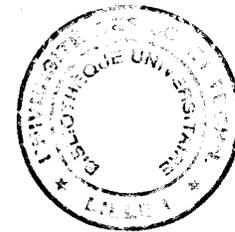


THESE



présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

Pour obtenir le titre de

DOCTEUR

En Productique : Automatique et Informatique Industrielle

par

Patrick DEBAY

AMELIORATION DE L'ACCESSIBILITE DES AUTOBUS URBAINS POUR LES PERSONNES A MOBILITE REDUITE : GUIDAGE A L'ACCOSTAGE

Soutenue publiquement le 26 Septembre 1996 devant la commission d'examen :

P. VIDAL	Président du jury
J. BILLARD	Rapporteur
A. JUTARD	Rapporteur
J. M. TOULOTTE	Co-directeur de recherche
M. EDEL	Co-directeur de recherche
N. MALVACHE	Membre
S. MAOUCHE	Membre
J. J. HENRY	Membre
G. COUVREUR	Membre
Y. DAVID	Membre
B. GUILLEMINOT	Membre
J. P. NERRIERE	Membre

Remerciements

Cette thèse est l'aboutissement de travaux réalisés au Centre d'Automatique de Lille de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, dirigé par Monsieur le Professeur Pierre VIDAL, je tiens à le remercier pour l'honneur qu'il me fait en acceptant d'être le président de ce jury.

Je suis particulièrement reconnaissant à Monsieur le Professeur Jean-Marc TOULOTTE, mon co-directeur de recherche, qu'il soit remercié pour ses conseils et son accueil au sein de son équipe de recherche.

Je me dois de remercier Monsieur le Professeur Jean BILLARD du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Paris et Monsieur le Professeur Alain JUTARD du Laboratoire Automatique Industrielle de L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger cette thèse et d'en être les rapporteurs.

Ce travail qui n'existerait pas sans l'aide de Monsieur Michel EDEL, co-directeur de recherche, travaillant dans l'équipe Simulation Interactive et Communication S. I. C. du Centre d'Automatique de Lille. Il a su co-encadrer mes travaux en m'indiquant de nouvelles voies, me donnant des réflexions et de nombreuses solutions aux problèmes posés. Ses compétences m'ont permis d'avancer.

Je remercie Monsieur Jean-Jacques HENRY, Ingénieur de Recherche au CERT ONERA, pour l'intérêt qu'il me témoigne en acceptant de participer à ce jury.

Je n'oublie pas Monsieur Yves DAVID, ancien Directeur Régional de L'INRETS Villeneuve d'Ascq et Consultant de la société SODIT. Qu'il soit remercié pour ses remarques éclairées, pour m'avoir aidé à obtenir une bourse de thèse et surtout pour l'intérêt qu'il me témoigne en acceptant de participer à ce jury.

Je remercie Monsieur le Professeur Noël MALVACHE et Monsieur le Professeur Salah MAOUCHE de m'avoir fait l'honneur d'être les examinateurs de mes travaux et de m'avoir donné des conseils.

Je remercie Monsieur Jean Pierre NERRIERE, Responsable Recherche et Développement à TRANSDEV, Monsieur Bernard GUILLEMINOT, Directeur Général des Services Opérationnels de la CUDL et Monsieur Gérard COUVREUR, Directeur d'Unité de Recherche ESTAS à l'INRETS, de me faire l'honneur de porter de l'intérêt à mes travaux.

Je remercie Monsieur Saïd HAYAT, chargé de recherche à l'INRETS et co-encadreur de la thèse pour avoir su m'accueillir à l'INRETS et être l'un des pères de ce sujet de recherche. Il a su par ses conseils orienter mes travaux et m'a permis d'arriver à ces résultats.

Je remercie Mademoiselle Brigitte DEBAY, Monsieur Jean-Claude BERTY, Madame Corinne DEBAY, Madame Danielle NAMPON et Madame Geneviève BAILLY pour leurs nombreux conseils et leurs lectures attentives du présent Mémoire. J'ai du embêter de nombreuses personnes en leur faisant lire et relire mes articles, rapport et thèse. Mesdemoiselles Claire NAMPON et Anne-Isabelle POVY en sont certainement les victimes les plus évidentes. Je voudrais les remercier et leurs souhaiter beaucoup de succès.

Je remercie les institutions qui, à des degrés divers, ont permis ou facilité cette recherche : La Région Nord Pas de Calais qui s'est associée à l'INRETS afin de me donner les moyens nécessaires pour réaliser ces travaux pendant deux années, le Groupement Régional de la Recherche sur les Transports pour m'avoir fait confiance en vue de la réalisation de ces travaux, l'ICAM (Dominique LAMY) pour l'aide qui ma apportée pour la réalisation des lois de commande, ainsi que Renault Véhicules Industriels pour les informations qu'ils m'ont fournies.

C'est à l'INRETS que j'ai passé mes quatre dernières années. Je me dois de remercier l'ensemble du personnel de Villeneuve d'Ascq et plus particulièrement Messieur Christian HYPACE, Michel DELSINNE, Bernard DELSINNE, Daniel BOURBOTTE, Jean Yves VITOUX et Patrice VANEC pour leur sympathie. J'accorde une mention spéciale à mon collègue de projet Monsieur Guillaume USTER. Mais je n'oublie pas de remercier l'ensemble du personnel du Centre d'Automatique de Lille et surtout l'équipe du Professeur J. M. TOULOTTE.

Je dédie cette thèse principalement à mes parents, et ensuite à toute ma famille, pour leur support moral et financier, leur compréhension, leur dévouement durant ces longues années. Merci, d'avoir supporté mon humeur pendant ces mois d'acharnement et d'avoir toujours cru en moi. Enfin, je terminerai par remercier Monsieur Etienne BAILLY et Mademoiselle Claire NAMPON qui m'ont supporté pendant les repas du midi et m'ont écouté me plaindre pendant trois ans. Je remercie Etienne de m'avoir supporté pendant 4 ans dans le même bureau et de ne pas avoir voulu en changer. Ces deux personnes sont devenues bien plus qu'une relation professionnelle, ils sont devenus des amis. Toutes mes pensées vont également à mes amis Anne-Isabelle, Annick, Claire, Véronique, Etienne, Grégory, Olivier et Patrick pour ne citer que certains, qui m'ont entouré et qui ont accepté de répondre à mes diverses sollicitations.

Table des Matières

INTRODUCTION GENERALE	7
PREMIERE PARTIE	
ACCESSIBILITE DES TRANSPORTS	11
CHAPITRE I	
L'ACCESSIBILITE DANS LES TRANSPORTS COLLECTIFS URBAINS	13
1.1 POSITION DU PROBLEME	13
1.2 QUELQUES POINTS DE REPERE	18
1.2.1 L'enquête de Saint Cyr sur le Rhône.....	19
1.2.2 Enquêtes sur l'accessibilité des autobus urbains	21
1.3 L'ACCESSIBILITE DANS LES TRANSPORTS GUIDES	23
1.3.1 VAL, SK et systèmes ferrés.....	23
1.3.2 Les autobus guidés.....	25
1.4 L'AUTOBUS URBAIN : CONSTAT ET ETUDE VIDEOGRAPHIQUE	27
1.4.1 Le constat.....	28
1.4.2 L'étude vidéographique.....	31
1.5 CONCLUSION	33
CHAPITRE II	
L'AUTOBUS URBAIN : ATTENTION A LA MARCHÉ	35
2.1 LES DISPOSITIFS EMBARQUES	35
2.1.1 Elévateur pour fauteuil roulant	35
2.1.2 Emmarchement transformable et marches escamotables.....	36
2.1.3 Palette	37
2.2 AUTOBUS A PLANCHER SURBAISSE	39
2.2.1 Quelques chiffres	39
2.2.2 Agenouillement.....	42
2.2.3 L'enquête de l'UITP	43
2.3 L'AMENAGEMENT DES ARRETS	44
2.3.1 Recommandations du COLITRAH.....	44
2.3.2 Groupe de travail de Grenoble.....	45

2.3.3 Quelques expériences d'aménagement d'arrêts d'autobus	45
2.4 CONCLUSION	47
CHAPITRE III	
AUTOBUS URBAINS : "COMBLER LA LACUNE"	49
3.1 LES EXPERIENCES DES SYSTEMES D'AIDE A L'ACCOSTAGE	49
3.1.1 Les expériences menées en Allemagne.....	49
3.1.2 L'expérience de Caen : le système chasse roue.....	52
3.1.3 L'expérience d'Halmstad (Suède).....	54
3.1.4 Le projet VISÉE	54
3.1.5 Bilan.....	55
3.2 AIDE A L'ACCOSTAGE : CAPTEURS UTILISABLES	56
3.2.1 Détermination de la position d'un véhicule par rapport à une référence matérialisée.....	57
3.2.2 Etude comparée des systèmes possibles	63
3.3 CONCLUSION	65
CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE	
L'AIDE A L'ACCOSTAGE : DEUX PISTES DE RECHERCHE	67
DEUXIEME PARTIE	
LE GUIDAGE SEMI-AUTOMATIQUE DES AUTOBUS EN ZONE D'ACCOSTAGE	69
CHAPITRE I	
MODELISATION CINEMATIQUE ET DYNAMIQUE D'UN AUTOBUS	73
1.1 PRESENTATION DE LA DEMARCHE	74
1.1.1 Paramètres significatifs de l'environnement.....	74
1.1.2 Paramètres significatifs du véhicule à l'approche du quai.....	74
1.2 NOTIONS PRELIMINAIRES.....	75
1.2.1 Direction, roues, et essieux directeurs	75
1.2.2 Application aux véhicules (Compatibilité des roulements)	77
1.3 ETUDE CINEMATIQUE D'UN VEHICULE	78
1.3.1 Modèle cinématique de l'autobus.....	80
1.3.2 Limites du modèle cinématique.....	84
1.3.3 Le mécanisme de la dérive.....	84
1.3.4 Influence de la dérive sur l'emplacement du centre instantané de rotation.....	86
1.3.5 Influence de la dérive sur le calcul du rayon de courbure	87
1.4 MODELISATION DYNAMIQUE DU VEHICULE	89
1.5 CONCLUSION	90
CHAPITRE II	
SIMULATION DE L'ACCOSTAGE D'UN AUTOBUS	93
2.1 INTRODUCTION.....	93
2.2 CONTEXTE DE LA SIMULATION	94
2.2.1 Edition graphique.....	94
2.2.2 Etude en boucle ouverte.....	95
2.2.3 Etude en boucle fermée	95
2.2.4 Le choix de la plate-forme de simulation	96
2.3 LE MOTEUR DE LA SIMULATION.....	97
2.4 REALISATION DE LA PLATE-FORME DE SIMULATION DU GUIDAGE DES AUTOBUS EN STATION	99
2.4.1 Description de l'objet de simulation.....	100
2.4.2 Description du modèle de simulation permettant l'évolution du synoptique sur l'écran.....	101
2.4.3 Réponse indicielle du modèle MOCA	102
2.5 VALIDATION DU MODELE MOCA ET DE LA SIMULATION DU GUIDAGE DES AUTOBUS EN STATION	105
2.5.1 Protocole de mesures	105
2.5.2 Description du système expérimental pour l'élaboration du modèle expérimental.....	106
2.5.3 Le système embarqué.....	107
2.5.4 Les relevés expérimentaux.....	108
2.5.5 Les relevés de la simulation.....	111
2.6 CONCLUSION : VALIDITE DU MODELE	117

CHAPITRE III

PILOTAGE AUTOMATIQUE D'UN AUTOBUS EN PHASE D'ACCOSTAGE 119

3.1 INTRODUCTION 119

3.2 COMMANDE EN BOUCLE FERMEE..... 120

3.3 COMMANDE DE LA DIRECTION (VOLANT) DE L'AUTOBUS 121

 3.3.1 La commande P.I.D. pour le guidage d'un autobus 121

 3.3.2 La commande par retour d'état pour le guidage d'un autobus..... 126

 3.3.3 La commande adaptative pour le guidage d'un autobus 130

 3.3.4 La commande par contrôleurs flous pour le guidage d'un autobus..... 137

 3.3.5 Réduction du nombre de capteurs nécessaires pour la réalisation de la commande floue pour le guidage
 d'un autobus 154

3.4 SUIVI D'UNE TRAJECTOIRE "DE REFERENCE" 157

3.5 CONCLUSION 163

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES 169

BIBLIOGRAPHIE

PREMIERE PARTIE : ACCESSIBILITE DES TRANSPORTS 173

BIBLIOGRAPHIE

DEUXIEME PARTIE : LE GUIDAGE SEMI-AUTOMATIQUE DES AUTOBUS EN ZONE D'ACCOSTAGE 180

ANNEXE 1.1

LE FILOGUIDAGE 187

ANNEXE 2.1

MODELISATION DYNAMIQUE D'UN VEHICULE 193

Introduction Générale

Parmi ses objectifs de recherche, l'INRETS souhaite apporter une contribution à l'amélioration des transports collectifs en mode urbain et suburbain. C'est pourquoi, dans ce domaine, ses travaux se sont structurés autour d'un thème fédérateur qui a pour titre "Amélioration de la qualité de service des transports collectifs".

Les actions concrètes d'amélioration de l'offre doivent s'appliquer à l'ensemble de la chaîne de déplacement et à ses différents maillons comme le présente la figure 1 d'une façon très schématique.

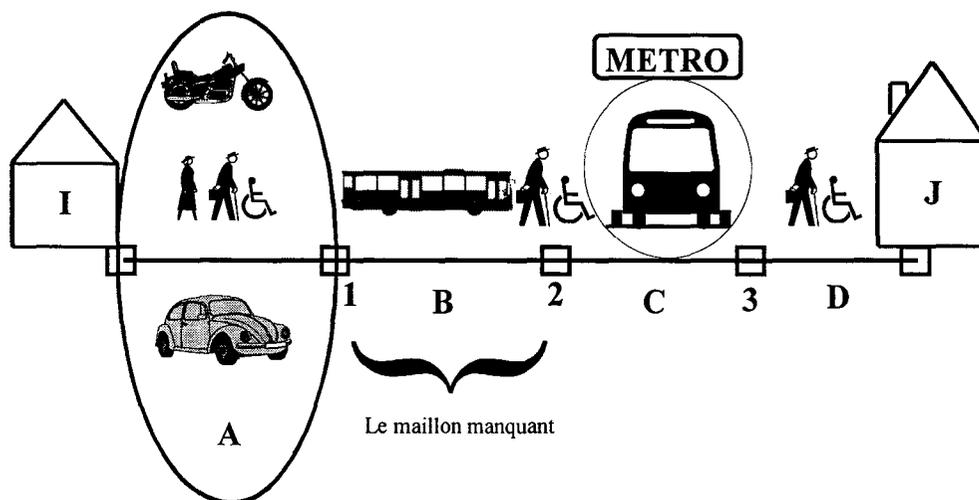


Figure 1 : Schéma type d'une chaîne de déplacement

Le trajet entre les deux points I et J peut être découpé en quatre tronçons :

- A : le rabattement vers la station de transport collectif (à pied, en deux roues, en voiture conducteur ou passager ...),
- B : le trajet en autobus,
- C : le trajet en site propre,
- D : le trajet terminal (arrivée à destination).

Entre ces quatre tronçons, il y a trois points à franchir :

- 1 : le point d'entrée dans le réseau,
- 2 : le point d'échange entre réseaux,
- 3 : le point de sortie du réseau.

Autour de ce schéma, s'articulent quelques recherches menées par l'INRETS ou avec sa collaboration. Ainsi, pour le point d'entrée dans le réseau, il convient de travailler sur les aspects de stationnement, d'information et de fréquence. Pour le point d'échange entre réseaux, les critères de pénibilité, de lisibilité et de temps d'attente sont privilégiés. Quant au point de sortie du réseau, les travaux doivent porter sur l'accessibilité aux différents territoires et sur la connexion aux réseaux interurbains.

L'ensemble de ces actions permettent, en définitive, d'améliorer le confort, l'accessibilité des matériels, l'information, l'exploitation, les correspondances, les performances et la sécurité. Elles peuvent se rattacher à l'objectif global d'amélioration de la qualité de l'offre, du point de vue de l'exploitant et de la collectivité.

Dans l'optique d'une offre accrue de mobilité, il est nécessaire de vérifier que les moyens de transport, pris individuellement ou sous forme d'un chaînage multimodal, évoluent vers une plus grande accessibilité. Dans le cadre de nos travaux, nous nous sommes focalisés sur ce point. L'accessibilité des systèmes de transport aux personnes à mobilité réduite (PMR) est une préoccupation d'autant plus légitime qu'elle vise à faciliter l'insertion des personnes souffrant de déficiences physiques, mais aussi à maintenir la mobilité des personnes âgées. De plus, il est important de souligner que l'accessibilité va dans le sens d'une plus grande commodité d'usage pour l'ensemble de la population.

En France, la préoccupation des pouvoirs publics est de rendre la chaîne des transports en commun accessible au plus large public possible en pensant aux utilisateurs de fauteuils roulants, aux personnes âgées, aux parents avec poussette d'enfant ou encore aux personnes avec bagages.

Pour cela, les systèmes de transport guidés de type VAL (Véhicule Automatique Léger) ou tramway ont pris en compte, dès leur conception, les aspects d'accessibilité. L'autobus qui reste, parmi les transports en commun, un mode de déplacement majoritaire dans les villes, est en retard dans ce domaine. Un premier pas a été franchi avec l'introduction des autobus à plancher surbaissé qui évite la présence de marches à l'entrée du véhicule en offrant une accessibilité de plain-pied. Cependant, ceux-ci ne règlent pas la totalité des problèmes concernant l'accessibilité. En effet, certains systèmes permettent d'obtenir une marche faible (espace entre la bordure du quai et le seuil du véhicule, compté verticalement) mais ne règlent pas le problème de la lacune horizontale (même espace compté horizontalement).

Conscient de cette lacune horizontale à combler, l'opérateur TRANSDEV (société européenne pour le DEVeloppement des TRANSports publics) et son réseau de Grenoble SEMITAG (Société d'Economie MIXte des Transports publics de l'Agglomération Grenobloise) ont souhaité développer une recherche sur le thème de l'accessibilité aux autobus en lançant un projet appelé GIBUS (GuIdage de BUs en Station). Bénéficiant de financements publics de la DTT (Direction des Transports Terrestres) et de l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), ce projet est réalisé par un groupement qui comporte, outre TRANSCET et SEMITAG, l'INRETS (Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité), l'USTL (Université des Sciences et Technologies de Lille), Renault Véhicules Industriels (constructeur de bus), ainsi que la Direction de la Recherche de Renault. Le SMTC (Syndicat Mixte des Transports en Commun), autorité organisatrice des transports de l'agglomération grenobloise et la Ville de Grenoble mènent une réflexion approfondie sur l'aménagement des arrêts et sont étroitement associés à ce projet.

TRANSDEV a passé une convention d'étude avec l'INRETS qui finança en partie nos travaux, l'autre partie étant financée par l'INRETS et la région Nord- Pas de calais.

La première partie de ce mémoire intitulée "Accessibilité des transports", a pour objet de poser le problème de l'accessibilité des transports collectifs en général et des autobus en particulier.

Tout d'abord, le problème de l'accès aux transports publics sera étudié en employant un vocabulaire défini au préalable. Les différents problèmes liés à l'accessibilité seront recensés et deux types de transport : les transports guidés et l'autobus urbain seront analysés.

Ensuite, nous nous intéresserons plus particulièrement à l'autobus urbain et aux trois catégories de solutions employées pour en faciliter l'accès : les dispositifs embarqués à bord du véhicule, l'autobus à plancher surbaissé et l'aménagement des arrêts.

Enfin, l'étude mènera à considérer l'intérêt que peut avoir l'aide à l'accostage. Ainsi, un bilan des expériences déjà menées sera réalisé et les possibilités offertes pour l'aide à l'accostage seront recensées.

La deuxième partie de ce mémoire, intitulée "le guidage semi-automatique des autobus en zone d'accostage" est consacré à la réalisation d'une commande permettant l'accostage d'un autobus.

La première possibilité, est d'installer le matériel informatique et un algorithme de commande sur un dispositif réel donc d'équiper un autobus de capteurs et d'effectuer des essais en grandeur réelle. Cette première voie n'est pas réalisable pour diverses raisons, et en particulier pour des raisons de coût et de sécurité. C'est pourquoi, une plate-forme de simulation a été utilisée.

Tout d'abord, un modèle géométrique et dynamique d'un autobus a été trouvé. L'approche suivie consiste à insérer dans le modèle cinématique des paramètres liés à la dynamique du véhicule.

Ensuite, l'accostage d'un autobus à l'aide du modèle choisi sera simulé. Pour la réalisation de cette simulation les quatre points suivants sont pris en compte :

- contexte de la simulation,
- choix d'un modèle de simulation pour décrire le comportement du système à simuler,
- choix d'une technique pour la mise en oeuvre de la simulation (moteur de simulation),
- observations et représentations des résultats obtenus à partir de la simulation afin de valider le modèle.

Enfin, si la validation du modèle donne des résultats satisfaisants, une loi de commande du véhicule sera déterminée. Pour cela, différentes lois de commande issues des techniques de l'automatique : commande P.I.D., commande à retour d'état, commande adaptative et commande floue seront essayées. Puis, les critères et méthodes nécessaires à la comparaison et donc au choix de la loi de commande seront déterminés.

Première Partie

ACCESSIBILITE DES TRANSPORTS

L'objet de cette première partie intitulée "Accessibilité des transports"¹ pose le problème de l'accessibilité des transports collectifs en général et des autobus en particulier.

L'étude de ce problème permettra, par la suite, d'en chercher des solutions. Une des solutions sera présentée dans la deuxième partie de ce mémoire. Une autre solution fera l'objet de la thèse de Guillaume Uster.

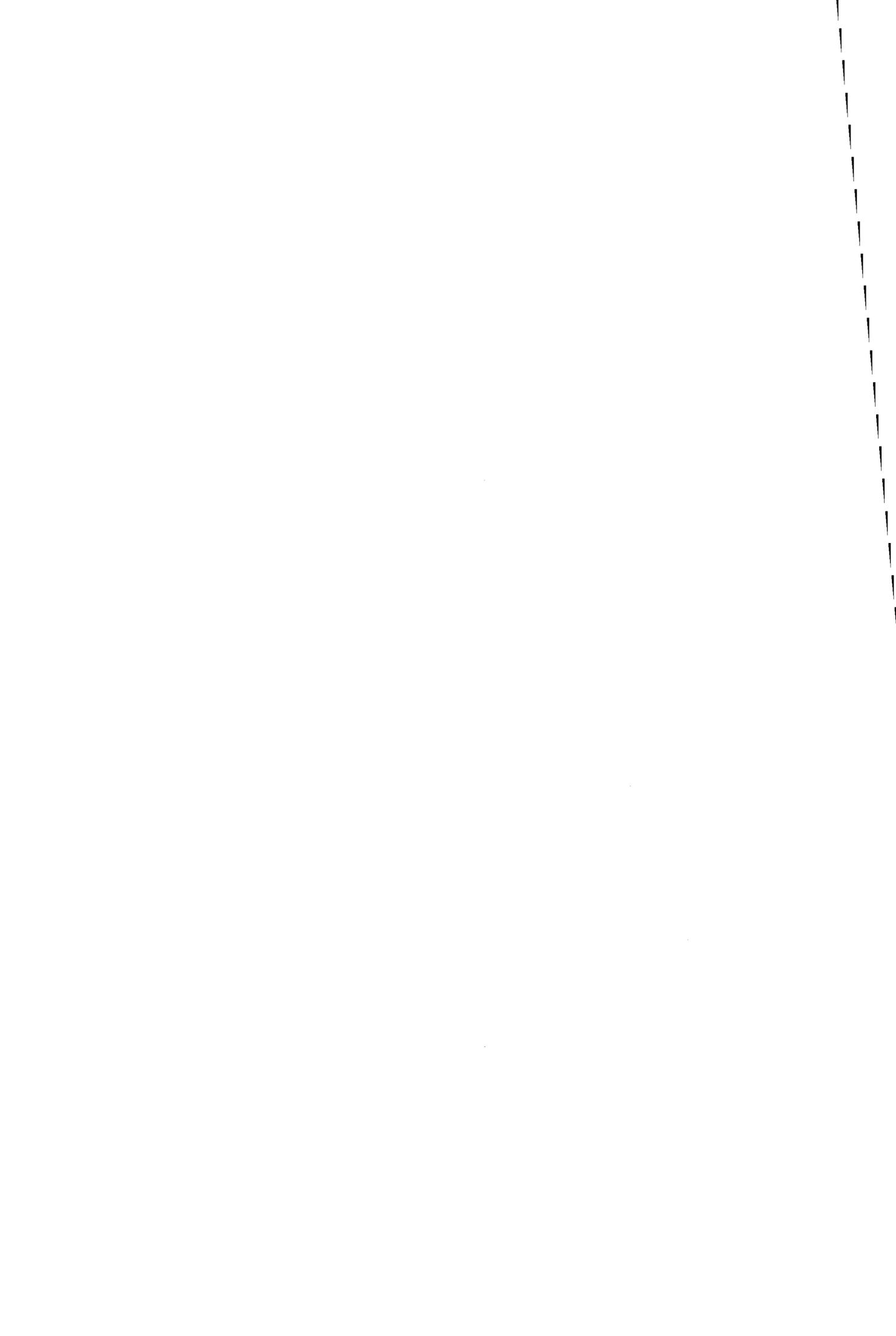
Le problème des personnes à mobilité réduite utilisant les modes de transports actuellement disponibles sera cerné.

D'abord la définition des termes employés au cours de la thèse qui permet de prendre quelques points de repères par le biais d'enquêtes concernant l'accessibilité sera donnée.

Ensuite un chapitre sera consacré à un état de l'art des dispositifs mis en œuvre pour supprimer la marche rendant l'accès aux autobus difficile voire impossible aux personnes à mobilité réduite.

Enfin, les différentes expériences et réalisations de systèmes d'aide à l'accostage menées en Europe et basées sur des techniques mécaniques et électroniques seront présentées. De plus, un état de l'art des différentes techniques envisageables pour assurer le positionnement et le suivi d'un véhicule dans un environnement donné est réalisé.

¹ Cette partie est commune avec la thèse de Guillaume Uster intitulée : "Amélioration de l'accessibilité des autobus urbains pour les personnes à mobilité réduite : Aide à l'accostage".



Chapitre I

L'ACCESSIBILITE DANS LES TRANSPORTS COLLECTIFS URBAINS

1.1 POSITION DU PROBLEME

Dans les années 70, l'INRETS, ou plutôt l'IRT (Institut de Recherche sur les Transports), s'est intéressé au transport des personnes à mobilité réduite. Il a organisé, en avril 1989, une journée spécialisée sur le thème du "transport sans handicap". L'objet était d'analyser le chaînon "transport" afin d'atténuer au maximum les diverses déficiences dont les personnes handicapées peuvent être atteintes. Les actions entreprises comme par exemple : l'aménagement des locaux publics ou privés, des postes de travail, de l'urbanisme, n'auront leur pleine utilité que si l'on fournit à l'ensemble de la population des moyens de mobilité permettant à toute personne d'accéder aux lieux où ces aménagements ont été effectués.

Lorsque sont évoquées les difficultés de mobilité, on pense essentiellement aux déficiences motrices. Or, toute déficience susceptible de perturber le déplacement des personnes doit être prise en compte. Le handicap peut revêtir plusieurs formes : déficiences des capacités sensorielles de l'individu et déficiences mentales. Des expériences ont été menées pour améliorer les transports en commun pour certains déficients mentaux [HER - 89]. Pour les déficients sensoriels perceptifs (malvoyants et malentendants), des études ont été réalisées afin de mesurer les difficultés rencontrées lors de leurs déplacements [STE - 89]. C'est pourquoi, certains services se sont développés essentiellement dans le domaine de l'information et de la signalétique, tels que les plans de réseaux en braille ou les dispositifs reposant sur la synthèse de la parole.

Cette thèse, ce limite aux personnes souffrant de déficiences de motricité, que ce soit de manière permanente ou ponctuelle.

Lors de l'allocution d'ouverture de la 6^{ème} conférence internationale sur la mobilité et le transport des personnes âgées et à mobilité réduite (COMOTRED 92 à Lyon), Monsieur Michel Gillibert, Secrétaire d'état aux handicapés et accidentés de la vie, lui-même utilisateur de fauteuil roulant, précisait : "L'**accessibilité** est non seulement la liberté d'aller et de venir, mais c'est aussi et surtout la possibilité de se rendre à l'école, de trouver un emploi, de pratiquer des sports et des loisirs, de rencontrer ses amis, tout simplement d'exister à part entière. La **mobilité** est la condition de la qualité de la vie".

Accessibilité et mobilité sont deux mots souvent utilisés dans ce mémoire. Il convient donc de donner, en préambule, quelques définitions de termes fréquemment employés en les cadrant dans un contexte de transport de personnes.

Accessible [MIT - 95] : Où l'on peut accéder, arriver, entrer.

Par accès à une activité ou à un service, on entend la capacité à participer à l'activité ou à utiliser le service. L'accès à un service n'implique pas toujours le fait de devoir se déplacer. En effet, certains services peuvent s'obtenir à domicile.

L'accessibilité est un terme qui signifie "caractère de ce qui peut être atteint, abordé, dont on peut s'approcher". Dans la vie courante, les personnes bénéficiant de toutes leurs capacités sensorielles et motrices ne sont guère sensibles aux problèmes d'accessibilité. Il n'en est pas de même des personnes souffrant d'un handicap permanent ou temporaire.

Mobile [ROB - 94] : Qui peut être mû, dont on peut changer la place ou la position.

La mobilité reste un concept relativement simple. Elle évoque la possibilité d'aller d'un point à un autre. Elle représente le fait de pouvoir se déplacer physiquement. Pour être mobile, une personne doit disposer des ressources physiques nécessaires pour se déplacer. Ces ressources peuvent inclure par exemple : les jambes, les fauteuils roulants, les voitures, les transports publics et les transports spéciaux. Pour une mobilité effective, des infrastructures appropriées doivent être disponibles pour le mode de transport retenu. Ainsi, un trottoir qui permet aux piétons de se déplacer sans problème gêne la mobilité des personnes en fauteuil roulant : poteaux et autres obstacles, voire bordures non surbaissées. Il existe une échelle dans la notion de mobilité : une personne peut disposer d'une mobilité plus ou moins réduite. De plus, la mobilité est liée à la notion d'information ; il faut connaître l'existence de certains services facilitant le déplacement des personnes avec un handicap.

Personne à mobilité réduite [SMI - 95] : personne ayant des difficultés à se déplacer à cause d'un handicap physique permanent ou temporaire, ou en raison de circonstances.

La population des PMR comprend tout d'abord les personnes handicapées au sens administratif et juridique du terme dont la maladie ou la déficience est reconnue. D'autres personnes se trouvent en situation de handicap, lors de leur déplacement. Cet handicap est une combinaison de l'incapacité fonctionnelle de la personne et des caractéristiques des situations rencontrées.

Nous pensons d'emblée aux personnes âgées dont les capacités physiques diminuent et qui disposent rarement d'un véhicule personnel. Ces personnes sont amenées à être de plus en plus nombreuses puisque le vieillissement est un phénomène démographique qui marque la

fin de ce siècle. Selon les projections de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), l'Europe de l'Ouest comptera 20 % d'individus de plus de 60 ans en l'an 2000.

Ensuite, certaines personnes se trouvent en situation de handicap temporaire :

- les individus souffrant d'une incapacité (jambe ou bras cassé...),
- les individus utilisant des aides à la marche (canne, béquille),
- les personnes accompagnées d'enfants en poussette,
- les personnes avec des bagages ou des paquets encombrants,
- les femmes enceintes...

En Europe de l'Ouest, dans les pays scandinaves et en Amérique du Nord, la mise en place du concept de Personne à Mobilité Réduite (PMR), représente une évolution importante des mentalités car elle permet la reconnaissance de la différence.

La définition des personnes à mobilité réduite que donne l'organisme canadien TransAccess est : "personnes qui, en raison de leur état de santé, sont incapables d'utiliser des services de transport ou qui les utilisent avec plus de difficultés que la population en général".

Cette définition montre que des personnes sont inaptes à utiliser des services ou qu'elles ont seulement à faire face à certaines difficultés. Afin de faciliter la tâche de plus en plus complexe des planificateurs et des décideurs, un recensement des problèmes a été effectué. Ceux-ci sont différents selon la mobilité de la personne et le type de transport envisagé (interurbain, local et véhicule personnel).

Cette approche très pragmatique met, à la disposition des parties intervenantes dans le dossier des transports accessibles, les informations nécessaires. Le but est de les aider, à évaluer les créneaux qui les intéressent et à répartir leurs ressources entre l'étude, la réalisation et l'amélioration des produits et des services. Ces travaux ont un objectif financier. Cependant, au delà du but lucratif, l'intérêt des nouveaux services dont peuvent bénéficier les personnes à mobilité réduite est reconnu.

L'ensemble des travaux réalisés dans le cadre de cette thèse pose la question suivante : Comment rendre un autobus urbain accessible ?

Un mode de transport est accessible aux PMR si, par sa conception physique et ses procédures d'exploitation, s'il peut être utilisé par ces personnes sans qu'elles soient pénalisées par leur handicap. C'est au concepteur du mode de transport et à l'exploitant d'identifier les fonctions inexécutables par certains utilisateurs et d'en tenir compte.

Une conception adéquate réduit les exigences physiques requises pour l'utilisation d'un mode de transport. Une personne, ayant des difficultés à marcher et à monter des marches, peut utiliser un autobus aux marches peu élevées et aux mains courantes à des emplacements appropriés. Un mode de transport est accessible si cette personne est assistée dans l'utilisation du mode de transport en question.

Pour réaliser un mode de transport accessible, le concepteur doit connaître les handicaps des utilisateurs potentiels, identifier les actes rendus impossibles et concevoir un mode de transport utilisable pour tous.

Dès qu'un système est rendu physiquement accessible, l'exploitant informe les utilisateurs potentiels de l'amélioration de ses prestations. L'accès est limité par de nombreux facteurs autres que la simple conception physique du mode de transport. Le manque d'informations et de confiance restreint l'accès, voire constitue un obstacle aussi important que des marches élevées ou des pentes raides.

L'accessibilité doit s'intégrer au transport, tant au niveau des infrastructures que des véhicules. Cette démarche imprègne tout le processus de conception, de fabrication et de maintenance. Grâce à cela, il est possible de garantir une accessibilité optimale.

Nous sommes tous invalides d'une façon ou d'une autre. Concevoir des systèmes accessibles implique qu'on les réalise de manière à ce qu'un groupe de personnes aussi important que possible puisse les utiliser facilement. Un mode de transport bien conçu augmente le nombre d'individus susceptibles de l'utiliser.

Les problèmes de mobilité touchent beaucoup plus d'individus que ne le laisse supposer la notion restrictive de handicap : les personnes se déplaçant avec des bagages, des achats encombrants, des jeunes enfants, celles ayant des difficultés à se déplacer à cause d'un handicap purement temporaire, d'un handicap physique ou sensoriel à plus long terme. On peut estimer [OXL - 1.95] que 20 à 30 pour cent environ des personnes qui se déplacent sont des personnes à mobilité réduite et non 6 à 10 pour cent comme le suggéraient les chiffres des années 70. De plus, les aménagements, qui facilitent la vie des personnes à mobilité réduite, profitent dans la quasi-totalité des cas à tous les voyageurs. A titre d'exemple, et dans un autre domaine, il faut rappeler que la télécommande pour les télévisions, conçue initialement pour les handicapés, est devenue aujourd'hui un objet utilisé par tous.

Outre le véhicule particulier, l'offre de transport faite aux personnes à mobilité réduite est, dans la plupart des villes, constituée par un transport spécialisé qui fonctionne à la demande et assure le déplacement porte à porte. Toutefois, il est presque exclusivement réservé à des personnes reconnues handicapées par une commission médicale spécialisée. Bien des bénéficiaires reprochent à ce système la lourdeur de réservation, la durée excessive des trajets, les horaires restrictifs interdisant le service de nuit et du dimanche et les restrictions géographiques. Surtout, ils trouvent là un objet de ségrégation.

L'accessibilité des personnes à mobilité réduite est un sujet qui préoccupe aujourd'hui les pouvoirs publics du monde. Aux Etats Unis, une loi de 1990 appelée ADA (Americans with Disabilities Act) a été élaborée en vue de garantir les mêmes droits aux 49 millions de personnes à mobilité réduite qu'aux autres citoyens : dans le domaine de l'emploi, des services publics, des logements publics, des services proposés par des entités privées ainsi que des télécommunications. L'élément clé de chacun des domaines est le transport. Sans un accès égal au transport, les personnes à mobilité réduite ne peuvent bénéficier de nombreuses possibilités offertes en matière d'emploi, de loisirs et de santé. L'ADA stipule que, d'ici 1997, chaque entité exploitant un service de transport public à itinéraire fixe doit offrir un service de transport parallèle complémentaire, de type porte à porte répondant à une demande. Il sera destiné aux personnes incapables d'utiliser les services à itinéraire fixe. L'impact financier des exigences de l'ADA est estimé à 700 millions de dollars dont 100 millions en dépenses d'investissements et 600 millions en frais d'exploitation. De nombreuses sociétés remplacent alors leurs services traditionnels à itinéraire fixe par des services à itinéraires et à arrêts variables utilisant des bus entièrement accessibles. Ces services, considérés comme répondant à la demande, ne doivent pas se conformer aux exigences de l'ADA en matière de services de

transport parallèle complémentaire. Cependant, même si ce nouveau service facilite l'accessibilité aux autres voyageurs, il n'est concevable qu'en milieu rural où le nombre de passagers, empruntant certains itinéraires fixes, est limité.

Afin d'aider à la mise en oeuvre de cette loi, un projet appelé ACTION (ACcessible Transport In Our Nation) a pour objectif la promotion de la collaboration entre la communauté des PMR et l'industrie du transport. Ce programme national de recherche et de démonstration, a été élaboré par le Congrès, est financé par le Ministère du Transport (US DOT), l'Administration Fédérale du Transport (FTA) et la National Easter Seal Society (NESS). Afin d'atteindre les objectifs assignés, des financements sont débloqués pour aider des programmes pilotes locaux destinés à améliorer l'accessibilité des moyens de transport dans les domaines de l'identification des besoins, de l'information, de la formation et de la technologie. Depuis sa création en 1988, le projet ACTION a financé 77 projets pour un coût total de 6 millions de dollars.

De même, dans le cadre du FTA (Ministère Américain du Transport), [BAL - 95] un manuel sur l'accessibilité des infrastructures de transport (Accessibility Handbook for Transit Facilities) a été rédigé. Il offre aux autorités organisatrices ou aménageurs des informations sur des dispositions stipulées dans la partie de la réglementation consacrée aux infrastructures. C'est ainsi que le manuel traite des exigences concernant le bord des quais et des plates-formes, les espaces séparant les quais et les plates-formes des véhicules, et l'accès du quai ou de la plate-forme du véhicule. De même, il donne des indications très précises sur l'environnement, les dimensions des arrêts de bus et des abris pour les voyageurs.

Il semble donc que l'ADA commence à avoir un impact significatif sur les sociétés de transport grâce à la mise en place de nouveaux services et de nouvelles technologies offrant davantage d'opportunités aux PMR en matière de mobilité et d'intégration.

En Europe, des groupes de réflexion appelés COST (COopération Scientifique et Technique) ont été créés pour tenter d'harmoniser les actions menées dans les différents pays de l'Union Européenne. Ainsi, le groupe appelé COST 322 est chargé de coordonner les travaux relatifs aux systèmes d'autobus à plancher surbaissé. Cette instance peut émettre des recommandations qui seront reprises par chaque pays membre.

Les opérateurs de transport public ressortissants de l'Union Européenne et membres de l'UITP (Union Internationale des Transports Publics) se sont regroupés au sein du Comité Européen d'Action pour les Transports Publics ou "Euroteam Transports Publics". L'objectif de ce comité est d'arrêter des positions communes en matière de transport en direction de l'Union, des états membres et des autorités locales. Il est unique : la mobilité pour tous.

En France, créé en 1977, le COLITRAH (COmité de LIaison pour le TRAnsport des personnes Handicapées), émanation du Conseil National des Transports a non seulement développé des idées et principes concernant l'accessibilité des transports et de la chaîne du déplacement, mais encore aidé, par des actes, à la réalisation de l'accessibilité. Il est amené ainsi à émettre des avis sur les matériels et les nouvelles infrastructures dont les avant-projets lui ont été soumis, à éditer régulièrement des guides et des brochures d'information, à élaborer divers documents pratiques de propositions de spécification et de recommandations.

En France, le décret n°94-86 du 26 janvier 1994 relatif à l'accessibilité aux personnes handicapées des locaux d'habitation, des établissements et installations recevant du public

modifie et complète le code de la construction, de l'habitation et de l'urbanisme. Il fixe les dispositions applicables lors de la construction, de la création ou de la modification d'établissements ou d'installations ouvertes au public.

Citons également l'article R.111-19-1 : "Est réputé accessible aux personnes handicapées tout établissement ou installation offrant à ces personnes, notamment à celles qui se déplacent en fauteuil roulant, la possibilité, dans des conditions normales de fonctionnement, de pénétrer dans l'établissement ou l'installation, d'y circuler, d'en sortir et de bénéficier de toutes les prestations offertes au public en vue desquelles cet établissement ou cette installation a été conçu". Ce texte législatif, même s'il ne concerne qu'indirectement les transports publics, montre la volonté politique ferme des pouvoirs publics de faciliter l'accessibilité.

Comme aux Etats-Unis, en Europe et en France la préoccupation des pouvoirs publics est de rendre la chaîne des transports en commun accessible aux personnes à mobilité réduite. Cependant, comme la réalité demeure loin de la rhétorique, le problème est plus vaste qu'on ne l'imagine. C'est pourquoi il est apparu important de donner en points de repère les situations de gêne d'une certaine catégorie de la population.

1.2 QUELQUES POINTS DE REPERE

Un déplacement en transport collectif peut être décomposé en trois phases :

- l'accès à la station,
- le transport proprement dit,
- la montée/descente du véhicule.

Le problème de l'accès au lieu d'échange du transport ne doit pas être négligé. Il serait en effet aberrant de mettre au point des services à l'intérieur des transports collectifs sans que les principaux bénéficiaires puissent en profiter pour des raisons d'accès. La présence d'obstacles, l'absence d'escalier mécanique ou d'ascenseur peuvent gêner ou empêcher l'accès au quai.

Pendant le transport, se pose le problème du confort des passagers. Des accélérations et des freinages trop brusques peuvent incommoder certaines personnes et risquent d'engendrer des chutes. Ceci peut mener à l'abandon du mode de transport. La possibilité de trouver des barres d'appui pour déambuler ou une place assise pendant le voyage doit être déterminant dans le choix modal.

En ce qui concerne la montée et la descente du véhicule, deux paramètres entrent en jeu :

- la lacune verticale (ou marche) est l'écart de hauteur entre le plancher du véhicule et le quai de la station.
- la lacune horizontale est la distance, comptée horizontalement, entre le bord du quai et le plancher du véhicule.

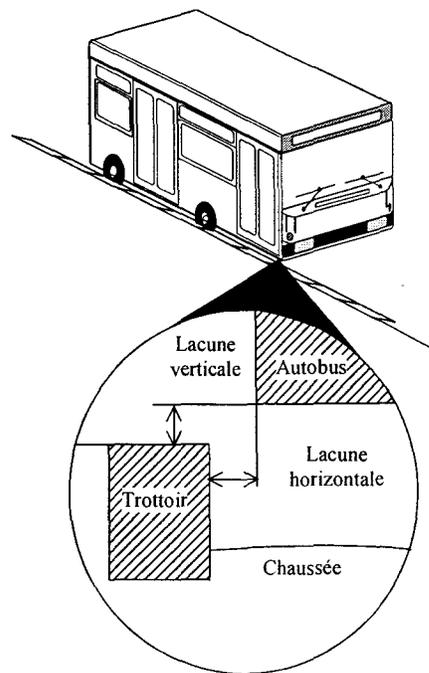


Figure I-1 . Définition des lacunes

Dans une moindre mesure, un troisième paramètre peut caractériser l'accessibilité : la précision du point d'arrêt. En effet, il existe des dispositifs facilitant l'accessibilité qui seraient inutiles si le véhicule ne s'arrête pas en face.

Si une difficulté apparaît lors d'une de ces trois phases (accès à la station, accès au véhicule et transport) l'utilisateur peut se sentir gêné ou exclu. Les capacités d'ambulation, de préhension et de communication peuvent se révéler insuffisantes dans certaines situations.

Une enquête et diverses études réalisées en France permettent de préciser les éléments susceptibles d'engendrer des handicaps et d'évaluer, pour chaque situation le nombre de personnes pénalisées pour apporter des solutions adaptées.

L'enquête de Saint-Cyr-sur-le-Rhône [MIN - 85] fournit les résultats de tests d'ambulation et de préhension fréquemment mises à contribution dans les situations de transport. D'autres enquêtes menées en Europe donnent des informations sur les difficultés d'accessibilité de l'autobus urbain.

1.2.1 L'enquête de Saint-Cyr-sur-le-Rhône

L'objet de cette enquête est de réaliser la typologie des utilisateurs de transports puis d'analyser les performances de chaque groupe d'individus selon la situation.

Au cours de cette expérimentation, sur les 504 habitants de Saint-Cyr-sur-le-Rhône, 466² ont été placés dans des situations proches de la vie quotidienne.

² La répartition en fonction du sexe est de 49,8% d'hommes et 50,2% de femmes tous âges confondus.

Cette expérimentation a été réalisée sur sept classes d'âge représentant les différentes catégories d'utilisateurs de transports collectifs :

Classe d'âge	Nombre	Catégorie d'utilisateur de transport
6 à 14 ans	85	scolaire
15 à 17 ans	29	scolaire + captif*
18 à 24 ans	46	
25 à 34 ans	48	habituel
35 à 49 ans	149	
50 à 64 ans	67	
plus de 65 ans	42	inactif

*captif : personne "prisonnière" des transports publics : ne possède pas d'autres moyens de déplacement.

Dans chaque situation et pour chaque individu, les enquêteurs de l'INRETS ont déterminé si une action était possible, limitée ou impossible.

Le résultat de la confrontation entre l'exigence du test et les capacités de l'individu est obtenu par l'observation des comportements et des stratégies motrices visibles. L'individu, sans dépasser les limites de ses capacités, n'avait pas de consignes précises et ni de contrainte de temps. Par exemple, pour le franchissement de marches, la performance d'un individu était mesurée selon les critères suivants :

- possible, pour un franchissement se faisant dans la foulée, sans modification importante du pas, sans hésitation et sans effort apparent. On peut parler ici de situation apportant un confort gestuel optimal pour l'individu,
- limitée, pour une progression se faisant marche par marche, avec des efforts et des hésitations visibles. La situation est fatigante même sans contrainte de temps,
- impossible, pour un individu se trouvant en situation d'exclusion malgré toutes ses stratégies compensatoires.

A l'issue de certains tests, une échelle de performances traduisant l'apparition d'éventuelles dysfonctions ou d'une bonne adéquation entre les caractéristiques du milieu et les aptitudes de l'individu sera disponible.

Lorsque le test le permettait, la performance a été quantifiée : distance, hauteur, force développée et temps d'exécution.

La base de données ainsi constituée a permis de sélectionner les situations les plus représentatives des différents modes de transport et d'analyser les performances des individus [DEJ - 88].

La catégorie des 18 à 24 ans est intéressante car elle représente des individus dont les caractéristiques sont figées du point de vue biométrique et où l'effet du vieillissement fonctionnel est peu marqué.

Certains résultats sont directement applicables à la question posée par l'accessibilité de l'autobus, du point de vue de la montée et de la descente du véhicule. Les situations concernées sont le franchissement des marches et des rampes.

Concernant le franchissement de marches de 35 centimètres, les résultats montrent que d'une manière globale sur l'échantillon, 68 % des personnes sont gênées pour gravir des marches sans appui. Quant aux personnes de plus de 65 ans, 52 % d'entre elles ne peuvent pas franchir la marche sans appui, et 14 % ne la franchissent pas malgré l'utilisation d'un appui.

La marche intérieure du bus présente généralement une hauteur de 21 centimètres. Pourtant, les résultats de franchissement d'une marche de 20 centimètres montrent que 21 % des personnes de plus de 65 ans sont gênées malgré l'utilisation d'un appui et que 24 % des personnes ne peuvent la franchir sans appui.

Le franchissement des rampes de 5 % pose peu de problèmes. Pour une pente de 8 %, près de 2 % de l'échantillon est gêné ou est dans l'impossibilité de la franchir sans appui. Mais il passe à 7 % pour les personnes de plus de 65 ans.

Sur cet échantillon, il est important de noter que 43 % des individus s'estiment gênés dans les gestes de la vie courante et que 10 % s'estiment handicapés pour des problèmes de déplacement, de préhension ou de communication.

En conclusion, certaines situations de transport produisent un handicap, au sens fonctionnel du terme, dans quelques cas, pour toutes les tranches d'âges. Les chiffres permettent de reconsidérer les estimations avancées en situation de transport, lorsque l'on s'intéresse aux personnes se sentant marginalisées par leurs aptitudes fonctionnelles.

1.2.2 Enquêtes sur l'accessibilité des autobus urbains

L'autobus proposé par Renault Véhicules Industriels "R312" est un véhicule qui présente un plancher bas sur la moitié de sa surface. Ce véhicule est construit depuis 1986 sur les bases d'un cahier des charges établi par des exploitants de réseau dans le cadre de l'UTP (Union des Transports Publics). Une enquête a été réalisée en 1990 [SAL - 90] auprès des usagers de l'autobus R312 : 278 personnes de plus de 15 ans ont répondu à un questionnaire alors qu'elles voyageaient sur la ligne 28 du réseau TCL de Lyon. Dans cet échantillon, 63 % sont des usagers captifs et 18 % sont âgés de plus de 65 ans.

On a noté le handicap visible de chaque personne questionnée : 25 % sont en situation de handicap. Ceci à cause de leur âge élevé, de la difficulté à se déplacer, de l'utilisation d'aides à la marche, de l'accompagnement d'enfant en poussette, de transport de bagages ou de paquets encombrants.

Voici les résultats significatifs concernant l'accessibilité :

- 12 % ont des difficultés à monter et à descendre,
- 68 % utilisent 1 appui pour monter et descendre,
- 15 % utilisent 2 appuis pour monter et descendre,
- 5 % ne peuvent ni monter ni descendre malgré les appuis.

Une autre étude, réalisée à Lyon par l'INRETS en 1988 [DEJ - 88], a examiné les difficultés d'accès aux autobus urbains. Du fait de l'éloignement de l'autobus du trottoir, cet

arrêt "anormal" oblige les passagers à descendre sur la chaussée. Sur un autobus standard classique, ils se retrouvent face au franchissement d'une marche d'une hauteur de 35 centimètres. La montée dans l'autobus devient impossible pour 14 % des personnes de plus de 65 ans et pour 10 % des personnes de 50 à 64 ans et limitée pour plus de 48 % des personnes de plus de 18 ans.

Dans cette même étude, les motivations des individus à recourir aux services de transport spécialisés ont été examinées. Le transport spécialisé est un service qui prend en charge le passager de porte en porte sur réservation. Le recours à ce type de service est motivé par les difficultés rencontrées lors de l'utilisation d'un mode de transport habituel. Les difficultés les plus fréquemment citées, dans les véhicules classiques actuels, sont de tenir debout et franchir l'embarquement des autobus.

Au Canada [SMI - 95], l'enquête sur la santé et les limitations d'activité menée en 1986 et 1991, montre que les personnes à mobilité réduite, éprouvant des difficultés à utiliser un autobus non adapté, sont gênées à 52 % au moment de l'embarquement et du débarquement.

Une étude [OXL - 2.95] a été menée à Londres pour le compte du LATU (unité londonienne des transports accessibles) et du London Transport en 1991 sur un groupe de 431 personnes utilisatrices de transports spécialisés ou parfaitement accessibles. Ces personnes ont difficilement accès ou pas du tout accès aux moyens de transport public. Certaines d'entre elles ont cessé d'utiliser les autobus publics à cause de la conception même des véhicules qui pose des problèmes à l'embarquement et au débarquement. Même si on effectuait les modifications nécessaires, 40 % des anciens utilisateurs de bus ont estimé qu'il était impossible pour eux de réutiliser ce moyen de transport. Les changements souhaités par les autres personnes étaient : des marches moins hautes pour accéder au bus (18 %) et l'installation d'élévateurs ou de rampes pour les fauteuils roulants (13 %).

L'ensemble de ces données confirme que la montée et la descente posent le plus de problèmes et entraînent des efforts de la part du voyageur et une augmentation du temps d'arrêt. Il importe donc d'améliorer la conception des barres-montoirs permettant de prendre appui ou, mieux, de réduire le nombre et la hauteur des marches.

D'une manière globale, ces données apportent des éléments d'orientation aux concepteurs pour l'amélioration des sites et des matériels de transport collectif. La recherche d'indices de dysfonctionnement est l'élément central qui offre la meilleure compréhension des difficultés rencontrées au cours d'un trajet en transport en commun.

Le concept de handicap de situation traduit le fait qu'une personne est incapable de faire face à une situation considérée comme normalement maîtrisable. Il amène à ne plus considérer les besoins de transport des personnes à mobilité réduite comme un enjeu marginal. Chacun prend le mode de transport urbain qui lui convient, sans le cantonner dans un type, particulièrement la voiture automobile encore trop souvent perçue comme unique possibilité pour les personnes handicapées.

Ce premier éclairage sur les problèmes d'accessibilité aux transports collectifs laisse entrevoir une approche globale du concept de personnes à mobilité réduite et permet de mieux comprendre les problèmes liés à l'utilisation de l'autobus urbain. Cependant, avant d'examiner plus en profondeur ce mode de transport, le plus répandu dans nos villes, il convient de

regarder du côté des autres transports collectifs afin d'appréhender leur approche de l'accessibilité.

1.3 L'ACCESSIBILITE DANS LES TRANSPORTS GUIDES

Il convient de préciser quelques notions sur les transports guidés. Par opposition au transport routier, où l'infrastructure est utilisée par tous les types de véhicules, le transport guidé utilise une infrastructure qui lui est propre. Ainsi, dans les transports guidés, on peut distinguer deux types d'infrastructure : les voies de chemin de fer réparties sur un réseau ouvert et les sites réservés aux systèmes de transport urbain qui sont de type fermé. Le système de guidage le plus répandu dans ces deux types d'infrastructure est le rail. Que ce soit avec du matériel roulant de type T.G.V., CORAIL, train de banlieue, R.E.R., métro ou tramway, le principe est le même ; la trajectoire du mobile est donnée par le tracé des rails et son avancement est assuré par l'intermédiaire de roues en fer.

Un déplacement en transport est décomposé en 3 phases : l'accès à la station, la montée/descente du véhicule et transport proprement dit. Examinons lors de ces trois phases comment les concepteurs et les exploitants ont pris en compte les paramètres d'accessibilité. Cet examen succinct est réalisé sur les transports guidés urbains comme le métro, le VAL, le tramway et le SK (Soulé-de Kermadec). Quelques éléments seront fournis pour les R.E.R. ainsi que les trains SNCF. Cet état de l'art est clos par un mode de transport assez peu développé dans le monde : l'autobus guidé.

1.3.1 VAL, SK et systèmes ferrés

Faisant office de précurseur, dès les années 70, la Communauté Urbaine de Lille avait pris en compte l'aspect de l'accessibilité dès la conception du métro automatique VAL (Véhicule Automatique Léger). Elle a exigé du constructeur italien Breda un tramway à plancher bas dit "intégral" où toute la surface du véhicule et toutes les portes sont d'accès de plain-pied. La totalité des stations bénéficie d'ascenseurs pouvant amener les voyageurs depuis la rue jusqu'au quai. De plus, le matériel a été conçu avec un accès de plain-pied, c'est à dire sans marche ni écart important entre le plancher du véhicule et le quai de station. Devant les stations du VAL, un rail, disposé au centre de la voie, amène le véhicule le plus près possible des bastinges de quai, grâce à une pièce mécanique appelée galet d'aiguillage (servant au passage des aiguillages). Le but est de minimiser l'écart existant entre la rame et le quai autour d'une valeur de 3 centimètres. La marche subsistant à l'entrée du véhicule est inexistante grâce à un système de suspension pneumatique qui place le plancher du véhicule au niveau du quai, quelle que soit la charge transportée. Toutefois, le confort à l'intérieur de la rame est critiqué. Les accélérations et décélérations fortes du véhicule qui lui assurent sa vitesse commerciale élevée, peuvent gêner certaines personnes ayant des difficultés à se tenir debout.

Le Syndicat Mixte des Transports Collectifs de Grenoble et l'exploitant SEMITAG ont appliquée la même démarche pour la mise au point, en collaboration avec le constructeur GEC ALSTHOM, d'un système de tramway facilitant l'accessibilité [DEJ - 95]. Deux voitures sur quatre sont à plancher bas avec une hauteur de 34 centimètres sur environ les deux tiers de la surface. Les stations possèdent un quai dit surélevé à une hauteur de 26 centimètres. De plus,

pour garantir l'accès aux utilisateurs de fauteuils roulants (UFR), une rampe rétractable, appelée palette, est déployée par le conducteur à la demande du voyageur.

Les tramways, mis en service en France depuis plusieurs années respectent eux aussi la démarche accessibilité. Ceux de Saint-Denis et de Rouen sont similaires au tramway de Grenoble. A Nantes, une voiture à plancher bas en milieu de rame offre une palette. De même à Saint-Etienne, le plancher bas occupe les deux-tiers de la surface du véhicule. Enfin, Strasbourg vient d'inaugurer un système à plancher bas intégral et des stations à quais surélevés.

Parmi les systèmes guidés, citons le SK qui est un système de transport automatique à câble dit continu. Ce système fait progresser, sur de courtes distances, des petites cabines à intervalles faibles avec l'originalité d'une absence d'arrêt en station. Ainsi, les passagers accèdent au véhicule qui se déplace à la vitesse de 1 km/h le long d'un quai à niveau. La version SK 6000 de ce système doit équiper, en 1996, l'aéroport Roissy-Charles de Gaulle pour assurer une liaison entre le nouvel aérogare, le R.E.R. et les parcs de voitures. La société Aéroports de Paris, le constructeur Soulé et l'exploitant ont demandé à l'INRETS une expérimentation [DEJ - 3.93] visant à démontrer l'accessibilité d'un tel système dans la phase la plus critique de montée et descente du véhicule. Les essais d'embarquement, de débarquement et de freinage ont été réalisés sur un large échantillon de sujets montés à bord d'une maquette mobile à l'échelle 1. Ces tests ont montré que la plupart des personnes à mobilité réduite, y compris les utilisateurs de fauteuils roulants, pourront utiliser ce système sans risque. Quelques handicaps de la marche nécessiteront l'arrêt en station, ce qui a été imaginé dès la conception du système. En effet, en cas de nécessité, il est prévu de pouvoir demander l'arrêt d'une cabine en station par l'intermédiaire d'un bouton d'appel sur le quai. De plus, cette expérimentation a conduit à quelques améliorations d'aménagements intérieurs tels qu'une barre d'appui, des interphones et des panneaux signalétiques.

