-366, 1971.
 - [2] "Hybrid Systems : Computation and Control"
<http://www.ee.ucla.edu/~hsc09/>
 - [3] M. S. Branicky, V. S. Borka et S. K. Mitter : "A unified framework for hybrid control model and optimal control theory.", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 43(1):31-45, janvier 1998.
 - [4] D. Harel: "Statecharts: A visual formalism for complex systems." *Science of Computer programming*, 8:231-274, 1987.
 - [5] A. Bemporad, M. Morari : "Control of systems integrating logic, dynamics and constraints." *Automatica*, 35(3): 407-427, 1999.
 - [6] D. Mignone: "Control and Estimation of Hybrid Systems with Mathematical Optimization" Thèse de doctorat, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zürich, 2002.
 - [7] J. Richalet, G. Lavielle et J. Mallet : *La Commande Prédictive, Mise en Oeuvre et Applications Industrielles*. Eyrolles, 2004. ISBN 2-212-11553-9.
 - [8] D. W. Clarke, C. Mohtadi et P. S. Tuffs : "Generalised Predictive control -part I. The basic algorithm." *Automatica*, 23(2):137-148, 1987.
 - [9] John Lygeros, Datta N. Godbole and Shanlar Sastry: "A game theoretic approach to Hybrid System Design", *Intelligent Machines and Robotics Laboratory*. University of California, Berkeley, CA 94720.
 - [10] P. Riedinger: « Contribution à la commande optimale des systèmes dynamiques hybrides. » Thèse de doctorat, INPL, Nancy, France, décembre 1999.
-

- [11] J. Zaytoon : « Systèmes dynamiques hybrides ». Traité IC2- Systèmes automatisés. Hermès, 2001. ISBN 2-7462-0247-6.
 - [12] D. Liberzon : "Switching in Systems and Control" Volume in series System and Control: Foundations and Applications. Birkhauser, Boston, 2003. ISBN 0-8176-4297-8.
 - [13] Benveniste, A. and P. Le Guernic (1990). "Hybrid dynamical systems theory and the SIGNAL language." IEEE Transactions on Automatic Control 35(5), 535-546.
 - [14] Benveniste, A. and P. Le Guernic (1990). "Hybrid dynamical systems theory and the SIGNAL language." IEEE Transactions on Automatic Control 35(5), 535-546.
 - [15] P. J. Antsaklis, J. A. Stiver et M. Lemmon "Hybrid system modeling and autonomous control systems." In R. L. Grossman, A. Nerode, A. P. Ravn et H. Rishel, éditeurs : Hybrid Systems, volume 763 de Lecture Notes in Computer Science, pages 366–392. Springer, 1993.
 - [16] John Lygeros, Datta N. Godbole and Shankar Sastry, "A design framework for Hierarchical Hybrid control", University of California, Berkeley.
 - [17] Lemmon, M.D. and P.J. Antsaklis (1997). Timed automata and robust control: Can we now control complex dynamical systems?. In: Proceedings of the 36th Conference on Decision and Control.
 - [18] Lemmon, M., C. Bett, P. Szymanski and P. Antsaklis. Constructing hybrid control agents from robust linear control agent. In: Antsaklis et et al. (1995) 322-343.
 - [19] Leirens .S, « Approche hybride pour la commande predictive en tension d'un réseau d'énergie électrique » , Automatique des systèmes hybrides de Supélec, groupe de recherche Automatique et Communication de l'IETR.
 - [20] Lygeros J., Tomlin C. et Sastry S. « Multi-objective Hybrid Controller Synthesis », Intelligent machines and robotics Laboratory, University of California, Berkeley.
 - [21] Witsenhausen, H.S.(1966). "A class of hybrid-state continuous-time dynamic systems." IEEE Transactions on Automatic Control 11(2), 161-167".
-

- [22] Lemmon, M., C. Bett, P. Szymanski and P. Antsaklis. Constructing hybrid control agents from robust linear control agent. In: Antsaklis et al. (1995) 322-343.
- [23] Peleties, P. and R.DeCarlo (1989). "A modeling strategy with event structures for hybrid systems." In : Proceedings of the 28th IEEE Conference on Decision and Control. Tampa, FL.pp.1308-1313.
- [24] Stiver, J.A and P.J. Antsaklis. "A novel discrete event system approach to modeling and analysis of hybrid control systems." In: Proceedings of the 29th Annual Allerton Conference on Communication, Control and Computing.Univ. of Illinois at Urbana-Champaign.
- [25] John Lygeros,"Hierarchical, Hybrid Control of Large Scale Systems", California PATH Research Report, University of California, Berkeley, Septembre 1996.
- [26] Pravin Varaiya: "Smart Cars on Smart Roads : Problems of Control". IEEE transactions on automatic control, VOL. 38, NO. 2, February 1993.
- [27] U. Karaaslan, P.Varaiya, and J. Walrand : "Two proposals to improve freeway traffic flow", in Proc. 1991 Amer. Contr. Conf., Boston, MA, June 26-28 1991, pp.2539-2544.
- [28] Vehicle modeling and control for automated highway system.
- [29] Peng, H *vehicle lateral control for highway automation*, Ph.D. University of California, Berkeley, 1992.
- [30] Chieh Chen. *Backstepping control design and its applications to vehicle lateral control in automated highway systems*. University of California. Berkley. 1995.
- [31] Polycarpou, M, and P. Loannou. *A Robust Adaptive Nonlinear control design*, Proceedings of American Control Conference. 1993
- [32] Yao, B, and M. Tomizuka, *A Robust Adaptive Nonlinear Control With Guaranteed Transient Performance*. Proceedings of American Control Conference. 1993.
- [33] Guldner.J, V.Utkin and J. Ackermann, *A Sliding Mode Control Approach to Automatic car steering*, Proc. Of The American Control Conference, Baltimore 1994.
-

[34] NHTSA Light Vehicle Antilock Brake System Research Program Task 4: A Test Track Study of Light Vehicle ABS Performance over a Broad Range of Surfaces and Maneuvers, Jan 1999.

[35] Electronic Throttle Control (Drive By Wire or Fly By Wire)
<http://www.picoauto.com/applications/electronic-throttle-control.html>

[36] EPS working in detail. www.indiacar.com

[37] *Ramaswami, Rajiv* "Optical Fiber Communication: From Transmission to Networking". *IEEE*. (May 2002).

[38] EM Talk, Microwave Engineering Tutorials and Tools. www.emtalk.com

[39] RF and Telecommunication eBooks. www.myrf.org.

[40] *Harvey J. Miller and Shih-Lung Shaw* *Geographic Information Systems for Transportation*. Oxford University Press. 2001.

[41] Steen, W. M. "Laser Materials Processing", 2nd Ed. 1998.

[42] Guidelines for the Safe Use of Ultrasound: valuable insight on the boundary conditions tending towards abuse of ultrasound.

[43] Le Chevalier, François, *Principles of Radar and Sonar Signal Processing*, Artech House, Boston, London, 2002.

[44] *Eshbach, Ovid W.* "Inertial Acceleration". in *Tapley, Byron D.* *Eshbach's Handbook of Engineering Fundamentals*. 1990.

[45] Vladislav Apostolyuk. Theory and Design of Micromechanical Vibratory Gyroscopes.

[46] GPS constellation status. Russian Space Agency. April 9, 2008

[47] *Krause, L.O.* "A Direct Solution to GPS-Type Navigation Equations". *Aerospace and Electronic Systems, IEEE*. (March 1987).

[48] *Vehicle Platooning and Automated Highways description of the San Diego experiment*. PATH. University of California. Berkley.

[49] http://www.iso.org/iso/fr/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=38110

[50] Farokh Eskafi, Delnaz Khorramabi & Pravin Varaiya' " SmartPath : An Automated Highway System Simulator", Department of Electrical Engineering & Computer Science and PATH/ITS, University of California, Berkeley CA 94720.

[51] Unsal, Cem "Intelligent Navigation of Autonomous Vehicles in an Automated Highway System: Learning Methods and Interacting Vehicles Approach".

[52] <http://www.paramics-online.com>

Rappels Théoriques

Rappel 1 : Commande par retour d'état

On considère le système linéaire suivant :

$$\Sigma \begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX \end{cases}$$

Le comportement dynamique du système dépend étroitement des valeurs propres de la matrice A. Le retour d'état s'intéresse à déterminer une commande $U = -KX + V$ (Avec K : matrice de gain et V : la commande en boucle fermée) afin de changer les valeurs propres du système et lui imposer un placement de pôle (modes du système) arbitraire. Ces pôles constituent le polynôme caractéristique désiré.

Les racines du système asservi sont données par l'équation :

$$\det(sI - (A - BK))$$

Ce terme doit être égalé à celui du polynôme caractéristique désiré. On obtient alors les valeurs de la matrice de retour K qui va forcer les valeurs propres en boucle fermée à l'endroit spécifié par le polynôme caractéristique désiré.

Rappel 2 : Commande par Backstepping

Le Backstepping est une procédure récursive qui réduit un problème de commande non linéaire en une série de commandes non linéaires d'ordre inférieur.

Nous allons expliquer à travers un exemple simple la méthodologie du Backstepping. On considère le système du second ordre :

$$\begin{cases} \dot{x} = x^2 - x^3 + \xi \\ \dot{\xi} = u \end{cases}$$

L'objectif est d'atteindre $x(t) \rightarrow 0$ à $t \rightarrow \infty$. La loi de commande peut être synthétisée en deux étapes. On considère en premier lieu ξ comme entrée de commande. En choisissant la fonction de Lyapunov candidate suivante :

$$V_1 = \frac{1}{2}x^2$$

Et la loi de commande :

$$\xi_{désirée} = -x^2 - k_1x \equiv \alpha(x)$$

L'objectif de commande serait atteint. Néanmoins, ξ est une variable d'état et ne peut donc être assimilée à $\xi_{désirée}$. On définit alors la variable suivante :

$$z = \xi - \xi_{désirée}$$

Avec « z » l'écart de ξ par rapport à sa valeur désirée. On a donc :

$$\begin{aligned} z &= \xi - \xi_{désirée} \\ &= u - (2x + k_1)(k_1x + x^3 - z) \end{aligned}$$

La fonction de Lyapunov candidate peut maintenant être augmentée comme suit :

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}z^2$$

Sa dérivée par rapport au temps est donc :

$$\dot{V}_2 = x(-x^3 - k_1x + z) + z(u - (2x + k_1)(k_1x + x^3 + z))$$

Pour que \dot{V}_2 soit une fonction définie négative, on doit choisir la commande suivante :

$$u = -x + (2x + k_1)(k_1x + x^3 - z) - k_2z$$

On obtient alors :

$$\dot{V}_2 = -x^4 - k_1x^2 - k_2z^2 \quad FDN$$

Ceci implique que $x \rightarrow 0$ et $\xi \rightarrow \xi_{désirée}$ asymptotiquement. Dans cet exemple ξ est considérée comme étant la commande virtuelle, et $\alpha(x)$ est appelée fonction de stabilisation.

Rappel 3 : Feedback linéarisant

On considère le système non linéaire monovarié suivant, Ecrit dans la base (X, U) :

$$\sum_{x,y} \begin{cases} \dot{X} = f(X) + g(X) * U \\ Y = h(X) \end{cases}$$

Dans certains cas, trouver une loi de commande non linéaire permettant de stabiliser le système s'avère très difficile puisque la détermination d'une fonction de Lyapunov adéquate n'est pas systématique.

L'idée qui a été proposée à travers la commande linéarisante et d'essayer de trouver une nouvelle base d'état et de commande (Z, V) avec:

$$\begin{cases} Z = \phi(X) = \begin{pmatrix} Z_1 \\ \vdots \\ Z_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi(X_1) \\ \vdots \\ \phi(X_n) \end{pmatrix} \\ U = \alpha_1(X) + \alpha_2(X) \end{cases}$$

De sorte que les équations d'état ramenées dans la nouvelle base s'écrivent totalement ou partiellement de manière linéaire :

$$\begin{cases} \dot{Z} = F(Z, V) = AZ + BV \\ Y = H(Z) = CZ \end{cases}$$

La détermination des 3 paramètres entrants dans la linéarisation $(\phi, \alpha_1, \alpha_2)$ fait appel à certains outils de la géométrie différentielle que nous allons définir.

Définition 1 : La dérivée de Lie

Considérons la fonction scalaire $h(X) \in \mathbb{R}$ et deux champs de vecteur :

$$f(X) = \begin{pmatrix} f_1(X) \\ \vdots \\ f_n(X) \end{pmatrix} \text{ et } g(X) = \begin{pmatrix} g_1(X) \\ \vdots \\ g_n(X) \end{pmatrix}$$

Alors la dérivée de Lie de la fonction h suivant les champs de vecteur f et g est définie par :

$$\begin{cases} L_f h(X) = \frac{\delta h}{\delta X} f \\ L_g h(X) = \frac{\delta h}{\delta X} g \\ L_g L_f h(X) \neq L_f L_g h(X) \end{cases}$$

Définition 2 : considérons le changement de base $Z = \phi(X) \in \mathbb{R}^n$ et $X \in \mathbb{R}^n$. Alors ϕ est un difféomorphisme si et seulement si :

- 1) ϕ^{-1} existe
- 2) ϕ et ϕ^{-1} sont au moins de classe C^1 (dérivable)

Une condition suffisante pour que ϕ soit un difféomorphisme est que :

$$\text{Det} \left(\frac{\delta \phi}{\delta X} \right) \neq 0$$

Définition 3 : considérons le système non linéaire monovarié suivant :

$$\sum_{x,y} \begin{cases} \dot{X} = f(X) + g(X) * U \\ Y = h(X) \end{cases}$$

Alors Σ est de degré relatif « r » si et seulement si :

$$\begin{cases} L_g h(X) = L_g L_f h(X) = \dots = L_g L_f^{r-2} h(X) \\ L_g L_f^{r-1} h(X) \neq 0 \end{cases}$$

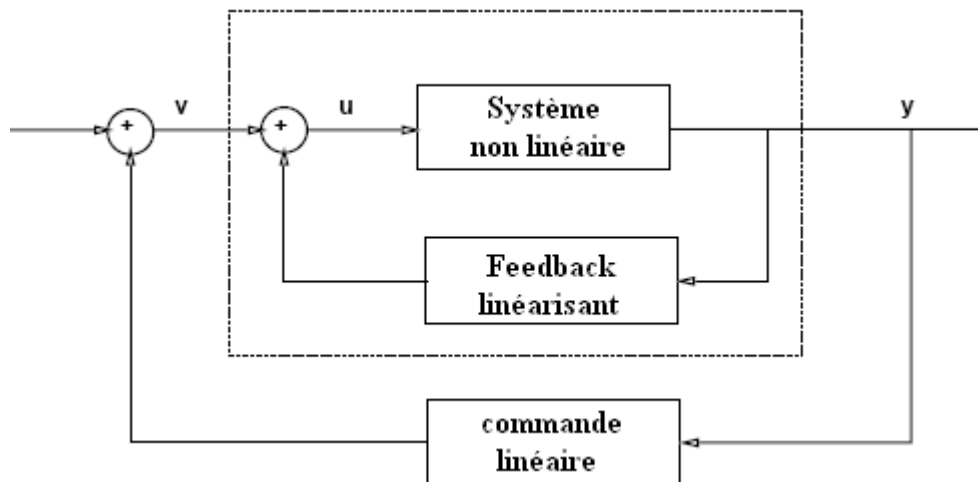
Théorème : considérons le système non linéaire monovarié précédent Σ et supposons qu'il est de degré relatif « k ». Le comportement E/S peut être toujours linéarisé et il est équivalent au transfert monovarié suivant :

$$\frac{Y(S)}{V(S)} = \frac{1}{S^k}$$

En prenant comme commande :

$$U = \alpha_1 + \alpha_2 V = \frac{1}{L_g L_f^{k-1} h} (-L_f^k h + V)$$

Le schéma suivant illustre la commande linéarisante :