Ces quelques exemples montrent l'intérêt de la prise en compte des problèmes d'accessibilité. Cette démarche doit imprégner tout le processus de conception, de fabrication et de maintenance des systèmes. Grâce au processus de réflexion et de coordination sur les systèmes, tant dans le domaine de l'infrastructure que du matériel roulant, il est possible de garantir une accessibilité optimale à un coût beaucoup moins élevé.

Sur les autres systèmes de transport guidé sur rail, l'accessibilité dépend essentiellement du type de matériel roulant et de la géométrie des quais de stations. Le métro parisien, conçu dès le début du siècle, n'a pas une bonne réputation pour l'accès au système surtout au niveau de la montée et de la descente. De même, le Réseau Express Régional ou R.E.R., de conception plus récente, n'a pas intégré ces paramètres. Cependant, certaines stations possèdent une plate-forme électrique permettant de faire gravir les marches à un fauteuil roulant. Mais, ce dispositif réclame la présence d'un agent RATP pour sa mise en oeuvre, ce qui risque de marginaliser la personne à mobilité réduite. L'accessibilité des véhicules de chemin de fer des grandes lignes est tout aussi problématique. Cependant, bien des efforts ont été réalisés pour l'accès aux gares, grâce aux lois portant sur l'aménagement des bâtiments publics. Dans le cas de la montée/descente du véhicule, il existe une plate-forme dont l'installation et l'utilisation ne passent pas inaperçues. Avec l'arrivée des T.G.V. dits "DUPLEX", à deux niveaux, c'est l'ensemble de la plate-forme au niveau de l'entrée du wagon qui se soulèvera pour se mettre au niveau du quai, la lacune entre le plancher du véhicule et le quai restant à combler avec une palette.

En matière de lacunes, même si les paramètres d'accessibilité restent problématiques pour les trains, sont acceptables pour les métros type urbain (sauf pour les stations en courbe) voire excellentes pour le VAL et certains tramways. Il convient de noter que le guidage leur confère une reproductibilité des paramètres d'accessibilité.

1.3.2 Les autobus guidés

Serait-ce pour copier le "grand frère" transport guidé que les autobus urbains ont adopté le guidage ? En réalité, la problématique est différente. En matière d'installations fixes dans les transports urbains guidés, les termes "station" et "quai" sont cités ; alors que pour l'autobus urbain, les termes "point d'arrêt" et "trottoir" sont utilisés. Le transport guidé de type VAL, métro ou tramway est donc considéré comme un transport à part entière bénéficiant de sa propre terminologie et de sa propre infrastructure. Pour l'autobus urbain, le terme de "point d'arrêt" ne fait aucunement référence à des équipements quelconques d'accueil ou d'information, contrairement celui de "station" qui évoque immédiatement pour les utilisateurs un certain niveau de prestation. De plus, le terme de "trottoir" laisse à penser que l'usager passe du statut de passager d'un véhicule routier à celui de piéton, mais il n'existe ni connotation de service rendu ni de multimodalité. Comme le véhicule se trouve le plus souvent prisonnier de la circulation urbaine, l'image de l'autobus urbain se trouve dévalorisée, et il demeure d'ailleurs le parent pauvre des transports publics.

En effet, il est souvent utilisé en complément de réseaux d'armature tels le métro ou le tramway et permet ainsi de compléter le maillage du réseau de transport public d'une agglomération. En conséquence, l'amélioration de son accessibilité ne peut que favoriser son image et donc augmenter sa fréquentation.

La revalorisation de l'image de l'autobus urbain pour le hisser au niveau de la qualité de service offerte par les transports guidés, peut passer par l'adoption d'une des fonctions qu'est le guidage [HAY - 93]. L'avantage du guidage est la possibilité pour le système de posséder son propre site, ce qui a pour effet immédiat de le soustraire au trafic automobile urbain et d'offrir une meilleure ponctualité. De plus le confort dans un autobus guidé, comme pour les autres véhicules guidés, est supérieur à celui des autobus traditionnels. Par ailleurs, les systèmes de bus guidés peuvent, aux extrémités de ligne, quitter leur guidage pour assurer une desserte fine permettant d'irriguer le tissu urbain, et de retrouver ainsi toute la flexibilité d'un autobus. Enfin, vis à vis des usagers, le système en site réservé permet de marquer l'espace du transport public dans la ville.

Cependant, le confort intérieur de l'autobus ne dépend que de l'habileté et des méthodes de conduite de son pilote. Quant à l'accès au mode de transport et au point d'arrêt, il dépend essentiellement de l'environnement urbain. Pour la montée/descente de l'autobus, le dernier avantage du bus guidé est son parfait alignement le long des quais de station et apporte une amélioration de l'accessibilité en terme de lacune horizontale. La lacune verticale est également améliorée par une surélévation du quai et un véhicule à plancher surbaissé.

Les systèmes allemand et belge présentés ci-après ont été conçus afin de bénéficier de tous ces avantages.

1.3.2.1 Le projet SPURBUS

C'est dans les années 70, sous l'égide du Ministère Allemand de la Recherche (BMFT), le programme SPURBUS a vu le jour. L'objectif affiché n'était pas la recherche d'une meilleure accessibilité, mais de réduire la largeur des voies réservées aux autobus et de permettre à ceux-ci d'emprunter les voies de tramways, notamment dans les tunnels. Deux concepts ont été menés en concurrence : le guidage mécanique développé par Daimler-Benz connu sous le nom de O-Bahn (O pour Omnibus) et le guidage électronique à partir du champ électromagnétique créé par un câble enterré dans la chaussée.

A partir de 1976, ce système a été développé par Daimler-Benz et Ed Zublin A.G., sur une piste d'essais à Rastatt, dans un premier temps. En 1979, l'exposition IUA 79 de Hambourg a donné l'occasion d'une démonstration publique. En anglais, le nom du système, Kerb Guided Buses (KGB), signifie bus guidés sur une bordure. Le guidage est assuré par des roues horizontales dépassant de la caisse de 5 centimètres et roulant sur des murets verticaux qui longent les pistes de roulement. Il existe à ce jour deux réseaux dans le monde utilisant le système O-Bahn : Essen en Allemagne et Adélaïde en Australie.

Dans la mouvance des autobus guidés, deux expérimentations copiant le principe de guidage du O-Bahn, sont à remarquer. La première se déroule en Grande Bretagne, à Birmingham, sur quelques centaines de mètres. La seconde eût lieu au Japon, sur une piste d'essais de 1000 mètres, en prévision de l'installation d'un tel système appelé Guideway Bus System sur un tronçon de 7 kilomètres en viaduc, dans la ville de Nagoya pour 1999.

Ce système prévoyait une bonne accessibilité en station puisque la lacune entre le plancher de l'autobus et le quai de station est faible mais surtout constante dans le temps, à cause de la nature même du guidage.

Le deuxième concept du projet SPURBUS, le filoguidage [*Annexe 1.1*], a été expérimenté en 1985 sur un tronçon de ligne d'autobus dans la ville de Fürth en Allemagne. Le principe de filoguidage nécessite un fil conducteur enfoui dans le sol qui parcouru par un courant basse fréquence, crée un champ magnétique. Sur le véhicule filoguidé, plusieurs bobines mesurent ce champ magnétique à droite et à gauche de l'axe représenté par le fil. Le véhicule se trouve sur la bonne trajectoire lorsque la valeur des deux mesures est équilibrée (identiques).

Dans le cadre de SPURBUS, ce procédé a été abandonné au profit du système mécanique réputé pour sa fiabilité. Hormis l'utilisation de cette technique dans le domaine industriel des chariots automatiques, le filoguidage est utilisé actuellement pour l'exploitation du Tunnel sous la Manche par des véhicules circulant dans le tunnel de service. Ces véhicules, fournis par AEG Daimler Benz et appelés STTS, transportent alternativement des conteneurs de maintenance, de secours ou d'incendie. L'intérêt du filoguidage permet une vitesse élevée, jusqu'à 80 km/h, dans un tunnel de faible diamètre avec des possibilités de croisement de véhicules.

1.3.2.2 Le système GLT (Guided Light Transit)

Actuellement en France, dans les villes moyennes, les autorités organisatrices de transports collectifs réfléchissent sur la conception d'un nouveau type de système de transport. Le but est de trouver un système de transport, satisfaisant les besoins d'une ville moyenne et offrant un confort et une accessibilité comparable au tramway. Le coût sera évidemment

supérieur à celui du bus mais devra être inférieur à celui du tramway. Ce système situé entre l'autobus urbain et le tramway est appelé dans les milieux du transport : "le système intermédiaire".

La division belge B.N. (la Brugeoise et Nivelles) du constructeur Bombardier Eurorail a conçu, dès 1985, un matériel roulant appelé GLT. Ce véhicule, qui tient à la fois du tramway sur pneumatique et du trolleybus guidé par rail, fonctionne sur un site expérimental situé à Rochefort dans les Ardennes belges.

Le véhicule de conception ferroviaire est doublement bi-mode. Il fonctionne en mode routier tel un autobus et en mode guidé par un rail tel un tramway. Il est exploité en alimentation directe sur une caténaire par l'intermédiaire d'un pantographe ou en alimentation embarquée grâce à un alternateur couplé à un moteur diesel situé à l'arrière du véhicule.

En ce qui concerne l'accessibilité, le système GLT peut offrir une lacune minimale en station comme tous les systèmes de transport guidé. La prochaine génération de matériel roulant offrira un plancher bas intégral à 350 mm de la chaussée, 2 doubles portes par caisse et l'absence d'estrade pour les sièges passagers.

Il n'existe à ce jour, aucune ligne régulière en exploitation commerciale équipée du système GLT. Cependant, la ville de Caen a retenu ce système comme transport en site réservé pour équiper une ligne dès 1998. Caen devient ainsi la première ville en France à s'équiper d'un système intermédiaire. L'avenir dira s'il s'agit du début d'un nouveau mode de transport ou d'une simple expérience.

Signalons enfin l'apparition sur le papier de nouveaux systèmes intermédiaires guidés par un rail central, à l'image du GLT ; le système Translohr développé par la société Lohr, constructeur de poids lourds spécialisés, et le système intermédiaire développé par De Dietrich.

Si l'accès aux stations est dépendante de l'environnement urbain, si le confort à l'intérieur du véhicule dépend du conducteur du véhicule, il est un domaine où des améliorations sensibles peuvent être réalisées : c'est au niveau du point d'interface qui représente le lieu d'échange. L'accessibilité du véhicule est amendée grâce à la réduction de la lacune verticale (marche) et de la lacune horizontale.

Enfin, il convient d'observer le mode autobus urbain ainsi que sa caractéristique "accès au véhicule". Ceci a été réalisé dans le cadre d'une étude du projet GIBUS [DEB - 93] menée en 1993 par l'INRETS.

1.4 L'AUTOBUS URBAIN : CONSTAT ET ETUDE VIDEOGRAPHIQUE

L'autobus urbain est le mode de transport collectif le plus utilisé dans nos villes. Pour apprécier son accessibilité, il est nécessaire de préciser son environnement et les différents types de points d'arrêts existants. Les autobus se garent le long des arrêts grâce à une manoeuvre appelée "accostage", phase de conduite que l'étude vidéographique a permis de mieux appréhender.

1.4.1 Le constat

Aujourd'hui, l'autobus urbain se heurte à un problème de mauvaise image à cause de son fonctionnement sur site partagé (le véhicule se trouve souvent prisonnier de la circulation urbaine). Aux arrêts, le stationnement illicite de véhicules particuliers empêche l'autobus de s'approcher pour effectuer l'échange de voyageurs. Piloté par un être humain, le bus doit naviguer au milieu du trafic routier et tenter de s'arrêter au plus près des quais.

La multiplicité étonnante des types d'arrêts mérite quelques explications et définitions. Un arrêt d'autobus est un emplacement réservé situé en bordure de la voirie sur laquelle circulent les autobus et sert de lieu d'échange des passagers. Le conducteur s'arrête à ce point en cas de demande venant de l'intérieur (bouton "arrêt demandé") ou de l'extérieur grâce à un signe réalisé par le passager en attente sur le trottoir. A Paris, même sur les nouveaux arrêts d'autobus RATP, il existe toujours une petite pancarte indiquant "Faire signe au conducteur". L'équipement minimal requis pour une telle installation est un poteau sur lequel figure le numéro de ligne, la destination et le nom de l'arrêt. D'autres informations peuvent également y figurer ; par exemple, le schéma de la ligne, les horaires de passage, les points de vente de titres de transport les plus proches et le plan simplifié du réseau. Dans certains cas, un système d'information dynamique, appelé S.A.I. (Système d'Aide à l'Information) affiche en temps réel l'heure de passage des deux prochains autobus.

Souvent, un point d'arrêt d'autobus est équipé d'un abri couvert qui permet aux voyageurs en attente de se protéger des intempéries. Cet équipement, appelé abri-voyageurs, offre au minimum un banc et un panneau d'information.

Les arrêts d'autobus présentent différentes configurations compte tenu de l'environnement urbain. Il existe deux grands types d'arrêt : les arrêts sur voie de circulation et les arrêts hors voie de circulation dits en "évitement". Les paramètres qui les différencient concernent la position de l'autobus vis-à-vis du trafic urbain, la trajectoire du bus pour la manoeuvre d'accostage, l'emplacement réservé aux passagers en attente, le type de véhicule standard ou articulé utilisé pour l'exploitation qui va déterminer la longueur d'emprise de l'arrêt. Afin d'assurer la sécurité des piétons et des voyageurs, l'implantation des arrêts d'autobus est réalisée en sortie de carrefour et/ou en aval d'un passage piétons. Cependant, les configurations locales ne permettent pas toujours de respecter cette recommandation. Chaque implantation d'arrêt est un cas particulier.

1.4.1.1 Arrêt sur voie de circulation

Le véhicule n'a pas de manoeuvre d'approche à effectuer pour arriver au point d'arrêt. Il reste en ligne et n'a aucune difficulté à se réinsérer dans la circulation, puisqu'il occupe une partie de la voirie.

Il existe deux cas de figure pour l'arrêt sur la voie de circulation :

- Les dimensions de la voirie permettent une avancée du trottoir, on parle d'arrêt en saillie. Dans ce cas, la longueur de l'arrêt et du zigzag doit être de 13 à 15 mètres pour un autobus standard et de 18 à 20 mètres pour un autobus articulé.

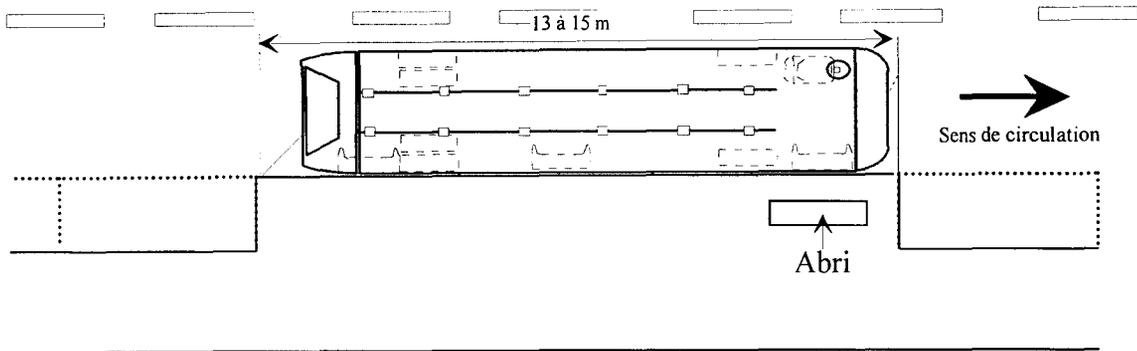


Figure I-2 . Arrêt en saillie

- La configuration de la voirie ne permet pas un élargissement du trottoir, on parle d'arrêt en ligne. Dans ce cas, la longueur de l'arrêt et du zigzag doit être de 40 mètres pour un autobus standard et de 50 mètres pour un autobus articulé.

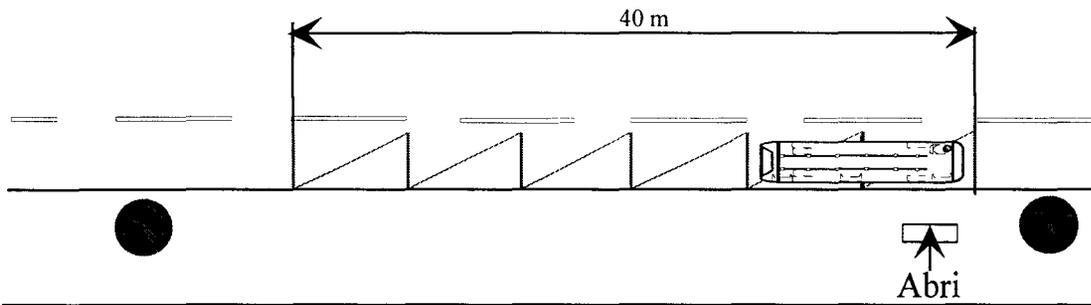


Figure I-3 . Arrêt en circulation

L'intérêt est de faciliter l'accès aux autobus en rendant théoriquement impossible le stationnement illicite à proximité de l'arrêt.

1.4.1.2 Arrêt hors voie de circulation

Cet arrêt nécessite une manoeuvre d'approche et de réinsertion en circulation. Il permet l'arrêt et le positionnement des portes le long du trottoir. La longueur minimale nécessaire est de :

- 40 mètres pour une ligne équipée de matériel standard, soit 10 mètres en aval du poteau ou de l'abri, et 30 mètres en amont.
- 50 mètres pour une ligne équipée de matériel articulé, soit 10 mètres en aval du poteau ou de l'abri, et 40 mètres en amont

L'autobus modifie sa trajectoire pour venir s'arrêter le long du trottoir. C'est la solution retenue en 1970 du "tout pour l'automobile". Elle est connue sous les dénominations d'arrêt "en évitement" ou "en encoche". Comme le montre la figure suivante, l'arrêt en encoche correspond à une emprise importante sur le trottoir.

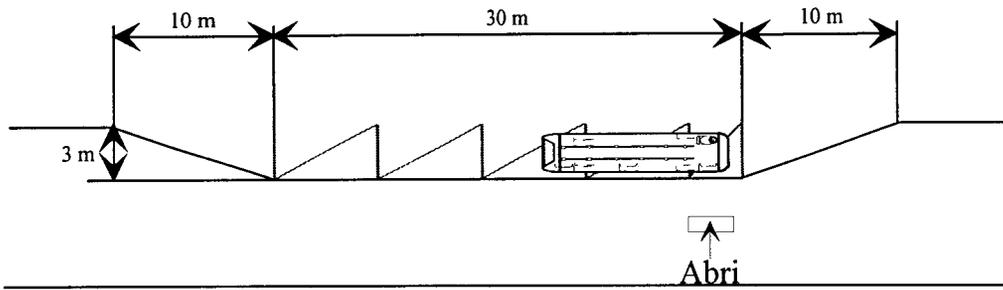


Figure I-4. Arrêt en encoche

Quant à l'arrêt en évitement, il est encadré par des places de stationnement

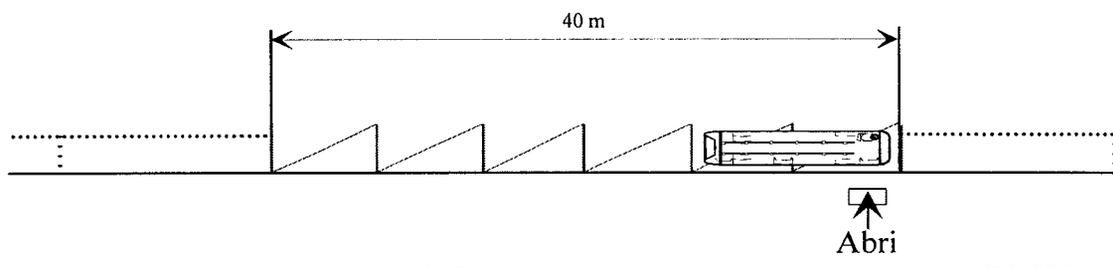


Figure I-5. Arrêt en évitement

La zone d'attente pour les passagers est gagnée sur le stationnement dans le cas d'un arrêt en saillie. Elle n'est pas modifiée pour un arrêt en circulation. Par contre, elle est réduite pour les arrêts hors circulation (arrêt en encoche et arrêt en évitement).

L'exploitant d'autobus rencontre le phénomène de stationnement parasite le long ou en amont et aval des arrêts. Cette entrave à la circulation des véhicules de transport en commun empêche le conducteur de se rapprocher du quai. La manoeuvre d'accostage étant plus délicate et plus longue, elle ne permet pas toujours à l'utilisateur d'utiliser le bus en toute sécurité et confort. De plus, la durée des arrêts est allongée.

Pour lutter contre cette forme de stationnement, il faut, d'une part, des aménagements physiques du type protection par des bornes rétractables ou hauteur du quai de station dissuasive et d'autre part, l'application d'un système suivi de verbalisation visant à empêcher les stationnements et arrêts illicites sur toute la distance nécessaire à l'accostage de l'autobus. C'est pourquoi les arrêts en voie de circulation qui rétrécissent cette voie de circulation, ralentissent ou arrêtent le trafic au moment de l'échange de voyageurs, ont l'avantage d'éviter le phénomène partiellement de stationnement illicite.

En France, le choix préférentiel des exploitants s'oriente vers un arrêt en saillie qui présente des avantages indéniables tels que l'élargissement de la zone dédiée aux piétons en attente, la facilité d'accès au bus, et donc, la réduction de la charge de travail du conducteur. Il est même noté un gain de temps pour l'accostage, un confort amélioré pour les passagers du bus dû à la réduction des manoeuvres de braquage et un gain d'environ trois places de stationnement autorisé aux voitures. Mais, l'aménagement de ce type d'arrêt n'est pas toujours possible ; l'arrêt en ligne est aussi retenu avec les mêmes avantages.

Après ce constat académique sur le problème de l'environnement de l'autobus urbain, une étude a été menée pour filmer et analyser la manoeuvre d'accostage dans le cadre du projet GIBUS.

1.4.2 L'étude vidéographique

1.4.2.1 Le dispositif expérimental

L'objectif de cette étude est l'analyse des mouvements des autobus au voisinage des arrêts afin d'observer les comportements d'approche des conducteurs et de les quantifier, selon différentes conditions de trafic et d'environnement. Cette expérimentation a été menée en 1993 par l'INRETS-LESCO [DEJ - 2.93] en liaison avec la SEMITAG et la Ville de Grenoble.

Afin de simplifier la combinatoire, l'étude vidéographique n'a retenu que trois arrêts : un en encoche (Argouges) et deux en saillie (Bon Pasteur et Foch). Le dispositif expérimental comprenait un matériel vidéographique embarqué sur une nacelle à 9 mètres au-dessus du sol. Des mires servant au repérage ont été disposées le long du trottoir et sur la carrosserie des autobus.

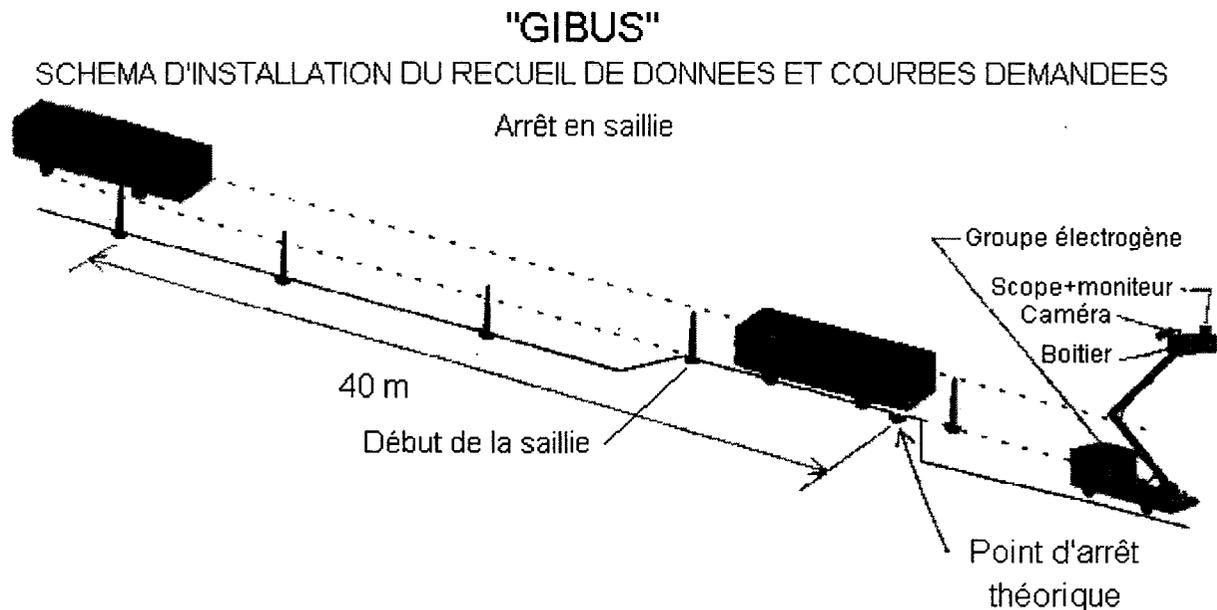


Figure I-6. Schéma de principe de l'expérimentation

Ce dispositif a filmé les manoeuvres d'accostage des bus sans que leurs conducteurs ne soient informés. Il a quantifié cinq paramètres :

- le temps d'arrêt en station qui permet l'échange des voyageurs,
- la position longitudinale du bus permettant d'apprécier la précision d'arrêt en prenant comme référence la tête de l'abri-bus,
- la lacune horizontale en fonction de la position longitudinale sur une distance de 40 mètres en amont du point d'arrêt. Cette information permet de visualiser la trajectoire de l'autobus qui se rapproche du quai,
- l'angle du bus par rapport au trottoir afin d'observer son alignement,
- la variation de vitesse (décélération) sur une distance de 35 mètres afin d'appréhender la vitesse d'accostage.

L'expérimentation sur près de 50 passages de bus étant réalisée sans perturber l'exploitation normale des bus, les éventuels conflits routiers venant perturber l'accostage ont été notés, au cours des mesures. Le dépouillement semi-automatique a été réalisé à partir des bandes vidéo recueillies.

1.4.2.2 Les résultats

D'une manière synthétique et dans le domaine sur l'accessibilité, les résultats de cette expérimentation amènent quelques commentaires.

- Temps d'arrêt

Le temps d'accostage et d'approche jusqu'à l'arrêt du véhicule est très faible : de l'ordre de 10 à 15 secondes.

- Position d'arrêt longitudinale

Aux arrêts Argouges et Bon Pasteur, la position du bus en longitudinal présente une grande dispersion. La stratégie des conducteurs privilégie un point d'arrêt positionnant la porte avant du véhicule au niveau de l'abri-voyageurs. Cependant, à l'arrêt Foch, les conducteurs ont tendance à dépasser le niveau de l'abri-voyageurs.

- Lacune horizontale

Les moyennes rencontrées sont de 0,49 m pour l'arrêt en encoche Argouges, 0,68 m pour l'arrêt en saillie Foch et 0,40 m pour l'arrêt en saillie Bon Pasteur, mais avec des valeurs minimales de 0,11 m et 0,12 m.

Ces différences de moyennes semblent dues plutôt aux problèmes de trafic qu'aux problèmes de géométrie d'arrêt. A l'arrêt en saillie Foch avec stationnement autorisé de part et d'autre, la moyenne et l'écart type sont très élevés. D'ailleurs dans 60 % des cas, au moins un voyageur a dû poser le pied sur la chaussée pour entrer ou sortir du véhicule.

Une lacune maximale de 30 cm est franchissable, c'est-à-dire sans poser le pied sur la chaussée par 100 % d'une population de personnes à mobilité réduite, hors utilisateurs de fauteuil roulant [OXL - 85].

- Position angulaire

Les angles mesurés sont faibles, les bus accostent en général parallèlement au trottoir.

- Variation de la vitesse d'approche

Tout en rappelant que les mesures correspondent à une moyenne calculée pour parcourir 10 mètres, les vitesses d'approche sont élevées, par exemple, de 25 à 35 km/h à 35 mètres du point d'arrêt.

Sachant que l'expérimentation s'est déroulée sans consignes particulières aux conducteurs, quelques éléments de réflexion peuvent en être retirés.

L'élément capital est le problème de conflit routier. Tout effort d'amélioration serait annihilé si l'approche de l'arrêt était impraticable, à cause de véhicules en stationnement illicite. Mais, les configurations d'arrêt sur voie de circulation permettent de limiter ces conflits.

Les mesures de lacune horizontale montrent que, hormis les problèmes de trafic routier, le conducteur est capable de positionner parfaitement son bus à quelques centimètres du trottoir et pratiquement parallèle à celui-ci. Cependant, la qualité de l'accostage est fluctuante et la valeur de 30 cm peut être dépassée.

Enfin, la vitesse d'approche de la station est élevée. En conséquence, le temps réservé aux manoeuvres d'accostage est réduit ; le conducteur reçoit une quantité importante d'informations et doit prendre rapidement ses décisions.

1.5 CONCLUSION

Après avoir posé le problème de la mobilité et de l'accessibilité dans les transports collectifs, ce chapitre donne quelques points de repère sur les difficultés qu'une certaine catégorie de la population rencontre face à une situation qui apparaît à d'autres comme banale. La prise en compte des problèmes des personnes à mobilité réduite, dès la conception d'un système de transport, est une démarche plus répandue dans le domaine des transports guidés comme le montrent les exemples du VAL, du tramway et du SK.

Bien que l'autobus soit le mode de transport le plus utilisé dans nos villes, il semble avoir un léger retard dans le domaine de l'accessibilité. Les diverses études présentées dans ce chapitre ont montré que l'autobus urbain se heurtait à deux problèmes dans le domaine de l'accessibilité :

la lacune verticale (ou marche)

Sur un autobus standard classique, la marche depuis la chaussée représente une hauteur de 35 centimètres. Ce qui rend la montée et la descente de l'autobus limitée voire impossible à un nombre non négligeable de personnes de tous âges.

la lacune horizontale

L'étude vidéographique menée à Grenoble permet d'observer l'accessibilité des autobus urbains pratiquée aujourd'hui. La lacune observée supérieure à 30 centimètres est la lacune maximale franchissable, c'est-à-dire sans poser le pied sur la chaussée par 100 % d'une population de personnes à mobilité réduite, hormis les utilisateurs de fauteuil roulant.

L'accessibilité des autobus ne peut, à ce jour, se satisfaire du niveau de prestation fournie. Il est impératif de pouvoir diminuer, voire supprimer, la marche située à l'entrée du véhicule et d'améliorer les lacunes à l'arrêt grâce à un meilleur positionnement des autobus.

Enfin il apparaît que la fonction de guidage des autobus permet d'obtenir une amélioration non seulement de l'image du mode de transport, mais également de l'accessibilité grâce à un aménagement du véhicule et du quai de station.

Chapitre II

L'AUTOBUS URBAIN : ATTENTION A LA MARCHE

Une première démarche consiste à réduire ou à supprimer la marche à l'entrée du véhicule. Les premiers dispositifs techniques mis en oeuvre pour l'amélioration de l'accessibilité l'ont été sur le véhicule. Un des paramètres importants est la hauteur du plancher du véhicule ou plus exactement la hauteur du seuil de la porte. Cette valeur est déterminante pour les dispositifs à mettre en oeuvre afin de débarquer et embarquer les passagers. Il n'existe pas de hauteur de plancher standard sur un autobus, elle peut varier de 70 centimètres à 32 centimètres. Pour améliorer l'accès au véhicule, les recherches et les fabrications en cours vont dans le sens d'une réduction de la hauteur vers une valeur "plancher" proche de 30 centimètres. Parallèlement aux aménagements des véhicules, il convient également d'intervenir au niveau de l'aménagement des arrêts.

2.1 LES DISPOSITIFS EMBARQUES

Pour chaque solution, le niveau d'accessibilité pour les personnes à mobilité réduite et pour les utilisateurs de fauteuil roulant sera distingué, en précisant les paramètres contribuant aux valeurs des lacunes.

2.1.1 Elévateur pour fauteuil roulant

C'est une solution lourde, issue directement des aménagements des minibus utilisés par les services de transports spécialisés. Elle est retenue par les réseaux urbains des Etats Unis pour répondre aux exigences de l'ADA (Americans with Disabilities Act). Les planchers de bus sont à plus de 70 centimètres du sol et l'élévateur peut être installé soit en porte avant, soit en porte milieu. Le conducteur assure la manipulation de l'élévateur. Renault Véhicules Industriels a présenté en 1989 le prototype d'une plate-forme élévatrice installée en porte

arrière. En exploitation, elle est actionnée par le conducteur qui a depuis son poste un contrôle visuel via une caméra embarquée.

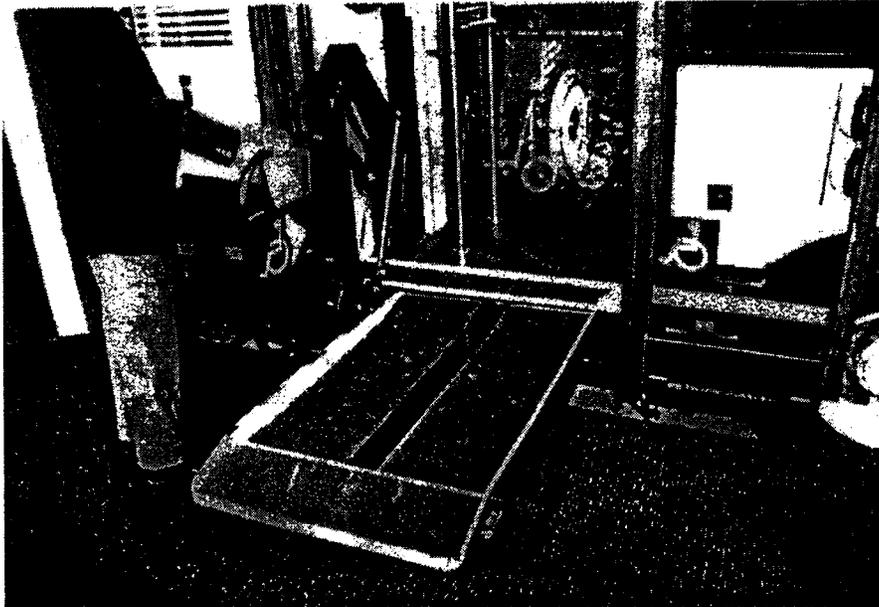


Figure II-1 . Exemple d'élévateur pour fauteuil roulant

Cette solution entraîne une augmentation importante du temps d'arrêt du bus, de l'ordre de 1 à 2 minutes. Certains exploitants limitent l'accès par élévateur aux seules personnes en fauteuil roulant. En conséquence, les personnes ayant des difficultés de motricité retrouvent l'embarquement d'un autobus classique, trois marches à franchir.

L'accessibilité n'est totale que pour les Utilisateurs de Fauteuil Roulant (UFR). Les autres personnes doivent franchir une lacune dépendant de la qualité de l'accostage et une marche dépendant de l'écart entre la hauteur de la première marche d'accès et le trottoir.

2.1.2 Emmarchement transformable et marches escamotables

Ces solutions ont pour but de transformer un emmarchement existant de façon à y intégrer un élévateur, soit de limiter la hauteur des marches. Le système d'embarquement transformable intègre des éléments mécaniques sous le plancher, mais limite la surface d'emprise à l'extérieur du bus. Déplié, ce système est un plan oblique reliant le bus au quai. Ce type de dispositif n'a été réalisé qu'au stade du prototype pour des véhicules avec un plancher de 68 et 55 centimètres. Le temps de manoeuvre complet est de 30 à 45 secondes pour monter ou descendre une personne en fauteuil roulant.

Dans l'embarquement transformable, on retrouve les mêmes critères d'accessibilité dans la plate-forme élévatrice, à savoir : une excellente accessibilité pour les UFR et aucun dispositif particulier pour les autres personnes à mobilité réduite.

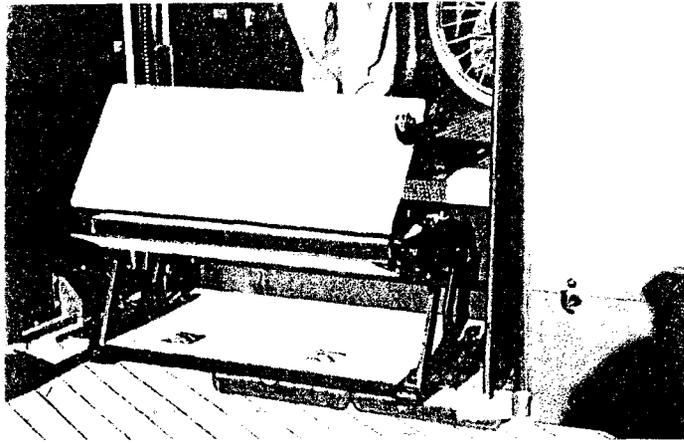


Figure II-2. Embarquement transformable en cours de déploiement

Les marches escamotables offre un accès sans marche trop haute, quelle que soit la position du bus par rapport au trottoir. Ce dispositif est une solution adoptée dans les années 80 aux Etats Unis. Mais à l'époque, il avait présenté de telles difficultés de maintenance qu'il avait dû être abandonné. Les progrès technologiques et l'ADA ont permis la mise au point d'une nouvelle génération que proposent certains constructeurs, au niveau des portes avant.

Les marches escamotables n'offrent pas d'accessibilité aux utilisateurs de fauteuil roulant. Les autres usagers doivent franchir une lacune horizontale dépendante de l'environnement et du conducteur, et une marche dépendante de l'écart entre la hauteur du plancher de l'autobus et le trottoir, voire le sol si l'accostage n'est pas réussi. Elles ne règlent donc pas totalement les problèmes d'accessibilité.

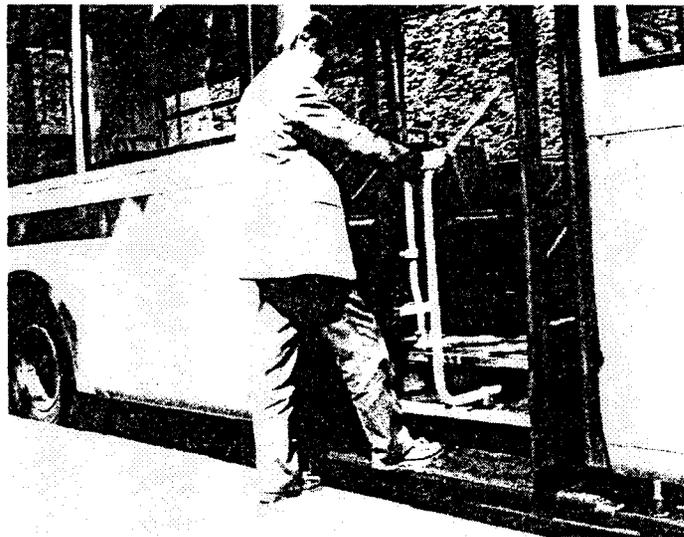


Figure II-3. Marches escamotables

2.1.3 Palette

La palette est une rampe rétractable située sous la caisse de l'autobus au niveau de la porte. En se dépliant, elle raccorde le plancher de l'autobus au trottoir. Pour offrir une pente acceptable, cette solution doit combiner l'équipement de l'autobus et l'aménagement de l'infrastructure réalisé par une surélévation de l'arrêt jusqu'à la hauteur du plancher du

véhicule. L'accessibilité ne sera garantie pour les UFR que si le bus vient accoster le long du quai.

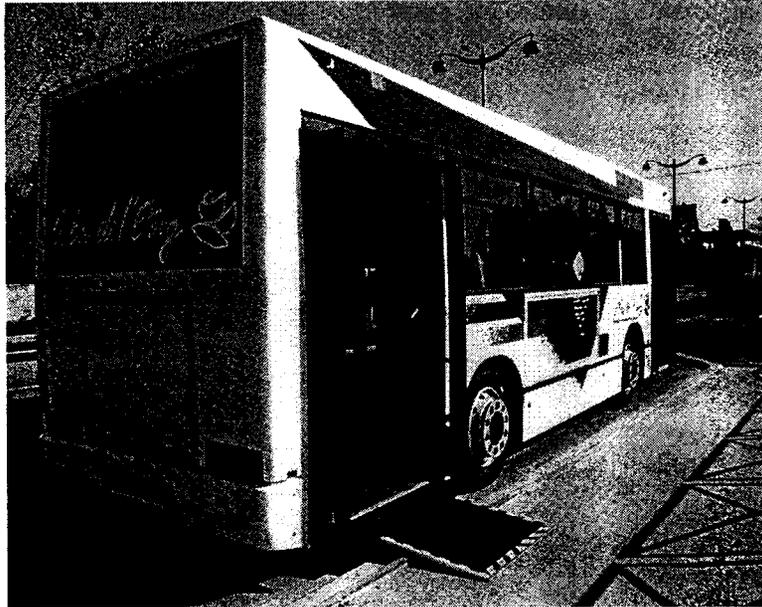


Figure II-4. Exemple de palette

A titre d'exemple, en Suède, la ville de Halmstad a expérimenté cette solution avec des autobus Volvo dont le plancher est situé à 55 centimètres du sol. Les palettes, situées aux portes avant et milieu coulissent horizontalement. Elles sont commandées par un dispositif électronique qui détecte automatiquement le quai, à l'approche du bus. L'espace entre le plancher et le quai peut être comblé à concurrence de 50 centimètres. L'accessibilité est ainsi totale mais le temps de déploiement des palettes augmente considérablement le temps d'arrêt en station. De plus, les urbanistes reconnaissent la difficulté d'intégrer dans le paysage urbain des quais de 53 à 55 centimètres au dessus de la chaussée. Cependant, la hauteur du quai surélevé présente une forte dissuasion vis à vis du stationnement intempestif de véhicules routiers au niveau de l'arrêt de bus. De plus, à Halmstad, une marche escamotable est installée sur les autobus en équipement complémentaire pour faciliter les échanges à la porte avant si l'arrêt n'est pas de type surélevé.

La vitesse de déploiement d'une palette étant de 0,1 m/s, il faut réaliser techniquement un bon compromis entre l'encombrement du mécanisme dépendant de la place disponible sous caisse et la rigidité de la palette dépendant de sa longueur. Parmi les systèmes connus, la rampe Bode a une longueur de 1,1 m pour un temps de déploiement de 12 secondes. Cette palette longue encombre le quai de la station. De plus, si le véhicule est trop proche du trottoir, la palette ne pourra pas être déployée : la distance minimale entre le bas de caisse et le bord du trottoir doit être supérieure à 4 centimètres.

A Linz (Autriche), on tient compte du faible nombre d'utilisateurs de fauteuil roulant, de l'ordre de 3 par mois, le conducteur dispose d'un autobus à plancher surbaissé, d'un système pneumatique permettant d'abaisser l'autobus de l'ordre de 8 centimètres et d'une palette portable. Cette palette logée à proximité des portes centrales est posée à la demande, au niveau de ces portes pour l'accès des UFR. La mise en oeuvre d'un tel dispositif dure de 2 à 3 minutes, temps relativement élevé.

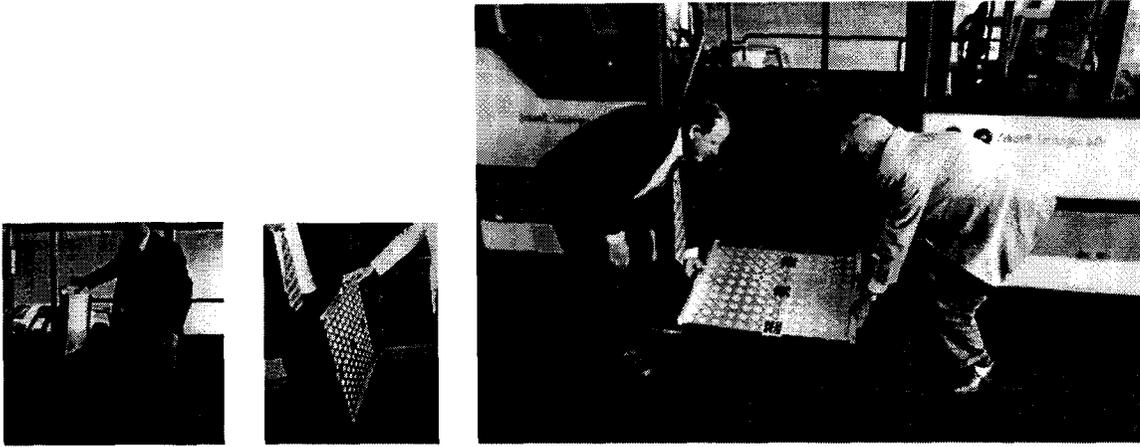


Figure II-5. Palette manuelle à Linz

Le système de palette offre donc une accessibilité totale mais présente des inconvénients : temps de déploiement et éventuellement aménagement des arrêts.

Des réflexions et des essais sont en cours à Grenoble en collaboration avec l'exploitant, Renault Véhicules Industriels et l'INRETS [DOL - 95] pour la définition d'une palette "idéale" permettant une accessibilité totale sur un autobus, équivalente à celle du tramway grenoblois.

Des essais ont été réalisés en 1994 [DOL - 95] avec un groupe de PMR afin d'étudier différentes configurations de rampes d'accès. L'objectif de cette expérimentation était de tester l'admissibilité des pentes de rampes d'accès à la montée et à la descente d'un autobus à plancher surbaissé.

Une grande appréhension due à la pente était apparue, lors de la sortie du bus de certaines palettes. Pour d'autres modèles, l'inquiétude était ressentie plutôt lors de l'entrée. De même, un ressaut même léger et une rupture de pente ont paru être des paramètres pénalisants pour certains testeurs. Certaines personnes présentes n'ont pas réussi à accéder au bus. Par ailleurs, il a été remarqué une très grande aisance des fauteuils électriques. Ces quelques données montrent que les problèmes d'accessibilité des personnes à mobilité réduite sont un combat quotidien, cependant, aucune solution parfaite n'existe à ce jour.

L'ensemble des dispositifs présentés ci-dessus ne résout pas totalement le problème de l'accessibilité des autobus. Ces systèmes ne sont en fait que des apports sur un véhicule existant, pour remplir une nouvelle fonction. C'est pourquoi, certains constructeurs d'autobus ont intégré la fonction "accessibilité", pour créer un nouveau véhicule dit "à plancher surbaissé".

2.2 AUTOBUS A PLANCHER SURBAISSE

2.2.1 Quelques chiffres

D'après la définition de l'UITP (Union Internationale des Transports Publics), l'autobus à plancher surbaissé doit posséder un plancher suffisamment bas entre les portes avant et milieu pour éviter l'emploi de marches lors de l'accès à l'espace situé entre ces portes et à leur proximité.

Le constructeur - carrossier allemand Néoplan a été le premier à développer le concept d'autobus à plancher surbaissé. Grâce à la réalisation d'un nouveau type de suspension, la hauteur du plancher est réduite à 35 centimètres environ par rapport à la chaussée avec un plancher plat sur la moitié de la surface. L'accès au véhicule se fait presque de plain-pied, en l'absence de marches, sur une partie de l'autobus, compte tenu de la hauteur du trottoir. Les portes avant et milieu bénéficient de cet aménagement, la porte arrière, à cause de contraintes mécaniques, est atteinte en gravissant quelques marches, ce qui nécessite une rampe à l'intérieur du véhicule.

Un cahier des charges adopté par le Ministère des Transports Allemand fixe les exigences d'accessibilité des personnes à mobilité réduite afin qu'elles soient reconnues et respectées par les constructeurs et les exploitants de réseaux. Depuis 1987, les constructeurs allemands Néoplan, M.A.N, Mercedes, Setra-Kassböhler et le constructeur Den Oudsten aux Pays Bas fabriquent des autobus répondant à ce cahier des charges.

Ce n'est qu'au congrès de l'UTP (Union des Transports Publics) en mai 1995 que Renault Véhicules Industriels, le constructeur national français d'autobus, a présenté son autobus à plancher surbaissé. Cette gamme appelée AGORA offre un plancher à 32 centimètres du sol à vide, soit 30,5 centimètres en charge, ce qui est la valeur la plus basse à ce jour. Avec un marché de l'ordre de 1200 autobus vendus en France, Renault Véhicules Industriels mise sur une livraison de 350 à 400 AGORA pour l'année 1996. Chez l'industriel se trouve déjà l'autobus dit "surbaisé de deuxième génération" qui offrira un plancher plat à 34 cm sur toute la surface du véhicule, sans marche et sans pente, trois portes doubles avec accès de plain-pied situé à 32 cm du sol.

L'offre d'autobus à plancher surbaissé peut se décomposer en trois types : le midibus d'une longueur inférieure à 10 mètres offrant 40 places, l'autobus standard d'une longueur de 12 mètres offrant 110 places et l'autobus articulé d'une longueur de 18 mètres offrant 170 places. Parmi les modèles disponibles sur le marché, chez Heuliez, le bus standard Access'bus GX 317 est conçu sur le châssis de l'AGORA, l'articulé Access'bus GX 417 et le nouveau standard GX 217 sont conçus sur un châssis Volvo.

D'après une enquête réalisée [HAR - 95] pour le programme américain de recherche coopérative sur le transport (Transit Cooperative Research Program), sur un échantillon de 309 exploitants de systèmes de transport en Amérique du Nord, 72 sociétés, soit près de 25 %, envisagent d'avoir recours aux bus à plancher surbaissé pour satisfaire aux exigences de l'ADA. Parmi les offres [BAT - 92] aux Etats Unis, citons les constructeurs BIA, New Flyer, Don Manning et surtout Néoplan qui possède une usine de fabrication dans le Colorado.

En Allemagne, dès 1988, 15 % des nouveaux bus commandés étaient à plancher surbaissé ; ce pourcentage est passé à 75 % en 1994. L'offre des constructeurs allemands se décline autour d'une société appelé Evobus, filiale à 100 % de Mercedes-Benz AG, qui regroupe les deux marques Mercedes-Benz (Mannheim) et Setra-Kässbohrer (Ligny-en-Barrois). La politique annoncée par la filiale est une disparition progressive de la marque Kässbohrer en urbain au profit de l'autocar de tourisme, et une présence affirmée de la gamme O405 des surbaissés de Mercedes-Benz qui se déclinent en standard, articulé et bus au gaz. Le constructeur allemand MAN propose dans la gamme d'autobus à plancher surbaissé, un midibus (NM 152), un standard (NL 202) et un articulé (NG 272). MAN a gagné en 1994 un appel d'offres pour la livraison de 23 articulés NG 272 pour le réseau de Bordeaux.

Le constructeur suédois Scania commercialise un midibus électrique (série 11) offrant une hauteur de plancher de 23 cm. Il va proposer à la fin de 1996 sur le marché français, un autobus à plancher surbaissé qui sera fabriqué sur le site d'Angers. L'italien Iveco a également lancé, sur le marché français, un autobus à plancher surbaissé sur toute sa longueur, au deuxième trimestre 1996. Il possède un autobus surbaissé plus court à deux ou trois portes et prévoit un articulé pour l'horizon 1997. Le constructeur belge Van Hool propose une gamme très complète d'autobus à plancher surbaissé intégral : un bus à gabarit réduit (A308), un standard de 12 mètres (A300), un articulé (AG 300) et un autobus à double articulation (AGG 300) d'une longueur de 24 mètres.

Par contre au Japon, [SER - 94] le marché est moins florissant : il n'existe pas de politique cohérente en faveur des personnes à mobilité réduite et des utilisateurs de fauteuil roulant. A Tokyo, chaque année, sur un total de 1800 bus, il est noté une moyenne d'un UFR par an et par bus. Jusqu'à présent, l'utilisation des autobus pour les UFR était impossible du fait de l'étroitesse des portes. Les passagers doivent monter par l'avant et descendre par l'arrière, ce qui est rendu très difficile par les deux hautes marches à l'avant ainsi que la présence de la borne de paiement. Le bureau de transport de la mairie d'Osaka a été la première autorité à mettre en circulation en 1991 un bus à plancher surbaissé équipé d'un élévateur. La Mairie de Tokyo a adopté de tels autobus à partir de mars 1992. Le plancher a été surbaissé de 32 centimètres par rapport aux bus standards dont la hauteur de plancher est de 87 centimètres. Les marches d'accès ont été réduites à une seule au lieu de deux dans le cas des bus standards. Des essais de palettes ont été réalisés, mais sans succès, à cause du manque de place dans des rues étroites et encombrées de voitures en stationnement. La déclivité de la rampe étant forte, à cause d'une palette courte, posait des problèmes d'assistance à la montée et de sécurité à la descente. Après 19 ans d'hésitation, la mairie de Tokyo a mis en circulation des autobus équipés d'élévateurs principalement sur les lignes desservant les centres sociaux. En 1994, ces bus étaient encore en phase de tests opérationnels : les problèmes sont d'ordre financier. Un élévateur coûte 10 millions de Yen (550 kF) alors que le coût d'un bus est de 15 à 18 millions de Yen (790 à 950 kF). En dehors des problèmes de coût, ces bus rencontrent un stationnement illicite sur les arrêts, une garde au sol faible, qui, sur un terrain accidenté, peut heurter le sol lors de changement de pente.

Parmi d'autres technologies, la marche supplémentaire qui positionne la première marche (sur quatre) à une hauteur de 216 mm du sol contre 385 mm sur un autobus standard a été envisagée. Le bureau de transport d'Osaka a été la première ville à étudier la possibilité d'abaisser la hauteur du châssis lors des arrêts selon une procédure appelée l'agenouillement qui ajuste l'air comprimé du circuit de suspension. Il semble que le temps de rétablissement de la pression soit compris entre 2,8 s et 1 mn 28 s, contre un temps de 2,5 s à 10 s pour l'agenouillement. Un deuxième système permettant d'ajuster la pression des pneus est à l'étude.

Face à ces balbutiements, le Ministère des Transports a créé, le 4 février 1994, un comité d'étude sur les technologies les plus appropriées facilitant l'accessibilité. Le budget de fonctionnement est de 10 millions de Yen pour la première année ; l'objectif est la construction d'un prototype de bus qui été attendu pour juin 1996.

Au Japon, en 1994, 74 autobus à plancher surbaissé et équipés d'élévateur fonctionnaient sur un total de 64 469 bus, qui, statistiquement, laisse peu de chance à un utilisateur de fauteuil roulant d'en rencontrer un. Les transports spéciaux appelés Special

Transport System (STS) sont peu développés. La seule alternative possible est l'utilisation de taxis.

2.2.2 Agenouillement

Le dispositif "agenouillement" offre la possibilité au plancher du véhicule à l'arrêt de s'abaisser de 6 à 8 centimètres afin de se rapprocher du niveau du trottoir. Cet abaissement, agissant sur le circuit d'amortissement pneumatique, peut être réalisé sur les deux essieux laissant le plancher horizontal ou sur l'essieu avant droit impliquant une pente de 5 %, avec un gain de hauteur de 8 à 10 centimètres.



Avant agenouillement



Après agenouillement

Figure II-6. Agenouillement d'un autobus

Cette technique nécessite une réserve supplémentaire d'air comprimé au niveau du circuit d'amortissement, surtout si l'on ne veut pas pénaliser le temps d'arrêt du bus. Il faut fonctionner en temps masqué par combinaison simultanée de la manoeuvre de portes et de l'agenouillement.

Les avantages de ce système sont une hauteur de la première marche à franchir réduite, un temps de fonctionnement relativement court, voire nul, en cas de mise en oeuvre en temps masqué.

L'inconvénient de l'agenouillement : parfois, les conducteurs considèrent, à tort, que ce système les libère d'une approche optimale du trottoir. Or, si la lacune horizontale est trop importante, les personnes devront poser le pied sur la chaussée, ce qui annihile totalement l'intérêt de l'agenouillement. A contrario, si l'autobus est trop proche de la bordure du trottoir, l'agenouillement ne peut être réalisé. En effet, un dispositif de sécurité, appelé bord sensible, situé sous le seuil de la porte avant, provoque une remontée immédiate de l'autobus en cas de détection d'un obstacle. Ce système évite l'éventuel écrasement de pieds de passagers se situant en bordure de trottoir. Les recommandations du COST 322 sur cet équipement ne sont pas clairement affichées. Quant à la position française, elle met en avant l'aspect sécurité des usagers face à l'existence d'un risque, même minime, d'écrasement de pieds.

Les usagers franchissent la lacune dépendant de la qualité de l'accostage. Quant à la marche, elle dépend de l'écart entre la hauteur de la première marche et le trottoir, voire le sol,

en cas d'obligation de pose de pied à terre. L'agenouillement n'offre pas toujours l'accessibilité aux utilisateurs de fauteuil roulant, suivant la qualité de l'accostage ; la palette pourrait être ainsi justifiée.

2.2.3 L'enquête de l'UITP

Une enquête, réalisée par l'UITP (Union Internationale des Transports Publics) [COS - 94] auprès de 103 exploitants et 9 constructeurs européens permet de dessiner les grandes tendances en matière de bus à plancher surbaissé et de leur avenir.

Deux faits saillants peuvent être dégagés des résultats :

- Tous les utilisateurs considèrent l'accessibilité des bus comme une question importante. En conséquence, les fabricants produisent des modèles à plancher surbaissé.
- Il existe de nombreuses possibilités d'améliorer l'accessibilité des bus à plancher surbaissé de demain. Cependant, il serait nécessaire de développer de nouvelles chaînes cinématiques qui augmenteront les frais d'investissement. Les exploitants estiment qu'ils ne pourront pas faire face à ces frais supplémentaires et souhaitent donc des subventions gouvernementales.

Parmi les résultats significatifs, 44 % des personnes interrogées estiment que la surface de plancher surbaissé actuellement de 40 % est suffisante. Le gain en hauteur de l'agenouillement doit être de 8 cm pour 75 % des personnes. 92 % des exploitants sont prêts à accueillir des personnes à mobilité réduite mais pas des utilisateurs de fauteuil roulant. Selon le type de fauteuil et la présence ou non d'accompagnateur, 69 % à 87 % des exploitants refusent les UFR parce que pour 61 % d'entr'eux, le temps d'embarquement et de débarquement d'un fauteuil roulant aura une influence sur l'horaire. L'agenouillement est préféré à la palette, à 82 % contre 44 % ; 95 % des exploitants sont opposés à l'installation d'un élévateur pour fauteuil roulant.