Feedback linéarisant

Figures

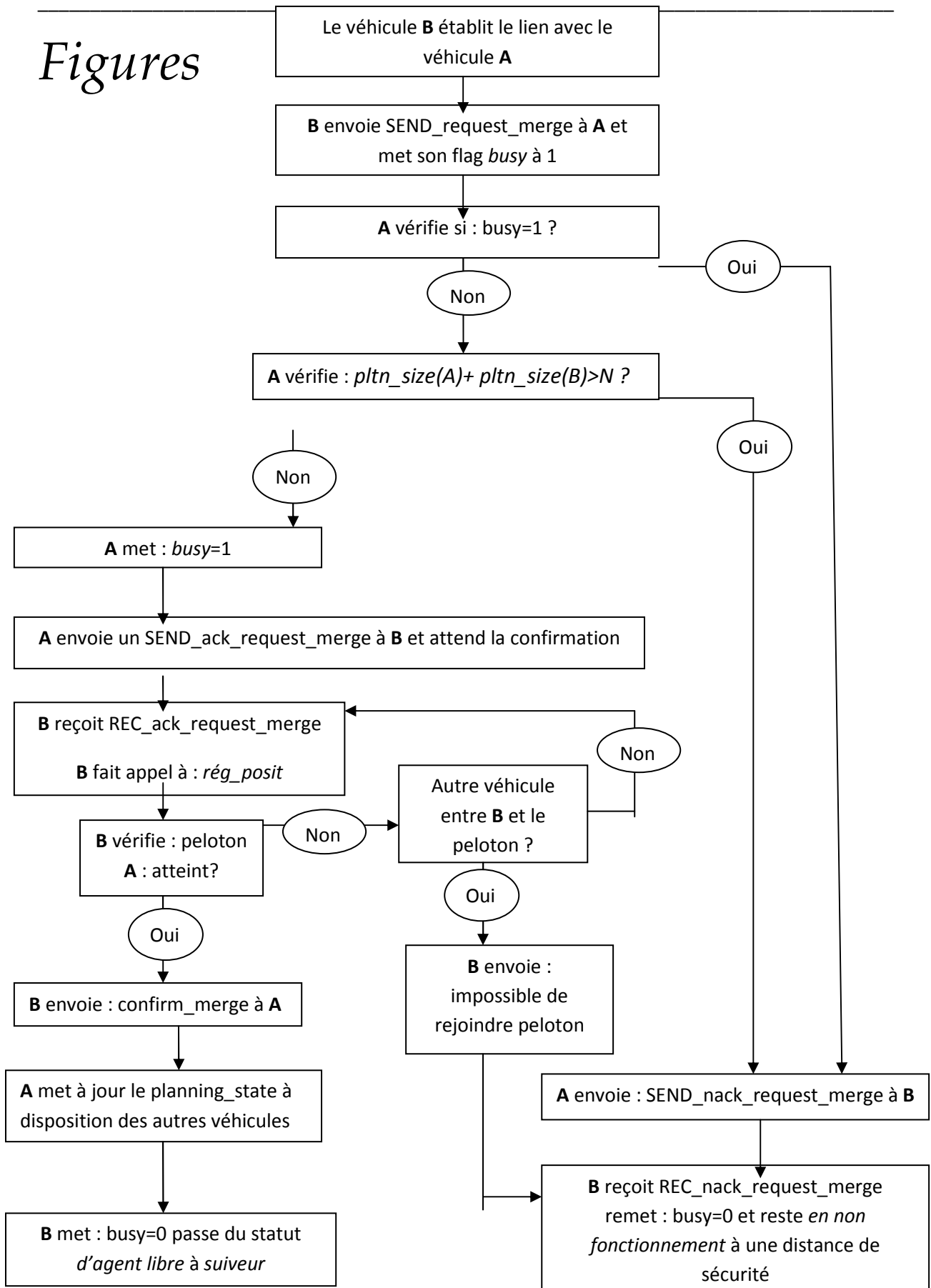


Figure-2.7: Organigramme de la fusion

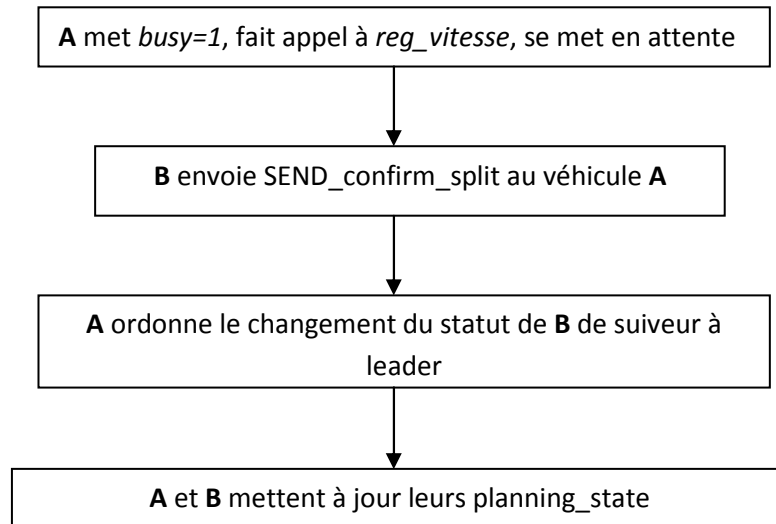


Figure-2.8 : procédure de séparation d'un véhicule leader

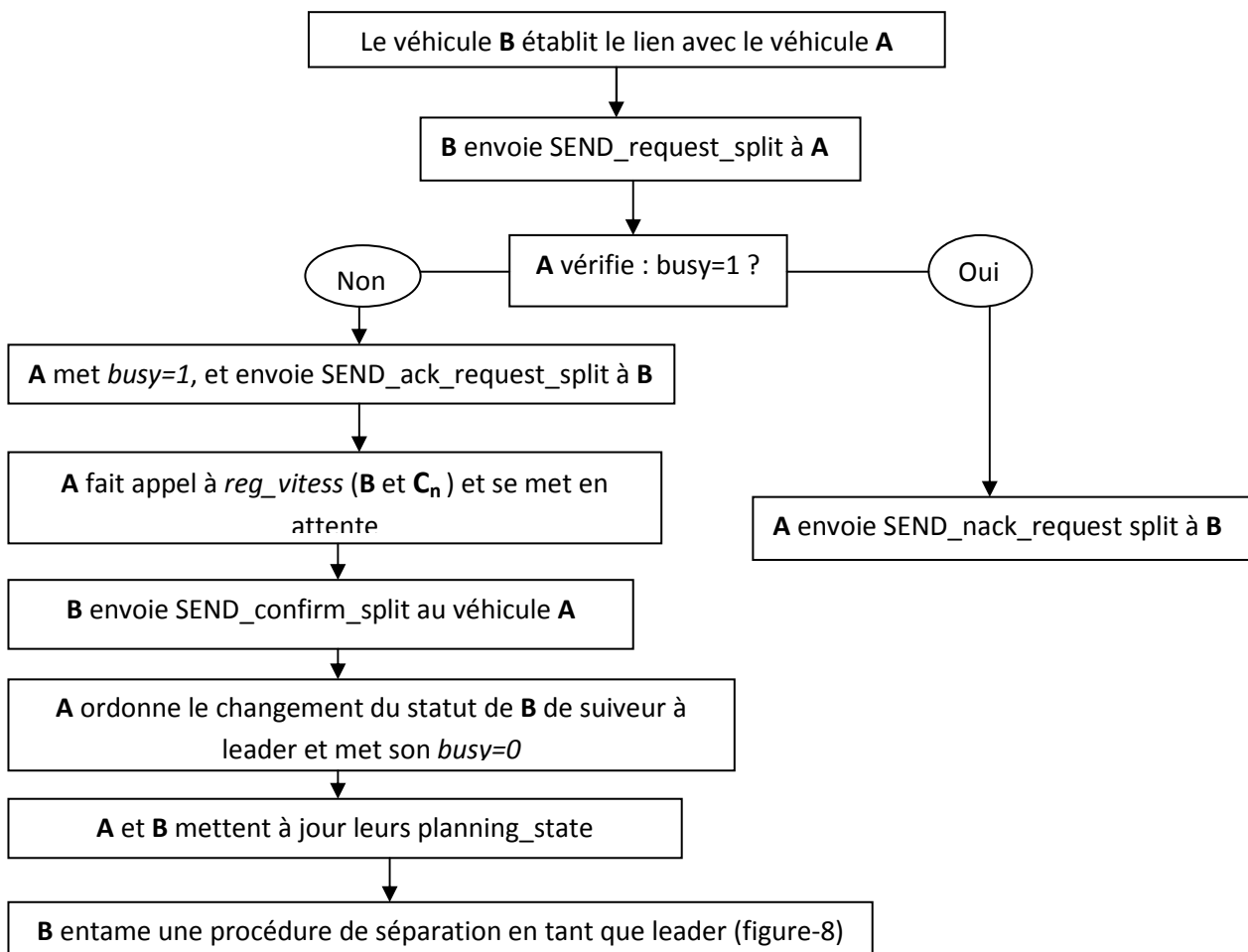


Figure-2.9 : Un véhicule suiveur demande une manœuvre de séparation

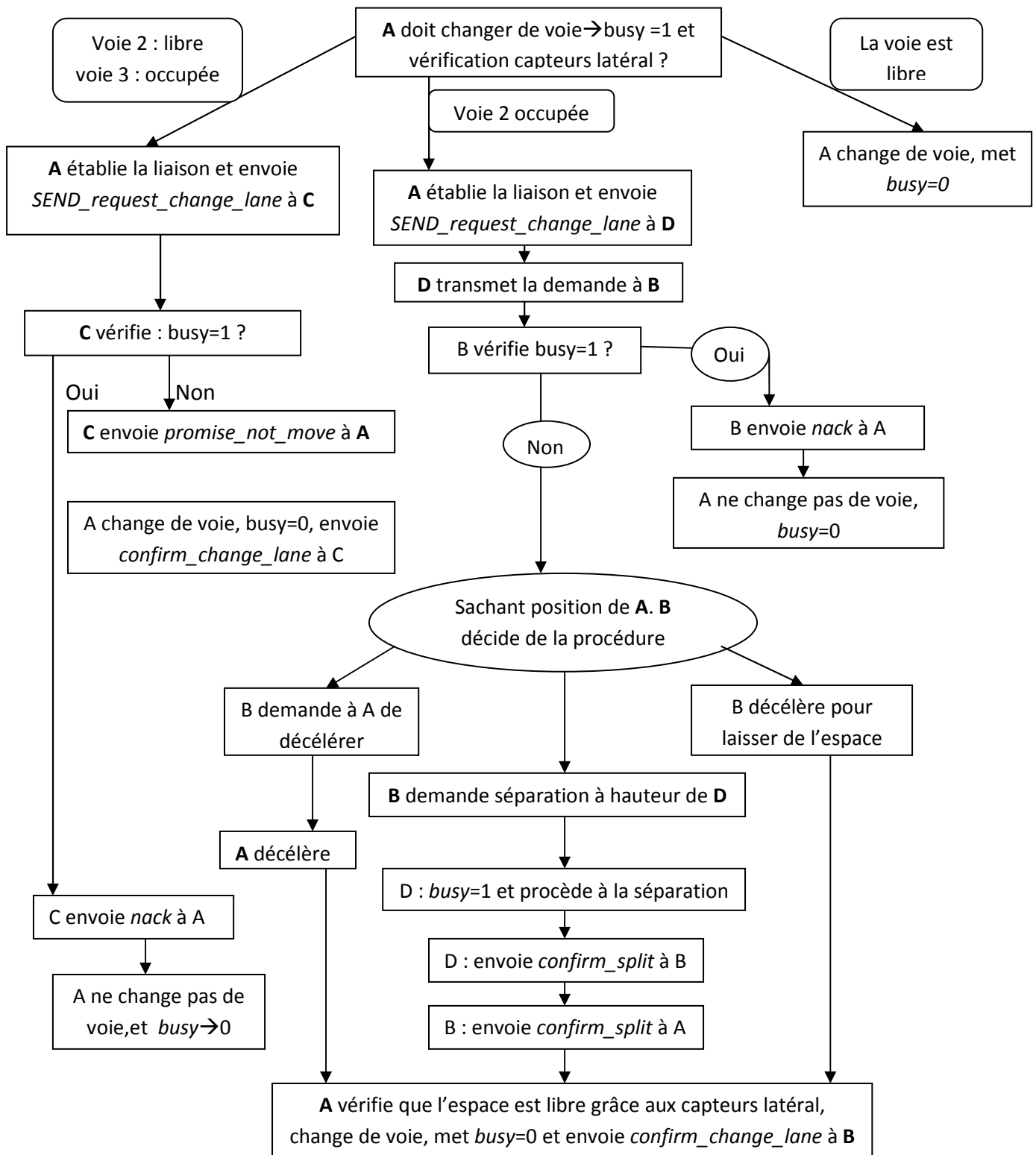


Figure-2.10 : Organigramme du changement de voie

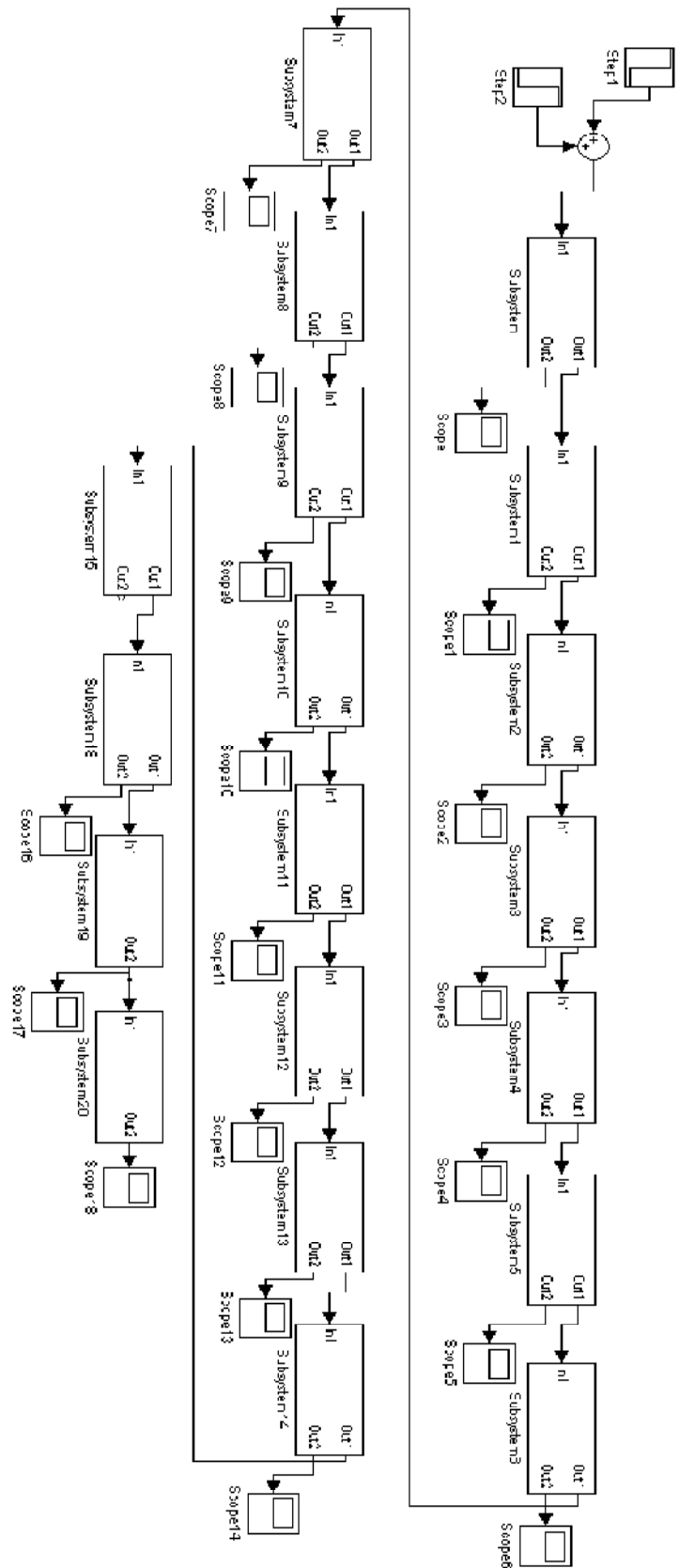


Figure-2.10b_: Schéma de simulation de commande en position pour un peloton de 20 véhicules