Une généralisation de la fabrication d'autobus à plancher surbaissé est constatée. Sur neuf constructeurs interrogés, huit font état de bus à plancher surbaissé dans leur programme de livraison.

Le système d'agenouillement fait l'unanimité parmi les constructeurs, contrairement à la palette qui ne satisfait que 56 % d'entr'eux. Constructeurs et exploitants ont donc les mêmes préférences.

Certains problèmes se posent lors de l'utilisation des équipements embarqués : il n'est pas possible d'obtenir un agenouillement constant. L'usure des pneumatiques, le salut du véhicule au freinage, les irrégularités de la chaussée et la tolérance de réglage des suspensions sont autant de paramètres qui peuvent modifier de 70 millimètres la garde au sol du véhicule (c'est à dire la distance entre le dessous de la caisse et le sol). C'est pourquoi, une réflexion a été menée chez Renault Véhicules Industriels sur les diverses configurations rencontrées par un autobus au cours de son exploitation commerciale. Il peut arriver que le bas de caisse passe au-dessus du trottoir. De même, la hauteur de certains quais peut empêcher la sortie de la palette ou l'agenouillement de l'autobus.

Un compromis devra être réalisé, d'une part entre la longueur de la palette, la hauteur du plancher et la hauteur du quai, d'autre part, de la seule modification du véhicule est insuffisante. Il convient de considérer le binôme véhicule - infrastructure, et d'aménager des arrêts garantissant le même niveau d'accessibilité.

2.3 L'AMENAGEMENT DES ARRETS

2.3.1 Recommandations du COLITRAH

C'est assurément le COLITRAH (COmité de Lliaison pour le TRAnsport des personnes Handicapées) qui a permis, en France, la prise de conscience de la nécessité d'améliorer l'accessibilité dans les transports en commun. Ainsi, un document appelé "*Recommandations pour l'accessibilité à tous les points d'arrêt d'autobus*" [COL - 3.93] complète le document "*Argumentaire concernant les dispositions à prendre en compte pour l'aménagement des points d'arrêt d'autobus*" [COL - 1.93].

Le premier document est un mode d'emploi pour la conception d'un arrêt accessible à tous. On peut y trouver des recommandations concernant les arrêts et leur implantation, le mobilier urbain (abri-voyageurs, poteaux) et la signalisation (formes visuelles et sonores des informations données au public). Une démarche similaire est initiée en Grande-Bretagne par l'Université de Cranfield [OXL - 3.95]. Le deuxième document propose de définir les lacunes à ne pas dépasser pour un autobus arrêté à une station d'échange. Ce travail a été entériné par le Conseil National des Transports.

Le COLITRAH recommande une lacune horizontale de 80 mm avec une tolérance de 20 mm et une lacune verticale de 35 mm avec une tolérance de 20 mm comme la figure ci-dessous.

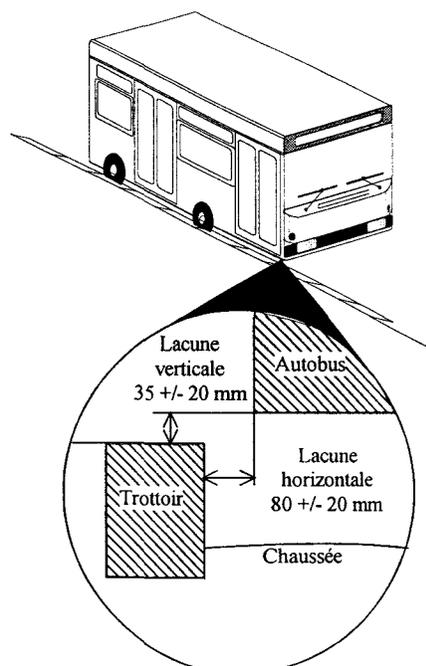


Figure II-7. Définition des lacunes

La conception du matériel, de l'arrêt (confort, signalétique, repérage), d'une approche et du stationnement du véhicule permet une montée et une descente aisées. Ces facteurs indispensables pour une accessibilité complète assurent la prise en charge de "tous les usagers" malgré leurs difficultés et la façon d'y remédier.

L'amélioration de l'accès et l'usage des véhicules ne profitent pas uniquement aux personnes à mobilité réduite mais à l'ensemble de la population. Elles contribuent donc au développement et à la promotion des transports [BRI - 95].

2.3.2 Groupe de travail de Grenoble

A Grenoble, un groupe de travail réfléchit sur les problèmes d'accessibilité, pour l'application des recommandations du COLITRAH. Il comprend des représentants du Syndicat Mixte des Transports Collectifs (SMTC), de l'exploitant SEMITAG, de la Ville de Grenoble, de la Direction Départementale de l'Équipement de l'Isère, du Conseil Général de l'Isère, de l'INRETS et d'associations ou de collectifs d'associations de handicapés (malvoyants, malentendants, utilisateurs de fauteuil roulant électrique ou mécanique...). Les constructeurs français Heuliez et Renault Véhicules Industriels y participent également.

L'étude réalisée comporte de la recherche bibliographique, des rencontres avec les associations afin d'aboutir à la proposition d'un arrêt "accessible". Ce groupe étudie l'aménagement intérieur du bus et l'insertion de l'arrêt dans la ville en liaison avec l'environnement, en particulier le raccordement avec les cheminements existants et le traitement des abords.

Ce groupe définit avec précision les caractéristiques à respecter pour un arrêt : hauteur, largeur, surface, implantation (alignement ou décalage par rapport au quai... En 1995, un prototype d'arrêt a été construit dans le dépôt d'arrêts d'autobus.

2.3.3 Quelques expériences d'aménagements d'arrêts d'autobus

L'aménagement d'arrêts d'autobus réalisé à Curitiba au Brésil est le plus original [MAR - 91]. Il consiste à placer sur le trottoir un abri en forme de cylindre appelé "TUBE du Ligeirinho". L'accès de cette station à hauteur élevée est possible par des escaliers ou une plate-forme élévatrice pour les personnes à mobilité réduite. Un employé chargé de la vente des tickets et de la gestion du tourniquet d'entrée assure l'assistance en cas de besoin. Les autobus Volvo standard classiques non surbâchés au Brésil, possèdent deux portes équipées de palettes de 50 centimètres. Les palettes sont déployées à quelques dizaines de centimètres du TUBE en se positionnant face à l'abri. Les palettes sont alors déployées entre les portes du bus et du TUBE pour assurer une parfaite sécurité.

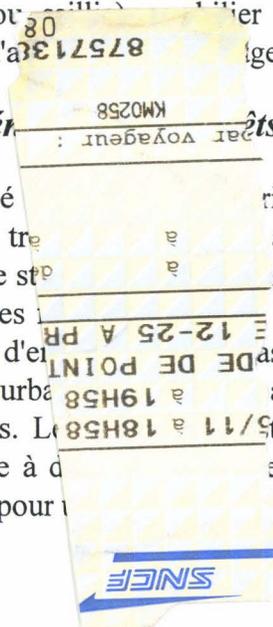




Figure II-8. TUBE du Ligeirinho à Curitiba

Aux Etats Unis, le projet ACTION [SMI - 95], support logistique de la loi ADA, a financé des actions dites à caractère technologique. L'une d'entre elles a été organisée par la SEPTA (Southeastern Pennsylvania Transportation Authority) dans l'état de Pennsylvanie. Il s'agissait de concevoir et réaliser des quais en bois partiellement surélevés et pourvus de rampes d'accès. Ces quais bon marché équipent ainsi cinq grandes gares. Cette démarche semble dérisoire mais elle prouve qu'avec un budget limité et un effort de créativité, il est possible d'améliorer l'accessibilité.

En Espagne, à Barcelone, un quai haut de 15 cm, légèrement en saillie avance de 50 cm sur la chaussée. Le réseau TCB (Transports en Commun de Barcelone) dispose d'autobus MAN surbaissés, avec des rampes courtes de 50 cm de long ou avec des rampes standard de marque Néoplan situées à la porte avant.

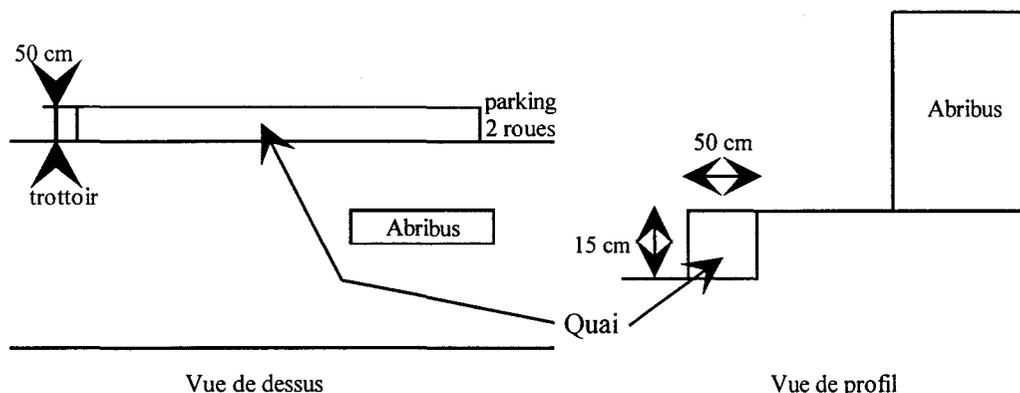


Figure II-9. Expérience de Barcelone

Il faut enfin signaler l'expérience [DEJ - 96] menée à Lorient par Via-Transport qui repose sur la création et la mise en place d'un prototype de plate-forme d'accueil de 21 cm de hauteur, modulable et mobile permettant une extension de la surface disponible de l'arrêt d'autobus.

Ces expériences très ponctuelles montrent la possibilité de rendre plus accessible les autobus urbains. Néanmoins, ces types d'aménagements à caractère expérimental

réclameraient une réflexion plus approfondie. C'est une nécessité de considérer le système de transport dans sa globalité.

2.4 CONCLUSION

L'accessibilité des transports est devenue une préoccupation importante pour tous les acteurs.

Les études se sont d'abord portées sur les dispositifs embarqués. Mais l'élévateur pour fauteuil roulant, l'emmarchement transformable, les marches escamotables et la palette présentent des inconvénients de coût et d'exploitation.

L'autobus à plancher surbaissé semblait alors être la solution idéale. Il permet, un accès de plain-pied dans le véhicule. Mais, même associé au système d'agenouillement, cet autobus ne présente pas une accessibilité totale. En effet, si la lacune verticale est bien réduite avec ce système, la lacune horizontale peut rester importante.

l'aménagement nécessaire des arrêts serait encore plus efficace s'il était associé à un dispositif embarqué ou à une meilleure conception de l'autobus (plancher surbaissé, agenouillement...).

Malgré tous ces efforts, l'accessibilité n'est pas totale. Les dispositifs étudiés permettent de régler partiellement le problème posé mais la lacune horizontale demeure toujours trop importante. Il était alors nécessaire de mettre en place une nouvelle fonction appelée "aide à l'accostage".

Chapitre III

AUTOBUS URBAINS : "COMBLER LA LACUNE"

Notre objectif est de concevoir une nouvelle fonction afférente à la conduite d'un autobus et en particulier à la manoeuvre d'accostage et de minimiser la lacune horizontale en amenant l'autobus le plus près possible du quai de station.

3.1 LES EXPERIENCES DES SYSTEMES D'AIDE A L'ACCOSTAGE

3.1.1 Les expériences menées en Allemagne

L'utilisation du système de guidage mécanique allemand O-Bahn a inspiré la RATP pour réaliser un prototype ne possédant qu'une seule roulette au niveau de la roue avant droite. Cette unique roulette entre en contact avec le quai et assure des lacunes de l'ordre de 5 centimètres. Cependant, cette expérimentation a été abandonnée face à des difficultés d'ordre mécanique lors d'essais réalisés à la RATP en 1994.

Des expériences d'accessibilité ont eu lieu dès 1987 en Allemagne à Herten, avec le premier bus à plancher surbaissé du constructeur Néoplan de Stuttgart. Dans le programme appelé "Praxis für die Praxis" (Pratique pour la pratique), six véhicules à plancher surbaissé Néoplan équipés de système d'agenouillement ont été mis en circulation sur une ligne desservant trois résidences de personnes âgées et deux hôpitaux.

Le Ministère des Transports a subventionné l'aménagement, à Boltrop³, de vingt arrêts de 20 cm de hauteur ; cependant, les conducteurs ont appréhendé la hauteur des bordures, cela a mené à des accostages de qualité médiocre présentant des lacunes importantes. Il a proposé

³ Herten et Boltrop appartiennent à un même groupement de communes

un financement pour la réalisation d'une étude sur "l'aide à la lacune" (Abstandshilfen). Cette étude, réalisée par le bureau d'études STUVA (Studiengesellschaft für Unterirdische VerkehrsAnlagen e.V.) sous la direction de M. Rogat du réseau de Herten, avait un objectif clairement affiché : réaliser un système efficace et bon marché [STU - 93] : d'où réalisation d'expérimentations et publication de travaux.

Deux systèmes ont été développés, l'un par MAN et l'autre par BOSCH. Le système de guidage MAN repose sur le principe de filoguidage avec un marquage au sol matérialisant la trajectoire et une antenne embarquée sous le bus. Les quelques informations disponibles ne disent pas si ce système a bien été testé sur site. Ce projet a été abandonné pour des raisons qui sont inconnues.

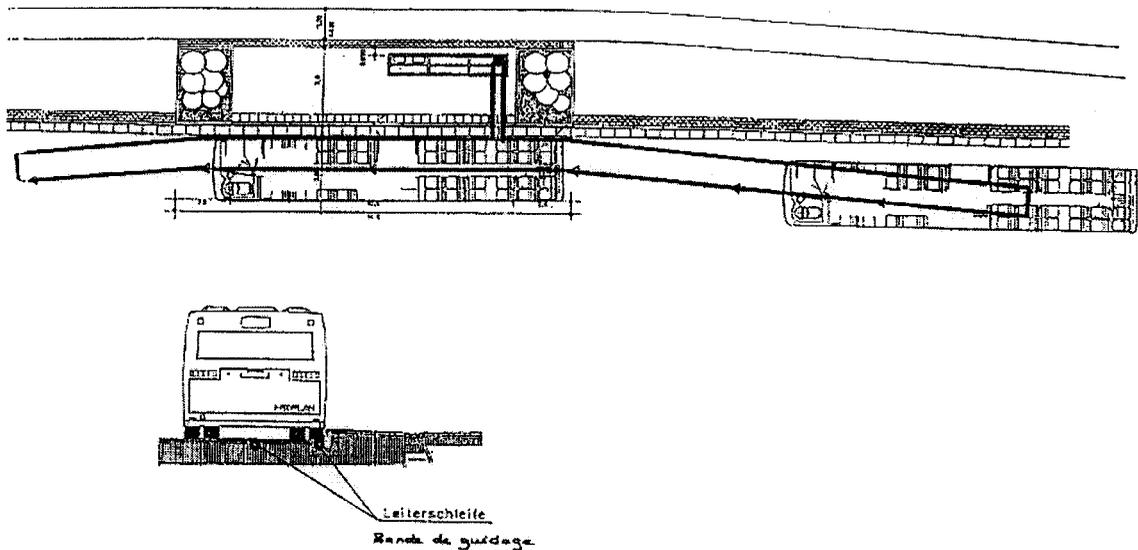


Figure III-1. Système de guidage MAN

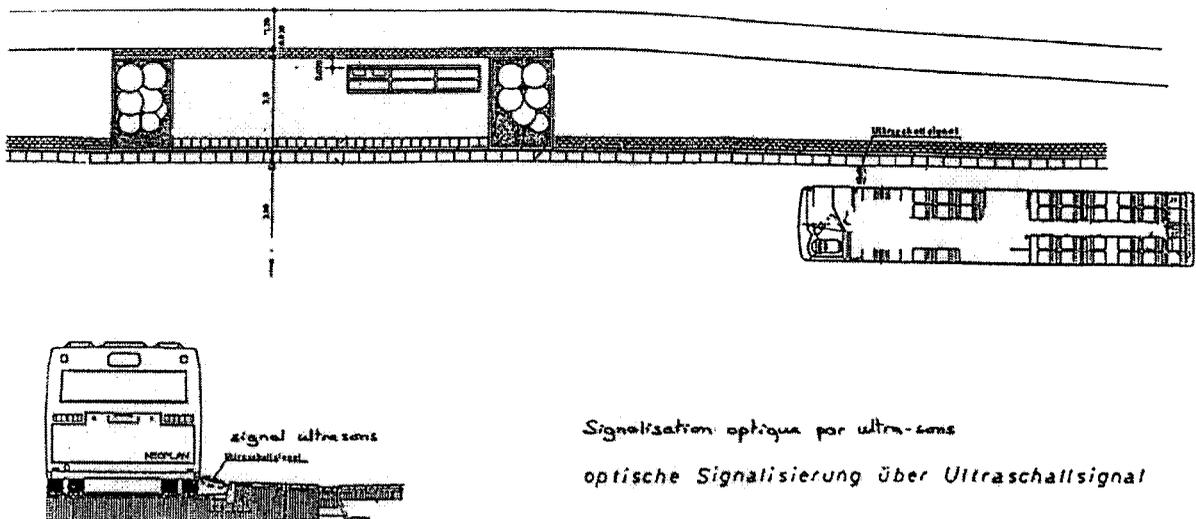


Figure III-2. Système BOSCH

Le système BOSCH, un dispositif à ultrasons, donne une information discontinue au conducteur sur la distance entre le bus et le bord du quai au moyen de trois lampes de couleur rouge, jaune et verte disposées sur le rétroviseur droit. La couleur verte annonce une distance

supérieure à 30 cm, la jaune une distance de 10 cm, la rouge une distance inférieure à 5 cm. Des problèmes de mise au point avec le système BOSCH ont nécessité la conception d'un autre système par la société Wiegand. Cette expérimentation a été arrêtée vraisemblablement pour des raisons touchant plus à l'ergonomie : l'emplacement de l'afficheur, les problèmes d'intégration du système dans les tâches de conduite et la technique proprement dite.

Les expériences n'étant pas concluantes, l'étude s'est concentrée sur l'utilisation d'une bordure lisse contre laquelle viendraient s'approcher progressivement les pneumatiques de l'autobus afin de réaliser une lacune horizontale minimale. Les fabricants Michelin, Continental et Dunlop ont levé le doute quant aux dommages que pourraient faire subir, aux flancs des pneus, les frottements à répétition contre le trottoir.

Des prototypes d'arrêts ont été construits, un en dépôt et quatre à Boltrop, sur lesquels il a été noté une bonne tenue des matériaux utilisés même à des températures de -10°C . Pendant un trimestre, un questionnaire a circulé auprès des conducteurs pour noter leurs observations. Les résultats, sur plus de cent réponses ont été globalement positifs.

La forme de trottoir spécifique permettant de minimiser le contact entre la roue et la bordure est devenue la solution allemande au problème de l'accessibilité des autobus à plancher surbaissé. Ce projet suscite beaucoup d'intérêt de la part du public et plus de 30 entreprises se sont intéressées à la fabrication en série des bordures. Actuellement d'autres villes d'Allemagne s'en équipent, par exemple Kassel (Cassel) ou Aachen (Aix-La-Chapelle) où 374 arrêts sur 813 sont pourvus de ce type de bordure. Cette solution n'en est qu'à son début puisque sur le réseau de la Vestische seuls 50 arrêts ont été modifiés à Herten sur un total de 3500.

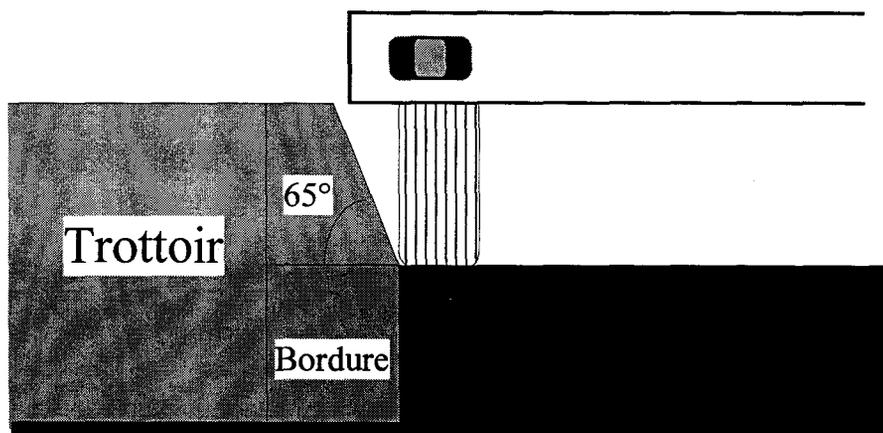


Figure III-3 . Modèle de bordure de trottoir utilisé en Allemagne

Les types d'arrêt de bus privilégiés sont les arrêts en circulation et en saillie avec des hauteurs de 18 centimètres en ligne et de 16 centimètres en courbe. Compte tenu d'un emmarchement de 32 cm et d'un agenouillement de 8 cm, ils offrent une lacune verticale de 6 à 8 cm ; les hauteurs de quais de 16 cm et 18 cm sont reconnues comme normes en Allemagne.

Les conducteurs ne bénéficient d'aucune formation spéciale pour accoster. Ils reçoivent seulement une notice d'utilisation du système "d'aide à la lacune" qui leur tient lieu de consigne. D'après nos informations, le pneu toucherait rarement la bordure. Une observation continue est réalisée par des contrôleurs. La lacune moyenne de 7 à 8 centimètres d'après

l'avis de l'exploitant à Herten, est tout à fait acceptable même pour les fauteuils électriques. Pendant une visite sur le réseau d'exploitation, il a été remarqué que les conducteurs ne "sentent" pas la bordure. Il en résulte que l'autobus monte sur le quai d'embarquement.

3.1.2 L'expérience de Caen : le système chasse-roue

A Caen, en 1990, la Compagnie des Transports de l'Agglomération Caennaise (CTAC) - Groupe VIA Transport a commencé une expérimentation de "bus plain-pied".

En associant des bus à plancher surbaissé à des arrêts aménagés en surélévation, c'est le message de la reconquête de l'espace urbain par les transports en commun qui est amorcé, dans l'optique, à moyen terme, du lancement d'un système de transport à voie réservée, le GLT.

Le système d'aide à l'accostage remplit deux fonctions principales : éviter le contact du bus avec le quai et assurer une lacune horizontale inférieure à 10 centimètres au niveau de la porte avant. Il comporte deux parties distinctes : un dispositif placé le long du quai de la station et un système d'aide visuelle au conducteur.

Les contraintes imposées au système portent sur sa polyvalence : son adaptation à tous les types de bus en exploitation à Caen, sa résistance aux agressions du climat et à l'usure, la sécurité des usagers de la voirie urbaine et, évidemment, son faible coût d'installation et d'entretien.

Le principe retenu, inspiré des guides existants dans les tunnels de lavage de véhicules, est un tube métallique de forme arrondie inséré dans une bordure. Les flancs des pneus viennent s'appuyer sur le tube sans créer de dommages sur les enjoliveurs. Plusieurs solutions ont été testées. La première, composée d'un tube métallique et d'une bordure en granit a été retenue pour un coût de l'ordre de 20 à 25 kF par station. La seconde, entièrement réalisée en béton, s'est avérée trop friable. Au niveau des arrêts équipés, les bus se présentent en ligne par rapport à leur voie de circulation ; ce qui exclut tous les arrêts situés en courbe.

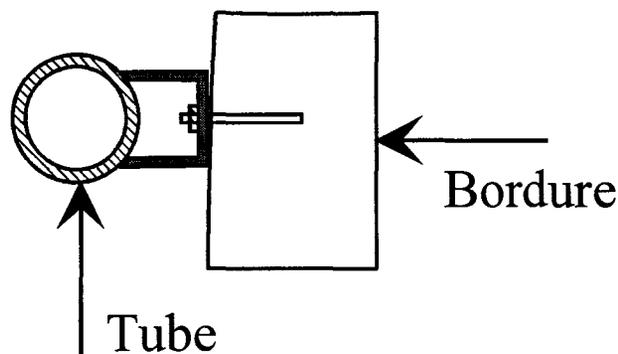


Figure III-4 . Coupe du dispositif de Caen

Le système d'aide à la conduite utilisé pour faciliter l'accostage du bus se décompose en trois parties :

- un système de visée.

Un collimateur placé sur le pare-brise avant du bus dans le champ de vision du conducteur permet de suivre, dans la phase d'approche, un repère au sol qui représente la trajectoire à suivre pour un accostage optimal.

- un repère au sol.

Le repère au sol est une ligne rouge vif qui mesure 5 centimètres de large. Elle ne dépasse pas la mesure maximale de dix centimètres imposée par le code de la route. Le tube peint en jaune le complète.

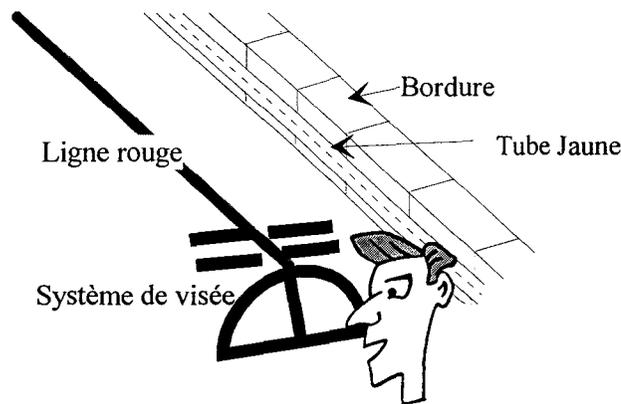


Figure III-5 . Système d'aide à la conduite

- un rétroviseur d'accostage.

Les conducteurs caennais ont réclamé un deuxième rétroviseur spécifique, afin de se rendre compte "de visu" de leur positionnement par rapport au tube jaune. Le choix d'un rétroviseur électrique permet un réglage précis et est adaptable à chaque chauffeur.

Néanmoins, il est très difficile de se rendre compte du positionnement précis. Un repère latéral a été ajouté. Il est situé près du passage de la roue avant droite, à hauteur du pare-chocs et matérialisé par un petit morceau de caoutchouc rouge, visible dans le rétroviseur.

L'expérience pilote "bus plain-pied" de Caen a été évaluée par l'INRETS [DEJ - 1.93] du point de vue des voyageurs et du point de vue de l'exploitation. Mais, reprenons ici que les conclusions concernant les aspects liés à l'exploitation.

Le système d'aide à l'accostage par guide chasse-roue et viseur ne semble pas atteindre les objectifs de très faible lacune entre la bordure du quai et le seuil d'entrée du bus ; une moyenne de 15 centimètres a été observée. Il pénalise légèrement le temps d'approche pour l'autobus surbaissé. Les conducteurs, même jugeant utile le guide-roue, restent très respectueux de leur outil de travail et évitent d'aller jusqu'au contact flanc du pneu / bordure métallique. L'arrêt surélevé, ici d'une hauteur de 25 à 28 centimètres, engendre la crainte d'endommager le véhicule (phénomène constaté chez les conducteurs allemands).

En conclusion, l'expérience de Caen démontre que, seul, un système mécanique ne peut répondre au problème de la lacune. Il semble nécessaire d'y adjoindre un système d'aide à la conduite. Ce système offrira une information continue durant toute la manoeuvre d'accostage. Toutefois, cela est encore insuffisant et doit être complété par la formation des conducteurs.

3.1.3 L'expérience d'Halmstad (Suède)

Le réseau suédois de Halmstad a choisi un véhicule Volvo en 1979 présentant un plancher à 58 cm environ du sol. Des quais surélevés à 53 cm de la chaussée ont été installés aux principales correspondances. Ils offrent une rampe et des marches pour rejoindre la zone d'attente du bus. Des palettes escamotables sur les deux portes viennent combler la lacune entre le seuil du bus et le quai.

Pour un accostage de qualité à ces arrêts, le constructeur Volvo a réalisé en 1982 un système d'aide à l'accostage, basé sur des techniques électroniques, qui permettait d'amener l'autobus le long du quai avec une action sur le volant. Ce dispositif reposait sur un filoguidage et la manoeuvre d'approche de l'arrêt était gérée de manière automatique. Les conducteurs n'avaient plus le contrôle de la direction, ni de l'accélération, ni même du freinage. Ils ne se sentaient plus maîtres de leur véhicule et refusèrent ce système.

Un dispositif électronique d'aide au pilotage et au freinage libère donc le conducteur de la charge de l'accostage mais lui laisse la possibilité, par une action sur le volant, de reprendre le contrôle du bus.

Les utilisateurs de ce système l'ont encore violemment critiqué. Il n'a pas été possible d'en connaître les raisons précises. Est-ce un manque de fiabilité, ou de trop fortes contraintes sur la direction lors de la reprise en main, ou bien encore un appauvrissement de la charge de conduite, ou bien la peur de voir le métier de conducteur disparaître ? En définitive, l'opposition a été si forte que le système d'aide à l'accostage a été supprimé.

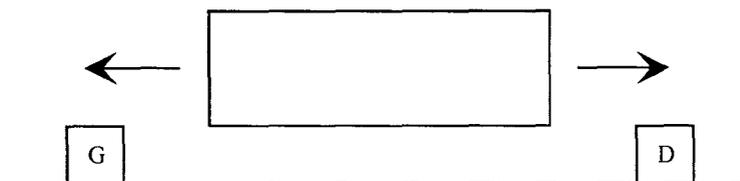
Cependant, du point de vue des passagers, cette expérience a été jugée très positive et efficace pour les personnes à mobilité réduite. Toutefois, les quais surélevés ont été difficiles à placer, notamment en centre ville. C'est pourquoi, depuis 1990, les autorités ont opté pour la solution des autobus à plancher surbaissé.

3.1.4 Le projet VISÉE

VISÉE est un projet en cours de développement dirigé par Renault Véhicules Industriels, en partenariat avec la Direction de la Recherche Renault, Matra Cap Système et l'INRETS. Un système à court terme qui assiste le conducteur pendant la phase d'accostage a été étudié, le chauffeur restant maître à bord. Ce système ne nécessite pas d'infrastructure lourde. En effet, il n'y a pas de contact physique entre le véhicule et les infrastructures. Il repose sur des techniques électroniques.

Le programme VISÉE guide l'autobus au moyen d'un système de vision embarquée : une caméra effectue la détection d'une ligne de référence tracée au sol. A bord du véhicule un calculateur traite les images et détermine le couple à appliquer à la colonne de direction. La trajectoire est donc optimisée.

Le principe retenu, basé sur le suivi de trajectoire par caméra embarquée, est dérivé du système expérimental LACETS (Lateral Control Enhancement System) développé dans le cadre du projet européen PROMETHEUS pour l'aide à la conduite. LACETS permet de surveiller la vigilance des conducteurs et l'assistance au guidage latéral en vérifiant que la voiture conserve une trajectoire conforme au tracé de la route. Pour cela, le système utilise le traitement d'images. La caméra placée sur le véhicule prend les bandes de balisage ou les trottoirs comme repères. Le système possède plusieurs niveaux d'information : visuels, sonores et kinesthésiques. L'information visuelle est projetée sur le pare-brise. Le rectangle symbolise le déplacement de la voiture par rapport aux repères droits et gauches de la route.



G et D : Repères du bord de la route

Figure III-6. Affichage du système LACETS

En cas d'hypovigilance du conducteur, l'écart par rapport à la trajectoire nominale peut devenir trop important. Une alarme sonore retentit alors pour avertir de redresser le volant. Le système LACETS existe également dans une version plus sophistiquée : lors d'un écart anormal, un actionneur situé au niveau de la direction force le véhicule à reprendre la trajectoire optimale, comme s'il roulait dans une ornière parallèle au marquage.

Le projet VISÉE a retenu ce principe dit "d'ornière virtuelle" comme système de guidage à l'accostage. Pendant la manoeuvre, le bus suit une trajectoire idéale l'amenant à une lacune minimale. Ce système offre une lacune horizontale inférieure à 8 centimètres.

Ce projet a permis la réalisation d'un véhicule roulant appelé P'0 sur une base d'autobus R 312, en 1995. Ce véhicule sera testé successivement sur site réservé où seront implantés des arrêts en encoche et des arrêts en saillie, puis sur le réseau de Grenoble, dès 1996. Un guidage basé sur des techniques optiques donne de très bons résultats, mais, pour l'instant, n'est pas applicable en milieu extérieur. En effet, l'installation en milieu urbain nécessite l'entretien des bandes blanches sur la chaussée.

Notons que ce système va vers une simplification des tâches de conduite libérant ainsi le conducteur pour des activités liées à la clientèle et à l'exploitation [DEJ - 96].

3.1.5 Bilan

Les expériences présentées précédemment ont toutes le même objectif : aider le conducteur à assurer un accostage optimal.

Le tableau N° III-1 présente une synthèse des expérimentations menées. Il indique si l'accostage est réalisé par un suivi de trajectoire ou par la mesure de distance par rapport au quai. Il informe sur les modes de conduite et de guidage : manuel, automatique ou dirigé. Il précise si le système est considéré comme une aide à la conduite pour le pilote de l'autobus. Enfin, il reprend les principes techniques utilisés pour la réalisation de la manoeuvre d'accostage.

Projet	suivi trajectoire	mesure distance	mode conduite	mode guidage	aide à la conduite	principe
MAN	oui	-	manuel	automatique	-	filoguidage
BOSCH	-	oui	manuel	manuel	oui	téléométrie
Vestische	-	-	manuel	manuel	-	bordure biseautée
Caen	oui	-	manuel	manuel	oui	bordure forme tube
Halmstad	oui	-	automatique	automatique	-	filoguidage + pilotage
VISÉE	oui	-	manuel	dirigé	oui	traitement d'images

Tableau III-1 . Comparaison des différentes expériences

Ces projets, aux caractéristiques différentes, ont donné des résultats plus ou moins concluants. Pour l'instant, aucun d'entre eux n'a été reconnu parfait. La plupart des expériences reposent sur des techniques électroniques. Il est donc nécessaire d'utiliser des capteurs pour réaliser le suivi de trajectoire et pour connaître le positionnement du véhicule par rapport au quai.

Dans la suite de cette thèse, de nouveaux projets seront présentés. Ceux-ci déterminent la position du véhicule en utilisant des capteurs. Cette étude a été réalisée afin d'acquérir une idée précise sur les capteurs utilisables dans le projet.

3.2 AIDE A L'ACCOSTAGE : CAPTEURS UTILISABLES

L'aide à l'accostage d'un autobus urbain nécessite la connaissance de la position du véhicule dans son environnement, sa progression ou son guidage jusqu'au point d'arrêt. La position du véhicule doit être déterminée avec précision. Elle est calculée de deux manières [LAM - 84]. La première possibilité est d'utiliser un repère fixe, matérialisé par l'environnement du véhicule. Ce repère ne dépend pas de la position de départ du véhicule. La seconde possibilité est d'utiliser un repère dont l'origine dépend de la position initiale du véhicule.

Afin de réaliser l'aide à l'accostage du véhicule, il est nécessaire que l'une des solutions ci-dessous soit retenue :

- Le véhicule est contraint à suivre une voie matérialisée par un ou deux rails. Le pilotage longitudinal est manuel et le guidage latéral est du type mécanique par force brute (comme, par exemple, pour le guidage des trains).

- La trajectoire à suivre est mémorisée à bord du véhicule qui se réfère à un repère fixe. Les capteurs lui permettent de connaître précisément sa position dans l'environnement. Les écarts de trajectoire sont détectés par comparaison à la trajectoire mémorisée.
- La carte du "monde extérieur au véhicule" est mémorisée à bord de celui-ci. Le véhicule, au cours de sa progression, génère périodiquement la carte de son environnement en utilisant un calculateur embarqué. Ces deux cartes sont comparées et déterminent la position précise du véhicule dans son environnement.
- Le véhicule suit une trajectoire de référence matérialisée le long de la voirie. Il est équipé de capteurs qui mesurent son écart latéral par rapport à la trajectoire désirée. Le guidage est assuré par un système de commande de direction ou un système de visualisation de l'information "distance". Le pilotage longitudinal est automatique ou manuel.

La première solution, du type "suivi de trajectoire de façon mécanique", nécessite l'installation de rail(s) sur le site pour assurer un guidage ponctuel du véhicule au niveau de la station. C'est pourquoi, cette solution ne convient pas.

Les deux solutions suivantes reposent sur la mémorisation de la trajectoire à bord du véhicule. Elles ont intéressé plusieurs auteurs : elles permettent de se libérer des contraintes d'un réseau figé mais n'offrent pas une précision aussi importante. En outre, elles demandent une connaissance précise de la position du véhicule à tout instant.

La dernière solution repose sur le suivi d'une référence au sol. C'est uniquement sur elle que sera concentré le reste de l'étude.

3.2.1 Détermination de la position d'un véhicule par rapport à une référence matérialisée

Trois systèmes essentiels sont distingués :

- Le système de référence.

Lié à un repère fixe, il matérialise la trajectoire à suivre. Perceptible par le véhicule, il lui permet de déterminer précisément sa position et son orientation par rapport à la route.

- Le système de détection.

Constitué de capteurs compatibles avec le système de référence, il mesure les informations émises qui, traitées, permettent de déterminer les modifications à apporter ou les informations nécessaires au conducteur.

- Le système de commande de direction.

Il reçoit les informations venant du système de détection. Il agit sur le véhicule (modification de la direction et/ou de la vitesse) ou restitue l'information au conducteur.

3.2.1.1 Capteur de champ magnétique

Parmi les différents procédés de guidage, celui qui consiste à mesurer la position latérale du véhicule par détection d'un champ magnétique est, sans nul doute, celui qui a généré le plus grand nombre d'études tant théoriques qu'expérimentales. Ce champ magnétique est produit par un courant basse fréquence circulant dans un câble. La détermination de la valeur du champ magnétique permet donc la connaissance de la distance au câble. Dès la fin des années 50, la *General Motors Corporation* [GAR - 60], en collaboration avec la *Radio Corporation of America*, a mené les premières recherches sur le guidage électronique à faible vitesse utilisant la détection de l'amplitude du champ magnétique. Vers la fin des années 60, le *Road Research Laboratory* [CAR - 70], le *Government Mechanical Laboratory of Japan* [ITO - 73] et l'*Ohio State University* ont appliqué cette technique. Ils ont effectué des essais à des vitesses de plus en plus élevées. Malheureusement, la perturbation de la distribution du champ magnétique, causée par les structures métalliques au voisinage du câble, ne permet pas de mesurer précisément la position latérale du véhicule. Les performances du système étaient donc insuffisantes.

Afin de remédier à cet inconvénient, Olson [OLS - 77] a étudié la précision des mesures données par plusieurs expériences. Il a comparé la mesure de l'amplitude du champ avec la détection de la phase. Pour cela, il a utilisé différents capteurs fil(s) ou bobine(s).

La précision de la mesure de la distance au fil de guidage dépend de la grandeur physique mesurée et du détecteur utilisé. Le système qui détecte la phase grâce à un fil s'est révélé être le plus performant.

Depuis, le savoir-faire dans ce domaine est devenu considérable. Cette méthode de détection de champ magnétique est fréquemment employée dans le milieu industriel (suivi de trajectoire par des robots mobiles). Elle présente une incertitude faible. En effet, l'erreur de localisation latérale est inférieure à 2 cm pour des vitesses comprises entre 0 et 20 km/h. Elle ne dépasse pas 5 cm pour des vitesses inférieures à 80 km/h. Cette méthode présente un autre avantage : elle ne dépend pas des conditions d'utilisation. Elle fonctionne aussi bien la nuit que le jour. Elle peut être employée dans n'importe quelle condition atmosphérique.

Toutefois, elle présente plusieurs inconvénients. Tout d'abord, la localisation est perturbée dans un environnement ferreux. Or, la caisse du véhicule contient du fer, tout comme certains objets qui peuvent se trouver dans l'environnement de l'autobus. De plus, l'installation ou la modification de la ligne est contraignante (tranchées sur la chaussée). Elle impose d'alimenter le fil de guidage en continu. Enfin, elle pose des problèmes de maintenance. Le passage répété des autobus au même endroit forme des ornières sur la chaussée et surtout, augmente le risque de rupture du fil de guidage.

3.2.1.2 Capteur optique

Afin de remédier aux inconvénients propres à la technique du suivi de câble, certains auteurs ont étudié d'autres systèmes de détection de la position du véhicule sur la chaussée. Par exemple, la trajectoire peut être matérialisée par une bande de peinture optique, métallique ou magnétique. Cette trajectoire n'est pas obligatoirement fermée. Il semble que la bande métallique ne soit pas envisageable car il est difficile, voire impossible de distinguer la référence des structures métalliques avoisinantes (exemple : boîte de boisson sur la chaussée).

- Peinture optique et détecteurs optiques [DEP - 90].

Le capteur le plus courant est constitué de plusieurs photodiodes fixées sous la caisse du véhicule. Celles-ci mesurent l'intensité lumineuse réfléchiée par la bande peinte. Afin de permettre l'utilisation du système dans les zones sombres, une source de lumière éclairant la bande de peinture est placée à côté des détecteurs. Les signaux issus de ces détecteurs sont traités et fournissent une mesure de l'écart latéral.

Cette méthode, bien que basée sur des systèmes simples et fiables, paraît très peu exploitable : la distance, séparant les détecteurs de la bande blanche, pour être précise, doit être faible et inférieure à 5 centimètres. Or, le tangage du véhicule pendant le freinage et la variation du nombre de passagers à bord de l'autobus, provoquent un abaissement de l'autobus. Ceci oblige à respecter une distance minimale entre le capteur et la chaussée bien supérieure à 5 centimètres.

- Peinture optique et traitement d'images vidéo.

Okawa [OKA - 93] et bien d'autres ([JELA - 92], [FRO - 89], [LAI - 93], [TAK - 87]) ont étudié et testé la localisation d'un mobile par analyse d'images. Le système de référence est toujours une bande de peinture ; le capteur principal est une caméra vidéo (ligne ou matricielle) embarquée sur le robot ou sur le véhicule. L'information recueillie par la caméra braquée vers l'avant du véhicule est numérisée puis mémorisée. La bande de peinture est reconnue grâce à sa luminosité (différente du sol).

Le traitement d'images détermine les coordonnées de la bande de peinture dans le plan-image de la caméra. Un changement de repère est ensuite opéré et permet de donner la position du véhicule. Ainsi le cap du véhicule et sa position latérale par rapport à la bande sont calculés. Dans certains cas, pendant le temps de calcul, la position est estimée par odométrie pour avoir une localisation précise.

La structure de base pour le suivi de ligne par caméra est la suivante :

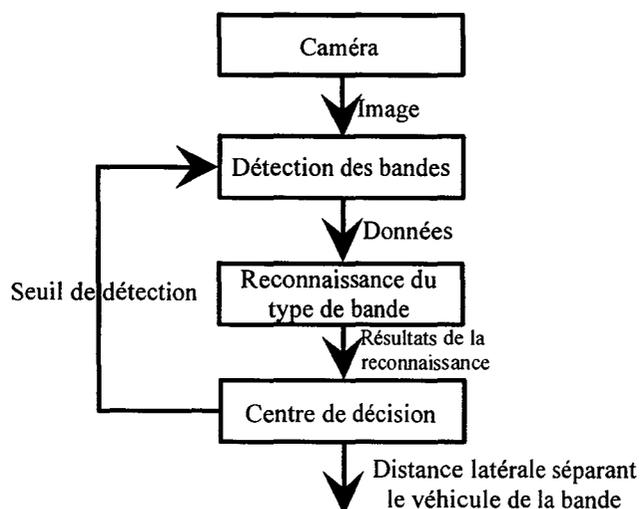


Figure III-7. Principe de détermination de l'information distance

Ce type de système de référence est facile à mettre en oeuvre et à modifier le tracé des voies. Le coût de l'installation est faible. Le temps de traitement qui a tendance à diminuer n'est pas à ignorer dans une application telle que la localisation latérale. L'erreur de position peut être faible, surtout quand la vitesse est petite. Cependant, ce système est difficilement exploitable dans un environnement naturel car la peinture se dégrade sous l'action des intempéries et du passage répété des véhicules.

- Peinture magnétique.

Une bobine pourrait être utilisée comme détecteur dont les variations d'inductance seraient mesurées sous l'effet d'un champ magnétique [JOH - 79]. Une étude a donné naissance à un procédé appelé "Guideline magnétique". Ce procédé est breveté et commercialisé par la société M.T.M. [MTM - 93]. Le principe physique utilisé pour la détection de pistes ou de balises est la mesure de la perméabilité magnétique. Le procédé "Guideline" utilise comme paramètre la perméabilité magnétique de la ferrite, dont le caractère intrinsèque évite toute altération des performances dans le temps. La trajectoire à suivre est matérialisée par un dépôt de ferrite sous forme de peinture, d'une gaine incluse dans la chaussée, d'enduit bitumineux coulé dans une saignée (de 1 cm de large et de 3 cm de profondeur), de ruban collé sur la chaussée ou de mortier sur support en béton ou en pavés. Le détecteur de position utilise un capteur fonctionnant en tout ou rien qui mesure la perméabilité magnétique du milieu. Celui-ci détecte la présence ou l'absence de matériaux magnétiques. Un système à microprocesseurs permet, à partir des signaux détectés, de connaître la position de la piste par rapport au capteur et ainsi de réaliser le guidage de véhicules.

Les mêmes avantages que pour le filoguidage avec, cette fois-ci, une référence passive (non-alimentée électriquement) sont retrouvés, mais aussi les mêmes inconvénients. De plus, se pose le problème de distance entre le capteur et les plots ou la bande magnétique. Comme pour la peinture avec les détecteurs optique, cette distance doit être faible, ce qui n'est pas réalisable.

3.2.1.3 Capteur de distance

Les capteurs de distance sont basés sur deux techniques de mesure :

- la durée de propagation de l'onde (sonore ou lumineuse) dans l'air.
- la méthode de triangulation.

Le radar hyperfréquences latéral et le capteur à ultrasons utilisent une méthode basée sur le temps de propagation de l'onde dans l'air. Le capteur optique utilise ces deux techniques.

- Téléométrie hyperfréquence [MAY - 82].

Lors de la détection d'un obstacle passif, le radar génère des ondes hyperfréquences ou micro-ondes qu'il reçoit après leur réflexion sur l'obstacle. Différentes méthodes sont employées pour mesurer la distance séparant le capteur de la cible. Elles sont fondées soit sur la mesure du temps de parcours d'un train d'ondes (radar), soit sur le décalage fréquentiel intervenant sur une onde pure (radar Doppler) ou modulée en fréquence (radar F.M.). Le radar utilisé par Mayhan [MAY - 82], est un radar bifréquence en bande X. Il a été testé avec deux fréquences de modulation

$\Delta f = 60 \text{ MHz}$ et $\Delta f = 300 \text{ MHz}$; le diagramme structurel du dernier est représenté sur la figure III-8.

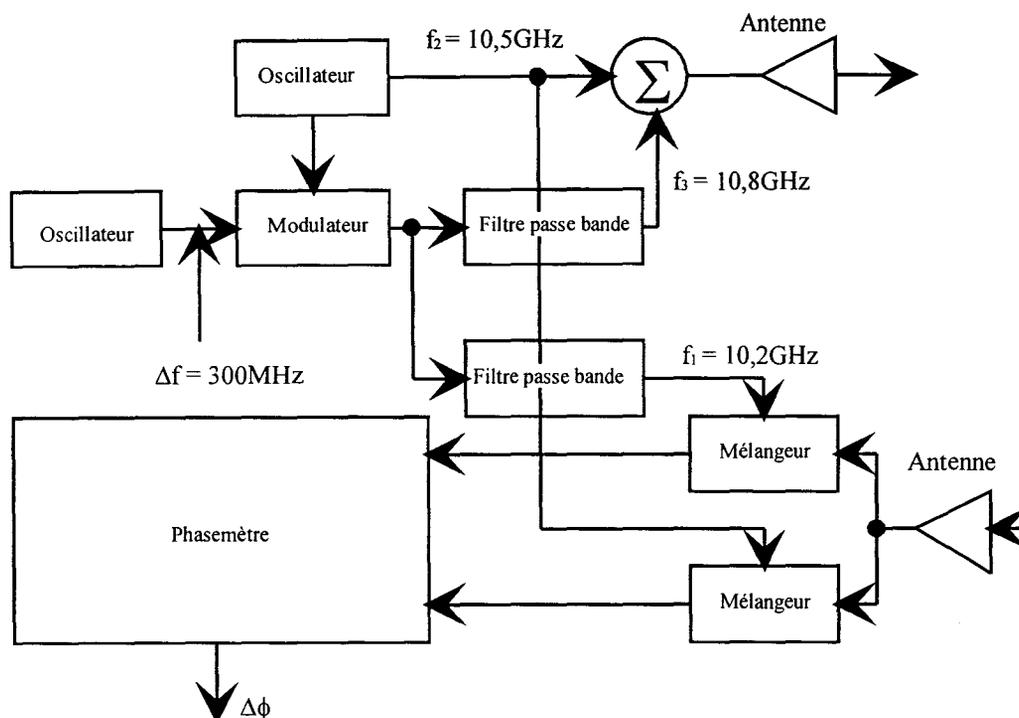


Figure III-8 . Diagramme fonctionnel du capteur

Une onde constituée de deux porteuses de fréquences respectivement $f_2 = 10,5 \text{ GHz}$ et $f_3 = 10,8 \text{ GHz}$ ($f_3 = f_2 + \Delta f$ avec $\Delta f = 300 \text{ MHz}$) est émise vers une paroi latérale (bordure). L'onde reçue en retour est déphasée d'un angle proportionnel à la fréquence d'émission et au temps de transit de l'onde $\tau = 2d/c$ (d étant la distance du radar au mur, c la vitesse de propagation dans l'air de l'onde hyperfréquence). Cette onde est mélangée avec l'onde f_2 et avec une onde f_1 de fréquence $10,2 \text{ GHz}$ ($f_2 - \Delta f$). Les deux signaux issus des mélangeurs sont filtrés de façon à ne retenir que les composantes de phase $\Delta f \cdot t - f_2 \cdot \tau$ et $\Delta f \cdot t - f_3 \cdot \tau$. La différence de phase $\Delta\phi$ entre les deux signaux est proportionnelle à la distance du radar au trottoir $\Delta\phi = \frac{4\pi \cdot f \cdot d}{c}$

(figure n°III-9). Le choix de la fréquence de modulation de 300 MHz a été orienté par des considérations relatives à la précision de la détermination de la trajectoire et à la qualité du signal (rapport signal/bruit). La précision de la mesure est de $\pm 2,78 \text{ cm}$ avec la fréquence de 60 MHz et de $\pm 0,33 \text{ cm}$ avec celle de 300 MHz . Le rapport signal sur bruit nécessaire pour la fréquence de 60 MHz est de 35 dB , alors qu'il n'est que de 20 dB pour la fréquence de 300 MHz .

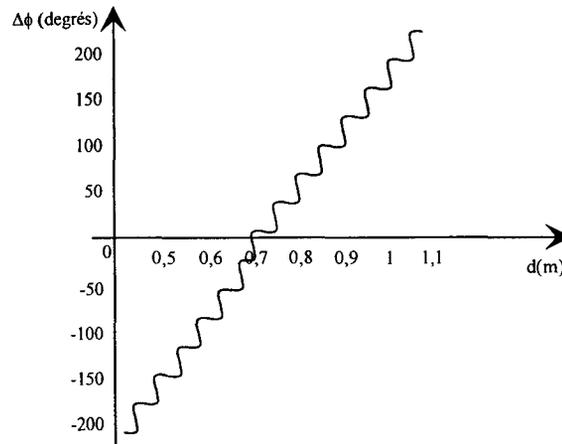


Figure III-9. Phase en fonction de la distance

La seule contrainte liée à l'utilisation de la fréquence 300 MHz est la différence entre la mesure de distance maximale et la mesure minimale (l'écart entre ces deux mesures ne peut pas dépasser 0,5 m alors qu'il est limité à 1 m pour une fréquence de 60 MHz).

Des études menées sur le même sujet à l'USTL ont abouti à des résultats similaires.

- Télémétrie ultrasonore [CLE - 83].

La position latérale est estimée par la mesure du temps d'aller et retour de l'onde sonore émise depuis le véhicule et réfléchi par un obstacle adéquat (quai). Afin de remédier à la variation de vitesse de propagation due aux conditions atmosphériques variables, les auteurs suggèrent l'utilisation d'une cible de référence solidaire du véhicule ; dans ce cas, la vitesse du son est estimée. L'estimation permet le réglage du gain du système de mesure et rend ainsi le système performant quelles que soient les conditions extérieures. Les seuls essais réalisés en laboratoire n'ont donné que des indications relatives à l'angle d'incidence du faisceau. Ainsi, une mesure de distance de 7 mètres est affectée d'une erreur inférieure à 10 centimètres pour un angle d'incidence de 5°.

Les avantages du système acoustique sont, sans aucun doute, son faible coût et son faible encombrement. Par contre, l'atténuation de l'impulsion sonore par l'air limite les distances mesurables avec précision à environ 10 mètres. Un autre inconvénient est la contrainte sur la surface de rétro-diffusion à utiliser car elle ne doit pas absorber les ondes sonores. Il faut éviter par exemple, l'apparition de mousse sur les bordures. En outre, le rapport signal sur bruit peut être affecté par les précipitations et les bruits haute fréquence.

- Télémétrie optique.

Plusieurs études ont employé ce procédé ; généralement deux techniques sont utilisées.

La figure III-10 montre le fonctionnement de la première technique. Il s'agit d'envoyer sur la cible un faisceau lumineux issu d'une LED, et de recueillir sur une diode de détection de position (PSD "Position Sensing Devise") la partie réfléchie du faisceau lumineux. A partir de la position du rayon réfléchi sur la PSD, la distance séparant le capteur de la cible est obtenue.

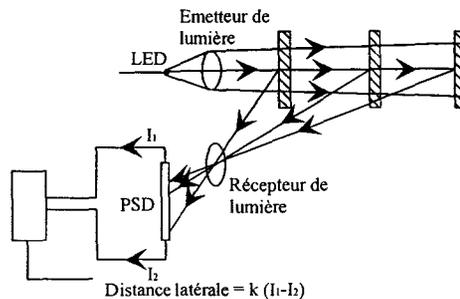


Figure III-10. Télémétrie optique

La seconde méthode est basée sur le temps de parcours du signal lumineux. Le principe de fonctionnement est analogue à celui de la télémétrie ultrasonore. Un transducteur optique travaille en rétro-diffusion : il fonctionne alternativement comme émetteur et comme récepteur. Il envoie un faisceau lumineux ; quelques instants après, il reçoit le faisceau réfléchi sur la cible. Sachant que la vitesse de propagation de la lumière dans l'air est de 3.10^8 m/s et connaissant la durée de propagation du faisceau lumineux, la distance entre le capteur et la cible est déduite.

Les avantages du capteur optique sont de trois ordres : l'indépendance de la matière de la surface de réflexion, son faible encombrement qui facilite son implantation et son rapport qualité/prix. Les inconvénients sont : le besoin de nettoyage fréquent de la lentille d'émission et de réception (surtout pour une utilisation en extérieur) et l'assujettissement des mesures à la couleur de la surface de réflexion.

3.2.2 Etude comparée des systèmes possibles

Le tableau N° III-2 présente une synthèse des différents types de capteurs permettant de réaliser la fonction d'aide à l'accostage. La deuxième colonne reprend la précision de la mesure de distance à la référence. Les trois colonnes suivantes présentent les différents coûts afférents à la mise en place et à la maintenance du capteur (coût d'achat et entretien à prévoir pour le système). Le coût d'installation du capteur n'a pas été fixé. Par contre, si l'environnement doit être modifié, la colonne quatre reprend les coûts des interventions nécessaires.

Les coûts présentés dans ce tableau sont donnés à titre indicatif et sont donc peu précis.

Type de capteur	Précision	Coût capteur + système de traitement	Coût d'installation et d'intervention sur l'environnement	Entretien
Vision embarquée	Dépend du traitement de l'information visuelle et de la résolution de la caméra (en moyenne sur les projets existants <> 1 cm)	30 à 40 kF	Pose sur la chaussée d'une bande de peinture de 5 à 10 cm de large sur une longueur de 40 mètres (coût estimé de l'opération 2500 F par arrêt)	Nettoyage de l'objectif de la caméra. Remise en peinture fréquente des bandes : passage répété des véhicules (tous les six mois)
Systèmes magnétiques	Précision variable avec le nombre de capteurs "tout ou rien" disponibles dans le bloc de mesure (en moyenne 2 cm)	50 à 60 kF	Installation d'une peinture magnétique sur la chaussée (5000 F par arrêt équipé) ou installation de plots magnétiques dans la chaussée (y compris la mise en place des aimants enterrés de quelques centimètres : de l'ordre de 50 à 100 kF par arrêt)	Remise en état de la bande magnétique (usée par le passage répété des autobus) tous les 6 mois à 1 an. Aucun entretien ni les plots magnétiques ni pour le capteur.
Filoguidage	Précision latérale estimée suivant les études déjà réalisées ± 2 cm pour une vitesse inférieure à 20 km/h et ± 5 cm pour une vitesse comprise entre 20 et 80 km/h	50 à 60 kF	Installation du fil conducteur, du générateur basse fréquence et de l'apport de l'énergie électrique sur chaque arrêt de l'ordre de 100 kF par arrêt équipé	Remplacement du fil électrique lors d'une rupture. Alimentation en continu du générateur. Aucun entretien particulier pour le capteur
Radar latéral	$\pm 0,5$ cm	Prix actuellement basé sur un prototype entre 60 et 90 kF	Aucune intervention sur l'environnement si le quai est de type surélevé (21 cm)	Entretien du matériel électronique
Télémetre à ultrason	Précision variable suivant le capteur utilisé en général, inférieure à 2 cm	Prix, en fonction du capteur utilisé, compris entre 12 et 25 kF	Aucune intervention sur l'environnement si le quai est déjà de type surélevé de 21 cm	Capteur : vérification de la non obstruction de la source sonore. Environnement : nettoyage des bordures (en général assuré par la municipalité)
Téléométrie optique	Précision dépendante du capteur utilisé : - Infrarouge : 0,2 à 1 cm - LASER : 0,01 à 0,5 cm	De l'ordre de 12 à 30 kF pour un infrarouge et de l'ordre de 25 à 60 kF pour un télémetre LASER	Mise en peinture des bordures du quai avec une couleur claire (exemple : jaune). Coût : 2500 F par arrêt. Intervention recommandée	Capteurs : nettoyage fréquent des lentilles pour permettre la bonne émission et la réception du signal. Environnement : si le choix de peindre les bordures a été retenu, prévoir leurs remises en peinture

Tableau III-2. Synthèse

En ce qui concerne la précision, l'ensemble de ces capteurs offre des écarts de l'ordre de quelques centimètres, cela est tout à fait acceptable pour notre projet. Pour les coûts, Il vaut mieux installer des équipements embarqués à bord des véhicules que d'intervenir sur l'environnement.

En effet, sur un réseau, le nombre d'autobus est inférieur au nombre d'arrêts. Les coûts d'intervention sur site sont importants, sans oublier les problèmes de vandalisme que pourraient rencontrer ces équipements au sol (ce risque est plus important que pour des équipements embarqués).

3.3 CONCLUSION

Une des difficultés pour améliorer l'accessibilité des autobus urbains est la réduction de la lacune horizontale. Les expériences européennes existantes ont été reprises, notamment en Allemagne, en Suède et en France. Le bilan des techniques actuellement utilisées fait apparaître qu'il existe deux pistes de recherche explorées à ce jour en Europe.

La première piste est un guidage de type mécanique. Il consiste en un contact franc entre le pneu et la bordure, pour laquelle aucune information de lacune n'est fournie au conducteur. Ce manque d'information apporte un résultat médiocre de lacune à l'arrêt par crainte de détérioration du matériel et un risque de montée sur le trottoir ; le conducteur ne possède plus de repères pour des lacunes résiduelles faibles.

La deuxième piste repose sur des techniques de captation électronique et de guidage automatique. Des capteurs, basés sur la télémétrie, le filoguidage et le traitement d'images, permettent de connaître le positionnement du véhicule et sa progression jusqu'au point d'arrêt. L'expérience d'Halmstad a été boycottée par les conducteurs pour des raisons autant techniques que psychologiques. Vraisemblablement, il a été vu, à travers ce système, un concurrent plutôt qu'une aide à la conduite.

L'état de l'art sur les capteurs utilisables pour la détermination de la position d'un véhicule par une référence matérialisée au sol montre les différentes techniques envisagées de vision embarquée, de systèmes magnétiques, de filoguidage et de télémétrie par radar ultrason ou optique. Elles offrent la précision recherchée à un coût d'installation inférieur à 100 kF par véhicule. L'environnement, suivant les techniques, doit supporter des modifications plus ou moins lourdes, voire de l'entretien, en particulier en peinture.

C'est pourquoi, à partir de ces expériences, les capteurs de type télémétrique permettant de connaître la position de l'autobus par rapport au quai de station ont été retenus. Les aspects "aide à la conduite" et "aide au guidage" ont été privilégiés pour fournir une information pertinente au conducteur et pour offrir une aide sur le positionnement du véhicule.



Conclusion de la Première Partie

L'AIDE A L'ACCOSTAGE : DEUX PISTES DE RECHERCHE

Après le problème de la mobilité et de l'accessibilité dans les transports collectifs, la première partie de ce mémoire a permis de prendre conscience des problèmes des personnes à mobilité réduite. La prise en compte de cette problématique, dès la conception d'un système de transport, est une démarche répandue dans le domaine des transports guidés comme le montrent les exemples du VAL, du tramway et du SK.

Bien que l'autobus soit le mode de transport le plus utilisé dans nos villes, il a un léger retard dans l'amélioration de son accessibilité. Les diverses études présentées ont montré que l'autobus urbain se heurtait à deux problèmes dans le domaine de l'accessibilité : la marche à l'entrée du véhicule et la lacune horizontale.

Il a été montré que l'accessibilité des autobus telle qu'elle est pratiquée à ce jour ne peut se satisfaire du niveau de prestation fourni. Il est impératif de diminuer voire supprimer la marche située à l'entrée du véhicule, ce qui est réalisé grâce à diverses études menées sur la conception du matériel roulant. Des dispositifs installés au niveau des portes facilitent l'accès au véhicule. Cependant, ces techniques montrent rapidement leur limite en terme de coût et d'utilisation.

L'introduction des autobus à plancher surbaissé évite la présence de marches à l'entrée du véhicule et offre un accès de plain-pied. Cependant, la totalité des problèmes concernant l'accessibilité des personnes à mobilité réduite n'est pas réglée.

Lors des échanges de voyageurs à la station, la marche ou lacune verticale entre le quai et le plancher du véhicule peut être faible grâce à la surélévation du quai et au choix d'un système d'agenouillement du bus. L'espace, appelé lacune horizontale, existant entre la bordure du quai et le seuil du véhicule, demeure important. Il faut donc améliorer les lacunes à l'arrêt grâce à un meilleur positionnement des autobus au voisinage des arrêts.

Les études sur les aménagements des points d'arrêt réalisées à ce jour ne répondent pas de manière satisfaisante au problème posé. La réponse au problème de meilleur positionnement passe par la définition d'une nouvelle fonction appelée "aide à l'accostage". L'objectif de cette fonction est la réalisation d'un accostage optimal avec une précision de quelques centimètres. Ainsi définie, elle devra être déclinée autour des trois composantes formées par le véhicule, le point d'arrêt et le conducteur.

L'état de l'art sur les systèmes d'aide à l'accostage existants et sur les capteurs a montré que les solutions expérimentées à ce jour répondaient au problème de manière partielle et qu'une meilleure réponse passerait sûrement par un compromis des différentes voies explorées.

Cependant, compte tenu de l'état de l'art, des réflexions et des expériences en cours dans le domaine du guidage des bus en station, la fonction d'aide à l'accostage peut se découper en deux axes de recherche :

- * Le premier axe de recherche porte sur un système de guidage agissant au niveau de la direction. Ce système assure, par action sur la direction, le guidage latéral du bus depuis la phase d'approche de la station, soit 40 mètres en amont du point d'arrêt jusqu'à l'arrêt du véhicule. Le point d'arrêt nominal offre une lacune de 8 centimètres avec une tolérance de 2 centimètres selon les recommandations du COLITRAH. Le conducteur reste maître des paramètres cinématiques du véhicule, tels la vitesse et le freinage et éventuellement l'action sur le volant. Il assure la fonction de sécurité et choisit le point d'arrêt longitudinal, afin de ne pas dériver vers un appauvrissement de la tâche de conduite.
- * Le deuxième axe de recherche porte sur un système d'aide à la conduite. Ce système embarqué fournit au conducteur une information concernant la position du bus par rapport au bord du quai de station, le conducteur devant effectuer une tâche d'ajustement. Selon les performances atteintes avec cette aide, il s'avérera peut-être nécessaire de prévoir l'équipement de palettes escamotables à bord des bus afin de garantir l'accessibilité aux utilisateurs de fauteuil roulant.

Deuxième Partie

LE GUIDAGE SEMI-AUTOMATIQUE DES AUTOBUS EN ZONE D'ACCOSTAGE

Le guidage semi-automatique pour l'accostage d'un autobus assure, en actionnant la direction, le guidage latéral de l'autobus depuis la phase d'approche de la station (40 mètres en amont du point d'arrêt) jusqu'à l'arrêt total du véhicule. Au niveau du point d'arrêt, la distance latérale doit être de 8 centimètres avec une erreur maximale de 2 centimètres selon les recommandations du COLITRAH. Le conducteur reste maître des paramètres cinématiques du véhicule (accélération, freinage), de la sécurité totale du bus, ainsi que de la position longitudinale du point d'arrêt. Cette position du point d'arrêt du véhicule est une donnée importante du problème, car elle fixe la durée du guidage et les paramètres cinématiques de la phase d'accostage.

Pour cette étude l'enquête vidéographique [DEJ et al - 93] a servi pour déterminer les conditions du guidage concernant l'environnement (stationnement des véhicules, distance et temps de guidage) et le véhicule (vitesse d'arrivée, position horizontale et orientation).

Lors de cette enquête, deux étapes pendant l'accostage ont été remarquées. La première, le pré-accostage, représente les 4/5 du temps. Le conducteur s'approche du quai en se souciant de la sécurité à l'extérieur du véhicule. La seconde, l'accostage proprement dit ; est réservée au positionnement de l'autobus par rapport au quai. Le chauffeur s'occupe alors de la lacune horizontale.

Une enquête [KAP et al - 94] réalisée dans la ville de Grenoble a été aussi utilisée. Il s'agit de déterminer les conditions de mise en oeuvre d'un système de guidage semi-automatique. Cette étude ergonomique a permis de vérifier que le système est utilisable sur les lignes actuelles et sur de nouvelles lignes. Elle a recensé les positions "idéales" d'éléments à ajouter aux véhicules comme, par exemple, des écrans informatiques. Les recommandations émises lors de l'étude ergonomique [KAP et al - 94] sont les suivantes :

- un système automatique ne peut être utilisé et n'est rentable que si les autobus circulent sur une ligne aménagée,
- dans le cas d'une ligne en circulation propre le problème du stationnement illicite n'est pas posé. Les arrêts standardisés représentent l'avantage de ce type de ligne.

Les ergonomes ont remarqué une grande inquiétude des conducteurs, face à un projet de guidage automatique. Ils ont la nette impression que ce type de système risque de les déposséder d'une partie de leurs fonctions. Les conducteurs d'autobus préfèrent de beaucoup leur véhicule au tramway où toutes les composantes de travail sont standardisées, automatisées.

Ainsi, un système de guidage semi-automatique serait mieux perçu par les conducteurs d'autobus qu'un système de guidage automatique intégrale. Notre travail est de structurer, modéliser et de simuler un tel système.

Le guidage automatique se ramène à faire la synthèse d'un asservissement. C'est-à-dire à déterminer les divers organes intervenant dans la boucle de commande. Cette synthèse peut être décomposée en plusieurs étapes. Pour la résoudre, l'organigramme ci-dessous est suivi :

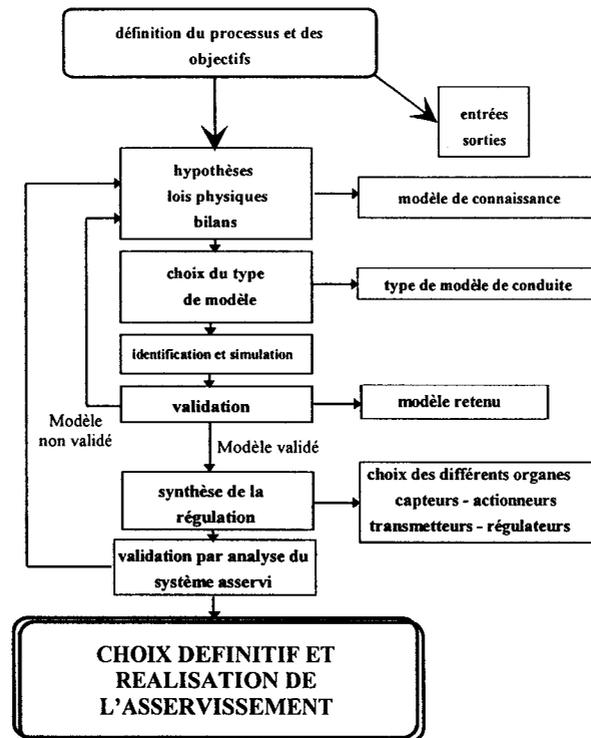


Figure 7. Organigramme simplifié de la synthèse d'un asservissement

La première phase de la réalisation du guidage automatique détermine les entrées et les sorties du processus à commander. Dans l'autobus, la consigne de la commande, étant l'entrée du modèle, est unique et correspond à l'angle à appliquer sur le volant. Par contre, le nombre de sorties intervenant dans la boucle de commande peut être unique ou multiple. La sortie utilisée correspond à la lacune horizontale à l'avant du véhicule (distance entre l'avant de l'autobus et le quai). Dans certaines commandes, il est possible d'utiliser des sorties différentes, par exemple : la lacune à l'arrière du véhicule, la vitesse et l'orientation de l'autobus par rapport au quai. Après avoir déterminé les entrées et les sorties, il faut réaliser la

modélisation du processus. C'est en général un ensemble de relations mathématiques liant les diverses variables mises en oeuvre (relations entre les entrées et les sorties).

Puis, valider le modèle : comparer le comportement modélisé avec le comportement réel du processus.

Parmi les critères pris en compte dans le choix de la commande, il y a : la précision, la stabilité, le temps de réponse, la fiabilité, la robustesse et les coûts de construction, de fonctionnement et de maintenance.

Commençons au cœur du problème, par la modélisation transversale d'un autobus. Cette modélisation consiste à déterminer une relation entre l'angle de braquage du volant et l'écart existant entre le quai et l'avant de l'autobus.

Chapitre I

MODELISATION CINEMATIQUE ET DYNAMIQUE D'UN AUTOBUS

Pour réaliser la commande d'un système automatique, la première phase de l'étude consiste en la modélisation du processus. Pour effectuer l'analyse et la synthèse d'un système dynamique, l'une des solutions est la détermination du modèle entrées - sorties. Dans ce type de représentation, les entrées et sorties du processus sont liées par un ensemble de relations mathématiques (en analyse structurale, c'est le niveau "système générateur"). Cet ensemble est composé de relations algébriques, d'équations différentielles et de relations récurrentes. A ces relations de type "égalité", peuvent s'ajouter des relations de type "inégalité" ou "inclusion", permettant de tenir compte de contraintes ou d'éventuelles saturations. Dans le cas de processus linéaires stationnaires à état continu, les relations entrées - sorties sont définies par des matrices de transfert. La mise en équation d'un système dynamique consiste, après les hypothèses simplificatrices, à lui appliquer les lois physiques le régissant. Pour réaliser le guidage latéral de l'autobus, il faut trouver la relation mathématique entre l'entrée (l'angle de rotation du volant) et la sortie (l'évolution de la lacune horizontale entre l'autobus et le quai).

L'analyse des mouvements d'un autobus aux arrêts [DEJ et al - 93] permet de délimiter les caractéristiques de l'environnement et les paramètres d'évolution du véhicule en phase d'accostage.

Quelques notions de mécanique seront rappelées afin de pouvoir modéliser le véhicule de façon cinématique puis dynamique. La complexité du modèle sera réduite grâce aux hypothèses simplificatrices déduites du contexte de l'étude.

1.1 PRESENTATION DE LA DEMARCHE

1.1.1 Paramètres significatifs de l'environnement

L'étude des arrêts [DEJ et al - 93] a fait apparaître un nombre important de types d'arrêt. Compte tenu du contexte dans lequel s'inscrit l'étude, à savoir l'amélioration de la qualité de service des transports en milieu urbain, les types d'arrêt des réseaux seront particulièrement intéressants. L'évolution de la tendance actuelle, conduit à retenir les plus significatifs à savoir les arrêts en saillie et les arrêts en circulation (ligne).

La longueur d'un arrêt est, dans les deux cas, de l'ordre d'une quinzaine de mètres. Quant à la longueur de la zone d'approche en amont du quai, elle est de 13 à 15 mètres pour un arrêt en saillie et pour un arrêt en circulation de 40 à 50 mètres. Par ailleurs, le point d'arrêt longitudinal n'est jamais strictement matérialisé. Dans la pratique, l'étude des mouvements aux arrêts a montré que pour un même conducteur, ce point est très fluctuant.

Des hypothèses sur l'état de la chaussée ont été choisies. La chaussée ne présente pas de dévers significatif, sa pente longitudinale est inexistante et pendant la période d'accostage, il n'existe aucune turbulence pouvant induire une composante de force extérieure latérale ou longitudinale.

L'objet de la modélisation, et ultérieurement de la commande, est de prendre en charge le pilotage de la direction pendant la phase d'accostage. Le conducteur du véhicule garde la maîtrise de la vitesse du véhicule et de la sécurité.

1.1.2 Paramètres significatifs du véhicule à l'approche du quai

La même étude [DEJ et al - 93] a permis de quantifier les conditions initiales du véhicule entrant dans la zone d'accostage :

- vitesse initiale comprise entre 25 et 40 km/h,
- position latérale initiale comprise entre 1,5 et 0,1 m,
- orientation initiale du véhicule parallèle à l'axe longitudinal de la chaussée.

Dans l'étude, les pneumatiques du véhicule sont supposés en bon état (usure homogène) et correctement gonflés.

Ces hypothèses conduisent naturellement à évaluer en priorité les performances de la modélisation cinématique d'un véhicule, d'autant qu'à l'arrière-plan de notre démarche pointe déjà un souci de temps réel lié à l'éventualité de l'implantation de la commande sur le véhicule.

Le véhicule décrit, à un instant donné, une trajectoire circulaire dont le centre est le centre instantané de rotation et le rayon est le rayon de courbure. Les coordonnées de ce centre instantané de rotation sont calculées à partir des grandeurs géométriques du véhicule (longueurs et angles). Ce modèle s'appuie sur l'épure de Jeantaud [JEA - 01] (considérations exclusivement géométriques), complétée par l'adjonction des angles de dérive des pneumatiques, eux-mêmes liés aux propriétés dynamiques du véhicule.

La modélisation cinématique utilise certaines grandeurs géométriques du véhicule ainsi que la vitesse d'évolution, tandis que la modélisation dynamique prend en compte en plus des paramètres dynamiques (moment d'inertie, accélération, charge...). L'intégration de considérations liées à la dynamique dans un modèle de type cinématique amène à dénommer notre modèle "MOCA" (MODèle Cinématique Amélioré).

Pour calculer la relation entre l'angle de rotation du volant et l'écart latéral (lacune horizontale), le modèle a été découpé en deux parties.

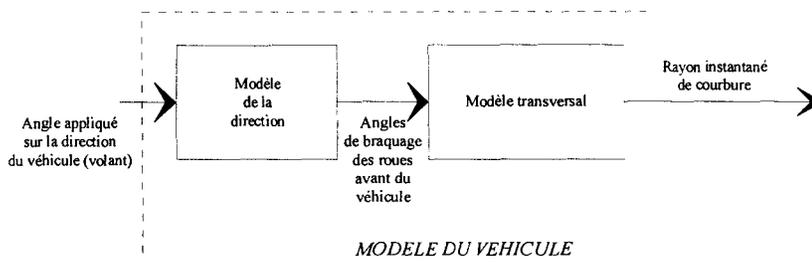


Figure I-1 . Décomposition du modèle du véhicule en deux parties

A partir du rayon de courbure et de la vitesse qui modélise le comportement longitudinal, il est possible de calculer par des relations trigonométriques le déplacement latéral et longitudinal du véhicule. Ainsi, l'évolution de la distance latérale de l'autobus par rapport au quai peut être déterminée.

Modélisons d'abord le comportement dynamique de la direction du véhicule. Une relation entre l'angle de rotation présent sur la direction du véhicule (volant) et l'angle de braquage de la roue avant gauche est obtenue. Bien que l'angle de braquage de la roue avant droite soit différent de l'angle de braquage de la roue avant gauche (voir paragraphe 1.3.1.3), la relation angle volant / braquage peut être rapprochée à un rapport de proportionnalité k (exemple pour un véhicule de type autobus R312, le constructeur Renault Véhicule Industriel donne $k = 20$).

Ensuite, le modèle transversal de l'autobus sera déterminé. Il s'agit de rechercher l'équation liant l'angle de braquage de la roue avant gauche (ou avant droit) au rayon de courbure du véhicule.

1.2 NOTIONS PRELIMINAIRES [DEB et al - 1.94]

1.2.1 Direction, roues et essieux directeurs

La possibilité de direction résulte des propriétés du roulement des roues rigides chargées sur un sol rigide rugueux (figure I-2) [JUL - 63].

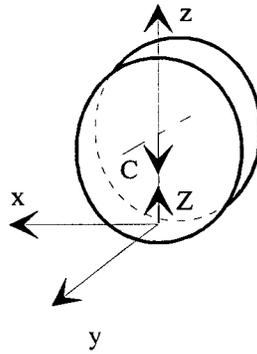


Figure I-2. Propriétés de roulement

Il s'agit là de faits physiques issus de l'expérience mais formulables dans le cadre de la mécanique rationnelle. Ils s'énoncent en trois points.

1^{er} point : Lois du guidage rigide

Les lois du frottement solide sont applicables dans le roulement à chacun des contacts instantanés de la roue de rayon R et du sol. La limite de l'adhérence statique s'exprime par la relation :

$$F_t < \mu_0 Z, \tag{Equation N° 1}$$

avec :

- F_t , effort tangentiel exercé par la roue sur le contact,
- μ_0 , coefficient d'adhérence,
- Z , réaction normale du sol.

Ainsi, dans les limites de l'adhérence exprimées par l'équation N°1, le roulement (progression dx) s'effectue sans glissement ($dx = R d\phi$) dans le plan de la roue ($dy = 0$).

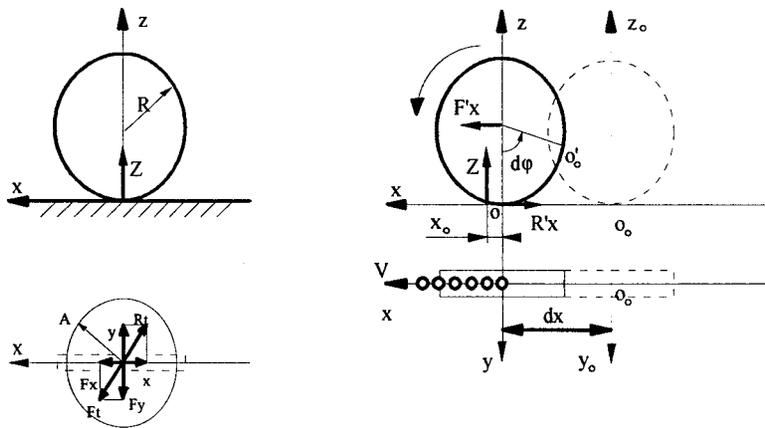


Figure I-3. Développement des forces

Décomposons les forces dans le cercle d'adhérence, en direction longitudinale (x) et transversale (y), les équations deviennent :

$$\vec{F}_t = \vec{F}_x + \vec{F}_y \text{ soit } F_t^2 = F_x^2 + F_y^2 \tag{Equation N° 2}$$

pour les sollicitations, car $(x \hat{=} y) = 90^\circ$

et

$\bar{R}_t = \bar{x} + \bar{y}$ soit $R_t^2 = x^2 + y^2$ pour les réactions. (Equation N° 3)

Posons alors :

$|F_x| = \alpha \mu_0 Z$ (Equation N° 4)

avec : $\alpha < 1$ étant le coefficient de prélèvement d'adhérence statique longitudinale,

$\mu_y = \mu_0 \sqrt{1 - \alpha^2}$ (Equation N° 5)

avec : $\mu_y \leq \mu_0$ étant le coefficient d'adhérence transversale disponible.

Les lois du guidage rigide adhérent s'expriment par l'ensemble des trois relations :

$d_x = R d\varphi$ (Equation N° 6)

$d_y = 0$ (Equation N° 7)

$|F_y| < \mu_y Z$ (Equation N° 8)

2^{ème} point : Liberté de braquage

Dans la mesure où la roue reste assimilable à un disque suffisamment mince, il est possible, en cours de roulement, de faire tourner le plan de la roue autour de l'axe instantané Oz normal au contact, sans perdre l'adhérence (maintien des relations (Equations N°6-7-8)).

Conséquence (figure I-4) : quel que soit le braquage de la roue α_M , la trajectoire de celle-ci en roulement adhérent est constamment tangente au plan de la roue.

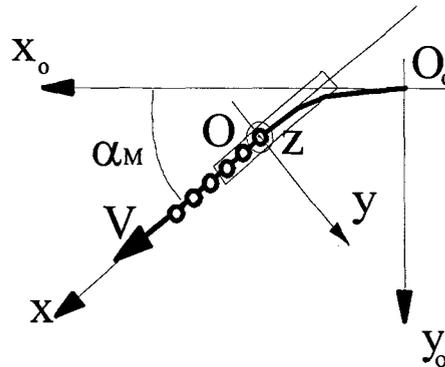


Figure I-4. Trajectoire de la roue

3^{ème} point : Résistance au roulement

Il est nécessaire (figure I-3) d'exercer un effort tangentiel fini F'_x sur l'axe de la roue et dans son plan pour la faire progresser. Cet effort F'_x équilibre la traînée de la roue R'_x ($R'_x + F'_x = 0$). Tout se passe comme si la réaction normale du sol Z était déportée en avant, dans la direction du roulement d'une quantité x_0 telle que :

$$x_0 = \frac{R'_x}{Z} R \quad \text{(Equation N° 9)}$$

1.2.2 Application aux véhicules (Compatibilité des roulements)

Les positions de contact de roulement des roues d'un véhicule sont liées par des relations géométriques. Chaque roue, par l'orientation de son plan, c'est-à-dire son braquage,

définit la tangente à une trajectoire individuelle, mais chacune de ces trajectoires individuelles reste compatible avec celle de l'ensemble du véhicule.

Soit Q le centre instantané de cette trajectoire (figure I-5), il est aussi celui de chacune des trajectoires des roues, et donc nécessairement situé sur chacune des normales Oy_i à leur plan de roue. La convergence à chaque instant en un point unique Q des normales Oy_i à tous les plans des roues constitue donc la condition de compatibilité des braquages des roues d'un véhicule.

Admettons que les roues se meuvent sans glissement (cas du guidage rigide adhérent), leurs axes doivent donc, à tout instant, concourir en un seul et même point : le centre instantané de rotation (Q) [SER - 47]. La figure I-5 montre que cette condition est réalisée d'elle-même s'il n'y a que trois roues dont deux montées sur un même essieu (a), ou s'il y a quatre roues montées sur un essieu fixe et un essieu pivotant (b). Il n'en est pas de même si au moins un des essieux est brisé (c). Alors un dispositif de commande du braquage des roues satisfaisant aussi bien que possible à la condition de convergence des axes énoncée ci-dessus doit être établi.

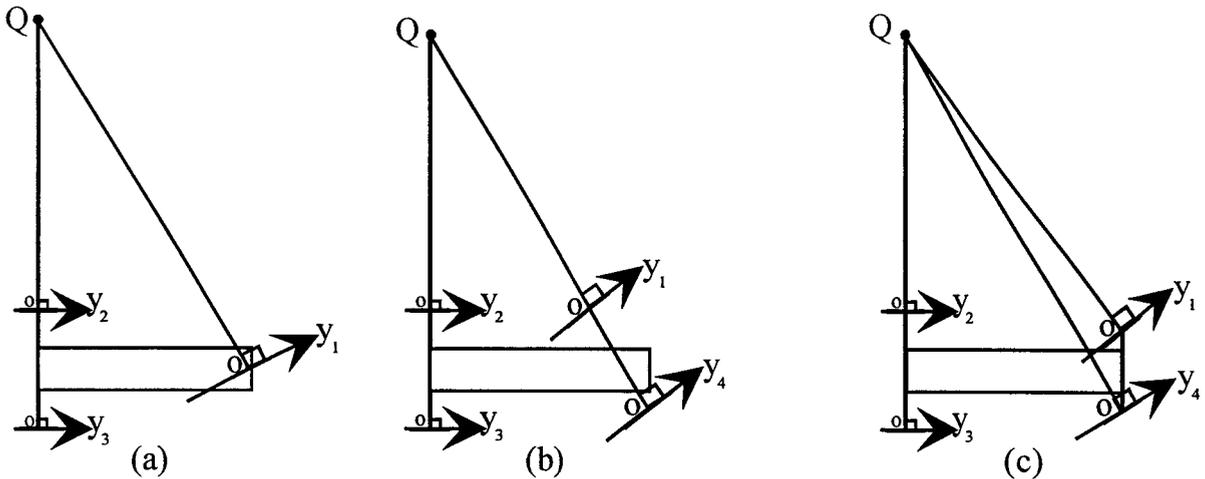


Figure I-5 . Position du centre instantané de rotation

C'est à Jeantaud qu'il revient d'avoir, dès le début de l'automobile, mis au point une liaison géométrique simple (trapèze de Jeantaud) entre les rotations des fusées autour des axes de pivotement, pour fournir une solution approchée mais acceptable de la condition de compatibilité des braquages des roues d'un véhicule.

1.3 ETUDE CINEMATIQUE D'UN VEHICULE [DEB et al - 2.95]

Le mouvement sur un sol plan horizontal d'un véhicule à deux essieux dont l'essieu avant est directeur est étudié. Supposons que la répartition des charges sur les essieux est une répartition statique. Les transferts transversaux des charges entre roues d'un même essieu n'altèrent pas la charge totale de cet essieu, en sorte que chaque essieu peut être remplacé par une roue fictive équivalente (figure I-6).

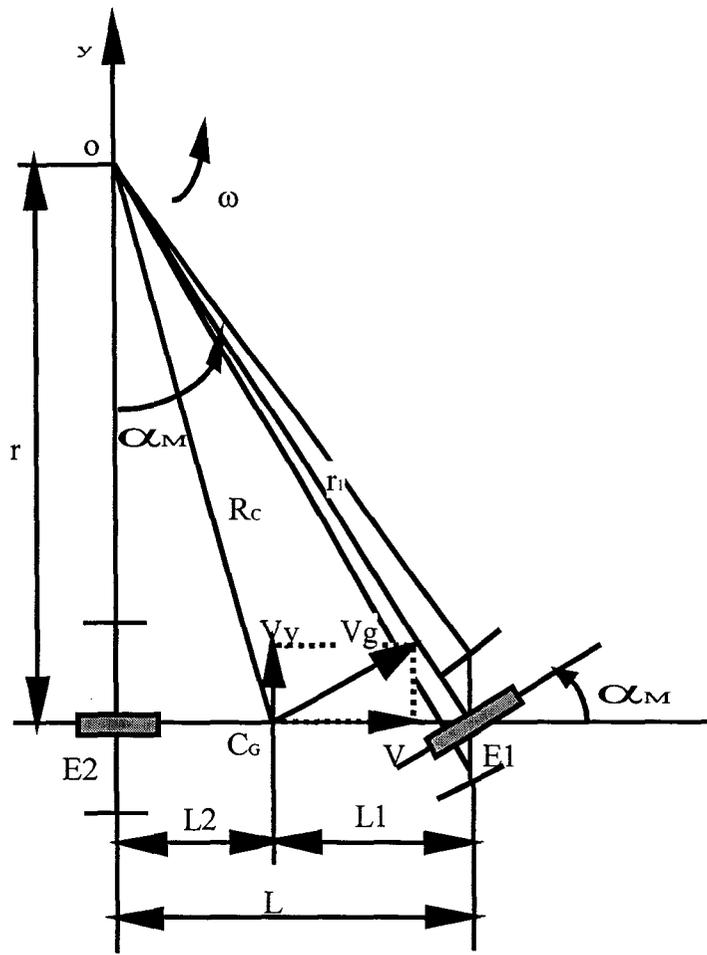


Figure I-6. Triangle de Jeantaud

Le braquage α_M de la roue avant fictive équivalente est dit "braquage moyen" (ou "braquage" tout court) de l'essieu-avant. Pour toute valeur de ce braquage, la trajectoire instantanée est une rotation de centre O et de rayons r pour E_2 (rayon de virage), R_C pour le centre de gravité C_G et r_1 pour E_1 , avec la relation :

$$\tan \alpha_M = \frac{L}{r} \quad (\text{Equation N}^\circ 10)$$

ou, si α_M est suffisamment petit, alors :

$$\alpha_M = \frac{L}{r} \quad (\text{Equation N}^\circ 11)$$

Si de plus, la relation entre l'angle de rotation du volant et le braquage est connue, il est possible de déterminer à tout instant les coordonnées du centre instantané de rotation du véhicule, et ainsi de calculer la trajectoire du centre de gravité ou de tout autre point du véhicule. Tel est l'objectif de notre modélisation.

1.3.1 Modèle cinématique de l'autobus

1.3.1.1 Modèle deux roues

La trajectoire instantanée du véhicule étant une rotation, la connaissance de la trajectoire du véhicule passe par celle des coordonnées du centre instantané de rotation et du rayon de courbure. En fait, la position du véhicule (coordonnées du centre de gravité x_n et y_n) peut être déterminée à partir de sa position précédente et du rayon de courbure :

$$x_n = x_{n-1} + dx \qquad y_n = y_{n-1} + dy \qquad dx, dy = f(R_C)$$

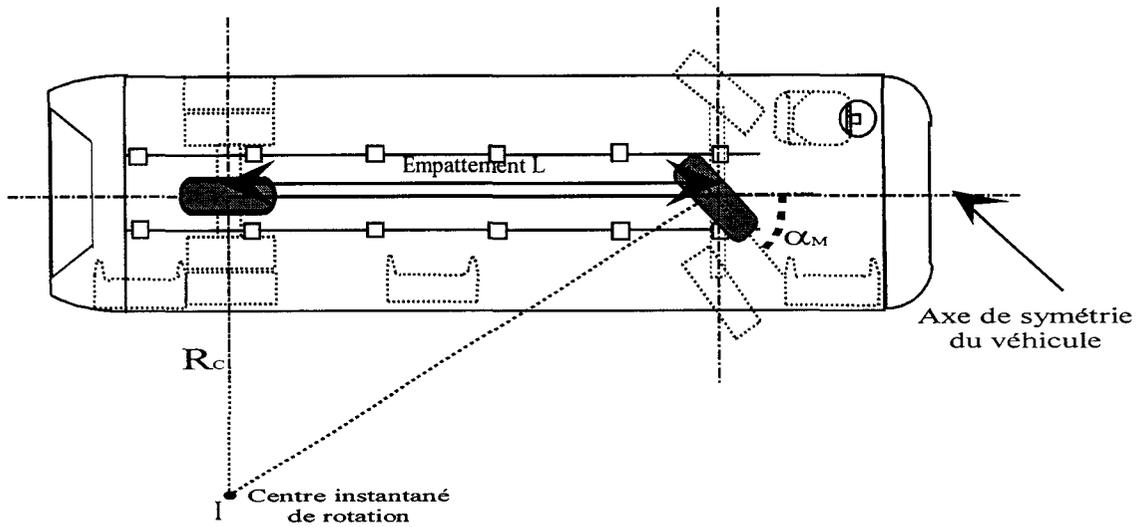


Figure I-7. Modèle cinématique à deux roues de Jeantaud

Les équations cinématiques se résument à :

Angle de braquage :

$$\alpha_M = \arctan\left(\frac{L}{R_C}\right) \qquad \text{(Equation N° 12)}$$

avec :

- L : empattement du véhicule,
- R_C : rayon de courbure.

Rayon de courbure :

$$R_C = \frac{L}{\tan \alpha_M} \qquad \text{(Equation N° 13)}$$

Compte tenu de la difficulté d'obtenir auprès des constructeurs, la relation entre le braquage et l'angle volant, le modèle à deux roues a été abandonné au profit d'un modèle à quatre roues, qui ne prend plus en compte le braquage moyen, mais le braquage réel sur chacune des roues (figure I-8).

1.3.1.2 Modèle quatre roues

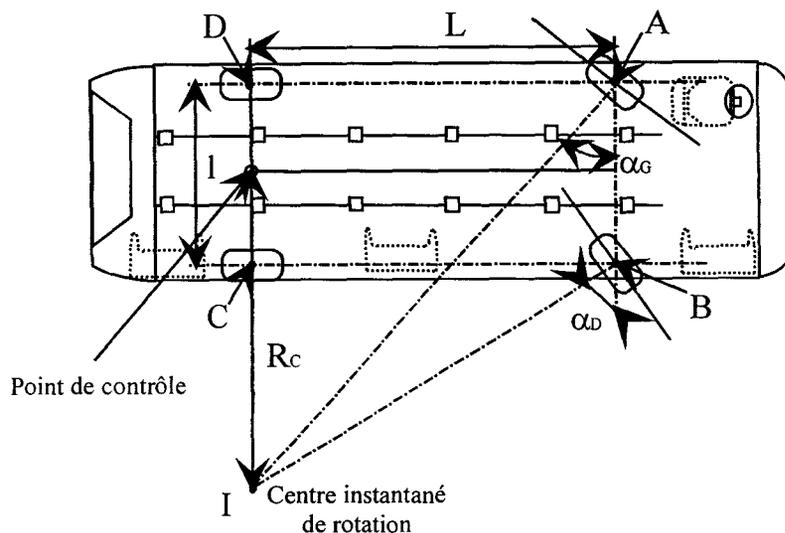


Figure I-8. Modèle quatre roues de Jeantaud

Les équations cinématiques donnent :

Angle de braquage :

$$\alpha_G = \arctan \left(\frac{L}{R_C + \frac{l}{2}} \right) \quad (\text{Equation N}^\circ 14)$$

avec :

- L : empattement du véhicule,
- l : voie du véhicule (hypothèse : voie avant = voie arrière),
- R_C : rayon de courbure.

Rayon de courbure :

$$R_C = \frac{L}{2} \cdot (\cotan \alpha_G + \cotan \alpha_D) \quad (\text{Equation N}^\circ 15)$$

avec :

- L : empattement du véhicule,
- R_C : rayon de courbure,
- α_G : angle de braquage de la roue avant gauche,
- α_D : angle de braquage de la roue avant droite.

Dans le modèle physique, chaque roue suit une courbe distincte avec une vitesse différente. Néanmoins, la vitesse de référence du véhicule est donnée pour un point particulier, le "point de contrôle" du véhicule, choisi, par exemple, sur l'axe longitudinal et correspondant au centre de gravité sur ce modèle (figure I-8).

1.3.1.3 Trajectoire du point de contrôle (centre de gravité)

Sur la base du modèle quatre roues de Jeantaud, le rayon de courbure (R_C) pour le point de contrôle, à savoir le centre de gravité a été calculé.

La position du centre de gravité est variable en fonction de la charge et surtout de la répartition de la charge dans l'autobus. Par exemple, si la charge est plutôt placée sur l'arrière de l'autobus, la position du centre de gravité se déplacera vers l'arrière du véhicule. L'hypothèse faite, d'après une étude déjà réalisée [CES, THE - 67], est que le centre de gravité reste sur l'axe de symétrie longitudinal du véhicule.

La relation entre la position du centre de gravité et la répartition des charges sur l'essieu avant et arrière est calculée. Cette relation sera très utile pour tester la robustesse des lois de commande.

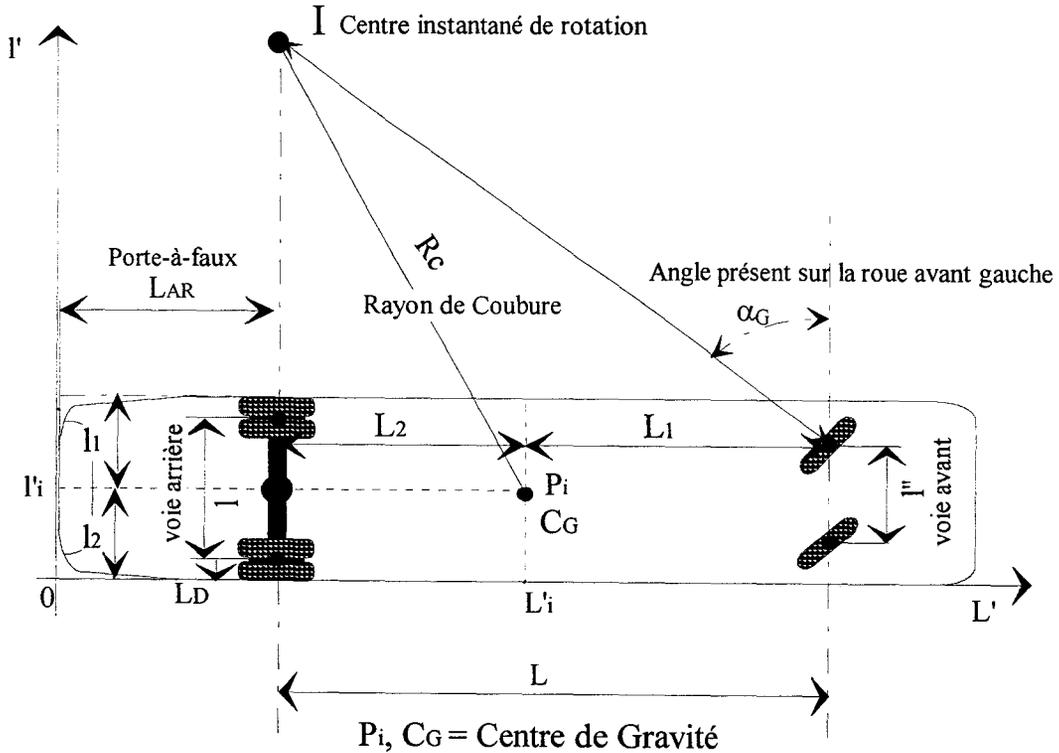


Figure I-9. Position du centre de gravité

Les charges sur les essieux avant et arrière sont connues (respectivement C_{av} et C_{ar} en kg) et le centre de gravité se trouve sur l'axe de symétrie longitudinal.

Alors : $l_1 = l_2 = \frac{\text{largeur de l'autobus}}{2}$ [CES, THE - 67].

Soit :

- L : empattement du véhicule,
- C_{av} : charge présente sur l'essieu avant,
- C_{ar} : charge présente sur l'essieu arrière.

Des relations précédentes, nous tirons :

$$L_1 = L \cdot \left(\frac{C_{ar}}{C_{av} + C_{ar}} \right) \tag{Equation N° 16}$$

et

$$L_2 = L \cdot \left(\frac{C_{av}}{C_{av} + C_{ar}} \right) \quad (\text{Equation N° 17})$$

la position du centre de gravité est déduite (la figure I-9) par rapport au repère (0, L', l') :

$$l'_i = l_2 \quad (\text{Equation N° 18})$$

$$L'_i = L_{AR} + L_2 \quad (\text{Equation N° 19})$$

avec L_{AR} : Porte-à-faux arrière

Pour satisfaire à la condition de compatibilité des roulements, les angles instantanés de braquage de roues sont rarement égaux. Dans le modèle géométrique 4 roues (équation 15), le rayon de courbure s'exprime en fonction des deux angles de braquage des roues gauche et droite. Compte tenu du fait qu'il existe une relation connue entre ces deux angles, le rayon de courbure peut être exprimé en fonction d'un seul de ces angles de braquage.

Grâce à la figure I-10, la relation entre α_D et α_G est déduite (équation 20).

$$\alpha_D = \arctan \left(\frac{L \cdot \tan \alpha_G}{l'' \cdot \tan \alpha_G + L} \right) \quad (\text{Equation N° 20})$$

avec :

- L : empattement du véhicule,
- l'' : voie avant,
- α_G : angle de braquage de la roue avant gauche,
- α_D : angle de braquage de la roue avant droite.

A partir de α_G , de la répartition des charges sur les essieux et de la géométrie du véhicule, le rayon de courbure R_C au centre de gravité P_i est calculé.

Des équations 15 à 20, le rayon de courbure devient :

$$R_C = \sqrt{\left(\frac{l}{2} - \frac{l''}{2} + \frac{L}{\tan \alpha_G} + L_D - l'_i \right)^2 + (L'_i - L_{AR})^2} \quad (\text{Equation N° 21})$$

avec : (figure I-10)

- L : empattement du véhicule,
- l : voie arrière,
- l'' : voie avant,
- l'_i : ordonnée du point P_i du centre de gravité,
- L'_i : abscisse du point P_i du centre de gravité,
- L_{AR} : Longueur du porte à faux arrière,
- $L_D = \frac{la - l}{2}$,
- la : largeur de l'autobus,
- α_G : angle de braquage de la roue avant gauche,
- R_C : rayon de courbure.

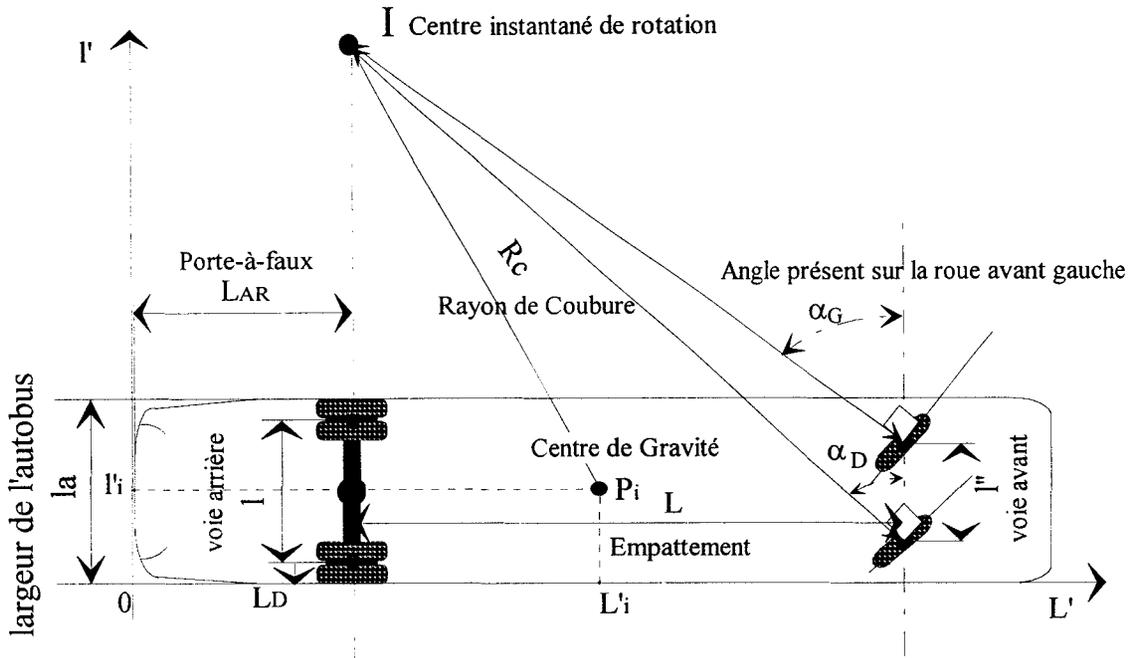


Figure I-10. Caractéristiques d'un autobus

1.3.2 Limites du modèle cinématique

L'hypothèse retenue jusqu'à présent montre que la roue se déplaçait sur le sol dans une direction toujours perpendiculaire à celle de son axe de rotation : il n'y avait ni glissement ni bandage élastique. Mais en réalité, les roues sont munies de pneumatiques qui sont susceptibles de se déplacer sans glissement apparent dans une direction faisant un angle δ_i avec la normale à leur axe de rotation : c'est le phénomène de la dérive.

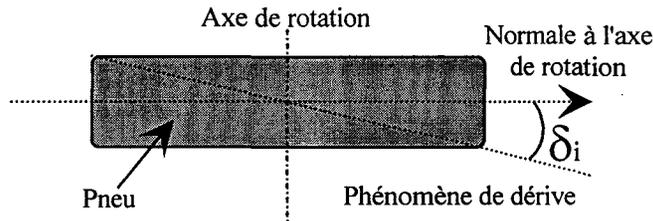


Figure I-11. Explication du phénomène de dérive

1.3.3 Le mécanisme de la dérive

La section d'un pneumatique s'appuyant sur le sol se déforme symétriquement sous l'action du seul poids de l'autobus (figure I-12 (a)). Mais, si une certaine force \vec{F} se trouve appliquée à l'axe de la roue, le pneumatique se déforme dissymétriquement (figure I-12 (b)).

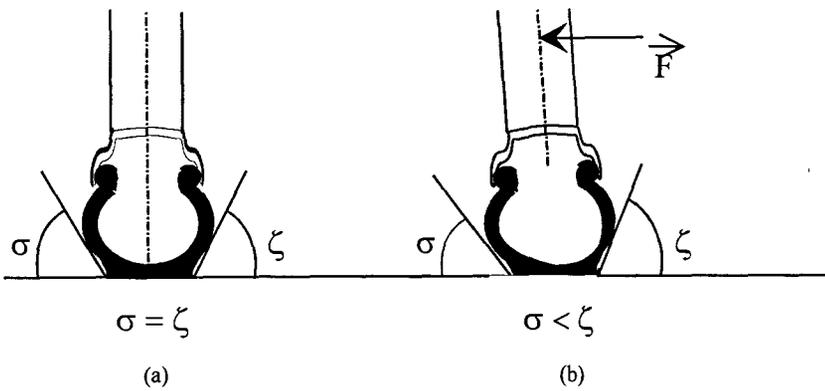


Figure I-12 . Déformation transversale du pneumatique sous l'influence d'un effort

Le phénomène de la dérive s'explique alors comme suit :

Selon les hypothèses suivantes : soit un pneumatique soumis à une poussée axiale \vec{F} dirigée vers la gauche (figure I-13) et dans un plan de symétrie perpendiculaire à l'axe de la roue, soit un point M situé sur la périphérie de ce pneumatique.

La partie du pneumatique en contact avec le sol étant déformée transversalement sous l'influence de cette force axiale \vec{F} , le point M s'écarte légèrement vers la gauche lorsque, sous l'influence du roulement, il entre dans le périmètre z_1 de la portion du pneumatique qui porte sur le sol.

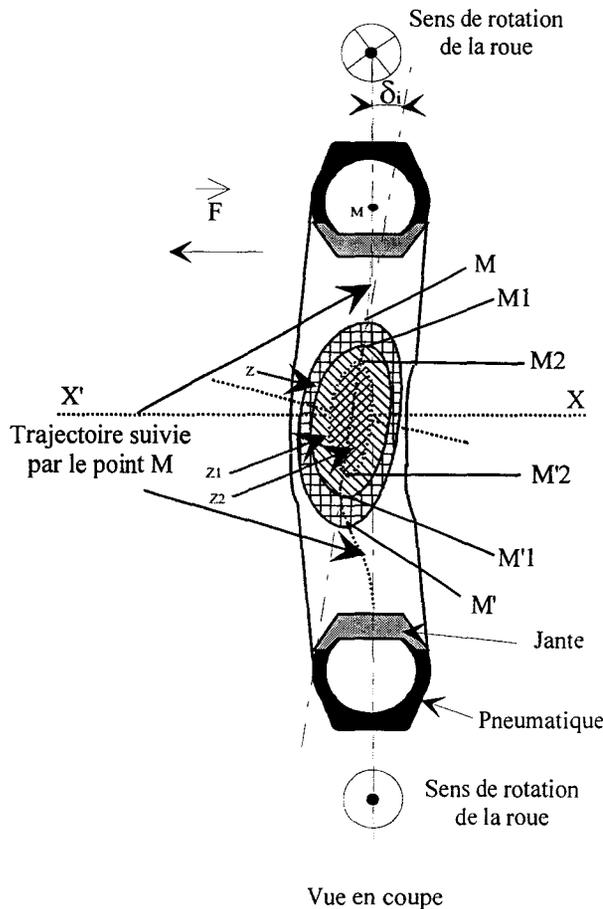


Figure I-13 . Mécanisme de la dérive du pneumatique sous l'influence d'un effort transversal

Le point M pénètre ensuite dans la zone de contact z_1z_2 et, tant que la pression reste faible, c'est-à-dire tant que M se trouve à la périphérie de la zone de contact, il commence par glisser légèrement et transversalement sur le sol.

Mais dès que le point M entre à l'intérieur du périmètre z_2 où la pression du pneumatique sur le sol devient plus forte, il cesse de glisser et se déplace par rapport à la roue dans la direction même de la trajectoire des points liés au sol, c'est-à-dire suivant un segment de droite $M_1M'_1$ faisant un angle δ_i avec le plan normal à l'axe de rotation.

Ce n'est que lorsque le point considéré est arrivé au niveau du point M'_1 , dans une région où l'adhérence commence à diminuer, à savoir à la périphérie de la zone de contact, qu'un certain glissement transversal recommence à se produire, amorçant le retour progressif du point M dans le plan de symétrie de la roue et le retour de la section transversale déformée vers sa forme symétrique initiale.

Donc à toute force transversale \vec{F} appliquée à la roue, correspond forcément, et sans qu'il y ait vraiment dérapage, une certaine dérive δ_i proportionnelle à cette force.

1.3.4 Influence de la dérive sur l'emplacement du centre instantané de rotation

Il est aisé de se faire une idée de l'influence de la dérive sur la position du centre instantané de rotation.

Considérons en effet (figure I-14) un véhicule à direction avant, ayant une masse M et un centre de gravité C_G , se déplaçant à la vitesse tangentielle V, sur une trajectoire de rayon R_C , alors la force centrifuge $\frac{MV^2}{R_C}$ doit être équilibrée par quatre réactions

$\vec{R}_1, \vec{R}_2, \vec{R}'_1$ et \vec{R}'_2 appliquées respectivement à chacune des roues et telles que :

- leur résultante générale soit égale à $\frac{MV^2}{R_C}$,
- leur moment résultant par rapport à C_G soit nul,
- chacune d'elles soit proportionnelle au produit δ_i de la dérive correspondante par la rigidité transversale du pneumatique considéré.

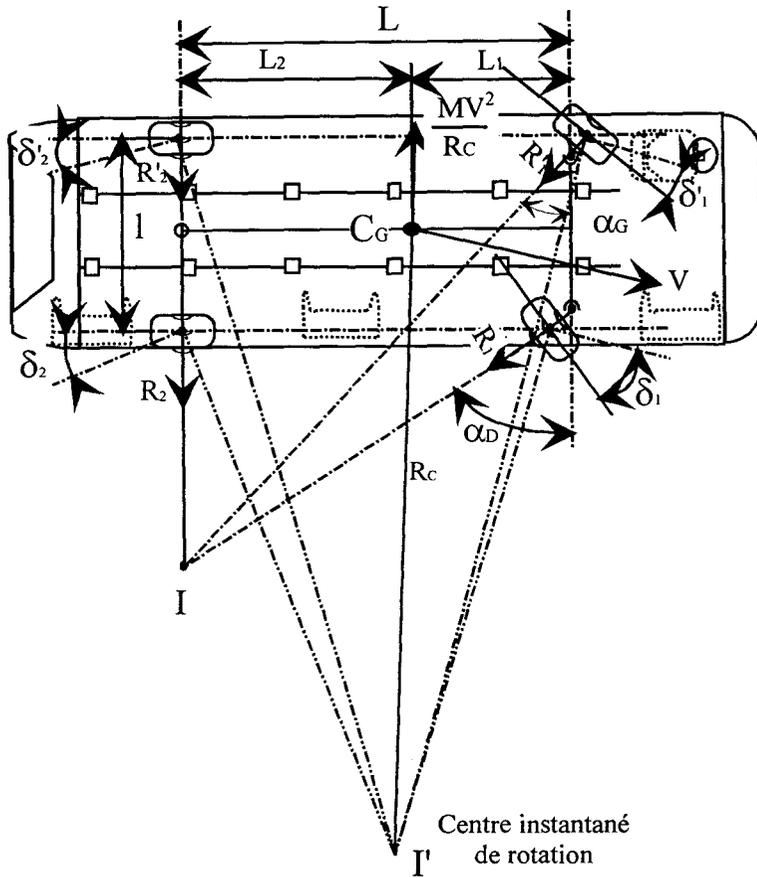


Figure I-14. Influence de la dérive sur l'emplacement du centre instantané de rotation

Si le virage est de rayon suffisamment grand, les dérives des roues avant d'une part et les dérives des roues arrière d'autre part sont considérées comme égales ; ainsi $R_1 \approx R'_1$ et $R_2 \approx R'_2$.

Le rapport $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R'_1}{R'_2}$ est inversement proportionnel au rapport des distances L_1 et L_2

du centre de gravité à l'essieu avant et à l'essieu arrière, c'est à dire proportionnel au rapport des poids portés (Equations N° 16 et 17) par ces mêmes essieux, donc :

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R'_1}{R'_2} = \frac{L_2}{L_1} = \frac{C_{av}}{C_{ar}}$$

Si les angles δ_2 et δ'_2 sont plus grands que les angles δ_1 et δ'_1 , le véhicule prendra un virage plus accentué que celui correspondant au roulement sans glissement. Si la dérive avant était égale au braquage des roues et la dérive arrière nulle, le véhicule se proposerait en ligne droite.

1.3.5 Influence de la dérive sur le calcul du rayon de courbure

Désormais, les angles de dérive sont pris en compte dans le modèle cinématique, en particulier dans l'expression du rayon de courbure.

A partir de la figure I-15, par des relations trigonométriques, le nouveau rayon de courbure est calculé.

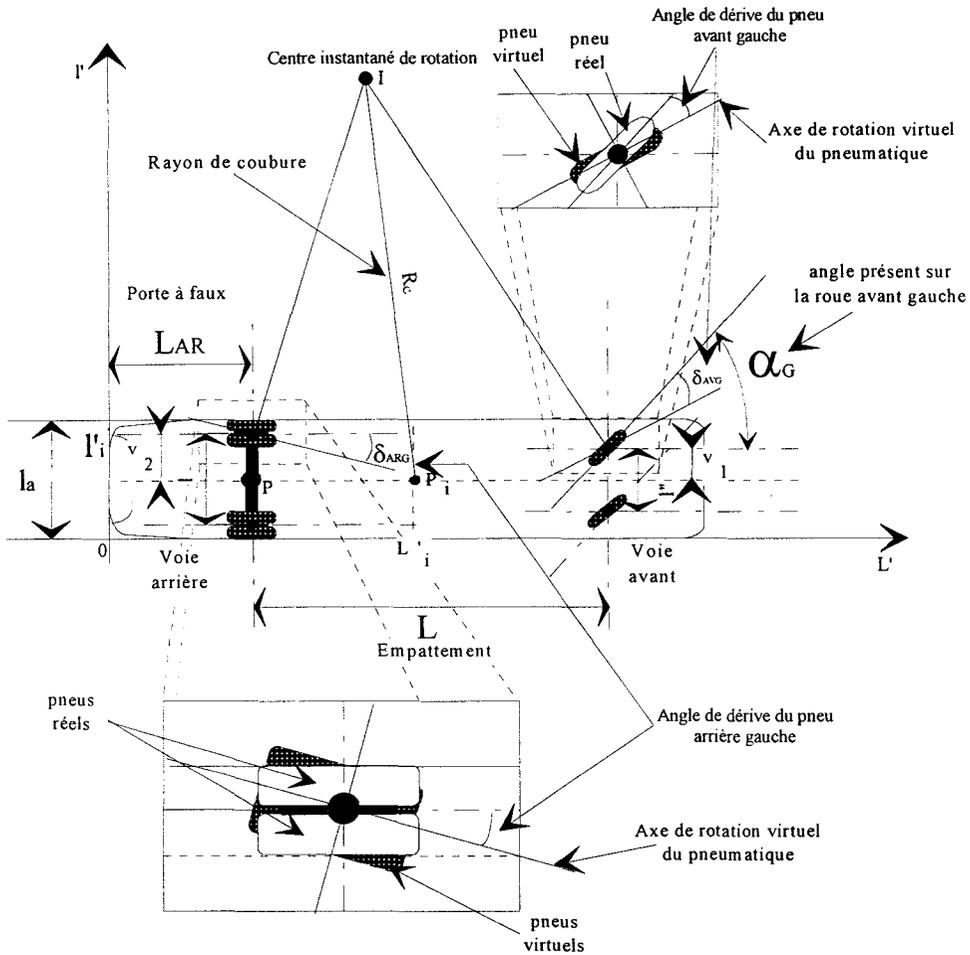


Figure I-15. Modèle cinématique MOCA

Dans ces conditions le rayon de courbure R_C devient:

$$R_C = \sqrt{(x_1 - L'_i)^2 + (y_1 - l'_i)^2} \quad (\text{Equation N}^\circ 22)$$

avec :

$$- x_1 = L_{AR} + \frac{L + \frac{l''-l}{2} \cdot \tan(\alpha_G - \delta_{AVG})}{1 + \frac{\tan(\alpha_G - \delta_{AVG})}{\tan \delta_{ARG}}} \quad (\text{Equation N}^\circ 23)$$

$$- y_1 = \frac{L + \frac{l''-l}{2} \cdot \tan(\alpha_G - \delta_{AVG})}{\tan \delta_{ARG} + \tan(\alpha_G - \delta_{AVG})} + \frac{l''+l_a}{2} \quad (\text{Equation N}^\circ 24)$$

- L : empattement du véhicule,
- l : voie arrière,
- l'' : voie avant,
- l'_i : ordonnée du point P_i, centre de gravité,
- L'_i : abscisse du point P_i, centre de gravité,
- L_AR : longueur du porte-à-faux arrière,

- L_D : $\frac{la - l}{2}$,
- la : largeur de l'autobus,
- α_G : angle de braquage de la roue avant gauche,
- δ_{AVG} : angle de dérive sur la roue avant gauche,
- δ_{ARG} : angle de dérive sur la roue arrière gauche,
- R_C : rayon de courbure.