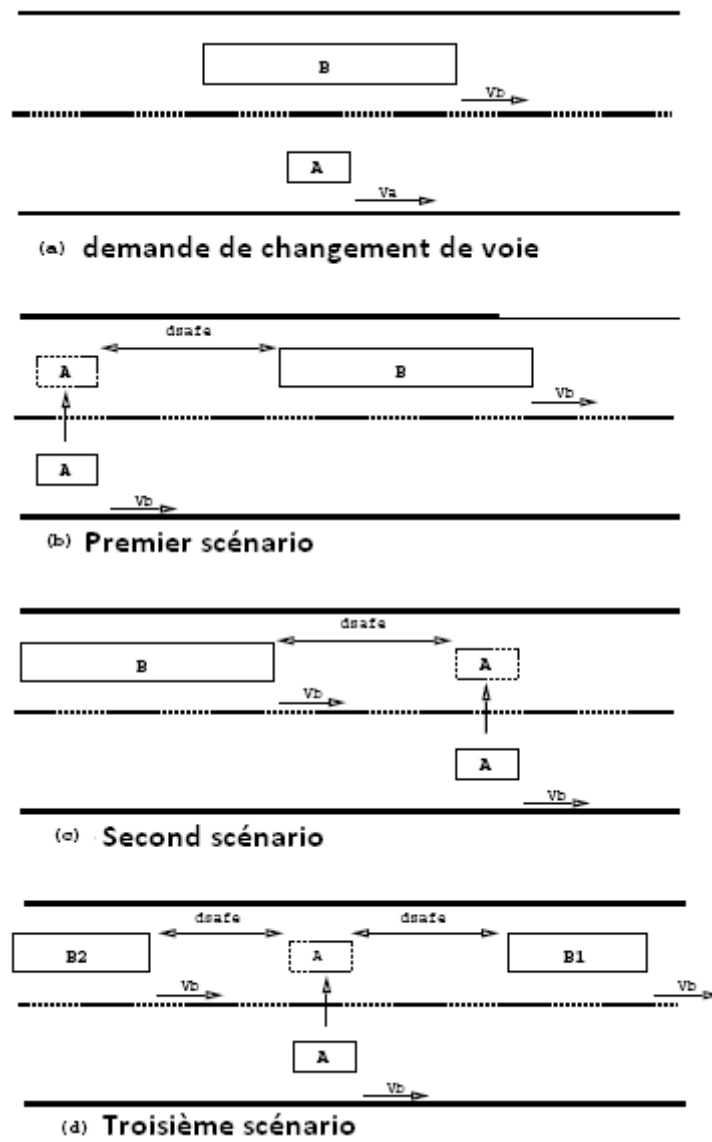


Figure-2.38 : Les trois scénarios de changement de voie

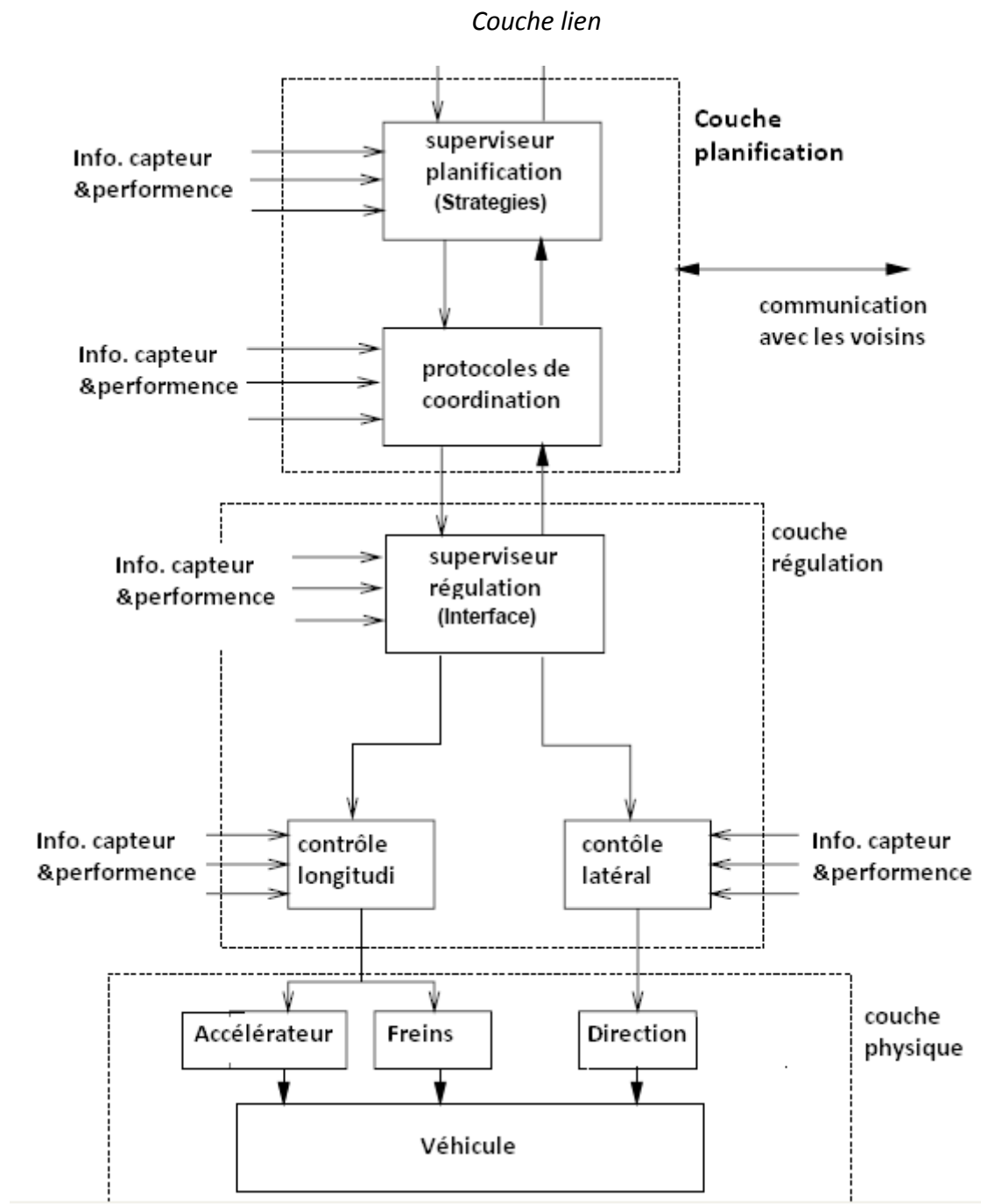


Figure-2.39 : Structure du régulateur Hybride

Diagrammes de classes

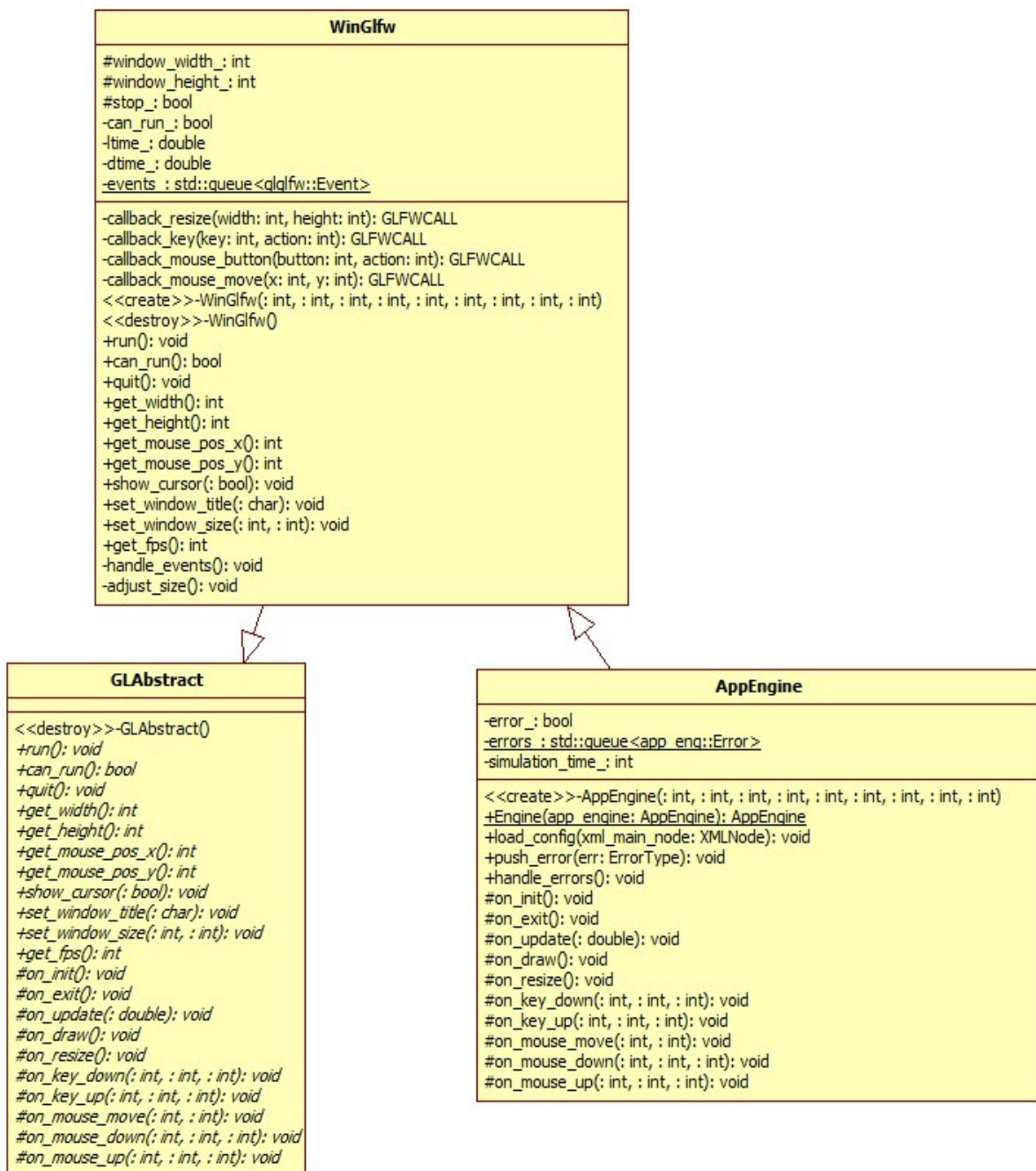


Figure-4.3 : Diagrammes de classes de fonctionnement

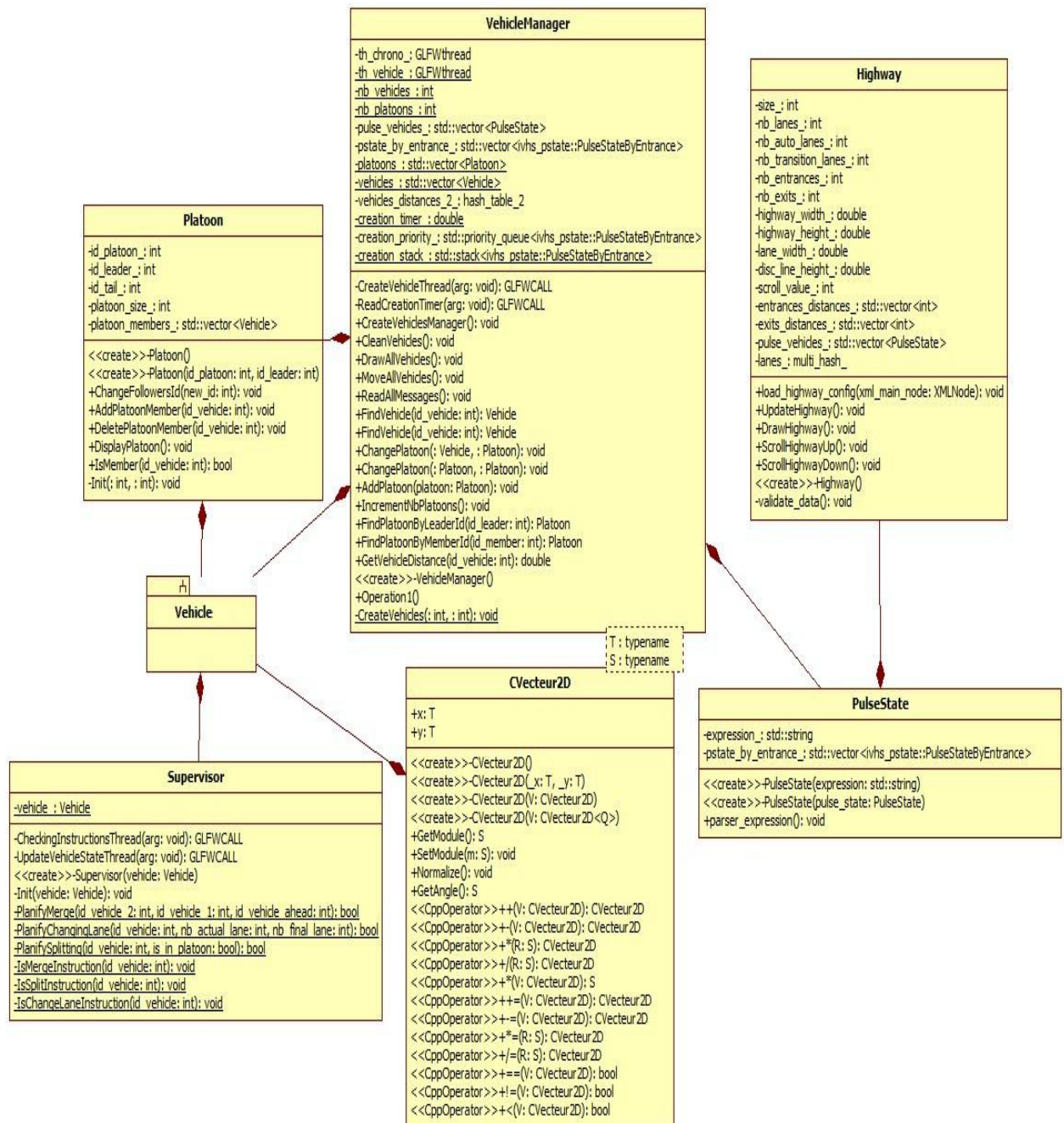


Figure-4.4 : Diagramme de classes métier

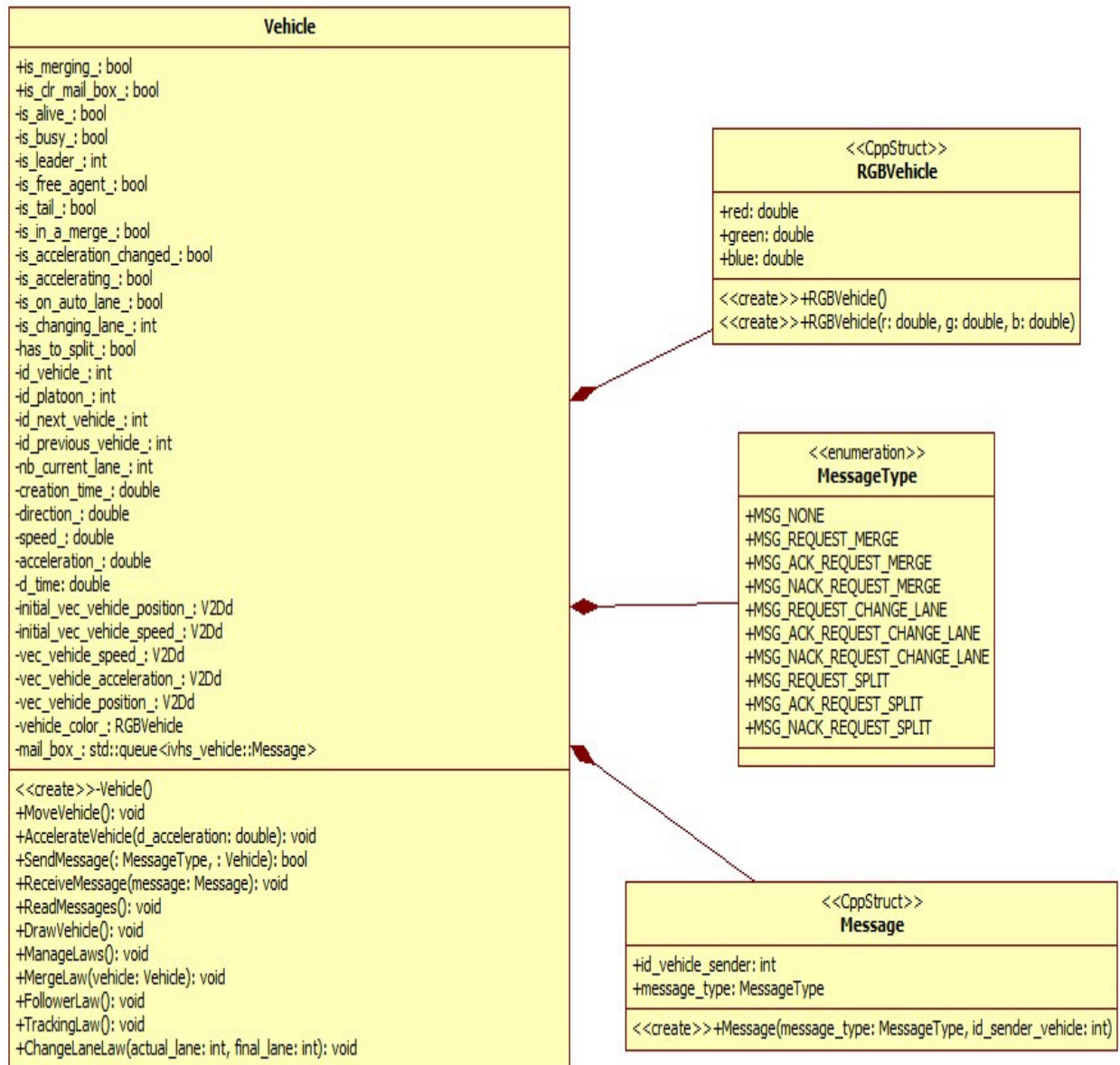


Figure-4.5: Diagramme de la classe Vehicule

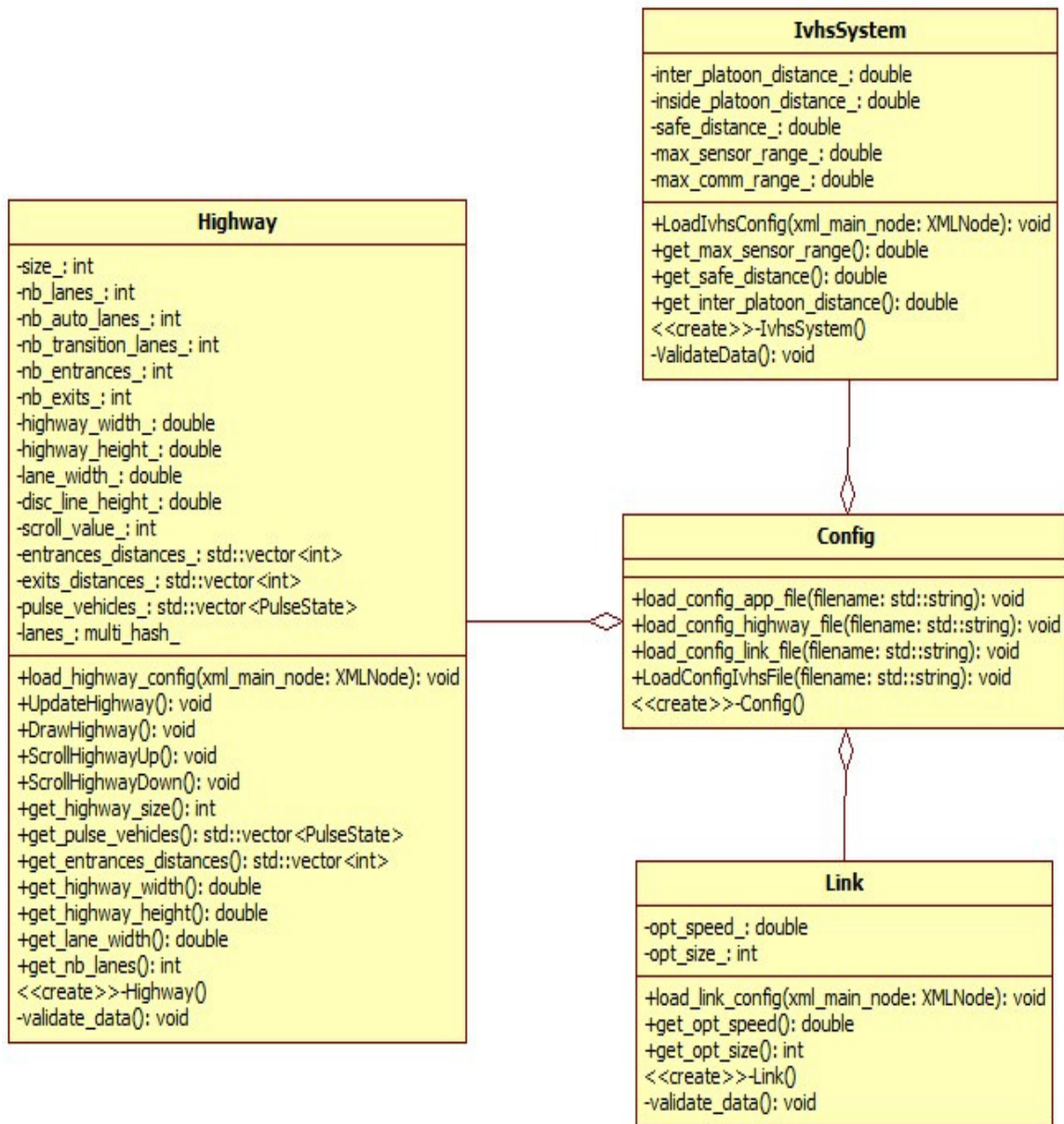


Figure-4.6 : Diagramme de classes de configuration

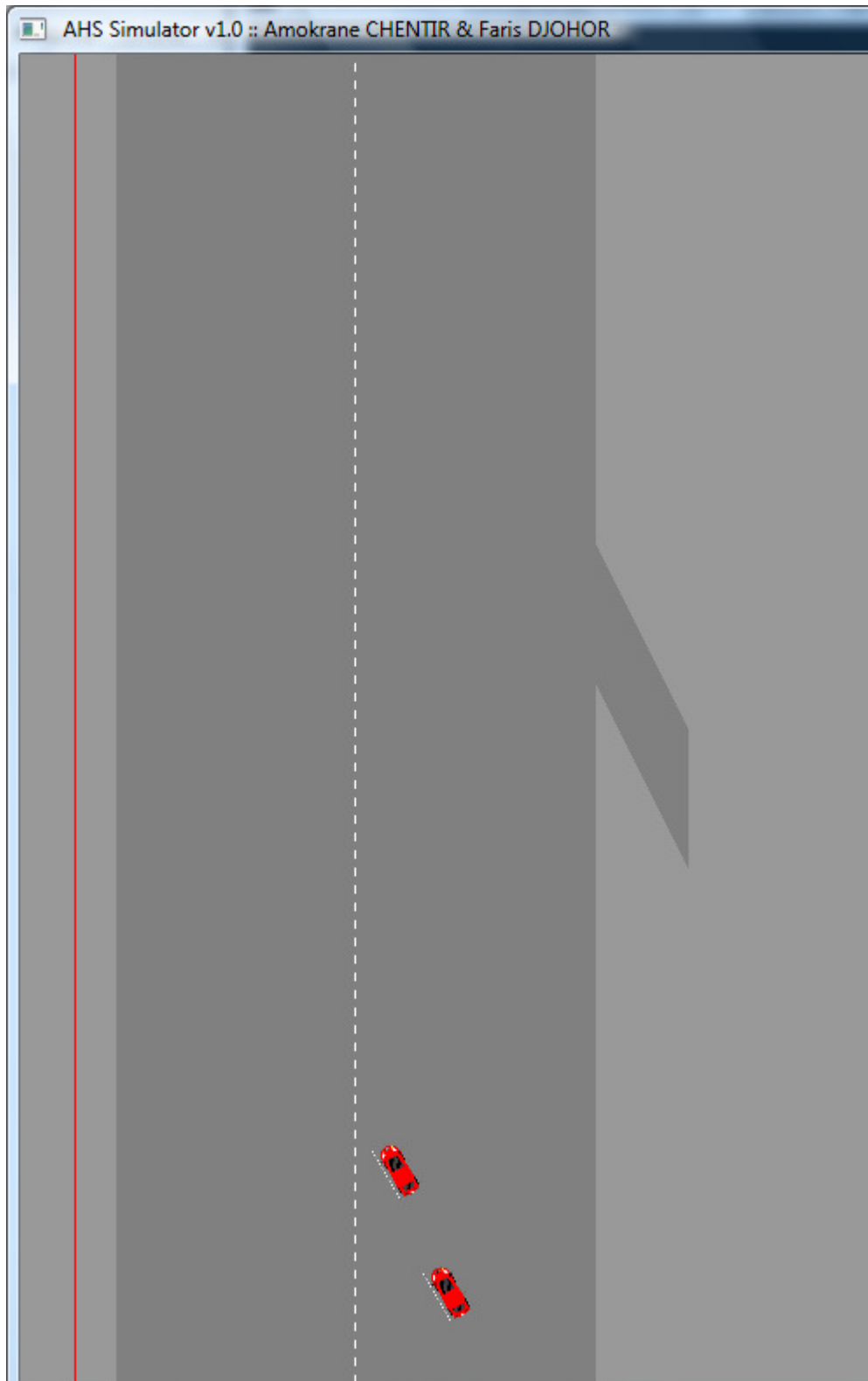


Figure-4.7 : Changement de voie en début de simulation

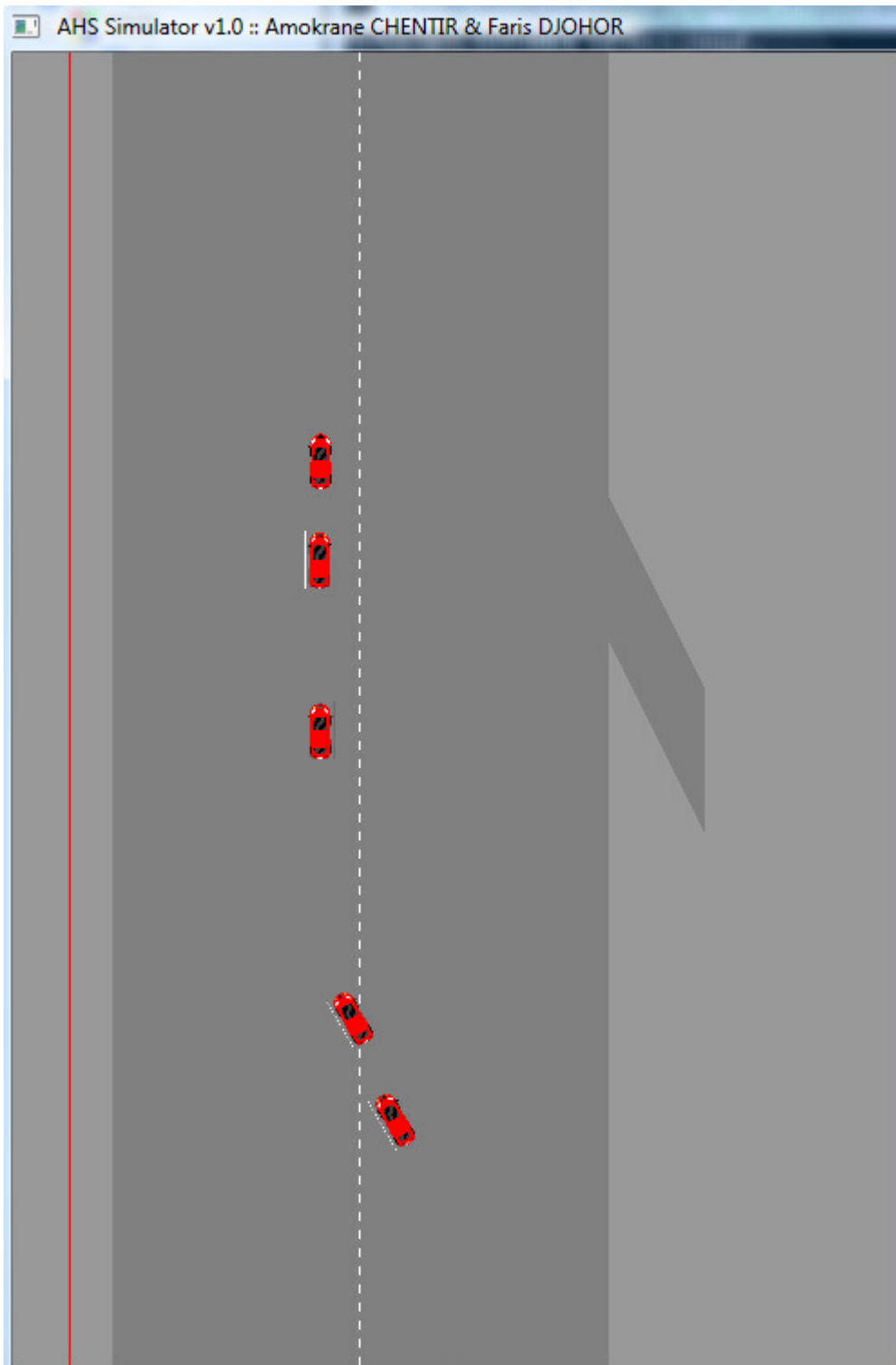


Figure-4.8 : Première fusion et formation du premier peloton

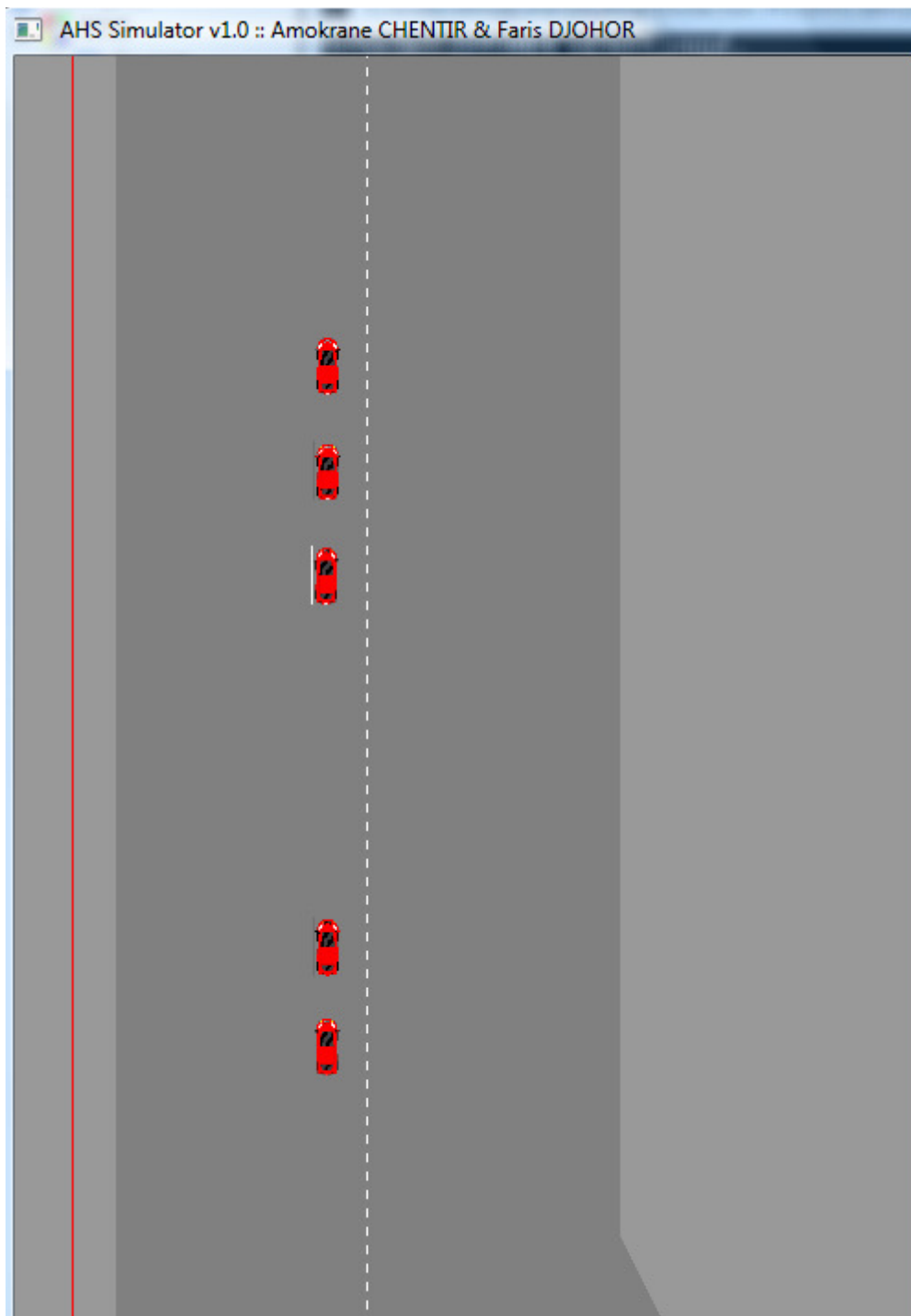


Figure-4.9 : Formation d'un deuxième peloton

Fichiers de configuration

```
<ivhs>

  <ivhs_config>

    <!-- Les distances sont données en M (système MKSA) -->

    <inter_platoon_distance></inter_platoon_distance>

    <inside_platoon_distance></inside_platoon_distance>

    <safe_distance></safe_distance>

    <max_sensor_range></max_sensor_range>

    <max_comm_range></max_comm_range>

  </ivhs_config>

</ivhs>
```