Toute la difficulté consiste à évaluer ces angles de dérive. L'expression de ces angles est déterminée en se reportant aux lois qui président à l'apparition de ce phénomène, en l'occurrence les lois de la dynamique d'un véhicule en mouvement. Il s'agit donc, à ce stade de notre étude, d'intégrer dans notre modèle cinématique un ensemble d'angles de dérive dont les expressions sont élaborées à partir des équations fondamentales de la dynamique.

1.4 MODELISATION DYNAMIQUE DU VEHICULE

Pour déterminer les angles de dérive, nous nous sommes basés sur les études de Anh Tuan Pham, [PHA - 82-83], [PHA - 83-84], [PHA - 85-86], [PHA - 90-91], appliquées au cas d'un autobus. La démarche complète de la modélisation est détaillée en [Annexe n°2.1] et [DEB, et al - 1.95].

L'angle de dérive sur chaque pneu est donné par l'équation suivante :

$$\sin \delta_i = \frac{\vec{V}_{M1/R0} \cdot \vec{Y}}{|\vec{V}_{M1/R0}|}$$

(Equation N° 25)

avec :

$\vec{V}_{M1/R0}$ vitesse du point M1 dans le repère R_0 de référence (lié au quai)

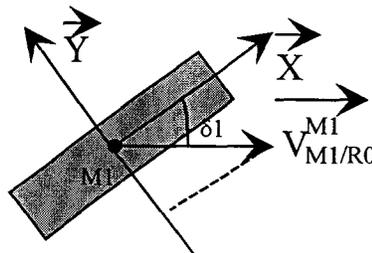


Figure 1-16 . Définition de l'angle de dérive

Il vient :

$$\vec{V}_{(R0)}^{M1} = \begin{pmatrix} \tau_t \dot{\alpha}_G \sin \alpha_G + V \cos \alpha + (\tau_t \sin \alpha_G - v_1) \dot{\psi} \\ -\tau_t \dot{\alpha}_G \cos \alpha_G + V \sin \alpha - (\tau_t \cos \alpha_G - l_1) \dot{\psi} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{Equation N}^\circ 26)$$

avec :

- l_1 : empattement avant,
- v_1 : demi-voie avant,
- τ_t : chasse géométrique,
- V : vitesse du centre de gravité du véhicule sur sa trajectoire,
- α : angle de dérive générale,
- α_G : angle de braquage de la roue avant gauche,
- ψ : angle de lacet.

Le calcul de l'angle de dérive de chaque roue passe notamment par la connaissance de l'angle α de dérive générale du véhicule et de l'angle de lacet ψ .

Ces deux angles s'obtiennent par la résolution du modèle (modèle détaillé en annexe 2.1). Ainsi, l'angle de dérive de la roue avant gauche obtenu est de la forme :

$$\delta_{AVG} = \frac{V(\alpha - \alpha_G) + v_1 \dot{\alpha}_G \dot{\psi} + l_1 \dot{\psi}}{V}, \quad (\text{Equation N}^\circ 27)$$

Et le modèle final est de la forme (modèle détaillé en annexe 2.1) :

$$\left(M.V + \frac{2.D_{AV}}{V} l_1 + \frac{2.D_{AR}}{V} l_2 \right) \dot{\psi} - m.h. \ddot{\theta} + M.V.\dot{\alpha} + (2.D_{AV} + 2.D_{AR}).\alpha = 2.D_{AV}.\alpha_G \quad (\text{Equation N}^\circ 28)$$

$$-I_{xz}.\ddot{\psi} - m.h.V.\dot{\psi} + (m.h^2 + I_x).\ddot{\theta} - R.\dot{\theta} + K.\theta - m.h.V.\dot{\alpha} = 0 \quad (\text{Equation N}^\circ 29)$$

$$I_z.\ddot{\psi} + 2.\left(\frac{D_{AV}}{V} l_1^2 + \frac{D_{AR}}{V} l_2^2 \right).\dot{\psi} - I_{xz}.\ddot{\theta} + 2.(D_{AV} l_1 + D_{AR} l_2).\alpha = 2.D_{AV} l_1.\alpha_G \quad (\text{Equation N}^\circ 30)$$

1.5 CONCLUSION

La modélisation d'un autobus en phase d'accostage cherche à exprimer l'évolution de la distance latérale quai/véhicule en fonction de l'angle volant.

La modélisation cinématique, s'appuyant sur l'épure de Jeantaud, est insuffisante : il faut tenir compte des angles de dérive des pneumatiques. Ce modèle cinématique a évolué en intégrant ces angles calculés à partir d'un modèle dynamique linéarisé à 3 degrés de liberté. De cette façon, un bon compromis performance / complexité est obtenu.

La validation de ce modèle passe par une phase de simulation. Elle comparera le comportement du modèle soumis à une sollicitation donnée à celui d'un véhicule expérimental soumis à la même sollicitation. Ce véhicule expérimental effectuera des manoeuvres dans les conditions relevées lors de l'étude vidéo. L'enregistrement de l'évolution temporelle de l'angle volant servira de sollicitation à la simulation de notre modèle.

De ce fait il sera possible de comparer l'évolution de la distance latérale du véhicule simulé (en boucle ouverte puis en boucle fermée) à celle du véhicule expérimental. A présent, il faut passer à l'étape suivante qui est la simulation et la validation du modèle MOCA.

Chapitre II

SIMULATION DE L'ACCOSTAGE D'UN AUTOBUS

2.1 INTRODUCTION

La simulation des systèmes réels est une technique qui se développe depuis plusieurs années. L'intégration de la simulation dans le cycle de la conception n'est efficace que si certaines conditions sont remplies :

- la simulation doit faciliter rapidement les tests de nombreuses variantes. Il faut simplifier au maximum la phase de modélisation qui doit être ramenée à une simple description,
- il faut décrire différents systèmes par analogie avec des systèmes existants où seuls quelques éléments diffèrent,
- il faut affiner progressivement la description du système au fur et à mesure de l'avancement du projet.

L'objectif de cette simulation est de valider le modèle MOCA. Il s'agit de calculer et de visualiser la réponse du modèle (lacune horizontale) à une sollicitation en l'occurrence une évolution temporelle de l'angle volant. Cette réponse sera comparée à celle relevée sur un véhicule expérimental soumis à la même sollicitation, à l'aide d'une grille de relevés réels.

Ensuite, différentes lois de commande seront testées pour choisir celle répondant le mieux aux critères.

2.2 CONTEXTE DE LA SIMULATION

La recherche d'un concept d'outil de simulation a fait l'objet de longues recherches et de nombreuses thèses dans l'équipe simulation interactive et communication au Centre d'Automatique de Lille.

La conception d'un outil de simulation est un projet qui présente trois niveaux :

- le choix d'un modèle de simulation pour décrire le comportement du système à simuler,
- le choix d'une technique pour la mise en oeuvre de la simulation (moteur de simulation) permettant de faire évoluer le modèle de simulation,
- l'adoption d'un style d'interactivité pour la communication homme - machine.

La question posée au départ de l'étude était : "Qu'attendons-nous de la plate-forme de simulation ?". Pour répondre à cette question, un cahier des charges du logiciel a été réalisé. Le but cherché est de visualiser et de quantifier le comportement cinématique et dynamique d'un autobus à l'approche d'une station (et plus généralement d'un véhicule routier), équipé ou non de capteurs extéroceptifs intervenant dans la chaîne de commande du véhicule. Le profil de vitesse du véhicule est imposé. A priori, le véhicule peut suivre une trajectoire de référence, elle aussi connue ou perçue par les capteurs placés sur le véhicule.

2.2.1 Edition graphique

Remarque : toutes les saisies se font à la souris avec visualisation en temps réel des coordonnées de sa position dans le repère de l'objet graphique en cours d'édition.

L'environnement :

- repère absolu (xoy) : (ox) = limite de la chaussée,
- forme du quai (quai en ligne, en saillie, ou en encoche),
- éléments de voirie.

Le véhicule :

- définition géométrique : taille, emplacement des essieux et paramètres dynamiques,
- choix et saisie des paramètres.

Les capteurs :

- représentation graphique,
- fonction de transfert,
- localisation sur le véhicule.

La trajectoire de référence : trajectoire continue ou discontinue (forme et position par rapport au quai).

La visualisation de l'évolution des grandeurs :

- position,
- orientation,
- vitesse du véhicule (dans le repère absolu),
- lacune horizontale,
- écart de position par rapport à la trajectoire de référence,
- mesures données par les capteurs.

L'animation graphique :

- conditions initiales du véhicule (position et orientation),
- profil de vitesse,
- coordonnées du point cible (vitesse nulle),
- relation angle volant / angle roue,
- loi de commande en position en boucle ouverte et en boucle fermée.

2.2.2 Etude en boucle ouverte

Fonction de transfert : une trajectoire $P(x, y) = f(t)$ et les conditions initiales (position, orientation) sont imposées. L'évolution temporelle de l'angle au volant correspondant est calculée et visualisée.

Réponse à un échelon de commande : dans la simulation un angle constant sur le volant en fonction du temps est injecté et le déplacement (longitudinal et transversal) de l'autobus sur la chaussée est visualisé.

2.2.3 Etude en boucle ferméeFonction de transfert :

- validation et réglage des correcteurs,
- évaluation des performances par suivi de trajectoire définie a priori.

Aide à l'accostage : correction de trajectoire à l'aide de capteurs de proximité.

Une stratégie d'approche $P(x,y) = f(t)$ a été choisie, un profil de vitesse, un type de capteur, un nombre de capteurs, une position d'installation de capteurs et la fonction de correction introduite par les capteurs.

La perception des capteurs est visualisée : $P(x,y) = f(t)$ avant correction, $P(x,y) = f(t)$ après correction, l'orientation du véhicule au point cible et l'angle au volant = $f(t)$.

Aide à l'approche de la station : suivi de trajectoire par capteur optique.

Une trajectoire de référence sur la chaussée (bande blanche, pointillés ...), le type de capteurs, le nombre de capteurs utiles, une position d'installation de ces capteurs sur le véhicule et la fonction de correction introduite par les capteurs sont définis.

L'évolution de l'autobus sur la chaussée, la perception des capteurs, la trajectoire de référence, $P(x,y) = f(t)$, l'orientation du véhicule au point cible et l'angle volant sont visualisés en fonction du temps.

2.2.4 Le choix de la plate-forme de simulation

Le concept de simulateur où un opérateur humain se trouve face à un dispositif reproduisant le plus fidèlement possible le comportement d'un système réel plus complexe est maintenant largement utilisé. Dans le cas de la simulation pour le guidage de véhicule routier, le système complet est constitué par le conducteur, le véhicule et l'environnement. En fait, la solution consiste à simuler non pas le système complet, mais uniquement deux de ses composantes : le véhicule et l'environnement.

L'utilisation d'un simulateur interactif apparaît nécessaire :

- pour pouvoir dialoguer avec l'utilisateur de la simulation (exemple, entrer les données : vitesse, orientation initiale de l'autobus, position latérale initiale...),
- pour la description ou la variation de la géométrie ou de la dynamique du véhicule à tout moment de la simulation (changement de type de véhicule),
- pour choisir l'environnement d'évolution du véhicule (quai en ligne, en encoche...),
- pour faire varier les conditions d'utilisation (charge du véhicule, vitesse...),
- dans le cas d'une conduite manuelle, pour entrer la valeur de l'angle à appliquer à la direction du véhicule,
- pour l'interprétation des résultats sous forme de tableaux ou de courbes,
- pour choisir les informations représentées sous forme de courbes,
- dans le cas d'aide à l'accostage, le simulateur restitue l'information du capteur sous forme visuelle, (l'utilisateur donne en retour une valeur de l'angle à présenter sur la direction et la durée nécessaire de cette consigne).

La plate-forme de simulation utilisée a été développée par l'équipe de recherche Système Interactif et Communication au Centre d'Automatique de Lille. Cette plate-forme répond aux trois conditions évoquées dans l'introduction et repose sur un moteur de simulation qui sera décrit ultérieurement.

Les raisons pratiques de cette plate-forme de simulation sont exposées ci-dessous.

- La simulation facile à mettre en oeuvre permet de tester rapidement de nombreuses variantes. Ce point est réalisé par l'interactivité et la simplicité de programmation.
- Différents systèmes peuvent être décrits par analogie avec des systèmes existants dans lesquels seuls quelques éléments diffèrent. Par exemple, il est possible de simuler le comportement d'un autobus, d'un camion ou d'une camionnette en intervenant au niveau de la géométrie et de la dynamique (poids, inertie...).
- La description du système affinée progressivement permet de faire évoluer le modèle cinématique vers le modèle dynamique.

Cette plate-forme de simulation peut être utilisée de deux façons. Dans le premier cas, correspondant à la simulation des systèmes, l'application est représentée par un modèle composé d'un ensemble d'objets de simulation à contraintes. Dans le deuxième cas, l'application est non définie a priori. Elle est représentée par un modèle quelconque, écrit en langage à contraintes ou non, évoluant dans le temps et auquel on veut associer une animation sur l'écran. Des objets de simulation ont été créés à cet effet et appelés "objets interactifs". Ils possèdent le même comportement que n'importe quel objet de simulation. Leur seule contrainte est de vérifier si les valeurs des variables qu'ils représentent ont changé ou pas afin de provoquer l'animation du synoptique.

Le modèle MOCA de simulation est un modèle temporel. Les variables internes et des paramètres extérieurs (vitesse...) évoluent en fonction du temps. Il apparaît plus judicieux d'utiliser cette plate-forme dans le cas d'une application non définie a priori. Le moteur choisi évolue pas à pas. Cela signifie qu'à chaque pas de simulation, tous les paramètres nécessaires pour l'évolution du modèle seront recalculés. L'évolution du synoptique sera réalisée suivant le choix de l'utilisateur (à chaque pas de simulation ou une fois tous les n pas).

2.3 LE MOTEUR DE LA SIMULATION

L'outil de simulation programmé en langage orienté objet [MOS - 94] se situe dans la catégorie des générateurs d'applications interactives. Il permet aux concepteurs d'aller de la construction de son propre modèle jusqu'à la simulation et à l'animation de ses synoptiques. Cette plate-forme de simulation décompose cette opération en trois phases essentielles : modélisation, construction du synoptique et simulation et interprétation des résultats. Au début de la conception de la plate-forme de simulation, les concepteurs, confrontés au problème de choix de modèle, ont essayé d'apporter leur contribution en proposant une architecture informatique des interfaces graphiques destinées à la simulation interactive. Cette architecture est basée sur la combinaison du modèle MVC (Modèle, Vue, Contrôleur, modèle proposé par le langage Smalltalk) [MEV, GUE - 87] et du modèle P.O_s.T (Présentation, Objet de Simulation, Traducteur) [MOS - 94].

Le principe du modèle MVC reste, à l'heure actuelle, l'une des meilleures solutions commercialisées pour la construction rapide d'interfaces avec un minimum de pratique et d'expérience de la bibliothèque Smalltalk. Néanmoins, le modèle MVC n'offre pas de stratégie pour la réalisation de nouvelles vues et de méthodes de transformation de l'image abstraite en image réelle. Les concepteurs de la simulation ont donc fait évoluer ce modèle vers un modèle plus approprié : le modèle P.O_s.T.

La raison d'être du modèle P.O_s.T réside dans sa structure très générique et dans les outils de sa conception. Ceux-ci permettent la création interactive des représentations graphiques très représentatives des modèles de simulation et la génération automatique des animations du synoptique.

Le modèle P.O_s.T regroupe trois entités distinctes :

- la **Présentation**, chargée de l'aspect visuel, assure l'affichage et l'animation de l'objet de simulation,
- l'abstraction représentée par le modèle de l'**Objet à Simuler**, modèle développé dans le chapitre précédent (MOCA),
- le **Traducteur** est prévu pour assurer la cohérence des domaines abstraits et graphiques à l'aide d'une bibliothèque de méthodes de traduction extensible par l'opérateur.

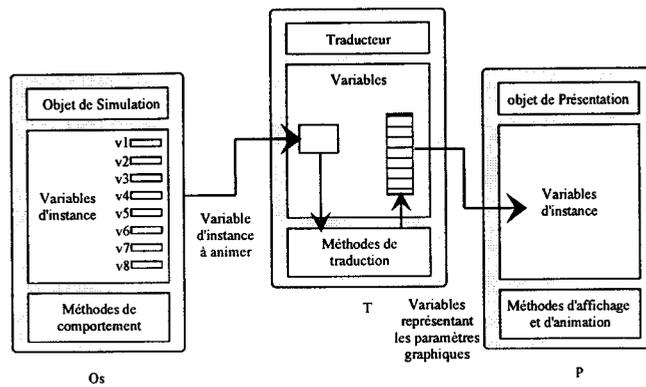


Figure II-1 . Structure du modèle P.O_s.T

L'architecture globale du modèle P.O_s.T est représentée par la figure II-1. Elle s'adapte parfaitement aux règles de conception des interfaces utilisateurs. En effet, l'objet de simulation est vu comme le composant élémentaire de l'application abstraite. Son comportement, écrit à base de contraintes ou représenté par son modèle temporel, permet de faire évoluer son état dans l'environnement de simulation.

La présentation est définie par un élément graphique, par exemple : un rectangle, un cercle, un polygone, un texte, etc... Une classe de base modélise les paramètres et les méthodes d'affichage communes à ces éléments. A chaque élément graphique, est associée une sous-classe qui définit les paramètres et les comportements spécifiques.

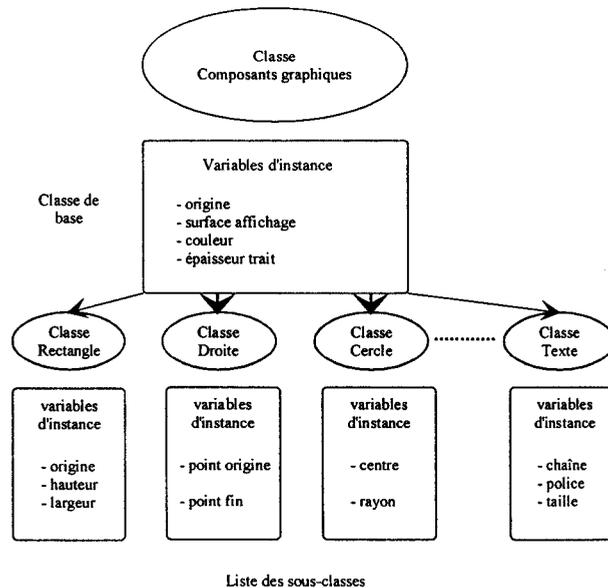


Figure II-2 . Bibliothèque des classes graphiques

Par analogie avec l'objet de simulation, la présentation constitue la composante élémentaire du synoptique. La construction de ce dernier revient donc à créer l'ensemble des présentations graphiques. Cela se fait en parallèle avec la construction des objets de simulation.

L'objectif de l'outil utilisé étant la simulation et l'animation du synoptique, une communication est établie entre l'application abstraite et le synoptique à l'aide d'un pont



constitué de l'ensemble des traducteurs. Chaque traducteur relie un objet de simulation à sa présentation.

Dans la mesure où un objet de simulation nécessite une animation quelconque, le traducteur définit une ou plusieurs méthodes de traduction reliant une ou plusieurs variables de l'objet en question aux variables de la présentation correspondante.

En effet, à chaque fois qu'un objet de simulation est invité à résoudre les contraintes décrivant son comportement, il demande à son traducteur de vérifier la stabilité de ses contraintes de traduction, c'est-à-dire vérifier si les variables concernées par l'animation ont changé. Lorsqu'une contrainte de traduction est instable, le traducteur exécute automatiquement la méthode de traduction correspondante.

Un exemple simple de contrainte de traduction est le cas d'un objet de simulation "véhicule" dont la valeur de la position est contenue dans la variable "*position*" et l'animation choisie est l'évolution d'un rectangle sur l'écran. La présentation correspondante est donc un rectangle ayant comme variable caractéristique une position sur l'écran. Lors de la vérification de la stabilité, le traducteur regarde si la valeur de "*position*" a changé. Dans ce cas, la résolution de la contrainte est assurée et le rectangle évolue sur l'écran.

2.4 REALISATION DE LA PLATE-FORME DE SIMULATION DU GUIDAGE DES AUTOBUS EN STATION

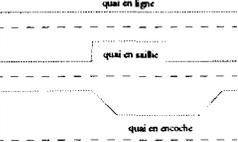
La première phase de la conception de la plate-forme de simulation est la décomposition de la scène à simuler en objets de simulation.

La décomposition en objets de simulation permet de construire l'interface graphique. Il convient de réfléchir à la construction du synoptique et aux méthodes pour créer l'objet de simulation qui gère l'animation graphique.

Pour chaque type d'objet de simulation, il faut construire une présentation graphique en se servant de l'éditeur graphique. Ensuite, il faut identifier pour chaque présentation les éléments de la partie statique et ceux de la partie dynamique (à animer).

Enfin, la dernière partie, la plus importante et la plus délicate : l'établissement d'une relation entre les éléments dynamiques et les variables de l'objet de simulation gouvernées par l'animation. Cette relation, appelée aussi contrainte d'animation ou relation temporelle, permet de modifier les paramètres des éléments graphiques (position, largeur, hauteur, couleur, etc...) en fonction de la valeur des variables de l'objet de simulation en question.

Dans notre cas, les objets de simulation sont : l'autobus, les capteurs, la bande blanche si on utilise un capteur de type caméra, le quai surélevé et la chaussée. Le tableau suivant donne, pour chaque cas, la présentation sur l'écran, les éléments graphiques à animer et le type d'animation.

Nom du prototype	Présentation de l'objet de simulation	Variable(s) à animer	Élément à animer	Type d'animation
<i>Autobus</i>		Orientation Position horizontale et verticale	Rectangle	Recopier le comportement d'un autobus réel
<i>Capteur</i>		Distance mesurée	Segment point de départ point de réflexion	Relier deux points (télémètre)
<i>Ligne blanche</i>		Pas de variable	-	Pas d'animation
<i>Quais</i>		Pas de variable	-	Pas d'animation

2.4.1 Description de l'objet de simulation

La structure d'un objet est entièrement décrite par ses variables. Celles-ci peuvent être classées en trois catégories [MOS - 94] :

- les caractéristiques décrivant les données statiques propres à l'objet (exemple : longueur, largeur, hauteur, masse de l'autobus dans notre cas). Elles sont modifiables selon les besoins de l'application et sont souvent utilisées pour représenter des seuils, des valeurs de référence...,
- les entrées/sorties regroupant les informations reçues ou fournies par l'objet. Ces informations sont des données qui évoluent dans le temps (données des capteurs, évolution latérale, évolution longitudinale, évolution de l'orientation, évolution de l'angle de braquage de la direction du véhicule ou de la roue avant gauche...),
- les variables internes qui décrivent les données dynamiques propres à l'objet. Fonction du comportement interne de l'objet face aux entrées/sorties, elles décrivent l'état de l'objet qu'elles représentent (angles de glissement, angles de lacet...).

Le comportement d'un objet de simulation est, en général, donné par un ensemble de méthodes agissant directement sur sa structure. Il se divise en deux parties :

- les contraintes statiques ou règles qui assurent la cohérence de relations physiques ou de lois statiques,
- les actions de l'objet qui représentent son comportement dépendant du temps.

Dans ce cas d'étude, l'application est représentée par un modèle qui n'est pas écrit en langage à contraintes. Le modèle évolue dans le temps et une animation sur l'écran lui est associé. Les objets créés possèdent le même comportement que n'importe quel objet de simulation. La seule contrainte est de vérifier le changement des valeurs des variables et le

non-dépassement des 50 mètres de la distance longitudinale parcourue. Alors, et seulement alors, le synoptique sur l'écran sera animé.

2.4.2 Description du modèle de simulation permettant l'évolution du synoptique sur l'écran

La simulation est basée sur le calcul des rayons de courbure successifs. A chaque pas de simulation, le rayon de courbure correspondant à l'état du véhicule est calculé. A partir de ce rayon et de la vitesse, l'évolution de l'orientation du véhicule et son évolution longitudinale et latérale sont déduites.

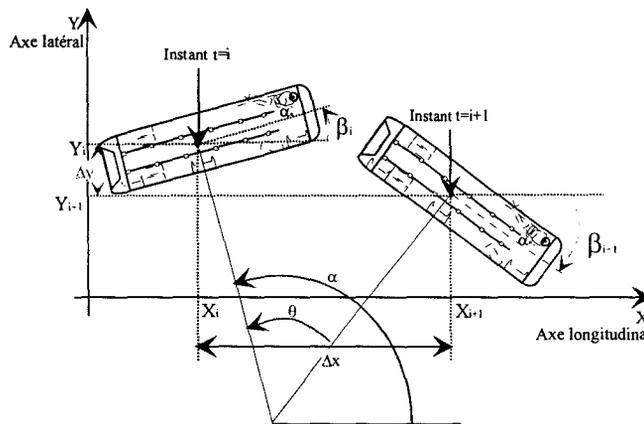


Figure II-3 . Forme de la trajectoire

Ces évolutions sont données par les relations géométriques présentées ultérieurement. Pour les calculs, la vitesse et l'angle présent sur le volant du véhicule entre deux instants d'échantillonnage sont supposés constants.

Posons alors :

$$K \text{ (en mètres), distance parcourue : } K = \frac{V \cdot 1000}{3600} \cdot \Delta T = \frac{V}{3,6} \cdot \Delta T \quad (\text{Equation N}^\circ 1)$$

avec V vitesse en km/h, et ΔT période d'échantillonnage en s.

$$\text{L'angle } \theta \text{ (en degrés) : } \theta = \frac{K}{2\pi \cdot R_c} \cdot 360^\circ. \quad (\text{Equation N}^\circ 2)$$

$$\text{L'angle } \alpha \text{ (en degrés) : } \alpha = \left(\beta_i + \left(90 \cdot \text{sign}(-\alpha_G) \right) \right). \quad (\text{Equation N}^\circ 3)$$

avec α_G : angle de braquage de la roue avant gauche du véhicule.

A partir des équations N°1, 2 et 3 et des relations géométriques et trigonométriques, les variations de ΔX , ΔY , $\Delta \beta$ sont obtenues.

Ces variations sont de la forme suivante :

$$\text{Evolution de l'orientation : } \Delta \beta = \theta \cdot \text{sign}(\alpha_G) \quad (\text{Equation N}^\circ 4)$$

$$\text{Evolution de la distance longitudinale : } \Delta X = R_C \cdot \left[\cos\left(\left(\theta \cdot \text{sign}(\alpha_G)\right) + \alpha\right) - \cos(\alpha) \right]$$

(Equation N° 5)

$$\text{Evolution de la distance latérale : } \Delta Y = R_C \cdot \left[\sin\left(\left(\theta \cdot \text{sign}(\alpha_G)\right) + \alpha\right) - \sin(\alpha) \right]$$

(Equation N° 6)

Ces trois valeurs déterminées et le modèle MOCA implanté, les objets de simulation peuvent être animés et les informations utiles peuvent être relevées : les évolutions de l'angle présent sur le volant, de l'angle de braquage des roues, des angles de dérive et l'évolution de la lacune horizontale d .

Avec le modèle et les différentes interfaces réalisées, le comportement de l'autobus à l'approche d'une station peut être simulé. Quelques exemples de simulation sont présentés dans les pages suivantes.

Mais avant de passer à l'interprétation des courbes, nous allons montrer le synoptique disponible sur la plate-forme de simulation. L'évolution sur l'écran est visualisée de la façon suivante.

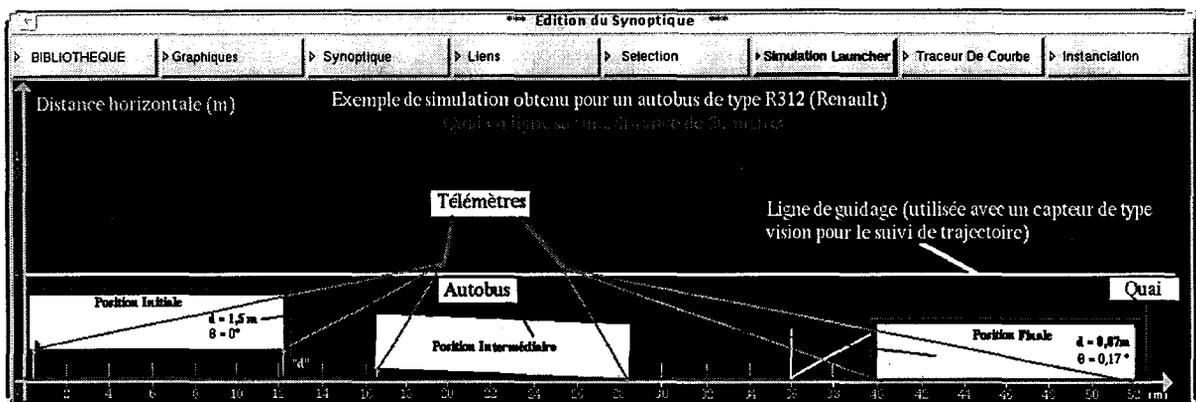


Figure II-4 . Environnement de la simulation

2.4.3 Réponse indicielle du modèle MOCA

2.4.3.1 Essais à vitesse et angle de braquage constants

Le premier essai de la simulation a été effectué pour une vitesse constante de 10 km/h, une charge du véhicule égale à 19 tonnes, une valeur de la consigne pour l'angle de braquage de la roue avant gauche de 10°, une position initiale latérale de 2,5 mètres (distance entre l'avant de l'autobus et le quai) et une orientation de 0° (orientation entre l'autobus et le quai). Les résultats sont visualisés sur les figures suivantes :

La consigne angle de braquage et l'évolution de l'angle réel sur la roue avant gauche en fonction du temps, $C_I = f(t)$ et $\alpha_G = f(t)$:

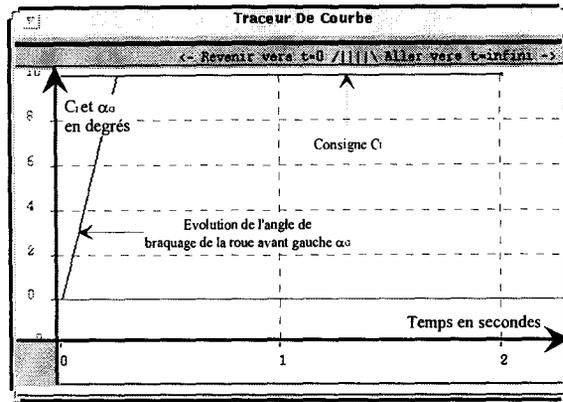


Figure II-5. Consigne et angle de braquage de la roue avant gauche en fonction du temps

L'évolution de l'orientation du véhicule en fonction du temps, $\theta = f(t)$:

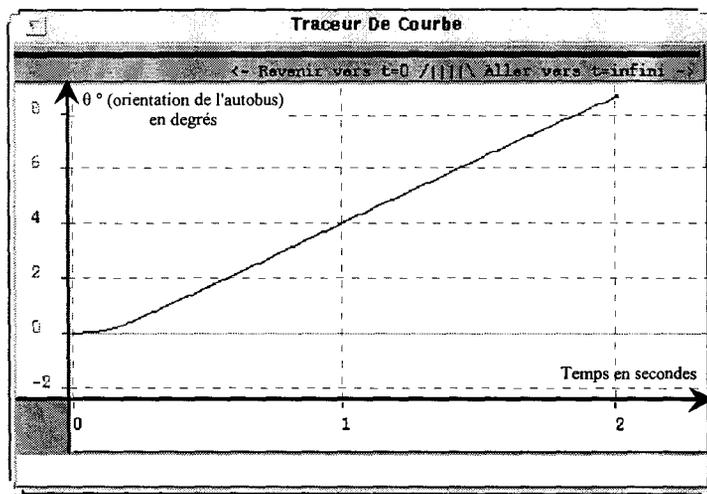


Figure II-6. Orientation en fonction du temps

L'évolution temporelle de la lacune horizontale, $d = f(t)$:

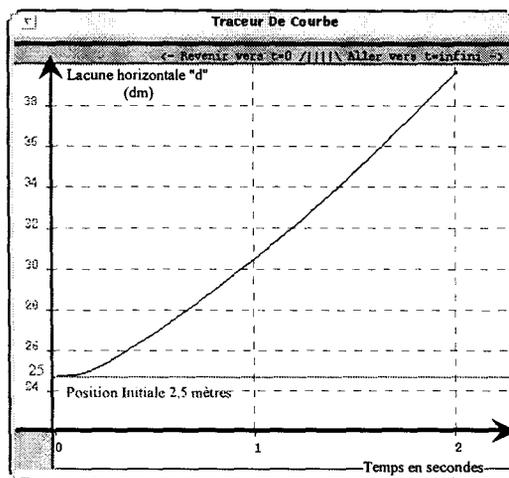


Figure II-7. Distance latérale en fonction du temps

2.4.3.2 Influence de la variation des paramètres sur la trajectoire

Il est possible de simuler le comportement d'un autobus en faisant varier sa charge, la consigne d'entrée, la vitesse et les autres paramètres liés à la dynamique du véhicule. Le prochain essai réalisé présente l'influence de la variation de charge sur la trajectoire.

Une simulation a été effectuée pour une vitesse stable de 10 km/h, avec cette fois-ci une charge du véhicule égale à 12 tonnes, une valeur de la consigne pour l'angle de braquage de la roue avant gauche de 10°, une position latérale initiale de 2,5 mètres et une orientation de 0°. Cet essai permet de voir l'influence de la charge sur la trajectoire suivie. Les résultats sont visibles sur les figures suivantes :

L'évolution de l'angle de braquage sur la roue avant gauche et la consigne en fonction du temps, $\alpha_G = f(t)$ et $C_1 = f(t)$ sont identiques au cas précédent (figure II-5).

L'évolution de l'orientation du véhicule en fonction du temps, $\theta = f(t)$ est différente du cas précédent :

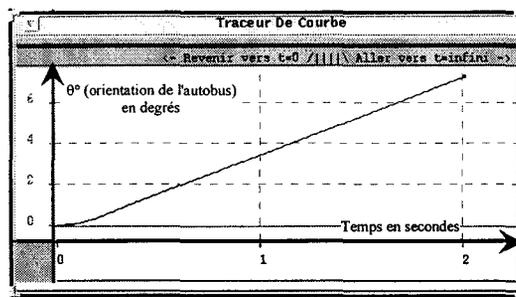


Figure II-8. Orientation en fonction du temps

L'évolution temporelle de la distance latérale qui sépare l'autobus du quai, $d = f(t)$ est légèrement différente du cas précédent :

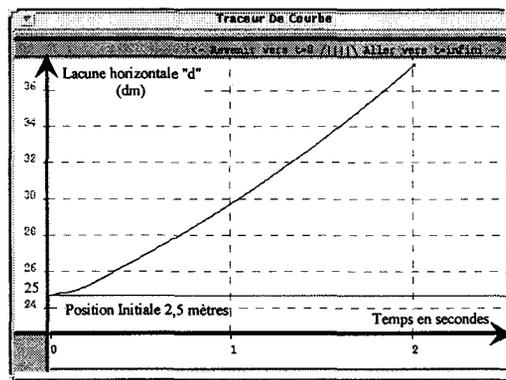


Figure II-9. Distance latérale en fonction du temps

La réduction de la charge du véhicule se traduit par une réduction de l'angle de dérive sur les pneumatiques. La simulation montre nettement une diminution de la pente de l'orientation θ° du véhicule, c'est-à-dire une augmentation du rayon de courbure.

Un test a été réalisé avec une vitesse de déplacement plus importante de l'autobus en passant d'une vitesse de 10 km/h à une vitesse de 25 km/h. Cette variation de vitesse s'est

traduite par une augmentation du déplacement longitudinal impliquant une augmentation plus rapide de la lacune horizontale.

Un autre essai a été réalisé cette fois-ci en diminuant la consigne de l'angle de braquage de la roue avant gauche. Cette réduction de l'angle de braquage de la roue avant gauche s'est traduite par une réduction du rayon de courbure. La simulation montre nettement une diminution de ce rayon, c'est-à-dire une augmentation plus rapide de la lacune horizontale. Il apparaît bien que l'augmentation de la lacune horizontale n'est pas proportionnelle à l'angle de braquage du volant et donc met en évidence l'existence des angles de dérive sur les pneumatiques.

Il est possible de simuler le comportement d'un autobus en faisant varier sa charge, la consigne d'entrée, la vitesse... Avant d'interpréter les résultats et d'utiliser la simulation pour tester et choisir la loi de commande la plus adaptée, il faut valider les résultats du modèle théorique simulé, avec les relevés effectués sur le véhicule expérimental soumis aux mêmes conditions.

2.5 VALIDATION DU MODELE MOCA ET DE LA SIMULATION DU GUIDAGE DES AUTOBUS EN STATION

Dans le cadre du guidage, il importe de connaître l'évolution temporelle de la distance latérale séparant l'autobus du quai. Cette distance est fournie par le modèle en fonction de la consigne temporelle de l'angle du volant de l'autobus.

Compte tenu des hypothèses simplificatrices apportées à la modélisation et de l'imprécision des mesures sur les paramètres dynamiques (fournis ou non par le constructeur), il est indispensable, pour valider le modèle MOCA, de comparer les résultats de la simulation aux relevés expérimentaux. Ceci amène à mettre en place une campagne de mesures destinée à obtenir une modélisation expérimentale partielle du véhicule [HEU - 90]. Les modèles expérimentaux ne décrivent pas la structure interne d'un phénomène mais uniquement l'évolution conjuguée de ses entrées et de ses sorties. Avant de commencer toute campagne d'essais, il faut dresser un protocole de mesures.

2.5.1 Protocole de mesures

La recherche d'un protocole optimal [RIC - 91] a un intérêt pratique majeur, notamment dans le cas où la durée des protocoles d'essais doit être courte (pour des raisons économiques par exemple).

Le premier élément à déterminer est le cadre du protocole.

2.5.1.1 Définition d'un cadre

Ce cadre va situer le protocole envisagé dans une classe bien déterminée. Celui-ci est défini en fonction des spécifications et des contraintes de l'application particulière. Un très grand nombre de possibilités peut être imaginé, mais il convient toujours de répondre à trois spécifications :

- horizon de l'essai. C'est la première constante à déterminer. Elle est égale à la durée pendant laquelle il est possible d'appliquer des essais,
- niveau d'excitation,
- structure du signal d'excitation. Il faut préparer correctement le protocole d'essai avec des signaux de test les plus significatifs possibles. Plusieurs habitudes existent dans le choix des signaux de test (en Automatique réponse à l'échelon, réponse à une rampe, réponse à un signal sinusoïdal...).

2.5.1.2 Définition de notre protocole

Dans la validation de notre modèle, voici le protocole choisi :

- Définition du cadre :

- horizon : la durée des essais est variable et dépend de la vitesse d'évolution de l'autobus sur la chaussée. La distance maximale des essais est de 50 mètres (distance d'un accostage),
- amplitude limite : le modèle à valider a deux entrées ; la première est la vitesse, la seconde l'angle de braquage présent sur la roue avant gauche. La période d'essai sera divisée en deux. La première période consiste à faire évoluer l'angle de braquage en gardant une vitesse constante. Pendant la deuxième période, la vitesse varie avec un angle de braquage donné. Des limites sont fixées : la vitesse ne doit pas dépasser 50 km/h et l'orientation de la roue avant gauche doit rester inférieure à 50°.
- classe de protocoles choisie : réponse indicielle.

- Choix des critères :

Trois critères sont optimisés :

- respecter la consigne de vitesse,
- respecter la consigne d'angle de braquage,
- dans le cas du test réalisé pour la commande, minimiser l'espace entre le quai et le véhicule.

- Présentation des résultats :

Pour différentes valeurs de vitesse (comprises entre 5 et 50 km/h) et différentes valeurs d'angle de braquage, la variation de vitesse, l'évolution de l'angle de braquage, la distance latérale séparant l'avant du véhicule avec le quai, la lacune horizontale et, dans le cas des essais réalisés pour la commande floue, la distance latérale séparant l'arrière du véhicule avec le quai sont représentées.

2.5.2 Description du système expérimental pour l'élaboration du modèle expérimental

Le choix effectué pour les essais expérimentaux repose sur le comportement de l'opérateur humain, sur la trajectoire suivie par l'autobus pour une commande ou un but fixé (par exemple, l'accostage de l'autobus).

La conception d'un guidage automatique d'un autobus ou d'un véhicule en général, dans sa phase expérimentale, requiert l'exploitation d'une grande diversité de solutions. Le concepteur dispose d'une méthodologie de comparaison qui permet de choisir entre des mesures prévues pour la même fonction répondant parfois à des stimuli différents. Il doit aussi, à chaque pas, vérifier l'origine d'un dysfonctionnement : un sous-système identifié, une erreur de conception au niveau du système, ou une erreur de mesure. Pour chaque dysfonctionnement, il affine son modèle théorique à partir des données expérimentales. Sinon, il recommence les mesures.

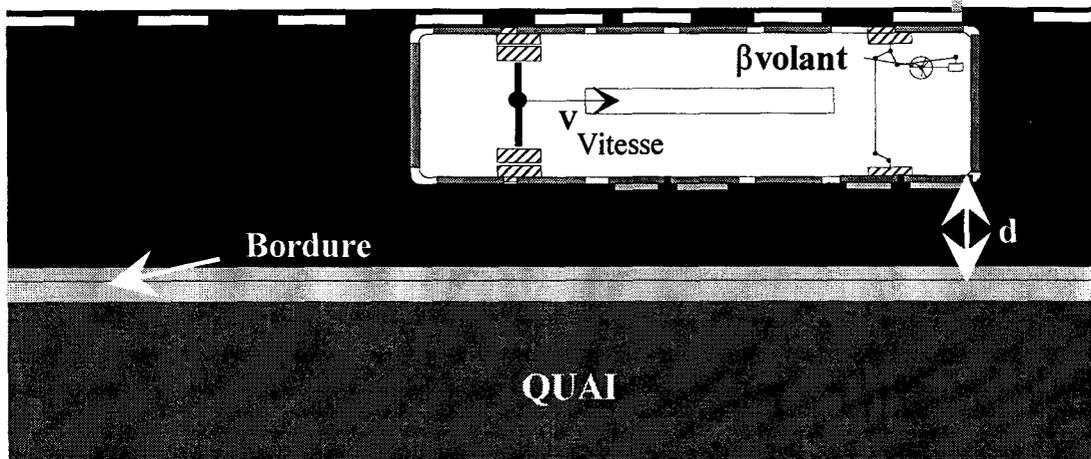


Figure II-10. Site expérimental

L'option retenue se base sur un dispositif électronique et informatique. La trajectoire du véhicule est relevée par un télémètre qui mesure la distance latérale d entre le capteur et une surface de rétrodiffusion placée sur la bordure du quai. Pour la réalisation d'un accostage, la surface de réflexion du signal est la bordure du trottoir, ce qui entraîne l'installation du capteur sur la paroi droite du véhicule, à une hauteur de quinze centimètres de la chaussée.

2.5.3 Le système embarqué

Pour réaliser les essais, une camionnette laboratoire de type Citroën C25 été disponible. Elle a été équipée d'un capteur de proximité (télémètre laser) permettant la mesure de la distance latérale d , d'un capteur permettant la mesure de l'angle présent sur le volant, d'un capteur de vitesse qui permet de relever la vitesse d'évolution de la camionnette et d'un ordinateur type P.C qui mémorise les valeurs délivrées par chaque capteur.

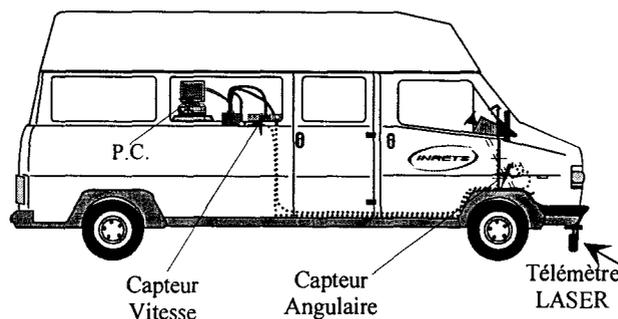


Figure II-11. Implantation du matériel sur la camionnette

La lecture des données relevées par les capteurs et la sauvegarde de ces informations dans un fichier ont été réalisées à l'aide d'un logiciel sur le calculateur. Les données enregistrées sont la lacune latérale, l'angle au volant ainsi que la vitesse longitudinale du véhicule [DEB et al - 2.96].

Un télémètre LASER, par mesure de temps de parcours de l'onde infrarouge, permet de connaître la distance latérale d . Ce télémètre peut effectuer des mesures comprises entre 10 cm et 8 m avec une précision de ± 5 mm, une résolution de 1 mm et un temps de réponse de 25 ms. Ce capteur a été choisi pour sa grande précision et sa résolution afin de minimiser l'erreur commise sur les essais.

Le capteur de vitesse fournit 815 impulsions pour une distance parcourue de 100 mètres. Grâce à lui, deux grandeurs peuvent être calculées : la vitesse d'évolution et la distance parcourue.

Pour l'angle de braquage du volant, le capteur utilisé est un codeur impulsionnel. Il fournit 1024 impulsions pour un tour de volant. Une impulsion est équivalente à 0,35 degré de rotation du volant.

2.5.4 Les relevés expérimentaux

L'objectif de l'étude expérimentale est de connaître la loi d'évolution de la distance latérale du véhicule par rapport au quai d en fonction de l'évolution temporelle de la consigne et de l'angle présent sur le volant pour différentes valeurs du paramètre "vitesse longitudinale".

Une première série d'essais a été effectuée avec des vitesses constantes, choisies entre 10 et 60 km/h. La fréquence d'échantillonnage du logiciel d'acquisition était de 50 ms, c'est-à-dire une mesure tous les 139 millimètres à une vitesse de 10 km/h et tous les 833,3 millimètres à une vitesse de 60 km/h. D'autres essais ont suivi, dont les conditions de vitesse et de déplacement sont proches de celles de l'accostage.

Les figures suivantes sont obtenues en effectuant une réponse à un échelon, elles seront comparées aux essais réalisés en simulation, dans les mêmes conditions d'évolution.

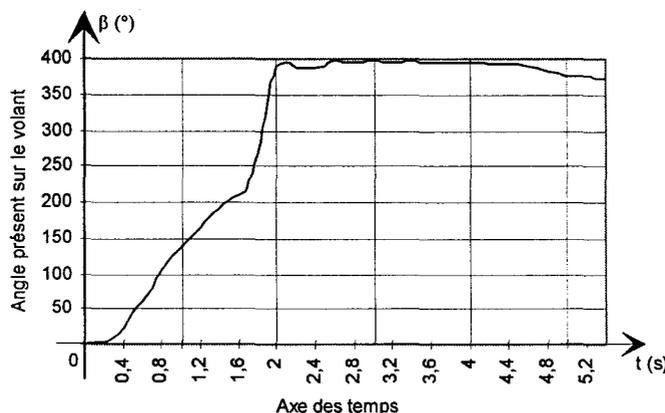


Figure II-12. Evolution de l'angle de rotation du volant en fonction du temps pour effectuer la réponse à l'échelon du système à une vitesse longitudinale de 15 km/h

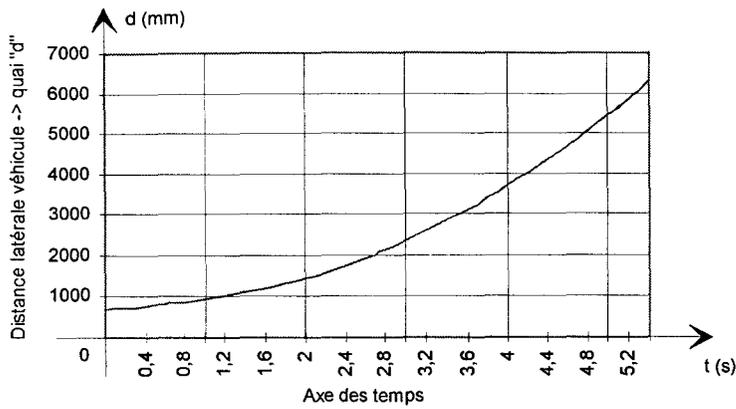


Figure II-13 . Evolution temporelle de la distance latérale d pour une vitesse longitudinale de 15 km/h

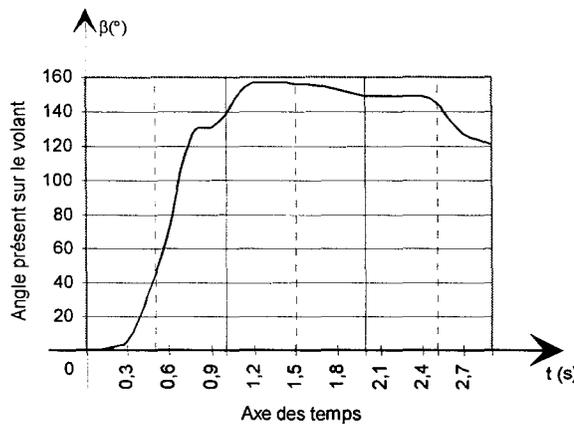


Figure II-14 . Evolution de l'angle de rotation du volant en fonction du temps pour effectuer la réponse à l'échelon du système à une vitesse longitudinale de 35 km/h

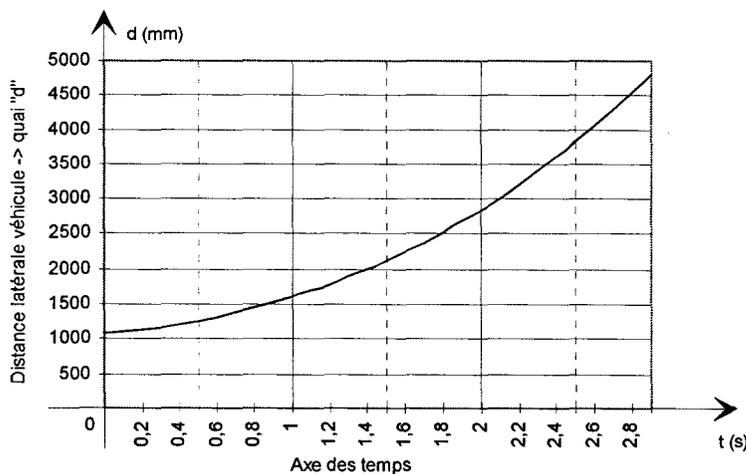


Figure II-15 . Evolution temporelle de la distance latérale d pour une vitesse longitudinale de 35 km/h

Les évolutions du véhicule en fonction du temps ont été relevées lorsque le véhicule part du quai et rejoint la circulation. Donc correspondant à des essais avec une rotation du volant vers la gauche. Ce choix s'explique par la volonté d'éviter le contact pneu - trottoir qui provoque, l'arrêt de la plate-forme de simulation. Il s'explique également par la perte des informations relatives à la lacune horizontale quand l'autobus touche ou monte sur le quai lors des essais sur site.

La deuxième série d'essais a été effectuée à vitesse variable avec l'angle de braquage constant.

Voici quelques résultats :

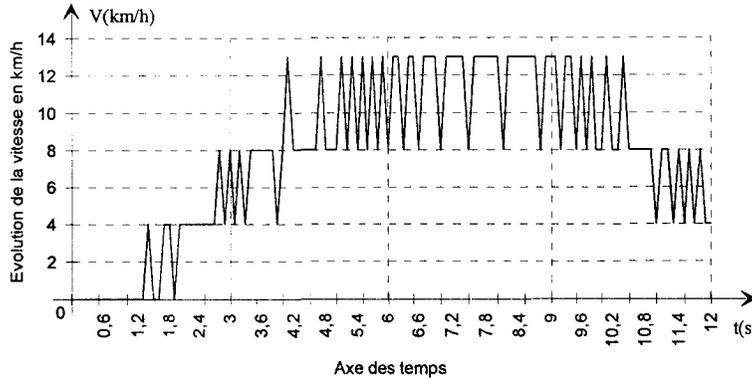


Figure II-16. Evolution temporelle de la vitesse du véhicule

Les oscillations sur la vitesse sont dues à la résolution du capteur utilisé pour relever la vitesse. L'utilisation de ces données brutes pour la simulation a été préférée afin de rester le plus près possible des conditions expérimentales.

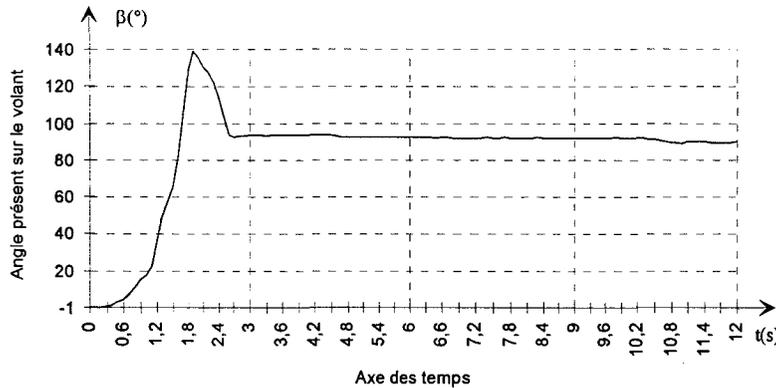


Figure II-17. Evolution de l'angle de rotation du volant en fonction du temps pour effectuer la réponse à l'échelon du système

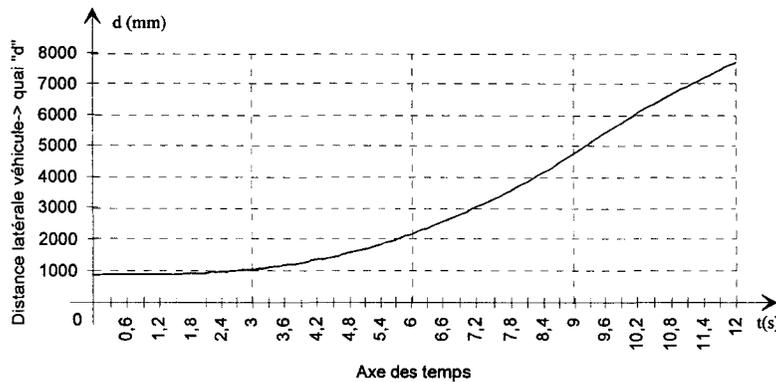


Figure II-18. Evolution temporelle de la distance latérale d

A partir de ces relevés, il est possible de déterminer les relations analytiques entre l'angle volant et la distance latérale d . Ces relations sont nécessaires pour l'étude de la commande afin de réaliser le guidage du véhicule. Mais pour la validation des résultats de la simulation du modèle MOCA, seuls les résultats sous la forme de tableaux et de courbes sont

intéressants. Pour que la comparaison entre le résultat de la simulation et les relevés comportementaux ait un sens, il faut, bien sûr, garder la même consigne d'entrée. A cet effet, l'évolution temporelle de la consigne "angle présent sur le volant" enregistrée lors des essais réalisés pour la détermination du modèle expérimental est injectée dans la simulation.

2.5.5 Les relevés de la simulation

La plate-forme de simulation a pour premier objectif de montrer la faisabilité du guidage automatique des autobus en station, en assurant un accostage optimal du véhicule. L'espace entre le quai de la station et l'autobus doit être franchi en toute aisance par tous les voyageurs et donc par les personnes à mobilité réduite. Le champ d'application de la plate-forme a été élargi à la simulation de l'accostage de tous types de véhicule. Pour permettre la validation du modèle et de la plate-forme de simulation, un module d'acquisition des paramètres cinématiques et dynamiques de ce véhicule ainsi que des données relatives à la validation a été mis au point.

A l'aide des traceurs de courbes disponibles dans la plate-forme tous les paramètres intermédiaires permettant de déduire le déplacement latéral d du véhicule peuvent être visualisés. Le modèle de simulation est décomposé en modules donnant aux modules suivants les informations nécessaires pour obtenir en sortie la distance latérale d .