Fichier de configuration de l'AHS

```
<link>

<opt>

  <opt_size></opt_size>

  <opt_speed></opt_speed>

</opt>

</link>
```

Fichier de configuration de la couche Lien

```
<highway>
  <highway_desc>
  <size></size>
  <nb_lanes></nb_lanes>
  <nb_auto_lanes></nb_auto_lanes>
  <nb_transition_lanes></nb_transition_lanes>
  <nb_entrances></nb_entrances>
  <nb_exits></nb_exits>
  <pulse_entrances>
  <pulse_entrance></pulse_entrance>
  <pulse_entrance></pulse_entrance>
  </pulse_entrances>
  <entrances_distances>
  <entrance_distance></entrance_distance>
  </entrances_distances>
  <exit_distances>
  <exit_distance></exit_distance>
  <exit_distance></exit_distance>
  </exit_distances>
  </highway_desc>
</highway>
```

Fichier de configuration de l'autoroute

Résumé :

Durant cette étude nous avons approché le problème des systèmes interconnectés d'une manière totalement hybride. La première partie est réservée à une étude bibliographique brossant le paysage actuel de la commande hybride des systèmes interconnectés. Au cours de la deuxième partie, nous avons étudié un système de réseau de trafic urbain, où nous avons proposé un schéma de control à agents semi-autonomes. Le design proposé est naturellement hybride, étant composé de contrôleurs à dynamiques continues agissant sur les couches basses du système et essayant d'optimiser l'utilisation des ressources par chaque agent semi-autonome, et de contrôleurs à dynamiques discrètes agissant au niveau des couches les plus hautes du système et ayant pour rôle principal de résoudre les conflits inter-agents. Enfin, la troisième partie de notre étude a consisté au développement d'un logiciel de simulation entièrement paramétrable où le modèle hybride du système étudié a été implémenté.

Les mots clés : Système hybride - Systèmes interconnectés – Automatisation du trafic autoroutier – Systèmes Multi-Agents – Logiciel de simulation

Abstract :

During this study, we have considered the problem of interconnected systems in a completely hybrid way. The first part is reserved to a bibliographical study that sets out the current scene of the hybrid control of interconnected systems. In the second part, we studied a system of an urban traffic network in which we proposed a control scheme with semiautonomous agents. There is no doubt that the proposed design is hybrid. It is made up of controllers with continuous dynamics acting in the lower layers of the system and attempting to optimize the use of the resources by each semiautonomous agent and controllers with discrete dynamics acting at the level of the highest layers of the system the key role of that is to solve inter-agent conflicts. To conclude with, the third part of our study consisted in the developing of simulation software entirely configurable where the hybrid model of the studied system was implemented.

Keywords : Hybrid System – Interconnected system – Automated Highway System – Multi-Agents System – Software simulation

ملخص :

خلال هذا العمل تمت دراسة الأنظمة المرتبطة بطريقة هجينة. الجزء الأول خصص إلى قيامه البحث المراجع لتقديم نتائج المحصلة عليها في فرع الأنظمة المرتبطة و الهجينة. خلال الجزء الثاني، تمت دراسة نظام شبكة حركة المرور، حيث اقترحنا خطة للتحكم عن خلال وحدات نصف مستقلة. المثال المقترح هو بطبيعة الحال هجين، حيث أنا هو يتألف من نظام التحكم ذات ديناميكية مستمرة التي تعمل على مستويات المنخفضة للنظام لذي يحاول الاستخدام الأمثل للموارد من طرف كل وحدة مستقلة، و أنظمة التحكم ذات ديناميكية لا مستمرة التي تعمل على مستويات المرتفعة للنظام الذي يتمثل دوره في حل النزاعات بين الوحدات. أخيراً، في الجزء الثالث تم تطوير نموذج محاكاة البرمجيات شكلي تمام النموذج الهجين من دراسة تطبيق هذا النظام

كلمات مفتاحية : نظام هجين، أنظمة متداخلة، النظام المستقل لطريق سريع، نظام ذات وحدات مستقلة، محاكاة البرمجيات