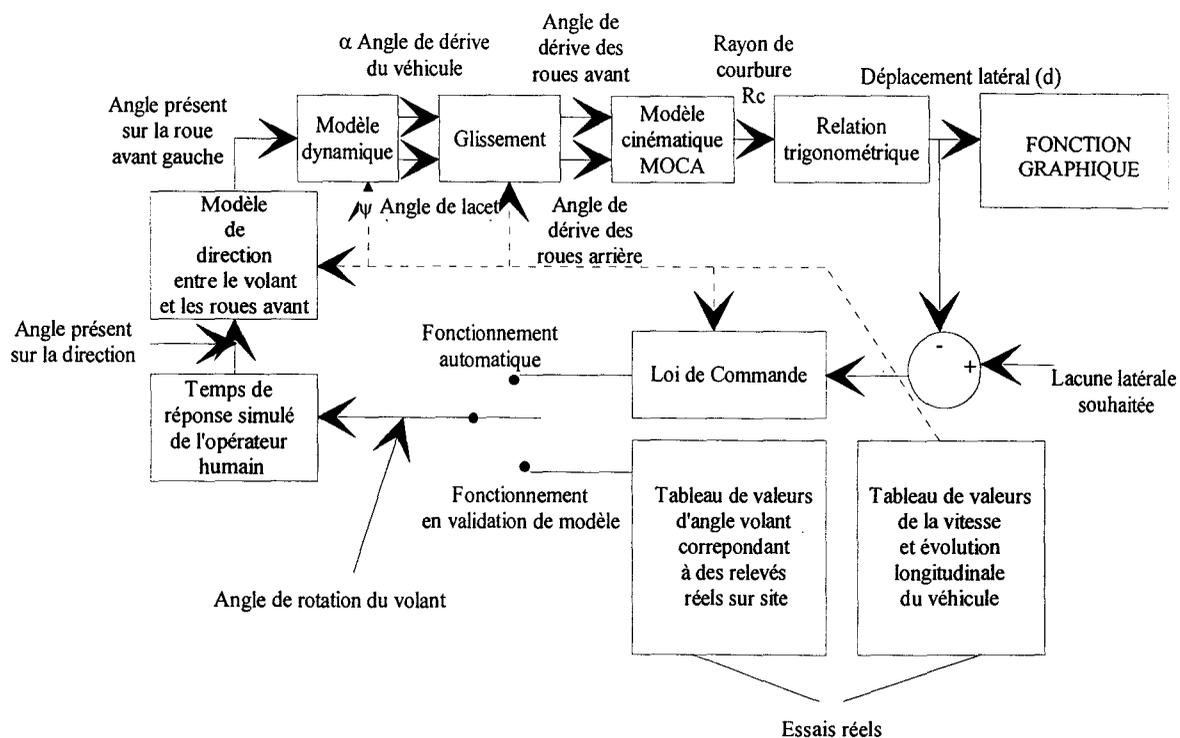


Figure II-19. Décomposition du modèle de simulation

Maintenant, présentons quelques résultats obtenus à l'aide de la plate-forme de simulation pour des essais réalisés sur une camionnette de type Citroën C25 à une vitesse constante de 15 km/h, à une vitesse de 35 km/h et à vitesse variable.

2.5.5.1 Exemple de résultats pour une vitesse d'évolution de 15 km/h

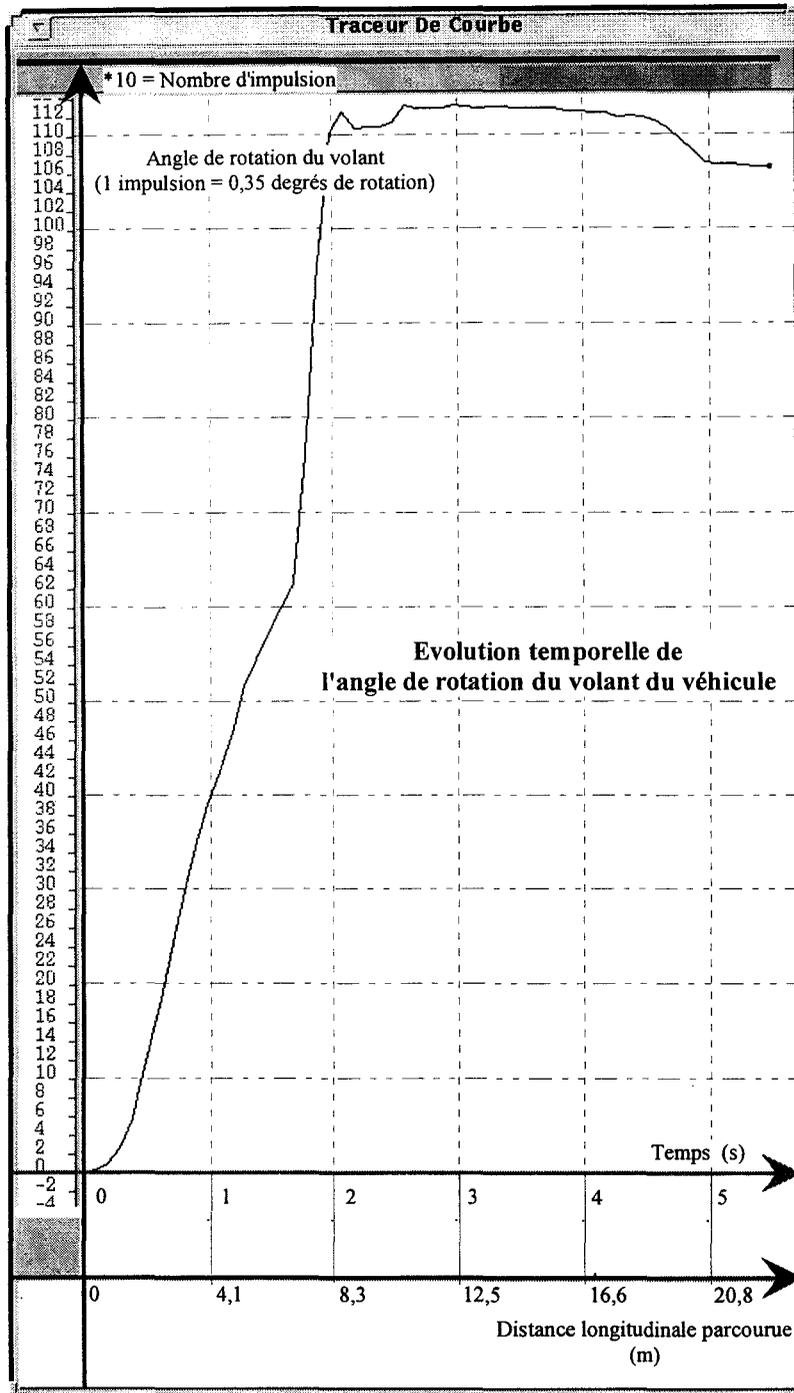


Figure II-20 . Entrée de la simulation, évolution temporelle de l'angle de rotation du volant pour une vitesse d'évolution de 15 km/h

Après avoir introduit l'évolution temporelle de l'angle du volant dans la simulation, l'angle de braquage présent sur la roue avant gauche qui représente, sur le schéma bloc (figure II-19), la sortie du modèle de direction est accessible.

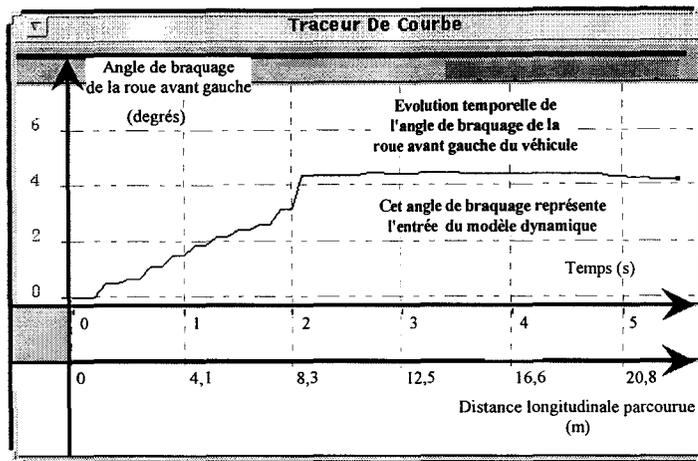


Figure II-21 . Evolution de l'angle de braquage de la roue avant gauche de la camionnette pour une vitesse de 15 km/h

A partir de ce braquage, le déplacement latéral du véhicule simulé et la distance latérale d séparant le véhicule de la bordure du quai sont calculés.

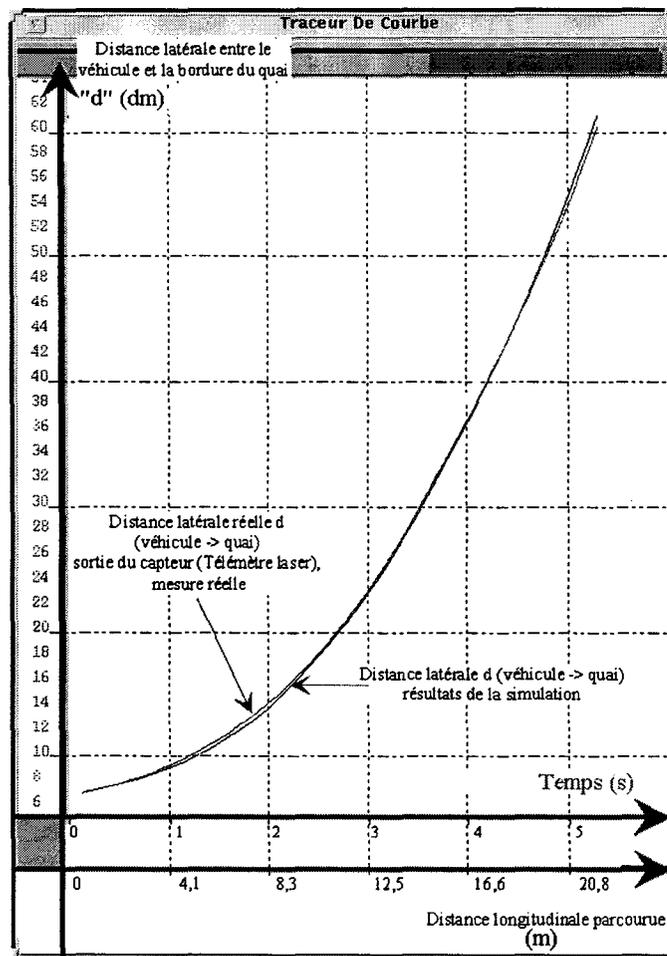


Figure II-22 . Evolution de la distance d entre le bus et le quai pour une vitesse d'évolution de 15 km/h

Sur cette courbe il est possible de remarquer qu'une erreur est commise entre la lacune horizontale réelle et simulée. Cette erreur reste faible pour une vitesse de 15 km/h. Par la suite cette erreur sera chiffrée.

2.5.5.2 Exemple de résultats pour une vitesse d'évolution de 35 km/h

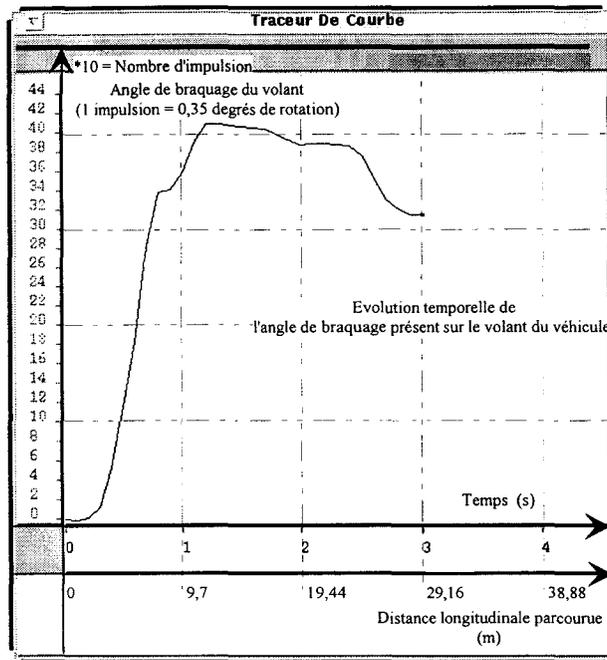


Figure II-23 . Entrée de la simulation, évolution temporelle de l'angle de braquage du volant pour une vitesse de 35 km/h

Cette entrée est injectée dans le modèle de direction qui a été déterminé de façon expérimentale. A la sortie de ce modèle, l'évolution temporelle de l'angle présent sur la roue avant gauche est obtenue.

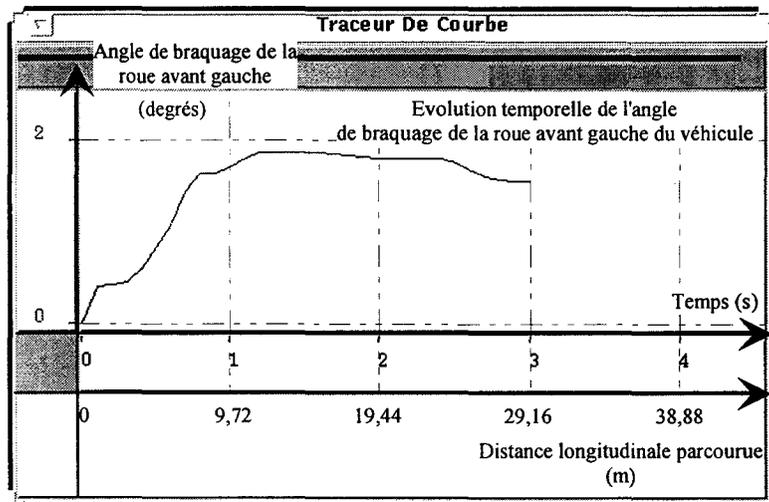


Figure II-24 . Evolution de l'angle de braquage de la roue avant gauche de la camionnette pour une vitesse de 35 km/h

Cet angle représente l'entrée du modèle dynamique. Il permet de calculer les angles de dérive et de visualiser le déplacement de l'autobus sur l'écran.

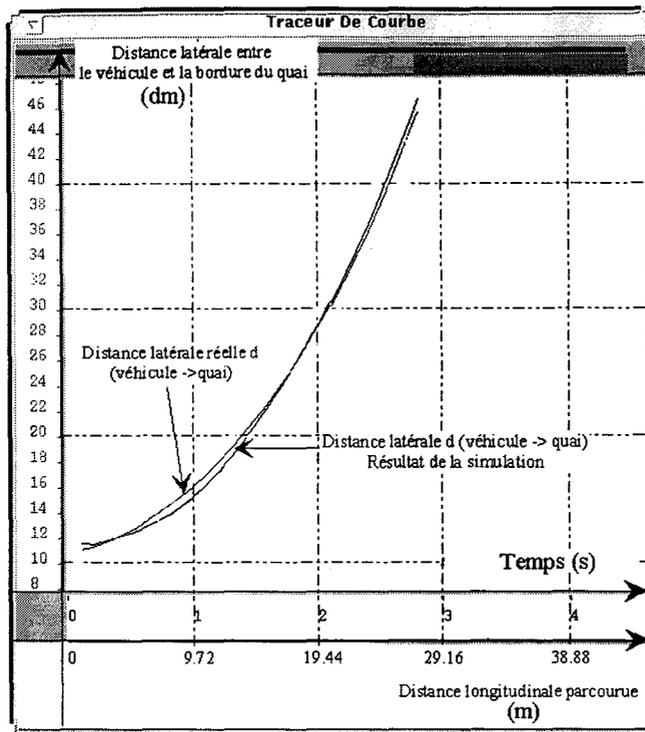


Figure II-25. Evolution de la distance d entre le bus et le quai pour une vitesse d'évolution de 35 Km/h

Sur cette figure, une erreur peut être remarquée entre le résultat simulé et réel. Cette erreur est plus importante que pour le résultat précédent. Mais ne permet pas conclure sur la validité du modèle.

La validation du modèle réalisée pour l'évolution en vitesse constante, il reste à effectuer la validation à vitesse variable.

2.5.5.3 Exemple de résultats pour une vitesse variable

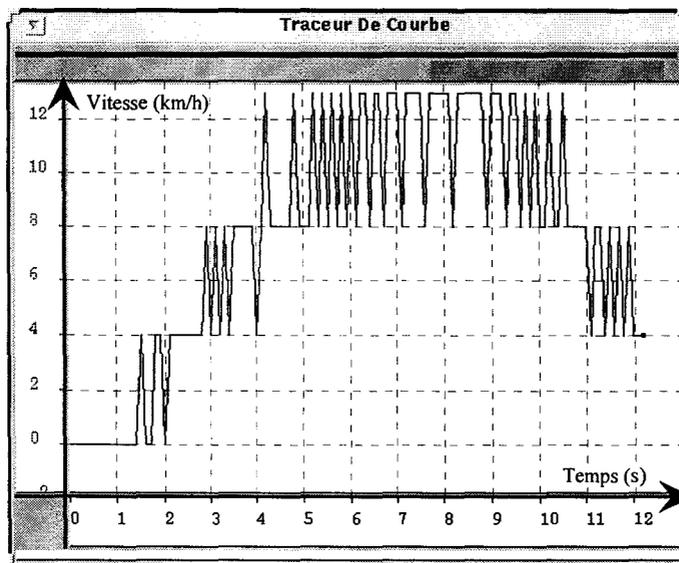


Figure II-26. Evolution de la vitesse

Regardons maintenant l'évolution de la deuxième entrée.

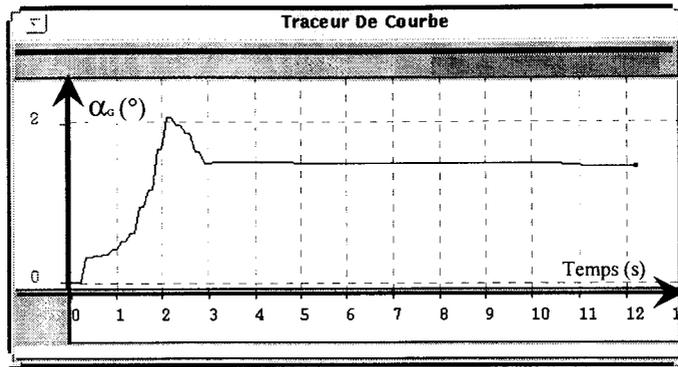


Figure II-27. Evolution de l'angle de braquage de la roue avant gauche de la camionnette

Avec cet angle représentant l'entrée du modèle dynamique, il est possible de calculer les angles de dérive et d'obtenir le déplacement de l'autobus sur l'écran.

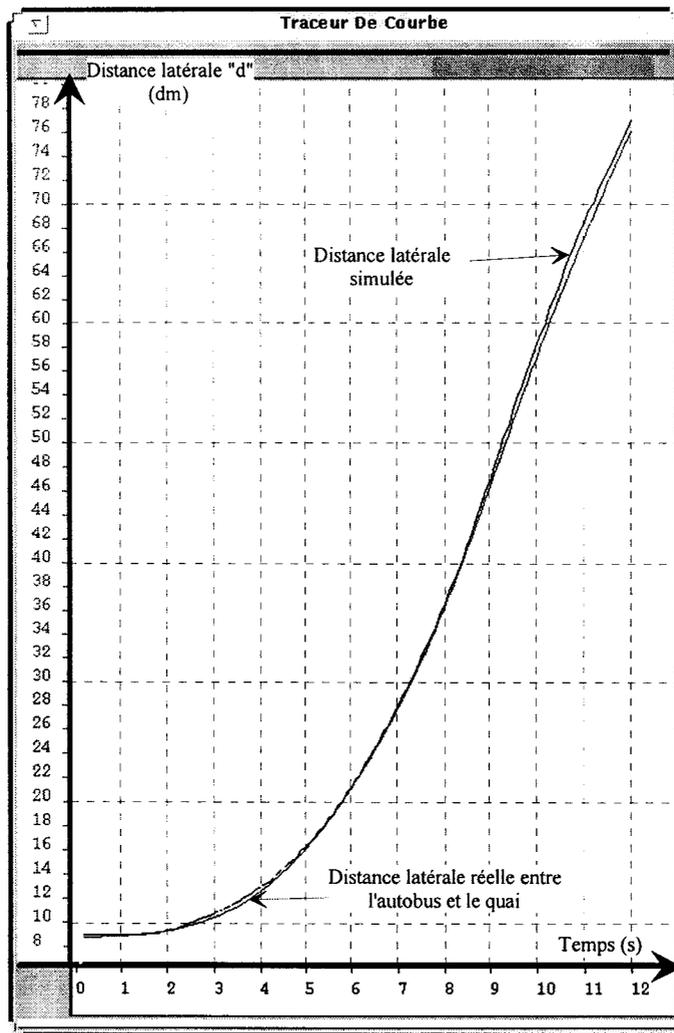


Figure II-28. Evolution de la distance d entre le bus et le quai

L'avantage de cette plate-forme de simulation est de comparer les valeurs réelles aux valeurs simulées de la distance latérale d et d'autres grandeurs. A partir de cette comparaison, une erreur absolue est déduite (voir figure II-29) qui permet de valider le modèle dynamique MOCA et de déterminer son domaine de validité.

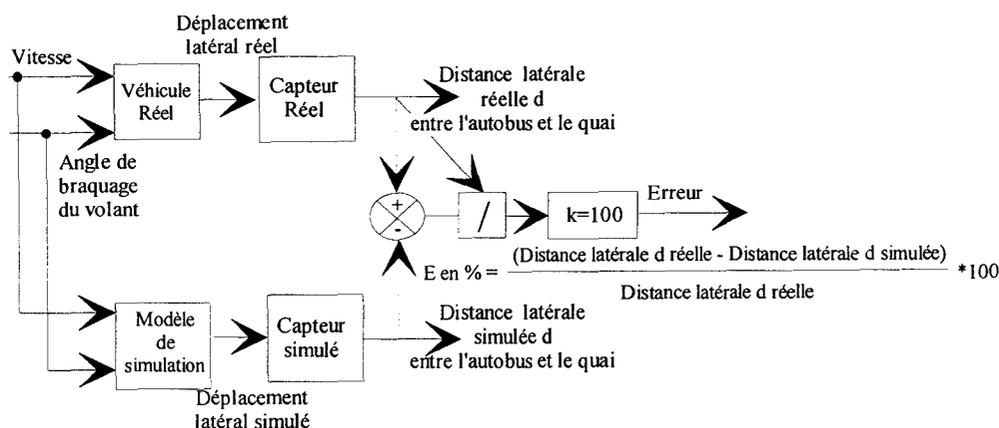


Figure II-29. Calcul de l'erreur

Les capteurs de proximité basés sur le principe de la rétrodiffusion de la lumière (LASER) ont une performance variant selon la nature et le pouvoir de réémission de la cible. Leur précision est donnée en pourcentage selon la distance mesurée. Dans nos essais, l'erreur de mesure maximale a été évaluée à 4,6 %. Cette erreur est déterminée à partir d'essais réels en bloquant la direction (le volant) du véhicule sur une valeur nulle et en mesurant les variations de la distance latérale d pour différentes vitesses. Elle correspond aussi aux erreurs réalisées par les appareils, aux imperfections de la chaussée et de la surface de réflexion (la bordure du quai).

2.6 CONCLUSION : VALIDITE DU MODELE

La modélisation d'un véhicule routier exige la prise en compte de nombreux paramètres afin que les résultats de la simulation s'approchent le plus possible du comportement dynamique du système réel dans les conditions de roulage rencontrées pendant l'étude. Ceci est valable quelle que soit la méthode de modélisation utilisée. Le modèle a été validé pour des vitesses d'évolutions constantes comprises entre 5 et 60 km/h et pour des vitesses variables passant de 50 km/h à 0 km/h. Cette variation correspond aux vitesses rencontrées lors des essais d'accostage réalisés sur le site de Grenoble [DEJ et al - 93]. Quelle que soit la validation, en vitesse constante ou en vitesse variable, l'erreur commise ne dépasse pas 4,6 %, donc le modèle donne des résultats satisfaisants comparativement à notre cahier des charges puisque l'on souhaitait que l'erreur commise par le modèle MOCA ne dépasse pas l'erreur commise par les mesures. Ainsi, le modèle est considéré valide pour une vitesse comprise entre 0 et 50 km/h et dans des conditions semblables à un accostage. Fort de ce résultat, évaluons maintenant les performances des différentes méthodes de commande du véhicule modélisé.

Chapitre III

PILOTAGE AUTOMATIQUE D'UN AUTOBUS EN PHASE D'ACCOSTAGE

3.1 INTRODUCTION

Les deux chapitres précédents ont porté sur l'élaboration et la validation du modèle en boucle ouverte de l'autobus. La commande automatique de la phase d'accostage repose sur une boucle d'asservissement incluant, outre le modèle en boucle ouverte, un module correcteur chargé d'élaborer les commandes du processus (le véhicule) en fonction des consignes et de l'état du processus lui-même.

Dans ce chapitre, il sera proposé d'évaluer les performances des différentes méthodes de commande qui consistent en l'élaboration du correcteur.

La commande PID, la commande par retour d'état, la commande adaptative et la commande floue seront abordées.

Chacune de ces commandes sera simulée en prenant comme consigne du système bouclé un échelon de lacune horizontale du bus, en début de manoeuvre d'accostage.

Les aptitudes du système bouclé à suivre une trajectoire de référence matérialisée sur la chaussée et la réponse du système bouclé à une consigne d'amplitude instantanée faible et variable dans le temps seront évaluées.

Cependant, compte tenu de la complexité des calculs liés à la commande par retour d'état, un outil dont la puissance de calcul est supérieure à celle de la plate-forme de simulation développé au chapitre précédent a été utilisée pour développer cette commande.

Par ailleurs, la question du passage du pilotage manuel au pilotage automatique du véhicule et réciproquement ne sera pas abordée dans ce chapitre. Il s'agit là en effet d'une réflexion conséquente qui fera partie des suites à donner à notre travail.

3.2 COMMANDE EN BOUCLE FERMÉE

D'une manière générale, la boucle d'asservissement peut se représenter sous la forme d'un schéma fonctionnel :

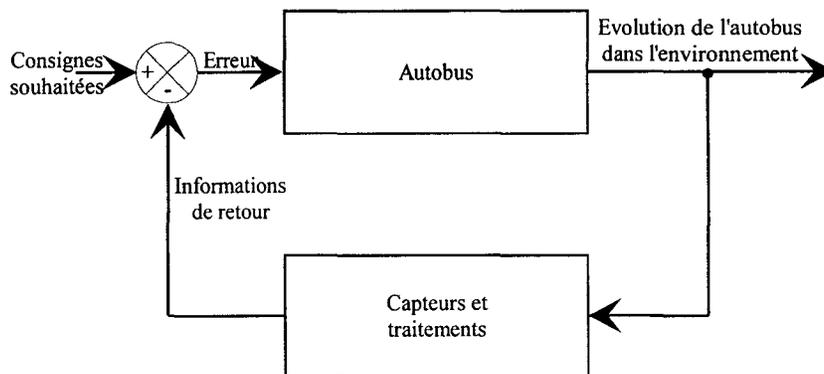


Figure III-1. Schéma fonctionnel de la boucle d'asservissement

Le bloc *autobus* correspond au modèle en boucle ouverte. Ainsi, en fonction de l'erreur entre les consignes souhaitées et les informations de retour, l'algorithme de pilotage en direction détermine les commandes à réaliser pour déplacer correctement le véhicule sur la chaussée.

Le bloc *capteurs et traitements* représente les différents capteurs (capteur angulaire, capteur d'impulsion "vitesse", système de vision ou télémètre), et leurs traitements associés. Ce bloc permet de déterminer les informations de retour afin de les comparer aux consignes souhaitées.

Pour résoudre le problème de la commande d'un autobus, plusieurs méthodes sont utilisables. Il s'agit de mettre au point un correcteur que l'on insère dans le système bouclé représenté sur la figure III-2.

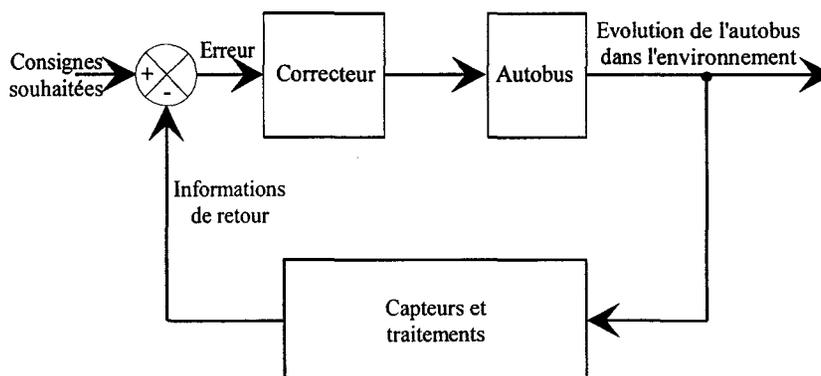


Figure III-2. Schéma fonctionnel de la commande automatique de l'autobus

3.3 COMMANDE DE LA DIRECTION (VOLANT) DE L'AUTOBUS

3.3.1 La commande P.I.D. pour le guidage d'un autobus [DEB et al - 1.96]

Ce type de correcteur combine les avantages des régulateurs PI et PD. Les actions apportées par ce correcteur sont :

- action proportionnelle : en statique, une diminution de l'erreur peut être observée si le gain augmente. En dynamique, la rapidité augmente tant que le système n'est pas trop oscillatoire,
- action intégrale : en statique, l'erreur entre la consigne et la mesure est éliminée. En dynamique, cette action diminue la rapidité et augmente l'instabilité,
- action dérivée : en statique, cette action n'a aucun effet. En dynamique, la dérivée augmente la rapidité à cause de son effet stabilisant.

Les trois termes PID sont utilisés dans l'étude pour les raisons suivantes. Le terme proportionnel augmente la rapidité de l'action, il demande un réglage précis pour éviter toute oscillation de la sortie du processus. Le terme intégral est utilisé pour éliminer l'erreur entre la consigne et la mesure réelle. Le terme dérivé augmente la rapidité du système et compense une partie de la perte engendrée par le terme intégral.

Les processus sont d'une extrême variété. Une très large classe a néanmoins pour caractéristique commune des réponses aperiodiques (non-oscillatoires). C'est le cas de beaucoup de processus et aussi de notre autobus. Un petit nombre de paramètres suffit généralement à caractériser leur réponse indicielle. Ainsi les trois paramètres L , R , et T représentés sur la figure III-3 constituent, la signature d'un processus en boucle ouverte.

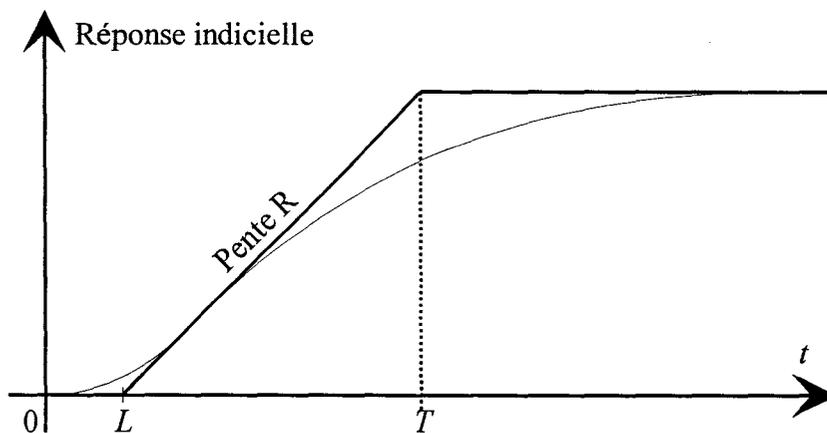


Figure III-3 . La "signature" L , R , T , d'un processus.

Pour calculer un régulateur, nous nous basons sur un modèle représentatif de la réponse indicielle observée. Par exemple, un modèle simple est donné par la constante de temps retardée (modèle de Broïda) :

$$G(s) = \frac{Re^{-sL}}{s + T^{-1}}$$

Une approche fréquentielle a été utilisée pour établir la synthèse d'un régulateur. Les automaticiens connaissent l'importance du régulateur PID : il obtient d'excellentes performances surtout lorsque le rapport T/L de la signature est grand (supérieur à 5 ou 10) [LAR - 93].

Le régulateur PID présente des atouts majeurs :

- il est standardisé du point de vue matériel : on le trouve dans toutes les technologies (électronique, pneumatique, numérique...),
- il est standardisé sur le plan conceptuel : tous les automaticiens expérimentés connaissent l'effet spécifique des trois actions,
- il peut être réglé sur le site, empiriquement, par un technicien qui observe les réponses en boucle fermée et rectifie son réglage selon des principes parfois informulés, mais efficaces.

Il existe une technique intermédiaire entre le réglage empirique et la synthèse basée sur la réponse fréquentielle déduite d'un modèle mathématique. Il s'agit de la méthode de Ziegler et Nichols ; elle est basée sur les deux paramètres L et R de la signature indicielle. Elle ne tient pas compte de T et s'applique d'autant mieux que T est grand.

Les coefficients d'un PID sont déduits du couple (K_u, T_u) , caractéristique du pompage limite. Ces dernières caractéristiques s'obtiennent expérimentalement en bouclant le processus par un régulateur proportionnel et en augmentant progressivement le gain jusqu'à apparition des oscillations entretenues (pompage-limite). Alors le gain K_u du régulateur et la période T_u des oscillations sont relevés. Un point unique est calculé correspondant à la fréquence $\omega_U = 2\pi / T_U$, pour laquelle le déphasage est de -180° , et le gain est égale à $1/K$. L'information peut sembler pauvre mais elle définit un paramètre de gain K_u et un paramètre temporel T_u . Ces paramètres s'affilient au couple (L, R) .

Ziegler et Nichols proposent les valeurs suivantes (valeurs standards), selon le type de régulateur choisi : P, PI, ou PID.

Régulateur proportionnel :	$K(s) = k_p$ avec $k_p = \frac{1}{LR}$,
Régulateur proportionnel intégral :	$K(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} \right)$ avec $k_p = \frac{0,9}{LR}$ et $T_i = 3,3L$,
Régulateur proportionnel intégral dérivé :	$K(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right)$ avec $k_p = \frac{1,2}{LR}$, $T_i = 2L$ et $T_d = 0,5L$.

Selon le type d'application et les résultats attendus du régulateur, les utilisateurs peuvent modifier ces valeurs. Après modification, le régulateur reste du premier ordre. Ces grandeurs sont réajustées si nécessaire, sur le site ou en simulation.

Dans le cas de la réalisation du régulateur, la méthode de Ziegler et Nichols a été utilisée pour déterminer les paramètres du régulateur PID. Pour trouver les valeurs des

coefficients de la signature L et R , l'évolution de la lacune horizontale d en fonction du temps a été utilisée. Les paramètres L et R dépendent de la vitesse d'évolution de l'autobus. Ils ont été déterminés à partir de la réponse en boucle ouverte à un échelon d'angle de braquage de la roue avant gauche de 10° pour les vitesses suivantes : 5, 10, 20, 30, 40 et 50 km/h. A partir de L et R , les coefficients k_p , T_i et T_d peuvent être calculés. Un exemple montre comment la valeur des paramètres du régulateur PID pour une vitesse de 5 km/h a été obtenue.

Vitesse longitudinale = 5 km/h :

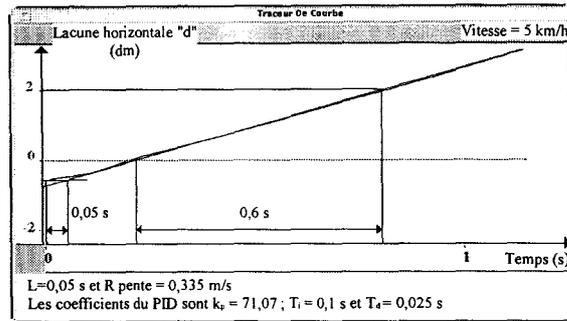


Figure III-4 . Détermination des paramètres du régulateur PID pour une vitesse de 5 km/h

On obtient les valeurs suivantes : $k_p = \frac{1,2}{LR} = 71,07$; $T_i = 2L = 0,1$ s et

$T_d = 0,5L = 0,025$ s.

Le calcul de ces paramètres est résumé dans le tableau III-1. Ce tableau est obtenu pour différentes vitesses d'évolution de l'autobus.

Vitesse d'évolution du véhicule	$K_P = \frac{1,2}{LR}$	$T_i = 2L$	$T_d = 0,5L$
V = 5 km/h	71,07	0,1 s	0,025 s
V = 10 km/h	4,46	0,46 s	0,115 s
V = 20 km/h	4,763	0,366 s	0,091 s
V = 30 km/h	1,356	0,558 s	0,139 s
V = 40 km/h	0,9354	0,546 s	0,136 s
V = 50 km/h	0,857	0,487 s	0,121 s

Tableau III-1 . Valeurs des paramètres du PID obtenues pour différentes vitesses

Ces paramètres déterminés, passons à la simulation de la commande PID avec ces valeurs. Testons la commande PID avec les coefficients calculés pour une vitesse de 5 km/h. Les conditions initiales sont : position latérale (lacune horizontale) de 1,5 mètre, orientation nulle et vitesse correspondant à celle rencontrée pendant un accostage.

La première mesure relevée est la variation de la vitesse en fonction du temps.

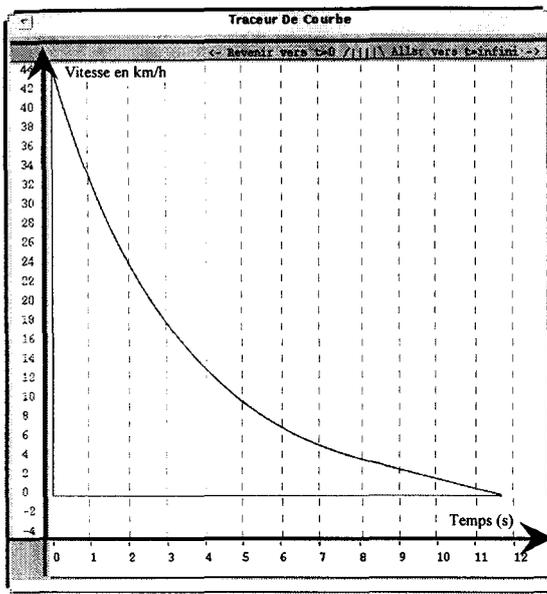


Figure III-5. Variation de la vitesse en fonction du temps

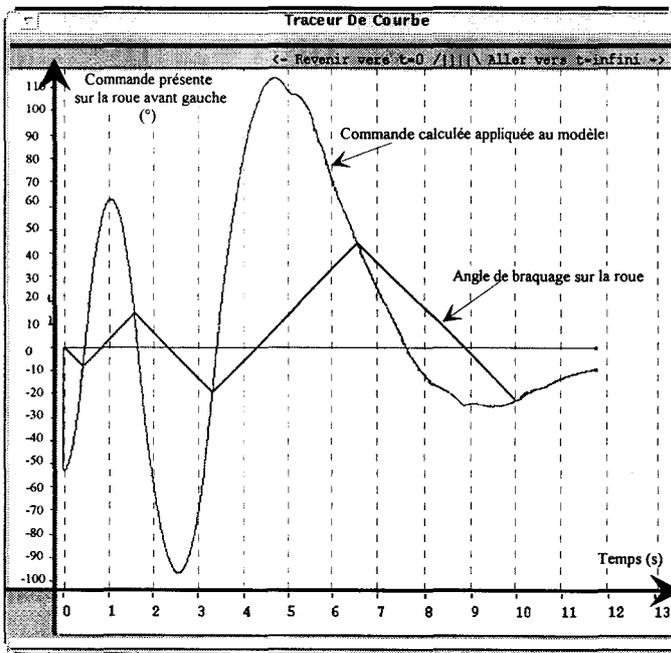


Figure III-6. Evolution de la commande de braquage en fonction du temps

A partir de ces deux grandeurs, l'évolution de la distance latérale en fonction du temps est obtenue.

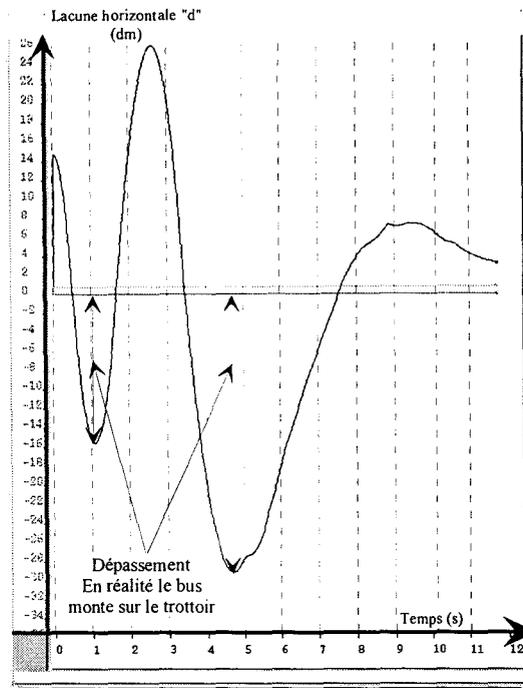


Figure III-7. Evolution de la distance latérale d en fonction du temps

Sur cette figure, il peut être remarqué que le but prévu n'est pas atteint. En effet, la lacune horizontale reste supérieure à 8 centimètres et il existe un dépassement non négligeable.

Les différentes valeurs obtenues pour les vitesses indiquées sur le tableau III-1 ont été testées. Le meilleur résultat pour les paramètres du PID correspond à une vitesse de 50 km/h. Les résultats obtenus pour ces valeurs de paramètres sont présentés sur la figure III-8 et III-9 :

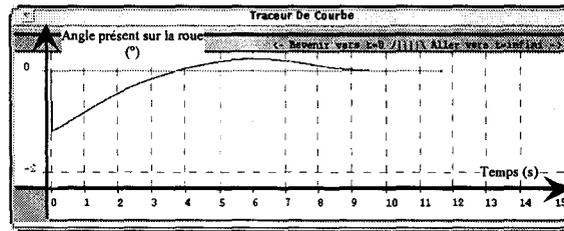


Figure III-8. Evolution de la commande de braquage en fonction du temps

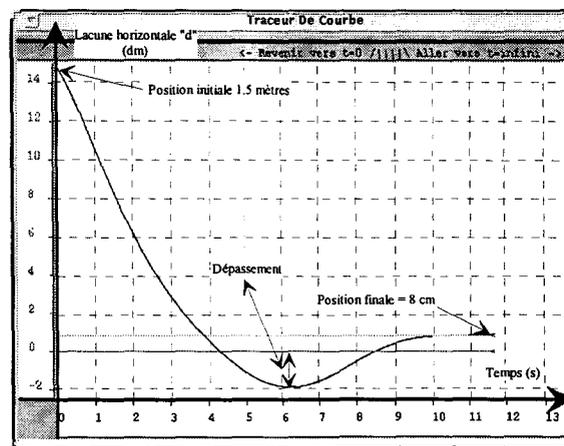


Figure III-9. Evolution de la distance latérale d en fonction du temps

Ici, les paramètres ne sont pas encore corrects mais tendent à le devenir. Il serait possible de les faire évoluer de façon empirique, pour annuler le dépassement qui existe sur cette commande. Le problème vient du fait que les paramètres du PID sont élaborés pour une vitesse donnée. Il est, de ce fait, prévisible que la commande soit globalement médiocre dans la mesure où la vitesse évolue constamment pendant la phase d'accostage. Cette incohérence sera dissipée lors de la mise en oeuvre de la commande adaptative.

3.3.2 La commande par retour d'état pour le guidage d'un autobus

Dans le cadre de l'étude sur la faisabilité de la commande neuronale pour le guidage des autobus en station, réalisée à l'ICAM [LAM - 96], une commande à retour d'état a été mise au point pour permettre au processus de commande neuronale un apprentissage correct. Le principe est le suivant : le processus est décrit dans l'espace d'état sous la forme :

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = Cx, \quad \text{avec } x \in \mathbb{R}^n, \quad u \in \mathbb{R}^1, \quad y \in \mathbb{R}^m \quad [BOR \text{ et al. - 93}].$$

Ici $x = \left[\alpha, \psi, \dot{\psi}, d \right]^T$ avec α angle de dérive, ψ angle de lacet et d lacune horizontale.

Lorsque l'ensemble des composantes du vecteur état est accessible à la mesure (directement ou indirectement par reconstruction d'état), il est possible de définir une loi de commande par un retour d'état de la forme $u = -Lx + ly^c$ dans laquelle L et l désignent des matrices de dimensions respectives $\mathbb{R}^{1.n}$ et $\mathbb{R}^{1.m}$.

Dans ce cas, le modèle du système (annexe 2-1) en boucle fermée s'écrit :

$$\dot{x} = (A - BL)x + Bly^c, \quad y = Cx$$

Ainsi, un système de quatre équations est obtenu :

$$\dot{x}_1 = -\frac{2D_{AV} + 2D_{AR}}{MV} x_1 - \left(1 + \frac{2D_{AV}l_1 + 2D_{AR}l_2}{MV^2} \right) x_3 + \frac{2D_{AV}}{MV} u$$

$$\dot{x}_2 = x_3$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{I_z + I_{xz}} \left(-\left(2D_{AV}l_1 + 2D_{AR}l_2 + (2D_{AV} + 2D_{AR}) \frac{mh}{M} \right) x_1 - \left(\frac{2D_{AV}l_1^2 + 2D_{AR}l_2^2}{V} + \frac{2D_{AV}l_1 + 2D_{AR}l_2}{MV^2} \right) x_3 + \left(2D_{AV}l_1 + D_{AV} \frac{2mh}{M} \right) u \right)$$

$$\dot{x}_4 = Vx_1 + Vx_2$$

avec :

$h = 1,38 \text{ m}$	hauteur du centre de gravité par rapport à l'axe de roulis,
$m = 16300 \text{ kg}$	masse suspendue,
$M = 17100 \text{ kg}$	masse totale du véhicule,
V	norme du vecteur vitesse du centre de gravité du véhicule,
$I_z = 200000 \text{ kg.m}^2$	moment d'inertie autour de l'axe de lacet de la masse suspendue,
$I_{xz} = 17 \text{ kg.m}^2$	produit d'inertie de la masse suspendue,
$D_{AV} = 145000 \text{ N/rad}$	coefficient de non dérive des roues avant,
$D_{AR} = 145000 \text{ N/rad}$	coefficient de non dérive des roues arrière,
$l_1 = 3,84 \text{ m}$	empattement avant,
$l_2 = 2,28 \text{ m}$	empattement arrière.

Si le système est asymptotiquement stable, alors $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x} = 0$.

Soit : $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = -C(A - BL)^{-1} B y^c$,

Et lorsque $l=m$, le choix : $l^{-1} = -C(A - BL)^{-1} B$, permet d'imposer $y = y^c$.

Si le système comporte des intégrations sur chacune des entrées et si $y^c = \text{Cste}$, il suffit de faire apparaître y parmi les variables d'état du système pour que le retour défini par $u = -Lx$ tel que la matrice $A - BL$ soit stable et permette d'obtenir le résultat $y = y^c$.

D'un point de vue pratique, afficher une consigne constante revient donc à déplacer le point d'équilibre du système.

3.3.2.1 Commande par retour d'état simple

La commande par retour d'état consiste à utiliser les variables d'état, multipliées par un gain K , pour élaborer la commande de braquage sur la roue avant gauche, comme le montre la figure III-10.

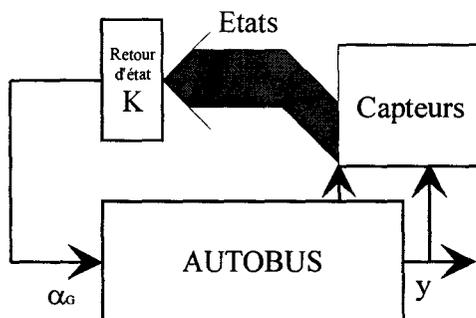


Figure III-10. Commande par retour d'état

Le choix du gain K dépend entièrement du comportement qu'on donne au système régulé, autour de son point d'équilibre, qualifié par les pôles du système en boucle fermée. Ce choix de pôles est le moment où intervient la volonté du concepteur du retour d'état. Le reste du calcul est assuré par une série de fonctions bien déterminées.

Notre cahier des charges stipule un comportement sans dépassement du point d'équilibre, c'est-à-dire un coefficient d'amortissement ζ supérieur à 0,7 et un temps de réponse d'environ 10 secondes. Pour répondre à ces contraintes, des pôles complexes conjugués : $-0,3 \pm 0,15j$ ont été choisis.

Le système possédant quatre états, il faut quatre pôles pour déterminer entièrement le gain K . Des pôles réels de valeurs négatives élevées (-5 et -10) ont été choisis, de manière à obtenir un transitoire très rapide devant le comportement prédominant des deux premiers pôles.

Voici les résultats obtenus pour une position latérale initiale de 1,5 mètre, pour une orientation de 0 degré et une consigne de la lacune horizontale de 0 cm :

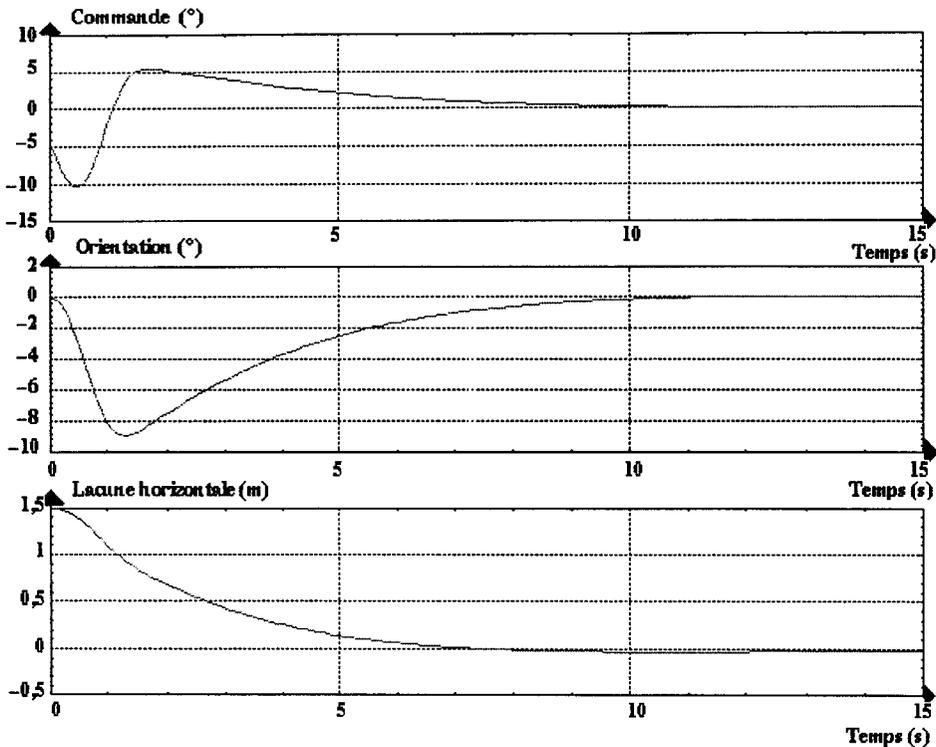


Figure III-11. Evolution de la commande, de l'orientation et de la lacune horizontale en fonction du temps

Les résultats sont conformes aux objectifs fixés, avec un comportement de la sortie "lacune horizontale" correct et un temps de réponse inférieur à 10 secondes. Posons une hypothèse : les états du système sont directement accessibles par la commande. Donc, des limites apparaissent car les états ne sont pas toujours accessibles dans la réalité. Ces limites font évoluer la commande vers une commande par retour d'état avec observateur.

Le modèle d'état a été calculé pour une vitesse V constante égale à 2,78 m/s. Pour modéliser l'accostage longitudinal du bus, il faut varier cette vitesse de 11,1 m/s à 0 m/s, en passant par un long palier à 2,78 m/s. Le comportement de la régulation reste correct et assure une certaine robustesse mais on ne peut suivre une variation réaliste de la vitesse.

3.3.2.2 Commande par retour d'état avec observateur

Seulement, les sorties sont accessibles mais non toutes les variables d'état. La seule sortie facilement mesurable est l'écart entre le bus et le quai. Aussi pour utiliser le retour d'état, il faut reconstruire les variables d'état par un observateur comme le montre la figure III-12.

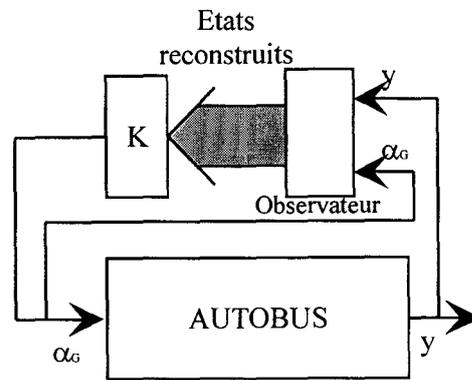


Figure III-12. Commande par retour d'état avec observateur

L'observateur, caractérisé par son gain L , reconstruit les variables d'état. Le calcul de cet observateur a été effectué par le logiciel Xmath. Il reste à la charge du concepteur de déterminer la vitesse d'estimation en fonction du comportement souhaité. Le retour d'état K est identique au retour d'état sans observateur. Il faut choisir de nouveau quatre pôles. La dynamique de l'observateur a été choisie de la sorte qu'elle soit dix fois plus rapide que celle du retour d'état.

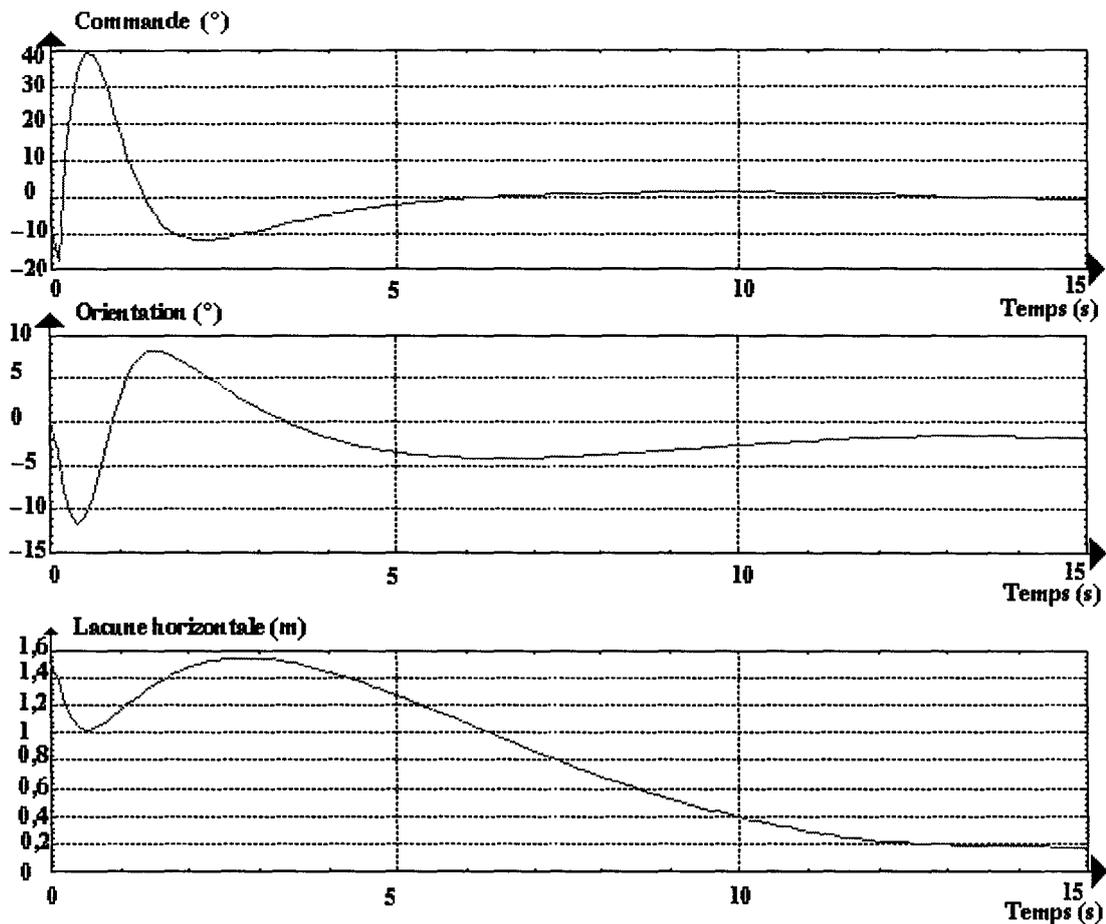


Figure III-13. Evolution de la commande, de l'orientation et de la lacune horizontale en fonction du temps

Les résultats sont moins bons que précédemment. La sortie (lacune horizontale d appelée ici y) est plus lente et l'erreur de position au bout de 15 secondes n'est pas nulle mais égale à 18 centimètres. Pour résoudre ce problème, il faudrait augmenter le temps de guidage

ou diminuer le temps d'apprentissage de l'observateur. Les valeurs maximales de l'angle de braquage de la roue avant gauche sont élevées mais elles restent inférieures à 40 degrés. Ceux-ci sont inférieurs à la limite de braquage des roues avant sur le véhicule (Renault R312). Cette limite est fixée pour des raisons mécaniques à 50°. La détérioration des résultats est faible car, le retour d'état a été effectué non pas sur les valeurs réelles, mais sur les états simulés. Lors d'essais sur la comparaison entre les états réels et les états reconstruits, il a été remarqué que la dynamique de l'observateur était rapide (3 s) et les résultats n'en étaient pas affectés. Remarquons que les conditions initiales prises ici sont des cas maximaux.

Pour ce type de commande, le temps de réponse est un peu plus long que pour la commande adaptative mais reste acceptable. Pour la lacune horizontale, les résultats restent corrects pour la commande à retour d'état sans observateur. Dans la commande avec observateur, le temps de réponse est augmenté mais on obtient une lacune de l'ordre de 18 centimètres à la fin de la période d'accostage. Les résultats concernant le dépassement et l'orientation de l'autobus à l'arrivée sont corrects. La seule différence notable est le prix de revient pour l'installation, car il faut prévoir un capteur supplémentaire pour relever la variation de la vitesse d'évolution du véhicule.

3.3.3 La commande adaptative pour le guidage d'un autobus

[DEB et al - 4.96]

"Commande adaptative" : que recouvre ce terme ?

La commande adaptative [DUG, LAN - 88] est un ensemble de techniques utilisées pour l'ajustement automatique en ligne et en temps réel des régulateurs des boucles de commande. On réalise ou on maintient un certain niveau de performances lorsque les paramètres du procédé à commander sont inconnus ou quand ils varient dans le temps.

Quelques tâches typiques peuvent être effectuées par un système de commande adaptative :

- ajustement automatique des régulateurs à la mise en oeuvre (effet : réduction du temps d'ajustement et amélioration des performances),
- détermination automatique des paramètres optimaux des régulateurs dans les divers points de fonctionnement du procédé,
- maintien des performances du système de commande quand les caractéristiques du procédé changent,
- possibilité de mise en oeuvre des régulateurs plus complexes et plus performants que les PID (ceci étant la conséquence de l'ajustement automatique),
- détection des variations anormales des caractéristiques des procédés (ces variations se reflètent dans les valeurs des paramètres fournies par les algorithmes d'adaptation),
- conception de nouveaux procédés technologiques utilisant des systèmes de commande adaptative (pour assurer le fonctionnement correct du procédé).

L'utilisation de la commande adaptative connaît aujourd'hui un essor certain grâce à sa complexité raisonnable et en raison du développement de microprocesseurs servant de support pour sa mise en oeuvre.

Divers types de schéma assurent des performances acceptables quand les paramètres du procédé sont inconnus ou varient dans le temps. Seuls, ceux possédant une boucle de contre-réaction sur la mesure de performances sont réellement des schémas de commande adaptative.

Par exemple, les systèmes utilisant des régulateurs à "gain programmé" (figure III-14) sont des systèmes de commande adaptative en boucle ouverte. On suppose une relation rigide entre certaines variables de l'environnement et les paramètres du procédé. Les valeurs des paramètres du régulateur sont lues dans une table associée aux mesures de l'environnement. Dans ce schéma, les modifications des performances causées par la modification des paramètres du régulateur ne sont ni mesurées, ni comparées avec les performances désirées. Les performances de ces schémas peuvent être catastrophiques si, pour une raison ou une autre, les relations entre les mesures de l'environnement et les paramètres dynamiques du procédé changent. Notons néanmoins que ce type de schéma est utilisé avec des résultats satisfaisants. Malgré la simplicité du principe, sa mise en oeuvre peut être coûteuse car elle peut requérir l'introduction de capteurs additionnels.

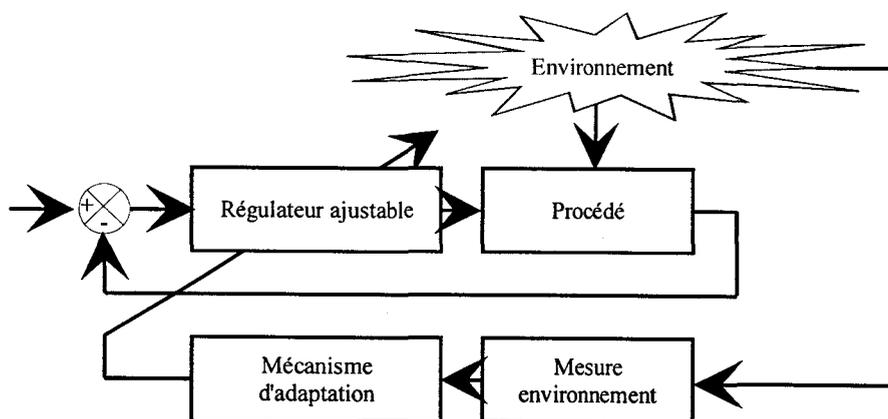


Figure III-14. Commande adaptative en boucle ouverte

Deux approches sont essentiellement considérées pour le développement des systèmes de commande adaptative destinés à la régulation des procédés à paramètres inconnus et/ou variables dans le temps :

- commande adaptative directe. Les paramètres du régulateur sont directement ajustés en temps réel à partir des mesures d'erreurs de performances,
- commande adaptative indirecte. L'ajustement des paramètres du régulateur se fait en deux étapes :
 - estimation des paramètres du modèle du processus,
 - calcul des paramètres du régulateur à partir des paramètres estimés du procédé.

3.3.3.1 Commande adaptative directe

Dans ce cas, on ne dispose pas, a priori, d'un modèle du processus et les paramètres de la loi de commande sont définis à partir d'une optimisation de l'indice de performance adapté. Le schéma correspondant, représenté sur la figure III-15, constitue une généralisation de la méthode à modèle de référence.

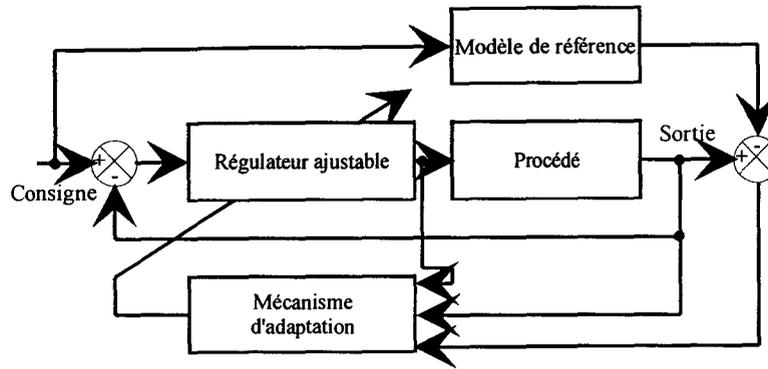


Figure III-15. Commande adaptative directe

La différence des sorties du procédé et du modèle de référence est une mesure de la différence, entre les performances, réelles et désirées. Cette information est utilisée par le mécanisme d'adaptation (qui reçoit aussi d'autres informations) pour ajuster automatiquement les paramètres du régulateur.

3.3.3.2 Commande adaptative indirecte

Elle constitue la généralisation du mode de détermination usuelle d'un régulateur pour un système à paramètres constants. Le modèle du processus est estimé, ici, en temps réel à partir des mesures des entrées et sorties du processus. L'estimation, à chaque instant, des paramètres du processus s'effectue à partir d'un prédicteur de sortie utilisant l'erreur de prédiction.

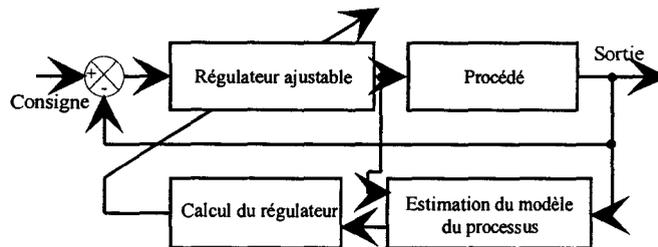


Figure III-16. Commande adaptative indirecte

Le modèle du processus servant pour le calcul est remplacé ici par un modèle estimé (identifié) en temps réel à partir des entrées et sorties du procédé. La structure des schémas d'identification en ligne est prise en compte. Ainsi, un schéma plus détaillé est obtenu. En effet, pour estimer les paramètres du procédé, à chaque instant, une prédiction de la sortie du procédé est construite : l'erreur de prédiction permet d'adapter les paramètres qui sont utilisés pour le calcul du régulateur.

3.3.3.3 Commande adaptative pour le guidage automatique des autobus en station : méthode du gain commandé

Pour la réalisation de la commande PID, les paramètres du régulateur varient avec la vitesse d'évolution de l'autobus. Une commande PID adaptative a été réalisée. Les paramètres du régulateur PID sont déterminés en fonction de la vitesse d'évolution [MUR - 83] et de la distance latérale entre l'autobus et le quai.

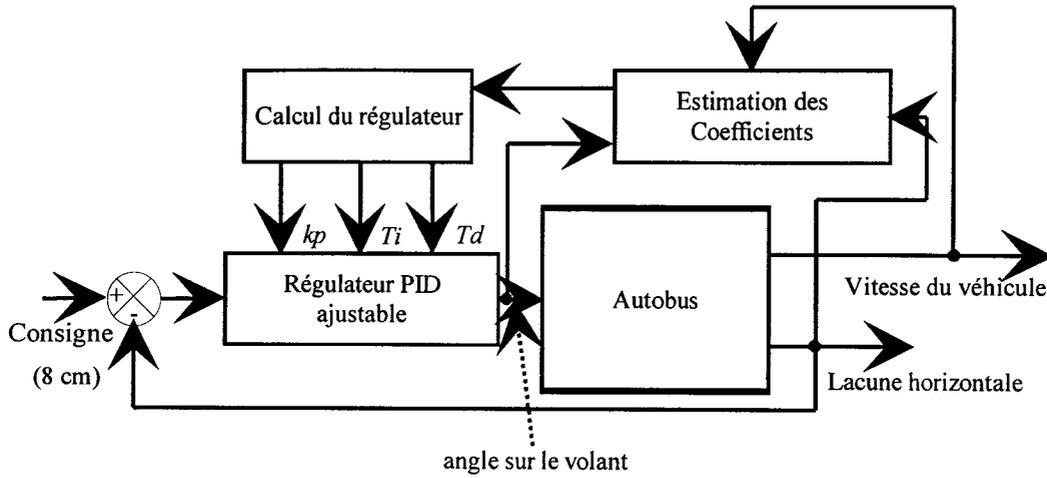
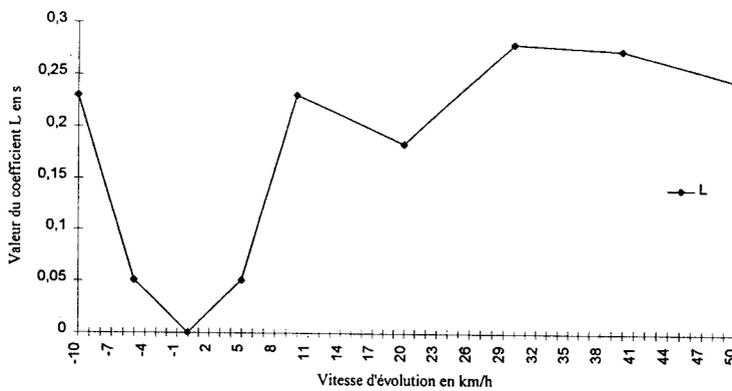
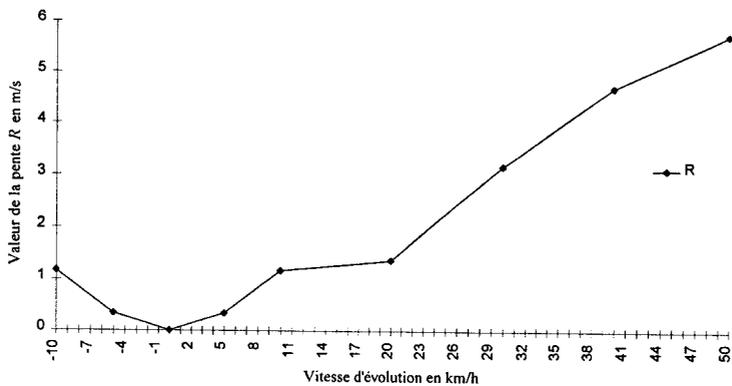


Figure III-17. Commande adaptative indirecte

Le bloc estimation des coefficients détermine les valeurs de la signature du processus par une interpolation linéaire. Deux interpolations ont été effectuées sur les coefficients L et R qui ont été calculés pour la commande PID à différentes vitesses d'évolution du véhicule. Les courbes pour L et R en fonction de la vitesse du véhicule sont obtenues.

Figure III-18. Courbe donnant le coefficient L en fonction de la vitesseFigure III-19. Courbe donnant le coefficient R en fonction de la vitesse

La valeur de la distance latérale d a été utilisée pour déterminer la valeur du coefficient multiplicateur. Celui-ci a pour but d'obtenir un confort maximal et d'éviter les oscillations lorsque l'autobus atteint les huit centimètres souhaités.

A partir des valeurs de L et R, les coefficients du régulateur PID peuvent être déterminées : $k_p = \frac{1,2}{LR}$, $T_i = 2L$ et $T_d = 0,5L$.

Les résultats obtenus avec cette méthode pour une position initiale identique à celle utilisée pour la commande PID, sont les suivants :

L'évolution de la vitesse reste identique à la figure III-5.

La variation de la lacune latérale en fonction du temps est la suivante :

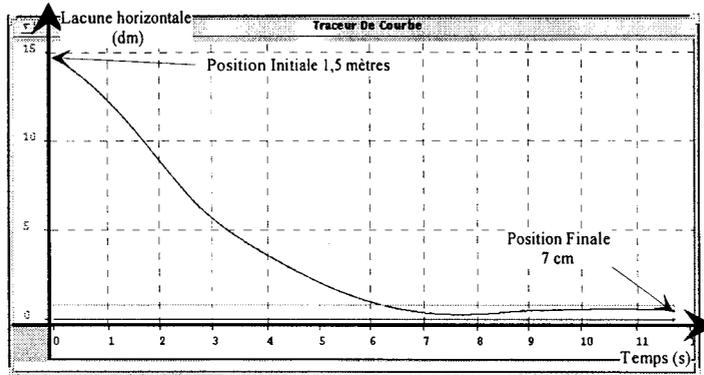


Figure III-20 . Evolution de la distance latérale en fonction du temps

A l'aide d'un algorithme de commande adaptative, la variation de l'angle de braquage du volant peut être calculée.

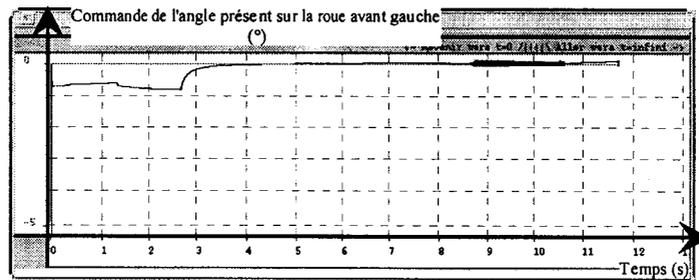


Figure III-21 . Evolution de la commande de braquage de la roue avant gauche en fonction du temps

Une autre donnée très importante : l'évolution de l'orientation du bus en fonction du temps.

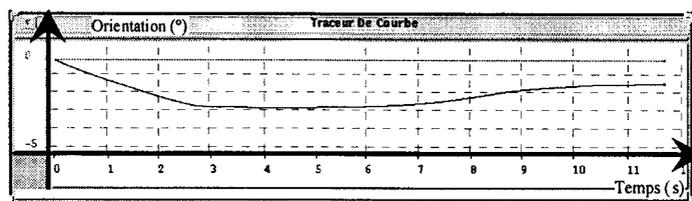


Figure III-22 . Evolution de l'orientation de l'autobus par rapport au quai en fonction du temps

La deuxième méthode utilisée est adaptée à la commande par retour d'état qui fonctionne avec un gain K calculé pour une vitesse moyenne V de l'autobus. Pour mieux prendre en compte la variation de la vitesse au cours de la phase d'accostage, il convient de sélectionner le gain K en fonction du paramètre V.

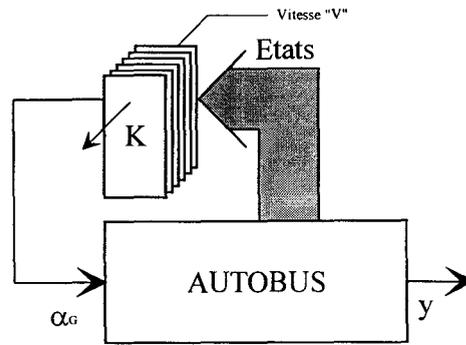


Figure III-23 . Méthode du gain commandé

Les gains K sont calculés, en fonction de la vitesse et des pôles choisis pour la régulation, puis ces valeurs sont implantées dans la plate-forme de simulation.

La même démarche a été suivie pour le retour d'état avec observateur. Le gain du retour d'état K et l'observateur sont calculés en fonction de la vitesse V .

Le premier résultat est celui de la commande adaptative avec retour d'état simple.

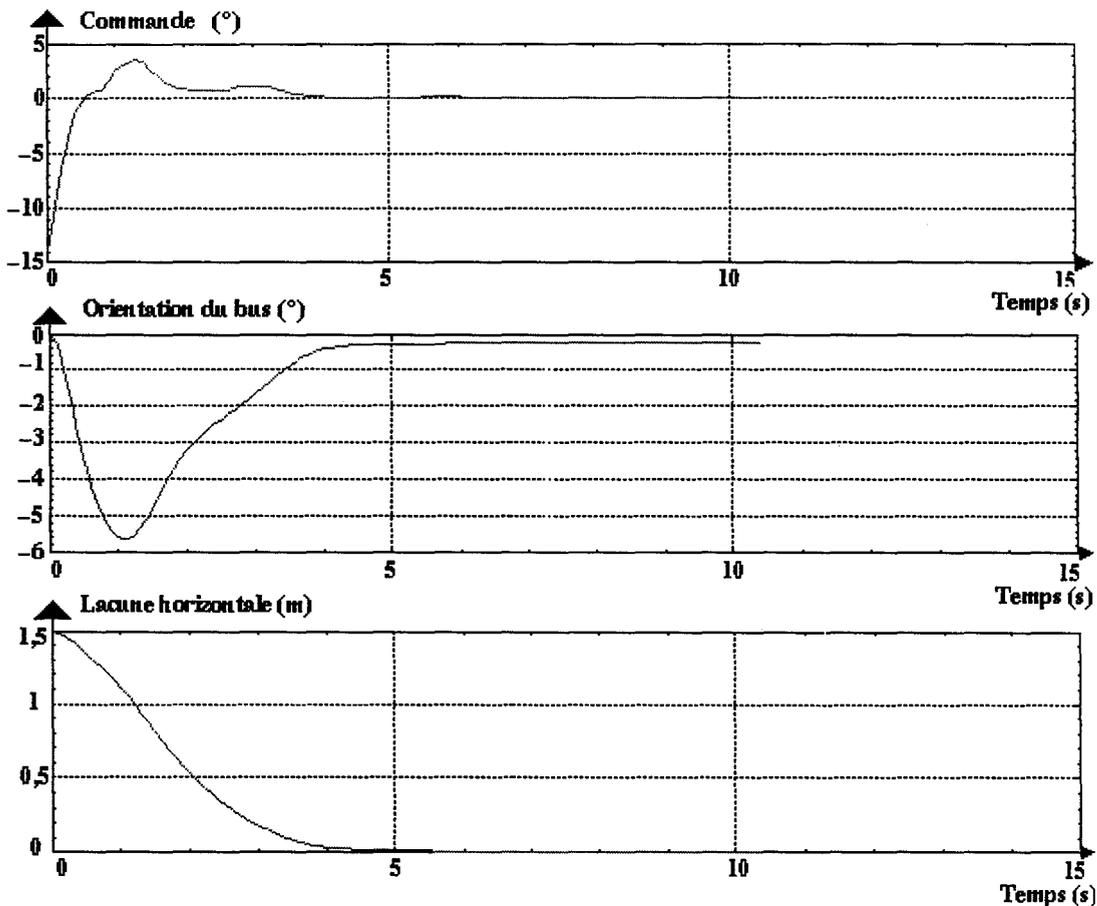


Figure III-24 . Evolution de la commande sur le volant, de l'orientation du bus par rapport au quai et de la distance latérale en fonction du temps

Le deuxième résultat est celui de la commande adaptative par retour d'état avec observateur.

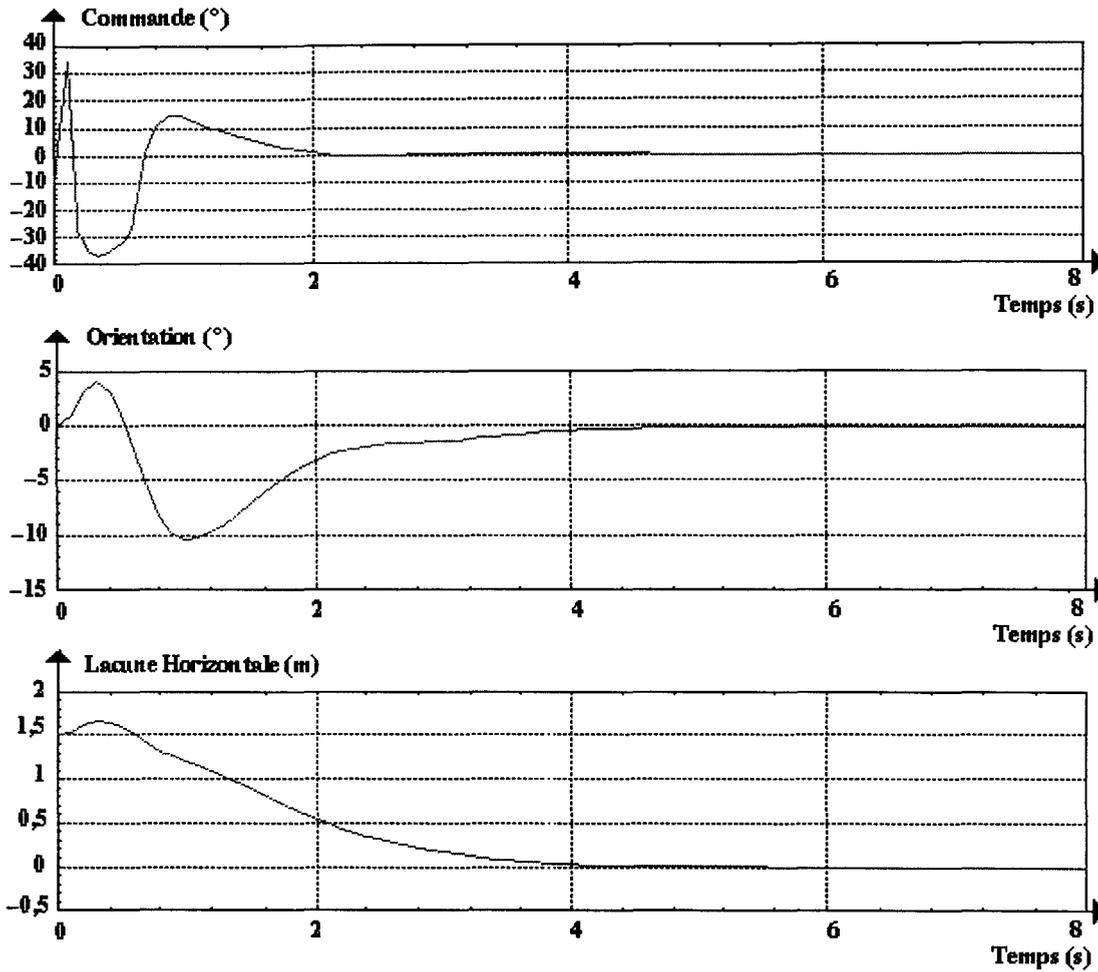


Figure III-25 . Evolution de la commande sur le volant, de l'orientation du bus par rapport au quai et de la distance latérale en fonction du temps

Ici, la commande supporte des profils de vitesse perturbés en respectant le cahier des charges pour les pôles choisis. Le résultat obtenu satisfait le cahier des charges dans ces différentes contraintes notamment la robustesse de la commande face à des profils de vitesse perturbés.

La commande adaptative supporte des profils de vitesse perturbés, si le conducteur, pour des raisons personnelles ou de sécurité, décide de freiner ou d'accélérer, la commande n'est pas perturbée et, surtout, la lacune à l'arrivée reste de 8 centimètres. La continuité de ce travail sera le test de fiabilité des lois de commande et leur résistance aux perturbations. Les conducteurs d'autobus actuels arrivent à obtenir des lacunes horizontales de 8 centimètres mais ne peuvent pas assurer une reproductibilité parfaite de cette action. Il a été adopté de tester la commande floue qui consiste en une reproduction du comportement de l'homme aux commandes de son véhicule.

3.3.4 La commande par contrôleurs flous pour le guidage d'un autobus

Certains paramètres et caractéristiques inconnus, difficiles à déterminer ou varient avec le temps. Pour s'affranchir de ces problèmes, nous nous orientons vers une approche faisant intervenir la notion de concept flou.

La théorie des ensembles flous, introduite en 1965 par L.A. Zadeh [ZAD - 65], permet de résoudre les difficultés posées par la commande des systèmes complexes et incertains. Ce concept flou correspond, en fait, à une approche plus pragmatique qui se limite à l'observation. Prenons l'exemple de la conduite d'un autobus en phase d'accostage.

- La méthode formelle utilisée antérieurement pour la réalisation de la commande PID et adaptative consiste à modéliser au mieux le comportement dynamique de l'autobus. Ainsi, si celui-ci se déporte sur la gauche, le système de conduite en déduit qu'il faut braquer le volant vers la droite d'un angle β pendant une durée t pour que l'autobus se positionne correctement sur la chaussée. L'ordre de commande ainsi calculé est, en théorie, une solution optimale puisqu'il prend en compte les caractéristiques de l'autobus. Dans la pratique, cette solution n'est pas forcément optimale, car, en général, la modélisation d'un tel véhicule nécessite d'effectuer des approximations et/ou de négliger certains paramètres impossibles à déterminer ou variables dans le temps.
- La méthode expérimentée est basée sur le concept flou. Ce concept consiste à se mettre à la place d'un conducteur pour reproduire les actions effectuées par celui-ci. On s'intéresse à son comportement, défini par sa connaissance et son expérience de la conduite et du véhicule à commander. Pour déterminer l'ordre de commande, on utilise des règles du type : "si le véhicule se déporte légèrement sur la gauche, braquer légèrement le volant vers la droite". Cette solution n'est pas forcément optimale mais elle est acceptable, raisonnable et même judicieuse dans certains cas. De plus, comme le comportement du conducteur est empirique et subjectif, il est possible d'obtenir différents types de conduite (agressive, prudente, douce, etc...). Donc, suivant la position initiale et l'orientation de départ, on envisagerait tel ou tel type de conduite. Cette méthode permet, de s'affranchir facilement de la modélisation formelle et explicite du véhicule.

3.3.4.1 Structure d'un contrôleur flou

Les contrôleurs flous utilisent l'expertise des opérateurs humains exprimée sous forme de règles linguistiques du type : Si "X est A_i " et "Y est B_i " alors "U est C_i ". Les prémisses de cette règle sont "X est A_i " et "Y est B_i ". Elles représentent des conditions floues sur les variables d'observations X et Y. La conclusion de la règle "U est C_i " représente une action de commande floue. A_i , B_i , et C_i sont les ensembles flous associés respectivement aux variables d'observation et de commande X, Y et U. Souvent, les contrôleurs flous sont utilisés dans les structures de commande en boucle fermée des processus.

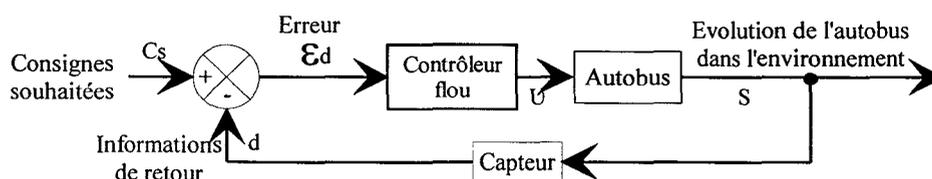


Figure III-26. Synoptique d'une commande floue

Voici les différentes étapes du raisonnement du contrôleur flou :

- **la fuzzyfication.** L'opération de fuzzyfication définit le degré d'appartenance d'une variable observée ou mesurée à un ensemble flou donné. L'opération de fuzzyfication représente le passage des grandeurs réelles (ou physiques) aux valeurs floues,
- **le traitement des prémisses des règles.** La prémisses des règles utilise plusieurs observations floues liées par les opérateurs ET ou OU, qui sont respectivement des t-normes et t-conormes [DEM - 94],
- **l'inférence :** traitement d'une règle (implication : "Si ... alors ..."). L'implication permet d'évaluer le degré de validité d'une règle d'expertise. Les implications de Mamdani et de Larsen ont été testées mais uniquement les résultats obtenus par les implications de Mamdani (méthode la plus souvent utilisée) seront présentés. Même si ces opérateurs ne sont pas de vraies implications, leur utilisation en commande se trouve justifiée car ils introduisent une notion de progressivité [DUB - 92]. L'inférence floue est une opération basée sur le modus ponens généralisé d'évaluer la contribution d'une règle activée par la commande. Il s'agit de déterminer l'ensemble flou inféré résultant d'une règle,
- **l'agrégation des règles :** synthèse du résultat de toutes les règles activées et génération d'une action de commande. L'agrégation des règles utilise la contribution de toutes les règles activées pour en déduire une action de commande. Les règles sont activées en parallèle et sont liées par l'opérateur OU, qui est une t-conorme,
- **la défuzzyfication :** calcul de la commande réelle à appliquer au processus à partir de l'action de la commande floue. Cette opération permet de calculer, à partir de l'ensemble flou de la variation de la commande, la valeur réelle de cette variation de commande à appliquer au processus. Trois techniques de défuzzyfication sont utilisées : la valeur du maximum, le barycentre des maxima et le centre de gravité (qui est une généralisation du barycentre des maxima).

Le diagramme fonctionnel d'un contrôleur flou est représenté de la forme suivante [DEM - 94] :

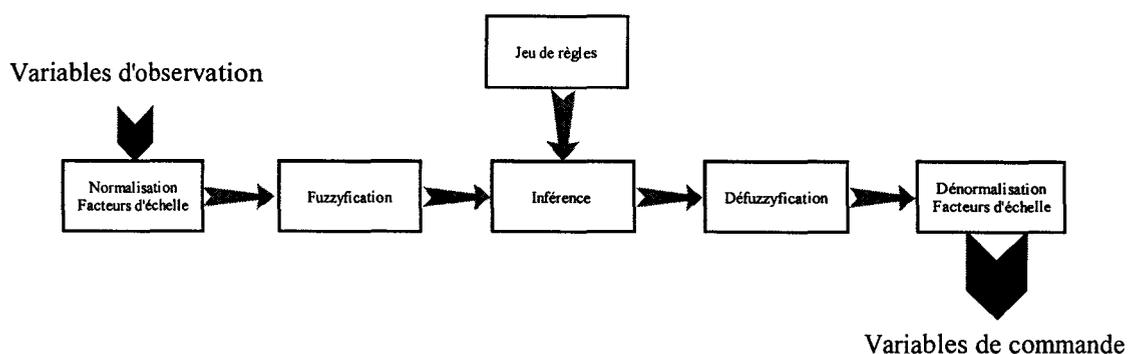


Figure III-27. Diagramme fonctionnel d'un contrôleur flou

Le lecteur trouvera, dans les références suivantes, des compléments d'informations et des explications plus complètes sur la théorie des ensembles flous : [ZAD - 65], [KAU - 77], [BOU - 93], [ONO - 89], [SCH - 90].

3.3.4.2 Etude de la commande de braquage à l'aide d'un contrôleur flou

Nous déterminons les informations nécessaires à l'élaboration de la commande de braquage et l'obtention d'une conduite proche de celle du conducteur [EUD, HAY - 95].

Parmi ces informations, il y a :

- la consigne de pilotage C_s qui représente la distance latérale à maintenir entre l'autobus et le quai (8 cm avec une erreur maximale de 2 cm),
- les informations liées à la localisation statique de l'autobus permettent de respecter la position et l'orientation du quai,
- les informations liées à la localisation dynamique de l'autobus prennent en compte la vitesse d'évolution du véhicule.

La solution utilisée pour déterminer la position de l'autobus par rapport au quai est la détection de la distance latérale de l'autobus au quai par des télémètres placés sur la partie basse du véhicule.

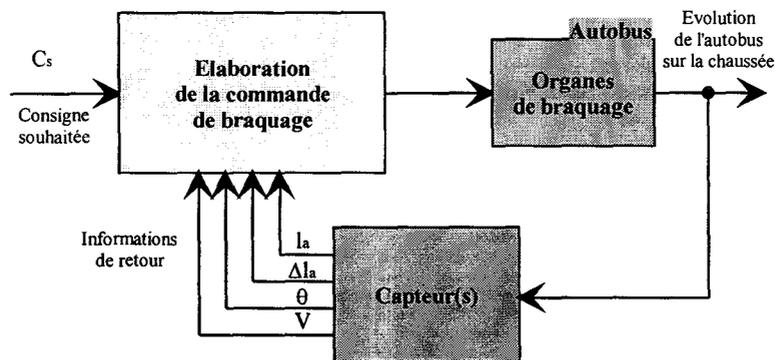


Figure III- 28 . Détail des informations utilisées pour élaborer la commande de braquage

A partir des informations délivrées par le ou les capteurs, les valeurs suivantes sont déterminées :

- l_a : lacune à l'avant de l'autobus,
- Δl_a : variation de la lacune (terme de dérivé),
- θ : angle que fait l'autobus avec le quai. Il traduit la direction empruntée par l'autobus. Il est, en effet, important d'avoir les mêmes performances en terme de lacune à l'avant et à l'arrière du véhicule puisque la montée ou la descente peuvent se faire par des portes situées à ces deux niveaux,
- V : vitesse du véhicule, paramètre important permettant de régler l'évolution de l'angle volant.

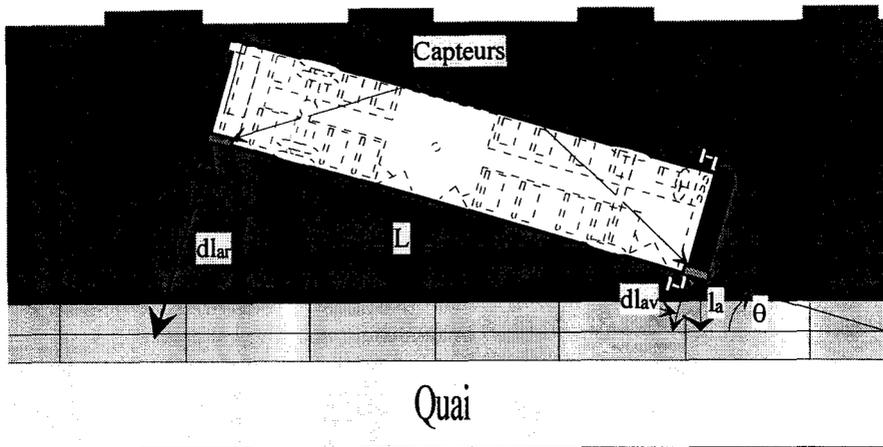


Figure III-29 . Les variables floues

Remarques :

- d_{lav} : distance à l'avant de l'autobus (perpendiculaire au bus),
- d_{lar} : distance à l'arrière de l'autobus (perpendiculaire au bus),
- l_a : distance à l'avant de l'autobus (perpendiculaire au quai),
- L : longueur de l'autobus,
- θ : orientation de l'autobus.

Le bloc relatif à l'élaboration de la commande de braquage de la figure III-28 se décompose en sous-blocs :

- le bloc "commande relative à la distance latérale" permet, à partir des différentes informations (C_s , l_a et Δl_a) liées au quai, de déterminer une commande de braquage U ,
- le bloc "commande relative à l'orientation de l'autobus" permet, à partir des différentes informations (l_a et θ) par rapport au quai, de déterminer l'ajustement de l'angle de braquage en ajoutant une variation ΔU ,
- le bloc "pondérateur" permet, à partir de l'information vitesse (V) liée au déplacement du véhicule, de déterminer un coefficient pondérateur K , (l'expertise, mais en évidence l'importance d'un système adaptatif en fonction de la vitesse),
- le bloc "opération" permet, à partir de la commande de braquage U , de la variation de braquage ΔU et du coefficient pondérateur K , de déterminer la commande de braquage α_G à envoyer sur la direction de l'autobus.

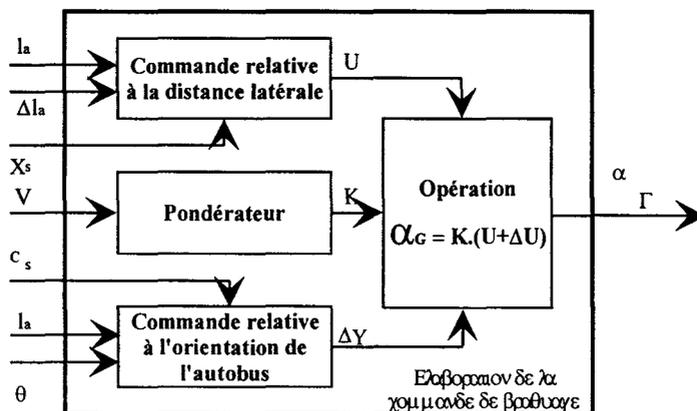


Figure III-30 . Détails internes de la commande de braquage

La détermination de la partition de l'espace, des fonctions d'appartenance et des règles permet de réaliser la commande floue relevant du domaine général de l'acquisition des connaissances. Elle constitue la principale difficulté de la commande floue. Auprès d'experts une enquête a été réalisée, pour qu'ils explicitent leurs connaissances ou auprès d'opérateurs qualifiés pour qu'ils décrivent leur savoir-faire. L'enquête peut être effectuée par interrogation orale ou par questionnaire [KAP et al - 94]. Les actions de commande réalisées par des opérateurs qualifiés sur une camionnette équipée de capteurs à cet effet a été observées [DEB, et al - 3.96]. Des liaisons entre les données d'entrées et de sorties pour le processus à contrôler a été établies.

3.3.4.2.1 . Description du système expérimental pour l'élaboration de la partition de l'espace

Quelles sont les informations utiles pour réaliser l'expertise de la commande floue ?

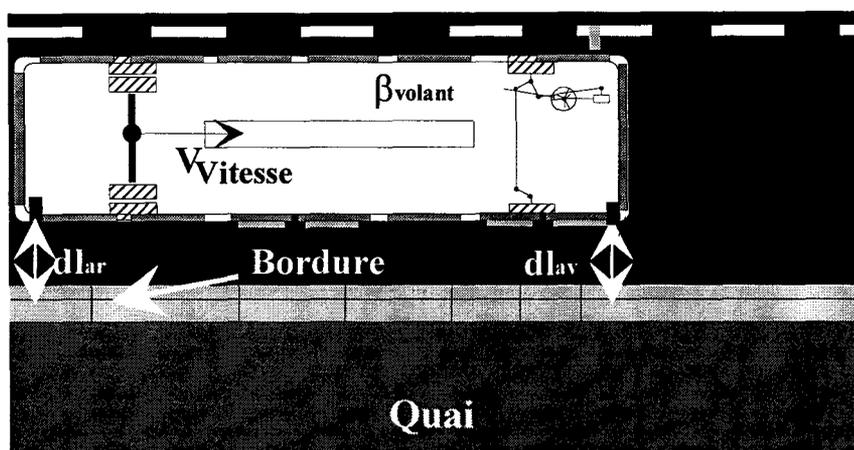


Figure III-31 . Site expérimental

Voici nos informations relevées : l'angle volant qui représentant la sortie du bloc commande, les distances latérales à l'avant et à l'arrière du véhicule. Elles permettent de déduire l'orientation du véhicule et la lacune à l'avant du véhicule. Nous choisissons de relever la vitesse d'évolution de l'autobus, paramètre très important : le conducteur du véhicule ne braque pas de la même façon la direction, selon la vitesse d'évolution faible ou élevée et suivant sa façon de conduire. Le dispositif utilisé est identique à celui qui a servi à valider le comportement simulé de l'autobus. La trajectoire du véhicule est relevée par deux télémètres qui mesurent les distances latérales (dl_{av} et dl_{ar}) entre les capteurs et la surface de réflexion représentée ici par la bordure du quai. Ce choix entraîne l'installation des capteurs sur la paroi droite du véhicule à une hauteur de quinze centimètres de la chaussée. De cette façon, les télémètres donnent l'information de distance latérale existant entre la partie basse du véhicule et le bord du quai. Les capteurs utilisés sont des télémètres LASER¹ ; leur portée de mesure est grande (une dizaine de mètres). Ils permettent de réaliser des mesures précises même sur des petites surfaces.

¹ LASER : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

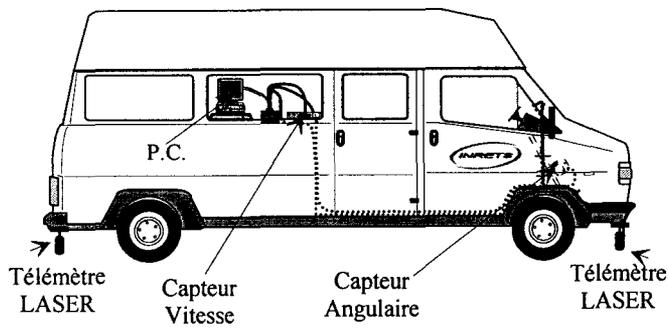


Figure III-32. Implantation du matériel sur la camionnette

Les sites où sont réalisées les expérimentations sont assimilables à des quais, de formes un peu différentes de celles proposées dans le cadre du projet GIBUS [DEB - 2.94]. Il a fallu, les adapter pour les ramener à l'échelle d'une camionnette.

3.3.4.2.2. Commande relative à la distance latérale

A partir des résultats de l'expertise, une partition de l'espace pour la lacune l_a et pour la variation de la lacune Δl_a a été réalisée. Déterminer une partition de l'espace consiste à associer à chaque variable un certain nombre de sous-ensembles flous et à délimiter ceux-ci. Il faut alors faire un compromis entre la précision et le nombre de règles qui augmentent tous les deux avec le nombre d'ensembles flous.

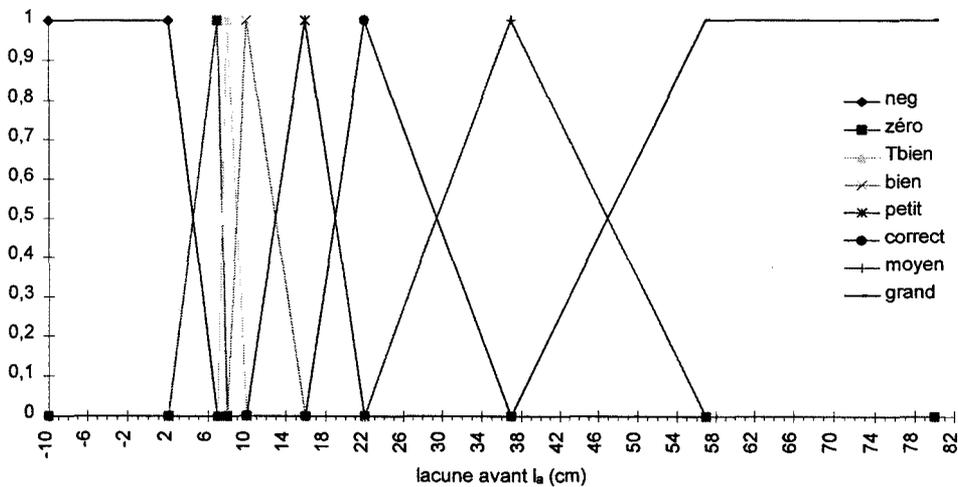


Figure III-33. Fonctions d'appartenance de la lacune avant

avec :

- neg : lacune négative (inférieure à 7 cm),
- zéro : lacune parfaite (comprise entre 2 et 8 cm),
- Tbien : lacune très bien (comprise entre 7 et 10 cm),
- bien : lacune bien (comprise entre 8 et 16 cm),
- petit : lacune petite qui peut être considérée comme faible (entre 10 et 22 cm),
- correct : lacune correcte pour un accostage réalisé par un conducteur (entre 16 et 38 cm),
- moyen : lacune moyenne (entre 22 et 58 cm),
- grand : lacune grande (supérieure à 38 cm).

Maintenant, passons à la détermination des fonctions d'appartenance de la variation de la lacune avant de l'autobus.

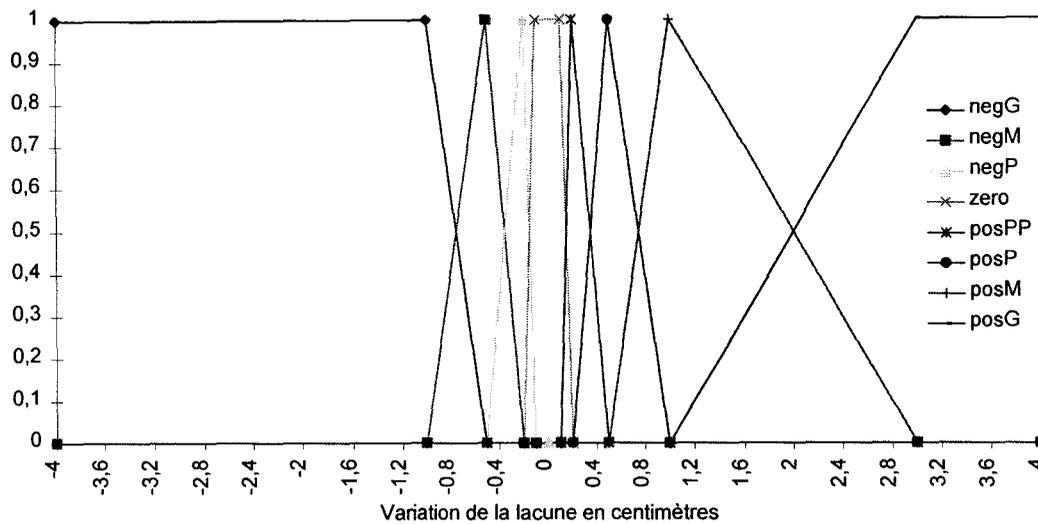


Figure III-34. Fonctions d'appartenance de la variation de la lacune avant

avec :

- negG : variation de la lacune grande en négatif pour une valeur inférieure à -0,5 cm,
- negM : variation de la lacune moyenne en négatif pour une valeur comprise entre -1 et -0,2 cm,
- negP : variation de la lacune petite en négatif pour une valeur comprise entre -0,5 et -0,1 cm,
- zéro : variation de lacune nulle pour une valeur comprise entre -0,2 et 0,2 cm,
- posPP : variation de la lacune très petite pour une valeur comprise entre 0,1 et 0,5 cm,
- posP : variation de la lacune petite pour une valeur comprise entre 0,2 et 1 cm,
- posM : variation de la lacune moyenne pour une valeur comprise entre 0,5 et 3 cm,
- posG : variation de la lacune grande pour une valeur supérieure à 1 cm.

Les fonctions d'appartenance établies, il faut bâtir les règles. Une des particularités de la commande floue tient à la façon dont on détermine les règles. Cette étape se fait souvent par expertise. Les constats de l'étude ergonomique [KAP et al - 94] et des expériences d'accostage réalisées sur la camionnette ont été utilisés.

la \ Δla	negG	negM	negP	zéro	posPP	posP	posM	PosG
neg	rien	rien	gaucheP	gaucheM	gaucheG	gaucheT	gauche+	gauche+
zéro	droiteM	droiteP	rien	rien	gaucheP	gaucheM	gaucheG	gaucheT
Tbien	droiteG	droiteM	droiteP	rien	rien	gaucheP	gaucheM	gaucheG
bien	droiteT	droiteG	droiteM	droiteP	rien	rien	gaucheP	gaucheM
petit	droiteT	droiteT	droiteG	droiteM	droiteP	droiteP	rien	gaucheP
correct	droiteT	droiteT	droiteT	droiteG	droiteM	droiteM	droiteP	rien
moyen	droiteT	droiteT	droiteT	droiteT	droiteG	droiteG	droiteM	droiteP
grand	droiteT	droiteT	droiteT	droiteT	droiteT	droiteG	droiteG	droiteM

Figure III-35. Règles donnant le braquage U

Il faut maintenant appliquer les règles fixés en faisant agir le moteur d'inférence. Cela nécessite le choix d'un opérateur d'implication. L'implication floue de Mamdani a été choisi car elle est classique en commande floue et correspond intuitivement à un comportement satisfaisant [BOU - 93] :

- si le degré d'appartenance en entrée est nul alors la règle n'est pas activée,
- si le degré d'appartenance en entrée est de 1 alors la règle donne l'intégralité de l'ensemble de conclusion,
- pour une valeur intermédiaire, le résultat est inclus dans l'ensemble de conclusion.

La notion d'incertitude n'intervient donc jamais.

L'implication floue étant choisie, la dernière étape est la défuzzyfication. Elle réalise la synthèse de toutes les règles et détermine une valeur numérique de la commande qui doit être non ambiguë, plausible et surtout continue.

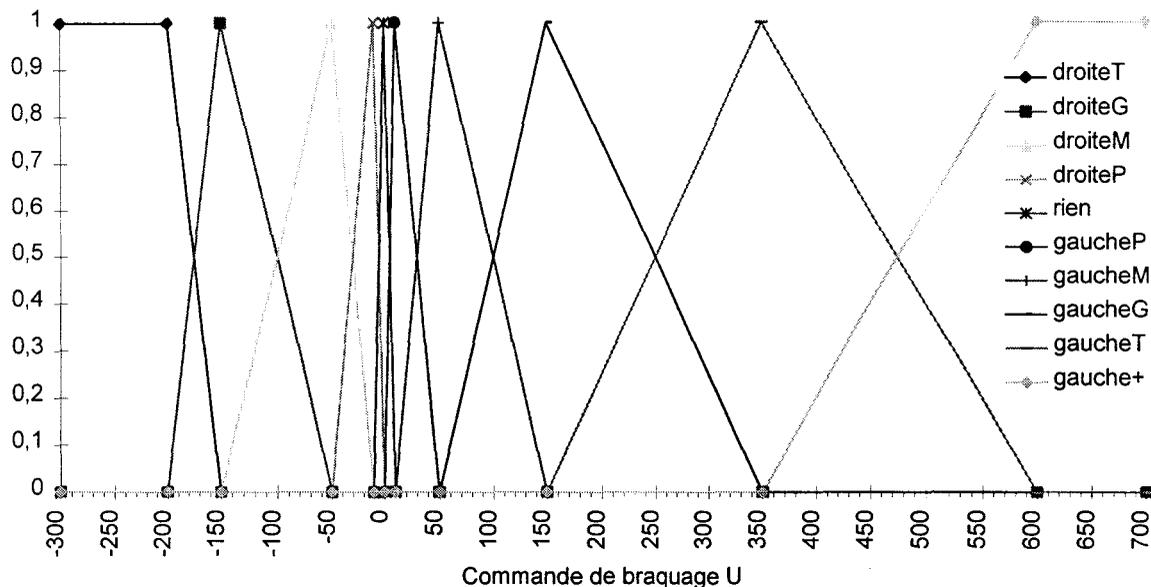


Figure III-36. Fonctions d'appartenance de U

La méthode de défuzzyfication choisie est connue sous le nom de la méthode du barycentre des hauteurs ou du barycentre des maxima. Le résultat est le barycentre des trapèzes ou des triangles, pondéré par les degrés d'appartenance des abscisses des hauteurs. Pour des fonctions triangulaires, les hauteurs correspondent aux valeurs pics. Dans un exemple, la courbe représentant la contribution des règles présente deux maxima pour les deux valeurs Δu_1 et Δu_2 .

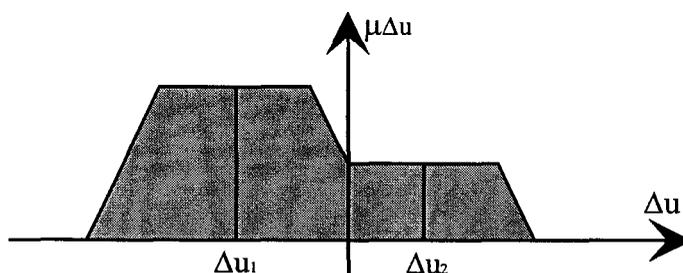


Figure III-37. Barycentre des maxima

Les degrés d'appartenance $\mu_{\Delta u_1}$ et $\mu_{\Delta u_2}$ sont associés respectivement aux valeurs Δu_1 et Δu_2 . La valeur de la commande Δu_a à appliquer au processus est alors :

$$\Delta u_a = \frac{\mu_{\Delta u_1} \Delta u_1 + \mu_{\Delta u_2} \Delta u_2}{\mu_{\Delta u_1} + \mu_{\Delta u_2}} . \text{ Pour } n \text{ contributions, on aura : } \Delta u_a = \frac{\sum_{i=0}^{i=n} \mu_{\Delta u_i} \Delta u_i}{\sum_{i=0}^{i=n} \mu_{\Delta u_i}} .$$

Maintenant, prenons un exemple : un véhicule se déplace à une vitesse v de 30 km/h avec une lacune l_a de 28 centimètres au départ, une variation de la lacune Δl_a de 0,4 centimètre et une orientation de 5° . La première étape est de trouver la commande U .

1^{ère} étape : la fuzzyfication.

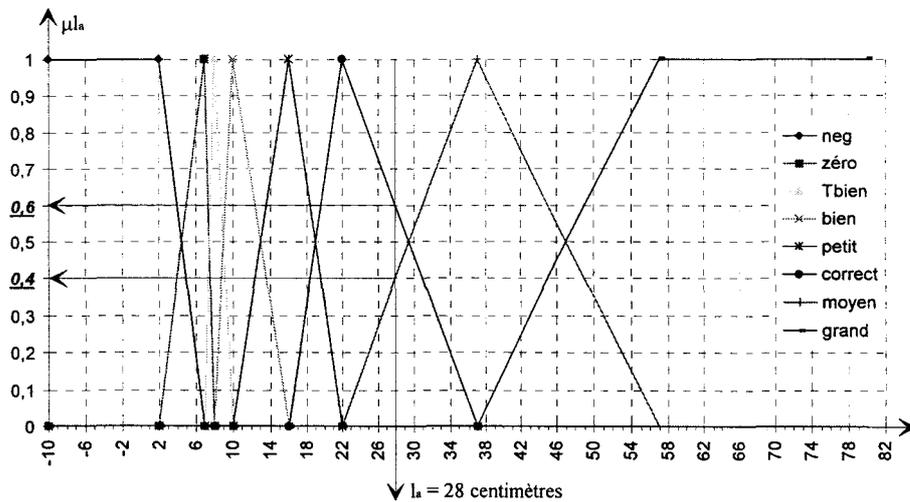


Figure III-38. Fonctions d'appartenance de la lacune avant

La concluons est que l_a appartient à l'ensemble flou *moyen* avec un degré d'appartenance de 0,4, et aussi à l'ensemble flou *correct* avec un degré d'appartenance de 0,6.

Maintenant, passons à la fuzzyfication de la variation de la lacune.

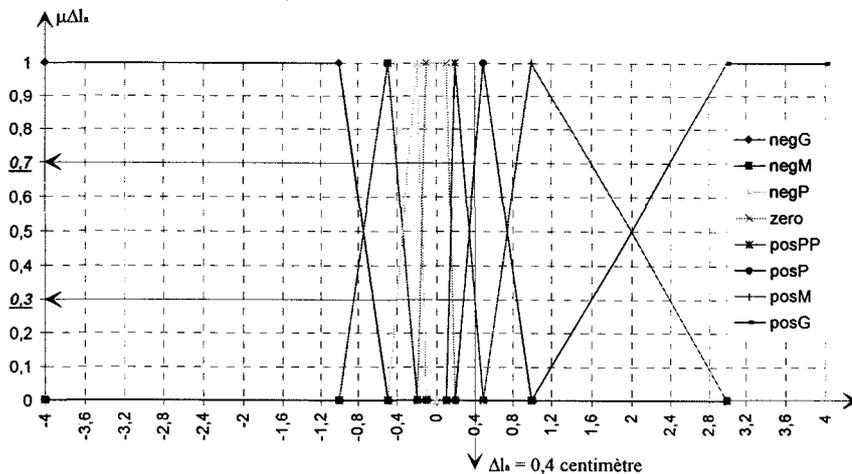


Figure III-39. Fonctions d'appartenance de la variation de la lacune avant

On conclut : Δl_a appartient à l'ensemble flou positif petit $posP$ avec un degré d'appartenance de 0,7, et Δl_a appartient à l'ensemble flou positif petit petit $posPP$ avec un degré d'appartenance de 0,3.

Ensuite, passons à la base de règles avec l'implication floue de Mamdani.

2^{ème} étape : règles de déduction avec conclusion relative à U.

A partir de la Figure III-35 et des résultats précédents, quatre règles sont activées :

- ⇒ Si " l_a est moyen avec $\mu l_a = 0,4$ " et " Δl_a est $posP$ avec $\mu \Delta l_a = 0,7$ " alors " U est *droiteG* avec $\mu U = \min(\mu l_a, \mu \Delta l_a) = 0,4$ "
- ⇒ Si " l_a est moyen avec $\mu l_a = 0,4$ " et " Δl_a est $posPP$ avec $\mu \Delta l_a = 0,3$ " alors " U est *droiteG* avec $\mu U = \min(\mu l_a, \mu \Delta l_a) = 0,3$ "
- ⇒ Si " l_a est *correct* avec $\mu l_a = 0,6$ " et " Δl_a est $posP$ avec $\mu \Delta l_a = 0,7$ " alors " U est *droiteM* avec $\mu U = \min(\mu l_a, \mu \Delta l_a) = 0,6$ "
- ⇒ Si " l_a est *correct* avec $\mu l_a = 0,6$ " et " Δl_a est $posPP$ avec $\mu \Delta l_a = 0,3$ " alors " U est *droiteM* avec $\mu U = \min(\mu l_a, \mu \Delta l_a) = 0,3$ "

Puis, passons à la défuzzyfication.

3^{ème} étape : la défuzzyfication.

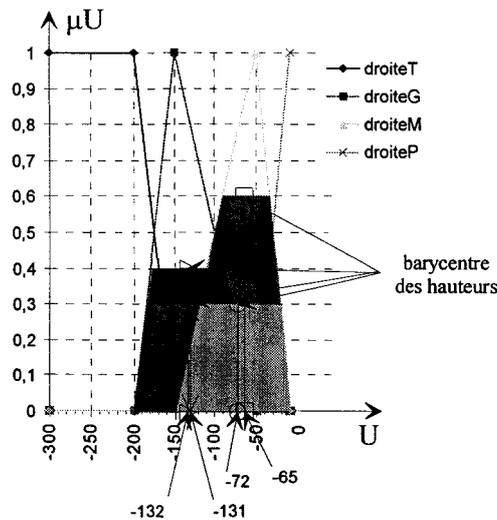


Figure III-40. Fonctions d'appartenance de U et barycentre des maxima

$$U = \frac{0,4 \cdot (-132) + 0,3 \cdot (-131) + 0,3 \cdot (-72) + 0,7 \cdot (-65)}{0,4 + 0,3 + 0,3 + 0,7} \cong 93,64$$

Donc, la valeur obtenue pour la commande U est de 93,64 impulsions ce qui représente une rotation du volant de 32,77° ou une rotation de la roue avant gauche de 1,63°. Ce résultat obtenu, il faut calculer la valeur du ΔU et le coefficient K qui est fonction de la vitesse.

3.3.4.2.3 . Commande relative à l'orientation de l'autobus

Ici, deux entrées doivent passer par le module de fuzzyfication. La lacune l_a , reprend les mêmes fonctions d'appartenance que pour la commande U (figure III-33) et, l'orientation de l'autobus, utilise les fonctions développées sur la figure III-41.

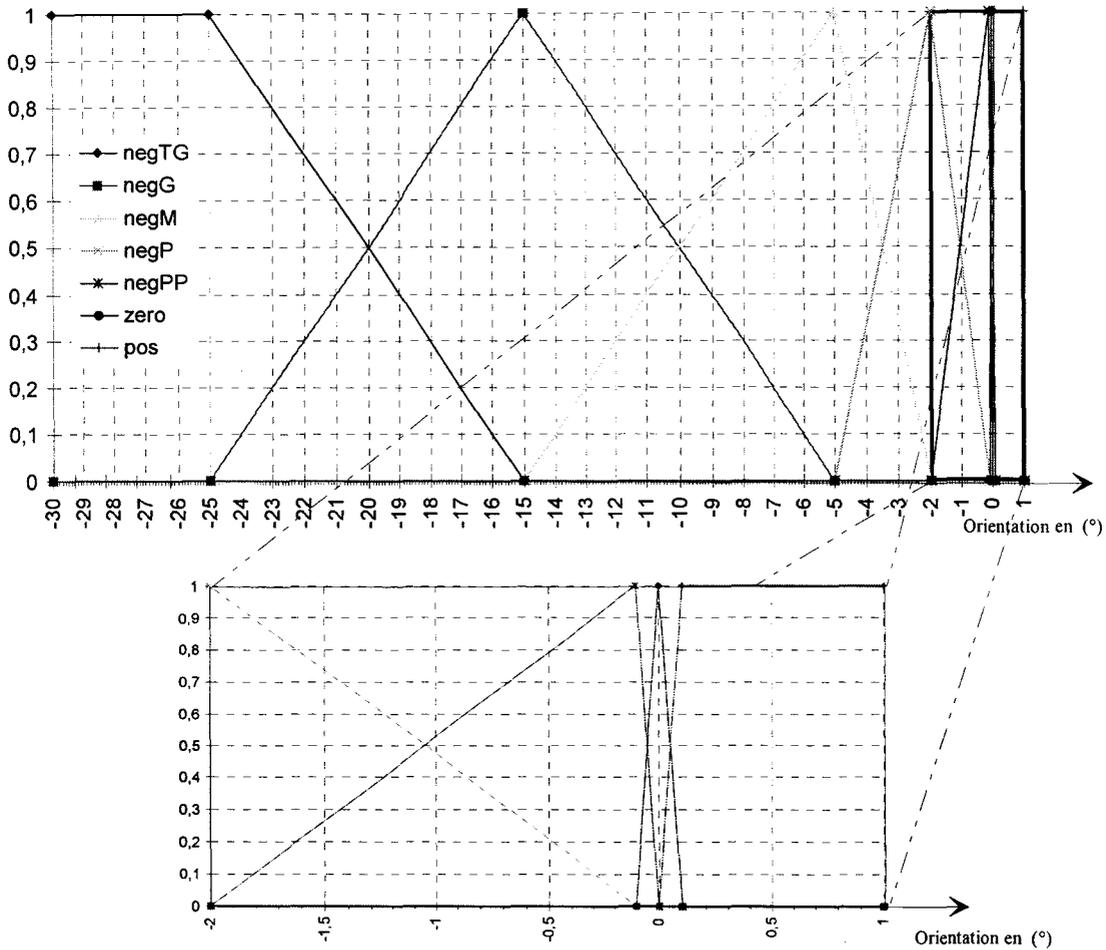


Figure III-41 . Fonctions d'appartenance de l'orientation de l'autobus

Nous déterminons les règles entre la distance latérale l_a et l'orientation de l'autobus θ .

l_a / θ	negTG	negG	negM	negP	negPP	zéro	pos
neg	posT	posT	posT	posT	posG	posM	posP
zéro	posT	posT	posT	posG	posM	posP	rien
Tbien	posT	posT	posG	posM	posP	rien	rien
bien	posT	posG	posM	posP	rien	rien	negP
petit	posT	posG	posM	posP	posP	rien	negP
correct	posT	posG	posM	posP	rien	negP	negP
moyen	posG	posM	posP	rien	negP	negM	negG
grand	posM	posP	rien	negP	negM	negG	negG

Figure III-42 . Règles donnant la variation du braquage ΔU

Passons maintenant à la dernière fonction qui est la fonction de défuzzyfication. Nous indiquons les fonctions d'appartenance choisies pour déterminer la commande ΔU .

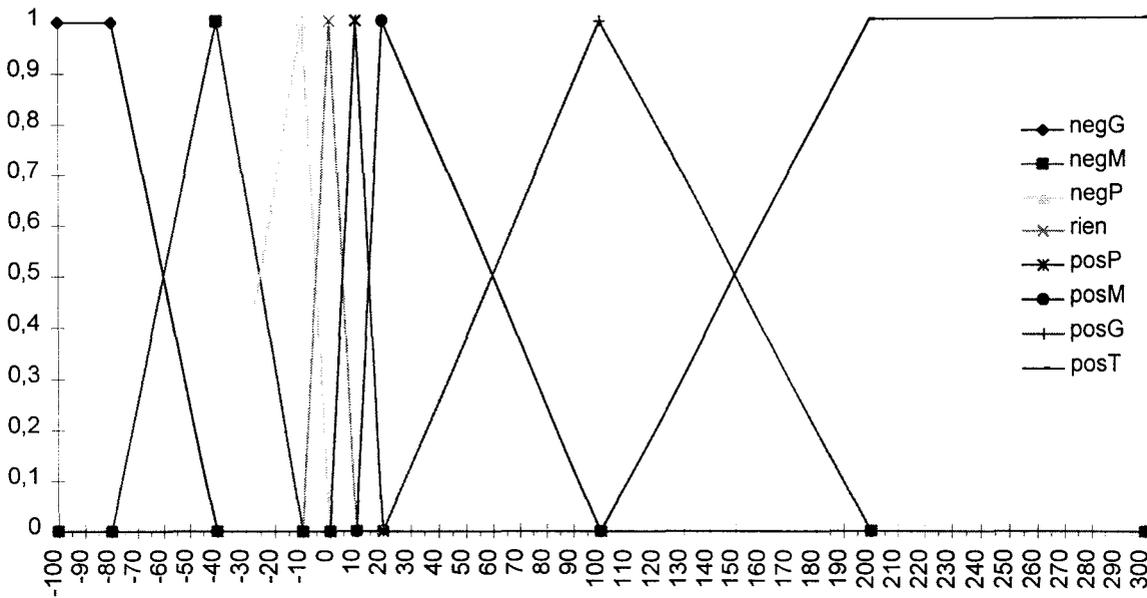


Figure III-43 . Fonctions d'appartenance de ΔU

3.3.4.2.4 . Pondérateur

Le bloc pondérateur détermine un gain qui sera multiplié aux résultats des deux premiers blocs. Un terme d'adaptation en fonction de la vitesse est introduit. Sur les relevés réalisés sur le site, il est visible que le conducteur humain ajuste l'angle de braquage en fonction de la vitesse du véhicule. Il pondère naturellement son comportement en fonction de la vitesse d'évolution. La plupart des accostages se décomposent en un braquage important vers la droite puis un redressement pour remettre le véhicule dans une direction parallèle à la ligne du trottoir. Or, dans les courbes, le premier braquage à droite apparaît nettement plus faible que le braquage à gauche pour redresser. Ceci est dû au fait que le redressement se fait alors que la camionnette a une vitesse relativement faible. Ce fait souligne l'importance du coefficient multiplicateur adaptatif dépendant de la vitesse. La première étape est la fuzzification de la variable vitesse.

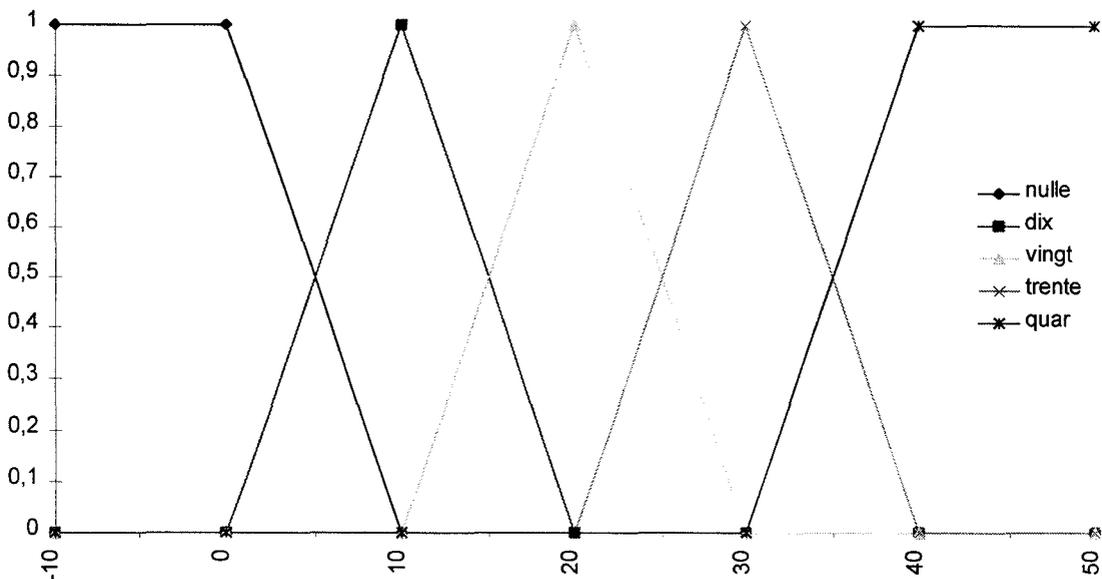


Figure III-44 . Fonctions d'appartenance de la vitesse longitudinale du véhicule

avec:

- nulle : vitesse inférieure à 10 km/h,
- dix : vitesse comprise entre 0 et 20 km/h,
- vingt : vitesse comprise entre 10 et 30 km/h,
- trente : vitesse comprise entre 20 et 40 km/h,
- quar : vitesse supérieure 30 km/h.

Une fois cette étape franchie, le résultat flou active la base de règles qui est la suivante :

V	K
nulle	grand
dix	moyen
vingt	un
trente	petit
quar	zéro

Figure III-45. Règles donnant le coefficient multiplicateur K

Les fonctions d'appartenance pour déterminer la valeur du coefficient K qui correspond à la méthode de défuzzification sont les suivantes :

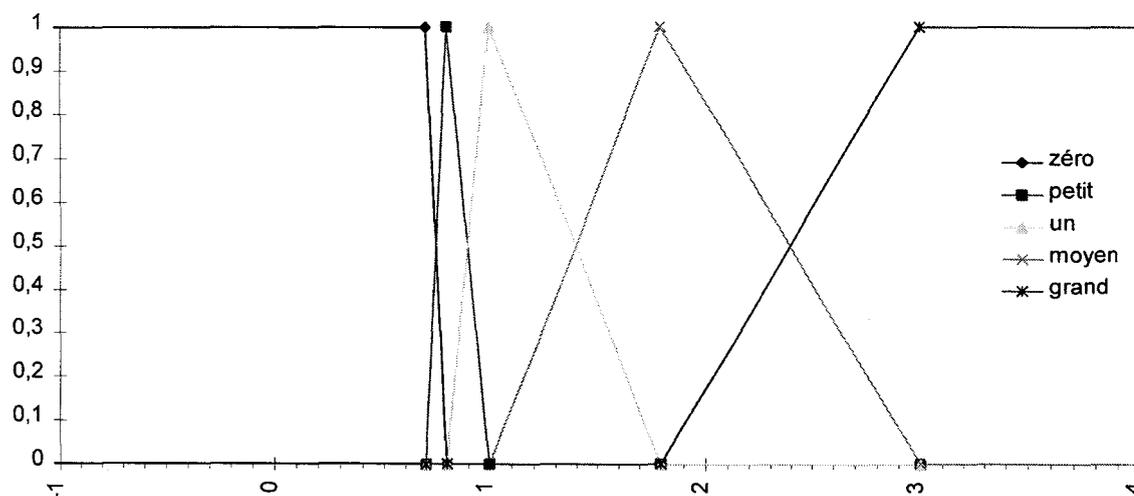


Figure III-46. Fonctions d'appartenance du coefficient K

La commande déterminée est testée sur la plate-forme de simulation réalisée.

Le premier test est effectué pour une distance latérale initiale de 1 mètre et une orientation de départ nulle avec une vitesse d'évolution rencontrée lors d'accostage.

Ici l'évolution de la distance latérale en fonction du temps (distance longitudinale parcourue) est représentée.

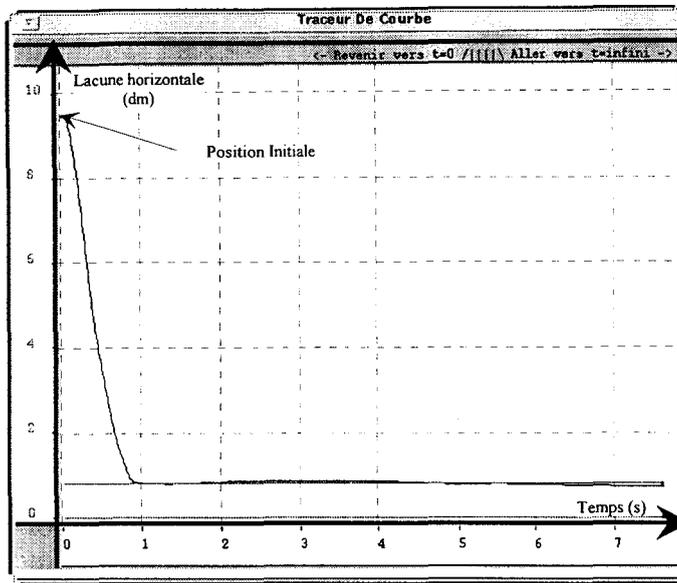


Figure III-47. Evolution de la distance latérale en fonction du temps

L'algorithme de commande a calculé la loi de commande à fournir à la roue avant gauche.

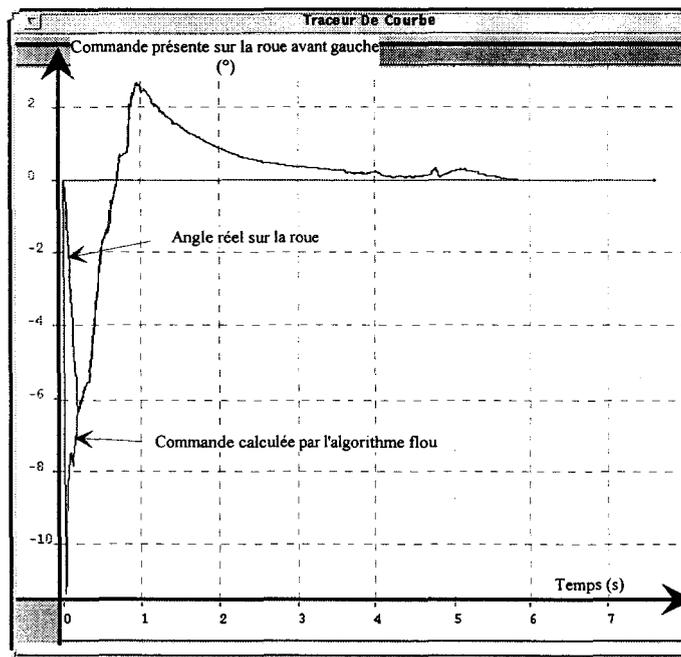


Figure III-48. Evolution de la commande en fonction du temps

Cette commande donne de bons résultats en terme de lacune finale pour des distances initiales très importantes (exemple une distance initiale de 5 mètres avec une orientation nulle).

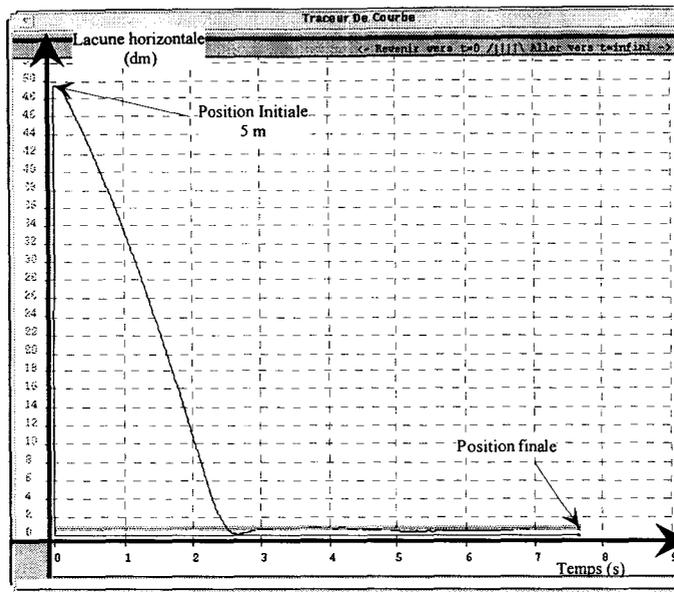


Figure III-49. Evolution de la distance latérale en fonction du temps

La deuxième valeur demeurant correcte est l'évolution de l'orientation de l'autobus. Cette grandeur est inférieure à 2 degrés en fin de guidage.

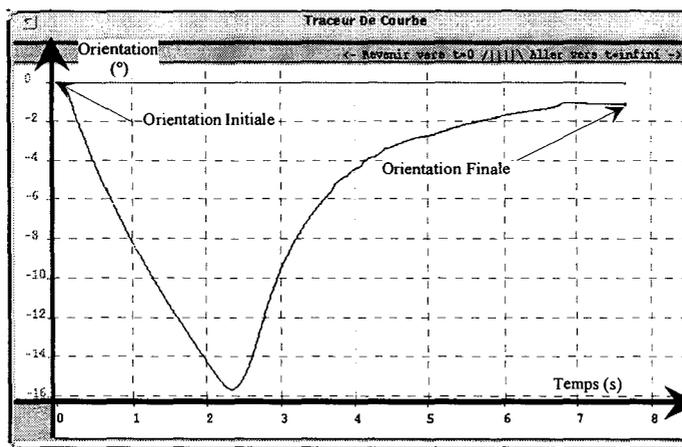


Figure III-50. Evolution de l'orientation de l'autobus par rapport au quai en fonction du temps

La dernière courbe représente l'évolution de la commande. Les valeurs obtenues pour cette commande sont très élevées.

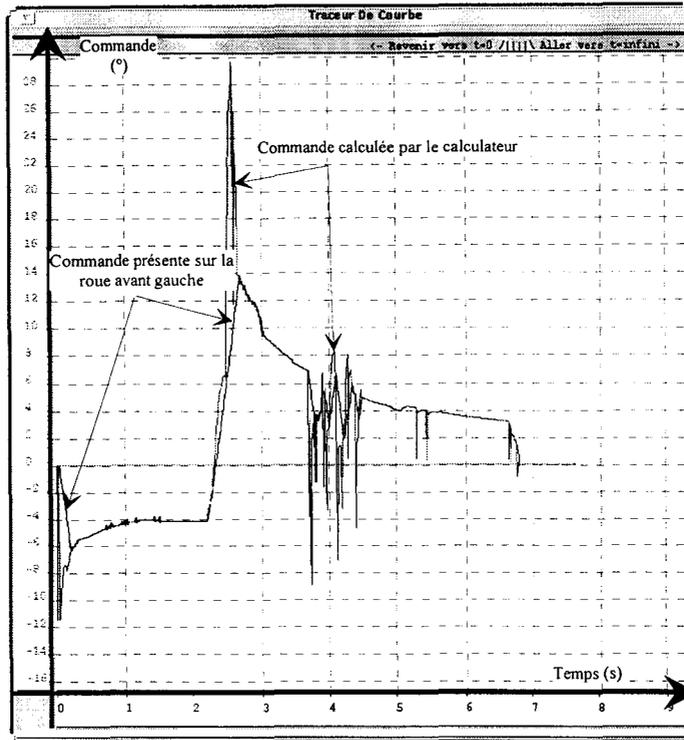


Figure III-51 . Evolution de la commande en fonction du temps

Pour pouvoir comparer nos résultats avec les autres types de commande, nous exposons les résultats obtenus par la commande floue pour une lacune horizontale initiale de 1,5 mètre, une orientation de 0 degré et une vitesse inférieure à 50 km/h.

La vitesse évolue de la façon suivante :

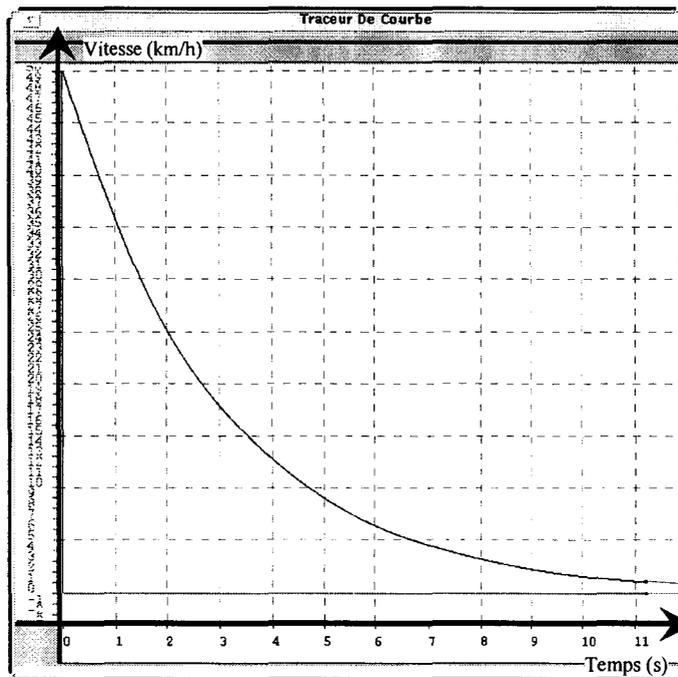


Figure III-52 . Evolution de la vitesse en fonction du temps

Cette forme de vitesse a été choisie car elle correspond à l'évolution relevée lors des essais réalisés à Grenoble. Cette variation dépend des chauffeurs et du contexte extérieur qui est directement en liaison avec le conducteur du véhicule.

Les informations permettant de juger de la réussite ou non d'un accostage sont l'orientation de l'autobus et la lacune présente à la porte avant de celui-ci. La première information est la variation de la lacune horizontale en fonction du temps.

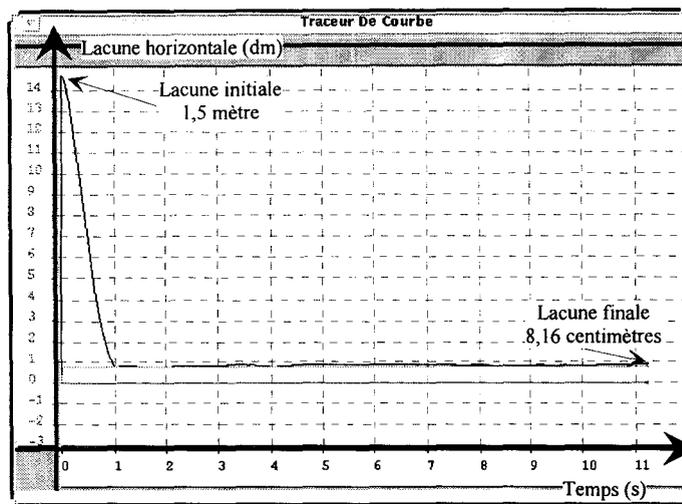


Figure III-53 . Evolution de la lacune horizontale en fonction du temps pour la commande floue à trois capteurs

La deuxième information est l'orientation de l'autobus. Elle permet de savoir si les personnes à mobilité réduite peuvent descendre du véhicule de transport.

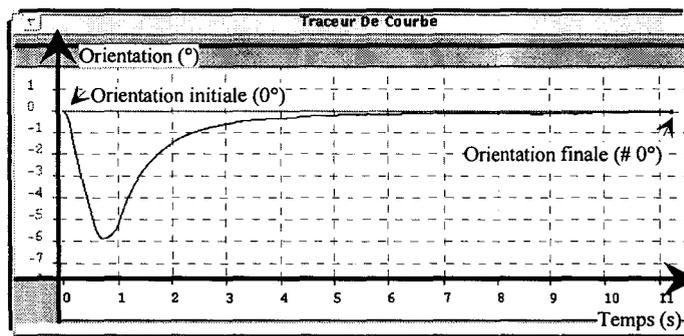


Figure III-54 . Evolution de l'orientation en fonction du temps pour la commande floue à trois capteurs

L'algorithme de commande calcule l'angle de braquage à appliquer sur la direction du véhicule pour obtenir la lacune finale désirée.

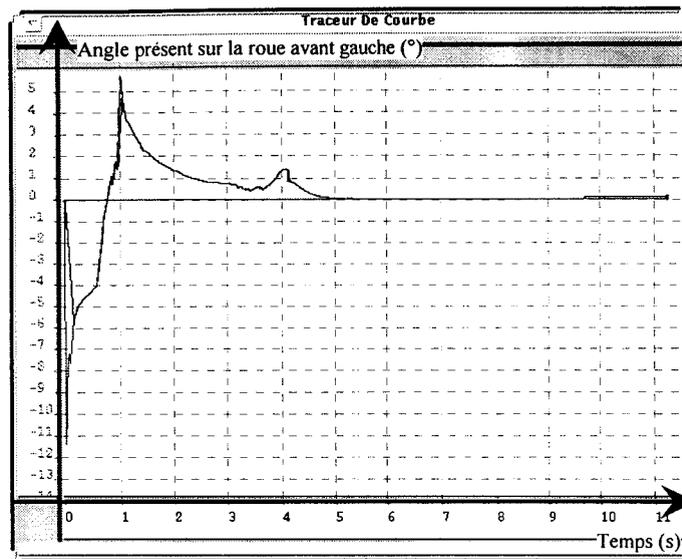


Figure III-55 . Evolution de l'angle de braquage de la roue avant gauche en fonction du temps pour la commande floue à trois capteurs

L'accostage est réussi dans les conditions maximales d'utilisation rencontrées pendant les études. Une lacune avant horizontale finale de 8,16 centimètres, une orientation de 0° qui implique une lacune à l'arrière du véhicule de 8,16 centimètres ont été obtenues. Donc, une personne à mobilité réduite peut monter dans le véhicule sans rencontrer une lacune horizontale importante. Une PMR à bord du véhicule peut sortir par la porte milieu ou la porte arrière, si l'autobus le permet : la lacune arrière respecte également les recommandations émises par le COLITRAH.

Pour obtenir ces performances, l'autobus doit être équipé de trois capteurs : un capteur type télémètre pour mesurer la lacune horizontale à l'avant de l'autobus, un capteur type télémètre pour mesurer la lacune horizontale à l'arrière de l'autobus (cette information permet de déduire l'orientation de l'autobus) et un capteur vitesse permettant de connaître la vitesse d'évolution du véhicule. Le but est ici de supprimer le capteur "télémètre" à l'arrière du véhicule ; d'où diminution du coût de la commande.

3.3.5 Réduction du nombre de capteurs nécessaires pour la réalisation de la commande floue pour le guidage d'un autobus

L'inconvénient majeur de la commande floue [DEB et al - 3.96] est l'utilisation de deux télémètres placés sur le coté droit de l'autobus pour déterminer la valeur de son orientation et en déduire la lacune *la* (figure III-29).

Ce deuxième télémètre augmente le coût de cette commande qui reste à l'heure actuelle un critère déterminant dans le choix [DEB, et al - 5.96].

Chiffrons maintenant la perte de précision en substituant le deuxième capteur par un algorithme de calcul permettant de déterminer la distance à l'arrière de l'autobus en exploitant l'information du capteur située à l'avant de l'autobus.

3.3.5.1 Algorithme de calcul

L'algorithme détermine la variation de l'orientation en fonction de la variation de la lacune horizontale à l'avant du véhicule mesurée par le capteur avant.

$$\text{En voici l'équation : } \Delta\theta_i = \frac{K}{2\pi R_{C_i}} \cdot 360,$$

avec :

$$K = v \cdot T,$$

v = vitesse longitudinale du véhicule en m/s,

T = période d'échantillonnage,

R_{C_i} = rayon de courbure à l'instant de mesure.

Il suffit de déterminer la valeur du rayon de courbure par l'intermédiaire d'un modèle cinématique ou dynamique. Dans notre cas, le modèle cinématique est utilisé, car il diminue le temps de calcul [DEB et al - 2.96]. Pour déterminer l'orientation initiale de l'autobus, la distance horizontale initiale L_{a0} a été relevée puis pendant une ou plusieurs périodes d'échantillonnage une valeur d'angle de braquage constante sur la direction (par exemple $\alpha_G = 0$) a été injectée et la lacune L_{a1} a été relevée. A partir de ces deux grandeurs l'orientation initiale de l'autobus θ_0 est déterminée par l'équation suivante :

$$\theta_0 = \arctan\left(\frac{L_{a0} - L_{a1}}{K}\right) \text{ avec } \alpha_G = 0.$$

L'algorithme mis au point permet la substitution du deuxième télémètre.

Pour déterminer l'orientation de l'autobus, à chaque instant d'échantillonnage, la valeur calculée pour la variation de l'orientation est ajoutée aux résultats obtenus précédemment.

L'orientation est donnée par l'équation suivante : $\theta = \theta_0 + \sum_{i=1}^n \Delta\theta_i$

Maintenant, comparons les résultats obtenus par la commande utilisant deux capteurs avec la commande utilisant trois capteurs.

3.3.5.2 Résultats

L'algorithme de commande floue mis au point pour la commande d'un autobus en phase d'accostage avec une vitesse évoluant entre 50 et 0 km/h, une lacune horizontale initiale de 1,5 mètre et une orientation nulle a été utilisé.

La première phase consiste à comparer l'évolution de l'orientation de l'autobus réel avec l'orientation déterminée par l'algorithme de calcul.

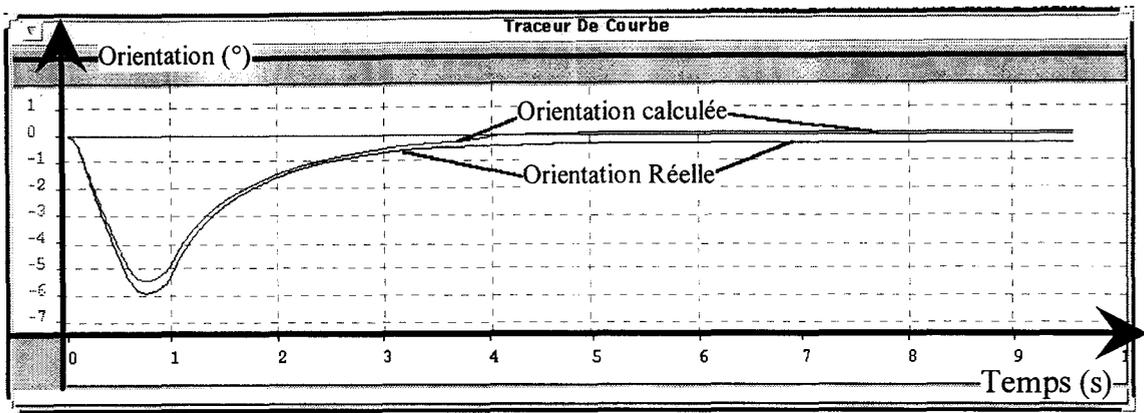


Figure III-56. Evolution de l'orientation en fonction du temps

L'erreur commise par l'algorithme de calcul entre l'orientation réelle et l'orientation estimée augmente en fonction du temps. Pour y remédier, un recalage toutes les n périodes d'échantillonnage est effectué. Pendant ce recalage, l'orientation de l'autobus est calculée de nouveau en utilisant l'algorithme déterminant l'orientation initiale de l'autobus. Cette erreur reste relativement faible ; de l'ordre de $0,3^\circ$ et ne provoque pas de baisse de performances.

La deuxième phase est la comparaison de l'évolution de la lacune horizontale dans le cas où deux capteurs sont utilisés. Le résultat le plus important est la lacune horizontale finale.

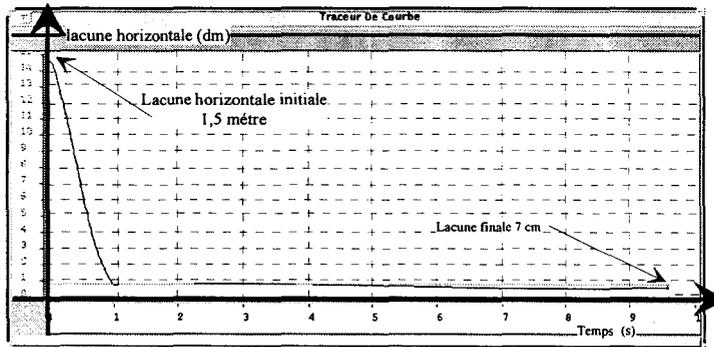


Figure III-57. Evolution de la lacune horizontale en fonction du temps pour la commande floue à deux capteurs

L'algorithme de commande par contrôleurs flous calcule l'évolution de la commande à appliquer à l'autobus pour obtenir une lacune finale de 8 centimètres et une orientation nulle.

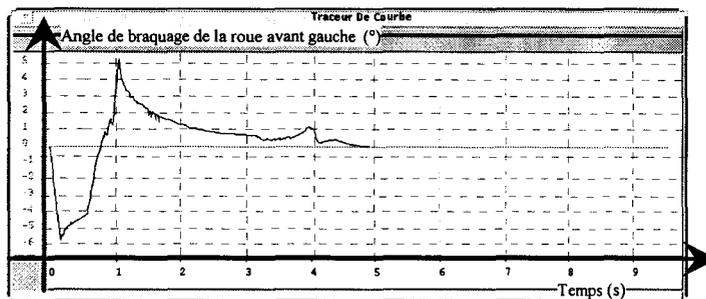


Figure III-58. Evolution de l'angle de braquage de la roue avant gauche en fonction du temps pour la commande floue à deux capteurs

Comparons maintenant ces résultats avec l'algorithme de commande floue utilisant trois capteurs pour déterminer l'angle de braquage à appliquer à la direction.

Examinons tout d'abord la variation de distance en fonction du temps.

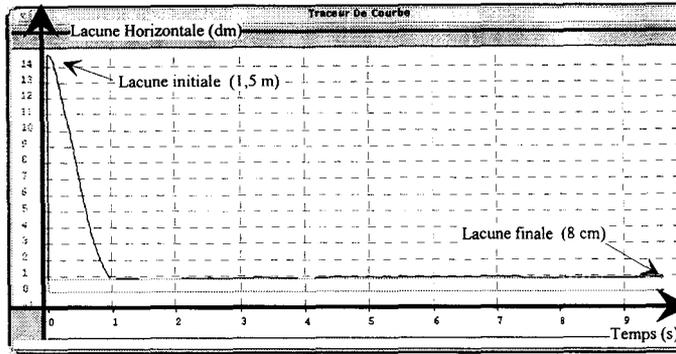


Figure III-59. Evolution de la lacune horizontale en fonction du temps pour la commande floue à trois capteurs

Sur les figures n° III-57 et n° III-59, les résultats finaux sur la lacune avant du véhicule restent satisfaisants. La lacune horizontale est égale à 7 centimètres dans la loi de commande utilisant deux capteurs, avec une orientation de l'autobus à l'arrivée proche de $-0,2$ degré. La lacune horizontale à la porte milieu de l'autobus est alors égale à 9 cm. Dans la commande floue utilisant trois capteurs, la lacune horizontale à la porte avant est égale à 8 centimètres avec une orientation de l'autobus égale à $-0,13$ degré. Avec ces valeurs finales, la lacune au milieu de l'autobus est égale à 9,3 centimètres.

Voyons maintenant l'évolution de l'angle présent sur la roue avant gauche de l'autobus en fonction du temps.

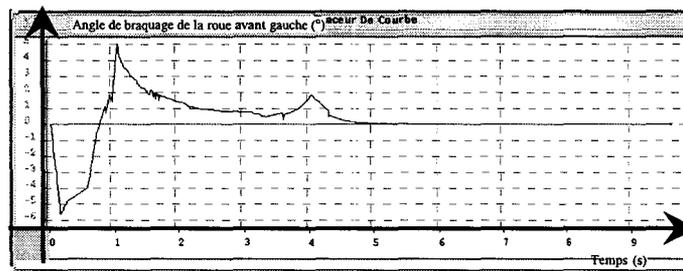


Figure III-60. Evolution de l'angle de braquage de la roue avant gauche en fonction du temps pour la commande floue à trois capteurs

Sur les figures III-58 et III-60, l'évolution des commandes est sensiblement la même : l'orientation estimée est proche de l'orientation calculée. Cette différence pourrait être réduite par l'introduction d'un recalage au niveau du calcul de l'orientation.

Le gain sur le nombre de capteurs utilisés ne provoque aucune baisse de précision du système. Les performances sont toujours conformes à notre cahier des charges.

3.4 SUIVI D'UNE TRAJECTOIRE "DE REFERENCE"

La commande en boucle fermée sert de base à l'évaluation de performance pour le suivi d'une trajectoire de référence sur la chaussée par une caméra. La caméra est simulée et la trajectoire est dessinée sur la chaussée (sur "l'écran"). La trajectoire est déterminée à partir des

essais réalisés en site réel sur le réseau de transports en commun de Grenoble. Une moyenne est effectuée sur tous ces essais ; nous avons obtenu une trajectoire moyenne. Cette fois-ci, la distance qui sépare le capteur de la ligne blanche tracée sur la chaussée représente l'entrée de l'algorithme de commande.

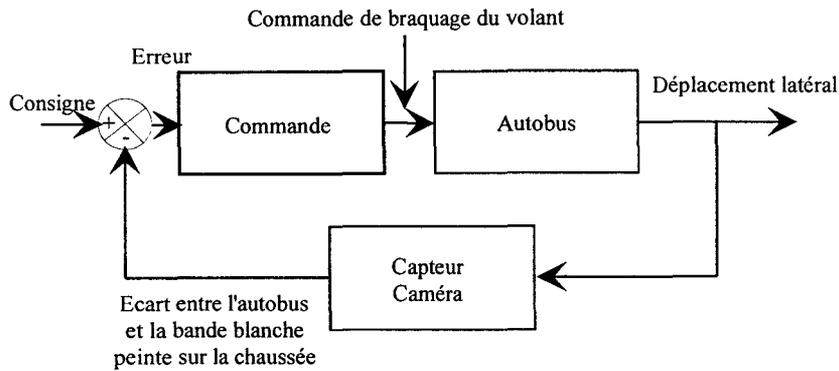


Figure III-61. Principe de commande pour le suivi de trajectoire

A partir des relevés, la courbe pour la trajectoire a été obtenue. Par exemple pour une distance longitudinale de 40 mètres avant le point d'arrêt, la trajectoire devra se situer à une distance latérale de 1 mètre.

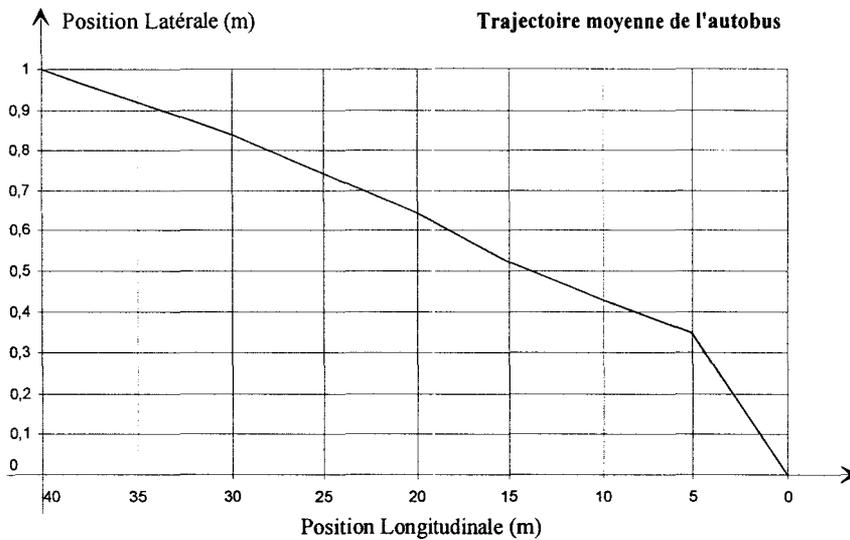


Figure III-62. Trajectoire moyenne

Cette trajectoire a été légèrement modifiée pour obtenir les consignes souhaitées par le cahier des charges : une lacune horizontale égale à 8 centimètres, une orientation finale de 0°, et un dépassement inexistant. Cette nouvelle trajectoire est représentée sur la figure III-63.

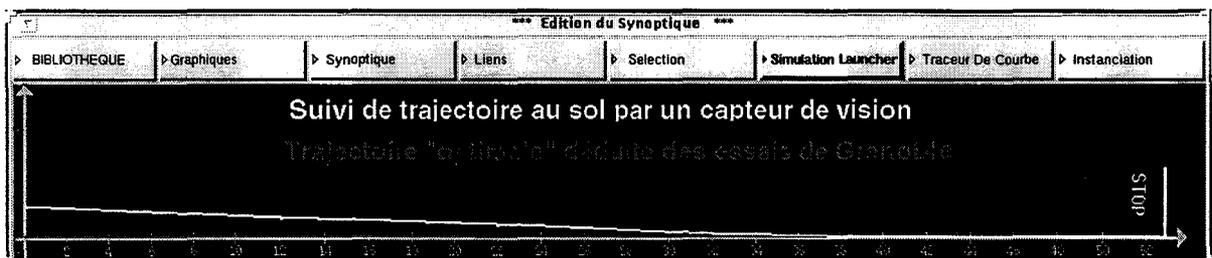


Figure III-63. Nouvelle trajectoire moyenne

Cette trajectoire commence à 50 mètres avant le point d'arrêt qui est visualisé sur la chaussée par une inscription "stop" ; arrêt conseillé au conducteur. A une distance de 40 mètres avant ce point, la distance horizontale (latérale) est de 1 mètre. A 30 mètres et à 20 mètres avant le point d'arrêt, la distance latérale est, respectivement, de 0,5 m et 0,1m. Cette distance horizontale devient nulle 15 mètres avant le point d'arrêt pour permettre à l'autobus de se positionner parallèlement au quai.

Pour savoir si la technique de suivi de trajectoire donne de bons résultats, la commande testée est celle qui donne des résultats les plus mauvais lors du guidage par télémètre : la commande PID avec un réglage des paramètres obtenus pour une vitesse de 5 km/h.

Exposons maintenant les résultats. La vitesse d'évolution reste celle rencontrée pendant les accostages réalisés lors des essais :

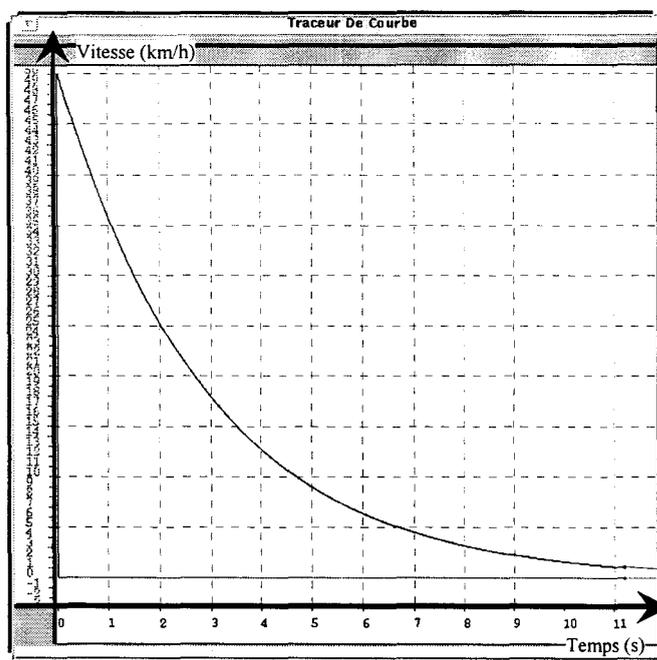


Figure III-64 . Evolution de la vitesse en fonction du temps

Pour effectuer le calcul de la commande, les relevés de distance recueillis par la caméra sont pris comme base.

L'information relevée par la caméra subira un traitement d'image pour extraire la donnée relative à la distance horizontale entre un point donné du véhicule et la bande blanche (ou une suite de réflecteurs sur la chaussée).

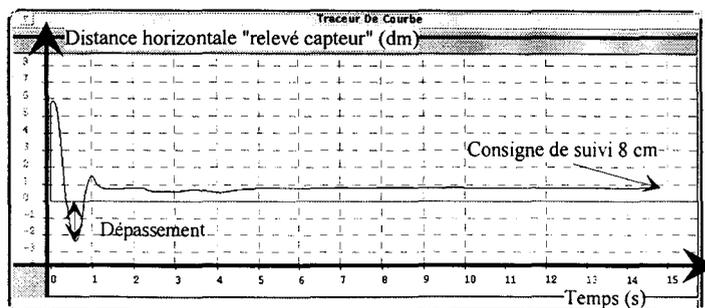


Figure III-65 . Evolution de la distance horizontale entre la bande blanche et un point de l'autobus en fonction du temps

Sur cette courbe, la consigne de suivi de trajectoire est atteinte. Voici maintenant l'influence de ce suivi sur l'évolution de la lacune horizontale à l'avant du véhicule.

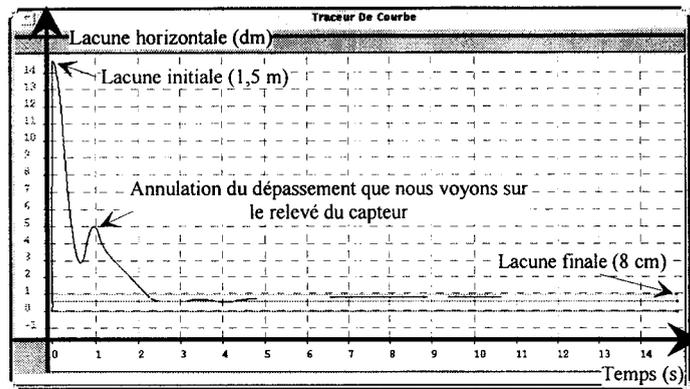


Figure III-66. Evolution de la lacune horizontale en fonction du temps

L'accostage est réussi car la lacune horizontale finale est égale à 8 centimètres. Elle a une légère augmentation à environ 1 seconde, ceci résulte de l'annulation du dépassement de la distance relevée par le capteur figure III-65. Maintenant, voyons si l'accostage est réussi en terme d'orientation de l'autobus.

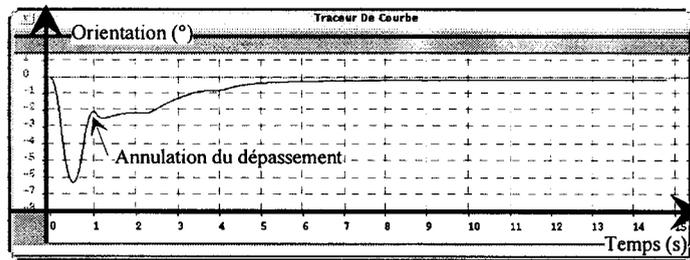


Figure III-67. Evolution de l'orientation en fonction du temps

Avec une orientation de départ nulle, l'orientation finale obtenue est proche de zéro ce qui entraîne une lacune horizontale à l'arrière du véhicule voisine de huit centimètres. L'algorithme de commande calcule l'angle de braquage à appliquer sur les roues du véhicule. L'évolution de l'angle braquage de la roue avant gauche est montrée ici. A partir de la relation entre l'angle de braquage de la roue avant droite et gauche, l'angle de braquage de la roue avant droite et l'angle de rotation à donner au volant peuvent être déduits.

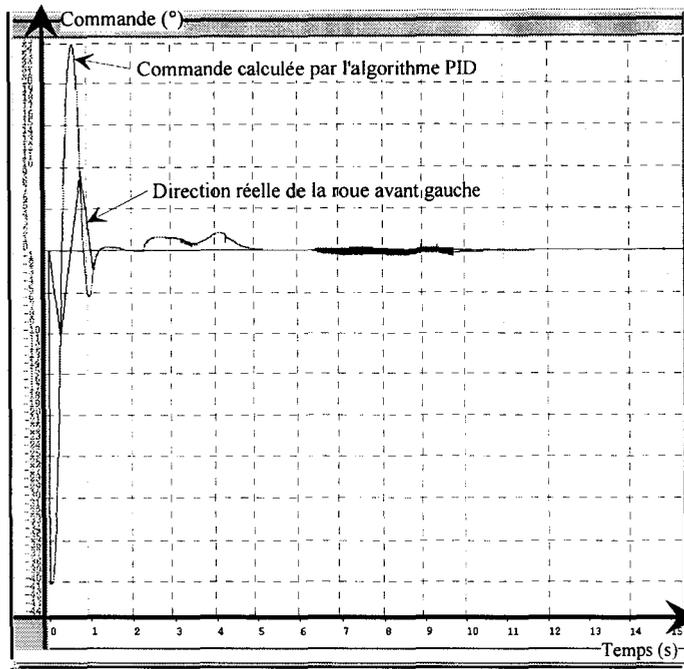


Figure III-68 . Evolution de l'angle de braquage de la roue avant gauche en fonction du temps

Le résultat est globalement meilleur que celui rencontré pour la commande PID avec un télémètre. Pour conclure sur l'efficacité du suivi de trajectoire par rapport au suivi de quai par télémètre, la commande par contrôleurs flous a été testée sur le suivi de trajectoire.

Les premières informations sont les relevés des capteurs situés à l'avant et à l'arrière du véhicule.

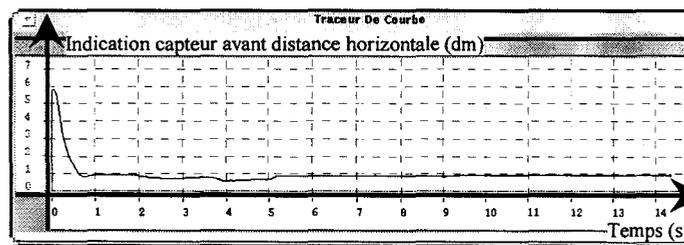


Figure III-69 . Evolution de la distance horizontale à l'avant du véhicule en fonction du temps

La distance horizontale à l'avant du véhicule est égale à 60 centimètres et la distance horizontale à l'arrière égale à 10 centimètres.

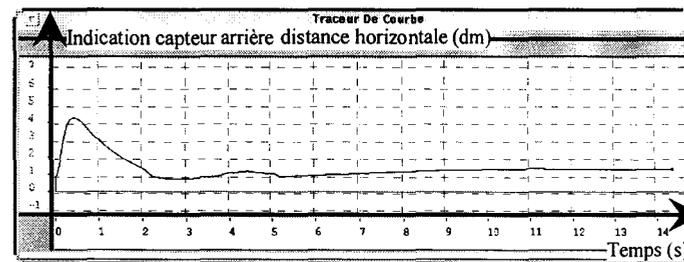


Figure III-70 . Evolution de l'indication du capteur situé à l'arrière du véhicule en fonction du temps

L'algorithme de commande par contrôleurs flous calcule l'orientation du bus par rapport à la trajectoire, la distance horizontale qui sépare l'avant du véhicule de la bande sur la chaussée, puis la commande à appliquer à l'autobus.

La réussite de l'accostage est jugée sur la variation de la lacune horizontale et sur l'évolution de l'orientation de l'autobus calculée par rapport au quai.

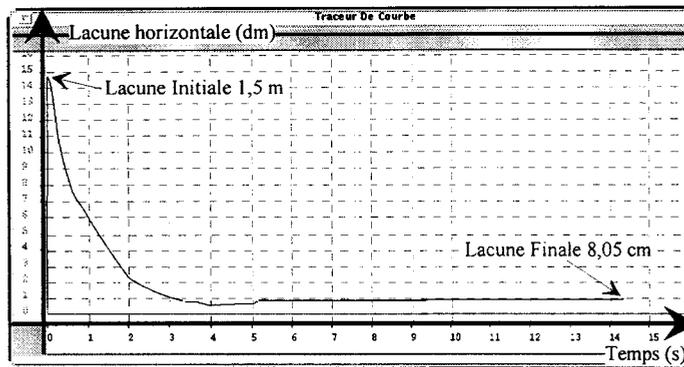


Figure III-71 . Evolution de la lacune horizontale en fonction du temps

Voyons maintenant l'évolution de l'orientation de l'autobus.

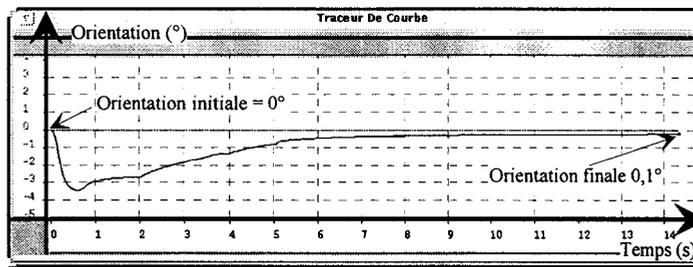


Figure III-72 . Evolution de l'orientation de l'autobus sur la chaussée en fonction du temps

L'algorithme a calculé l'angle de braquage à appliquer sur la roue avant gauche.

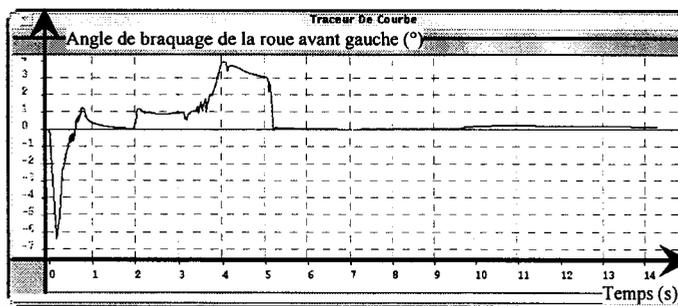


Figure III-73 . Evolution de l'angle de braquage de la roue avant gauche en fonction du temps

Les performances en terme de lacune et d'orientation restent sensiblement les mêmes par rapport aux résultats obtenus avec des télémètres. Le seul inconvénient est l'augmentation du temps de réponse de cette commande, ce temps est d'environ 1 seconde pour la commande avec télémètre et d'environ 3,5 secondes pour la commande floue avec suivi de trajectoire.

Cet inconvénient est compensé par le gain en confort. L'évolution de la commande en direction du véhicule est plus douce. Sur les courbes précédentes il peut être constaté que :

- pour la commande par télémètres, l'algorithme donne un coup de volant vers la droite suivi d'un coup de volant vers la gauche d'une ampleur sensiblement égale.
- sur la commande par suivi de trajectoire, le guidage commence par un braquage de la direction vers la droite suivi d'un retour vers zéro puis d'une façon plus douce, d'une nouvelle évolution de la direction vers la gauche.

Le suivi de trajectoire résout en partie le problème lié au stationnement irrégulier des automobilistes. En effet, la distance qui doit être dégagée pour permettre le guidage est plus faible (40 mètres minimum pour le guidage par télémètres contre 15 mètres pour le suivi de trajectoire).

Le type de quai utilisé est aussi, une donnée très importante. Il se résume aux arrêts en circulation pour le guidage par télémètres. Cependant pour le suivi de trajectoire ce système peut être appliqué à tous les types d'arrêts.

Le guidage améliore les performances obtenues avec les commandes de type PID et obtient les performances désirées.

Cette technique n'a pas que des avantages. Comme nous l'avons montré dans le chapitre 3 de la 1^{ère} partie, le coût de la vision embarquée est plus élevé. Il faut aussi prévoir un coût plus important pour l'installation sur l'environnement ainsi que pour l'entretien.

3.5 CONCLUSION

Dans notre application, le domaine est la commande latérale de véhicule. Ce chapitre présente l'application des méthodes de commande pour le contrôle en position de l'autobus par rapport au quai.

Les critères du choix au niveau de la commande sont multiples. La lacune finale doit être égale à 8 centimètres avec une erreur tolérable maximale de 2 centimètres. L'orientation finale de l'autobus est une donnée importante du problème car, à partir de cette information, la lacune horizontale arrière du véhicule est déterminée. Si cette lacune est du même ordre de grandeur que la lacune horizontale avant, alors les PMR pourront descendre du véhicule. Cette orientation sera comprise entre 0 et 0,2 degré pour une lacune finale de 10 centimètres et entre 0 et -0,2° pour une lacune horizontale de 6 centimètres.

Le dépassement de la lacune horizontale ne doit pas excéder 8 cm. S'il existe un dépassement supérieur à cette limite, le véhicule montera sur le trottoir.

Un critère a été ajouté : le temps nécessaire pour obtenir la lacune horizontale désirée.

Enfin le nombre de capteurs utilisés doit être minimum. Cela permet de diminuer le risque de pannes et le coût du système de guidage. La commande doit augmenter le confort de la conduite, élément non négligeable pour les clients.

Ces résultats sont exposés sous la forme d'un tableau comparatif :

Commande utilisée	Lacune finale	Orientation finale	Dépassement	Nombre de capteurs	Temps de réponse	Commande retenue
Paramètres du PID calculés pour la vitesse de 5 km/h	30 cm	4°	OUI	1	-	NON
Paramètres du PID calculés pour la vitesse de 50 km/h	8 cm	0°	OUI	1	-	NON
Retour d'état sans observateur	8 cm	0°	NON	3	7,5 s	OUI
Retour d'état avec observateur	18 cm	-2°	NON	1	-	NON
Adaptative avec paramètres déduits de la commande PID	7 cm	-1,5°	NON	2	10 s	OUI
Adaptative avec paramètres déduits de la commande par retour d'état sans observateur	8 cm	0°	NON	4	5,5 s	OUI
Adaptative avec paramètres déduits de la commande par retour d'état avec observateur	8 cm	0°	NON	2	5,8 s	OUI
Contrôleurs flous avec 2 télémètres	8,16 cm	0°	NON	3	5 s	OUI
Contrôleurs flous avec 1 télémètre	7 cm	0°	NON	2	4,5 s	OUI

Tableau III-2. Comparaison des commandes

Le nombre de capteurs est une donnée importante. Cependant, nous sommes limités à un budget qui ne doit pas dépasser le coût d'une palette escamotable à savoir 100 kF.

Pour les commandes utilisant l'information vitesse, celle-ci n'entraîne pas une augmentation du coût d'installation : tous les véhicules lourds (poids lourds et autobus) sont tenus par la loi d'avoir à leur bord un chrono-tachygraphe.

Toujours en relation avec le critère de coût des capteurs, la commande par retour d'état sans observateur avec 3 capteurs pour déterminer la lacune horizontale (télémètre), l'orientation de l'autobus (ψ) (gyromètre) et la dérive du véhicule (α) a été abandonnée.

La commande adaptative calculée à partir des paramètres du PID n'est pas retenue. Si la lacune horizontale obtenue à l'avant du véhicule est satisfaisante, il n'en est pas de même de la lacune horizontale à l'arrière qui est d'environ 38 centimètres. Donc, les PMR montées dans le véhicule ne pourront pas descendre de l'autobus.

La commande adaptative par retour d'état sans observateur n'est pas retenue pour la même raison que la commande par retour d'état sans observateur.

La commande par contrôleurs flous utilisant deux télémètres, donne de bons résultats en terme de lacune, d'orientation et de temps de réponse. Le prix de revient est légèrement augmenté, augmentation due à l'utilisation de deux télémètres. Mais il reste dans la fourchette fixée au début. Pour cette raison, une commande par contrôleurs flous utilisant un capteur a été mise au point. Ces performances ont légèrement diminué mais restent acceptables pour notre cahier des charges.

La commande adaptative par retour d'état avec observateur est très séduisante et donne de bons résultats.

Deux types de commande sont applicables à notre étude : le suivi de trajectoire et le guidage par télémètre. Les principaux avantages et inconvénients du suivi de trajectoire ont été exposés. L'avantage du guidage par télémètre est le faible coût des capteurs et des traitements de l'information. Par contre, l'obligation d'une bordure de trottoir accessible pendant toute la durée du guidage donc pendant 40 mètres demeure un inconvénient. Cette contrainte sera presque irréalisable en milieu urbain, étant donné le nombre important de voitures en stationnement irrégulier dans nos villes.

Notre choix se porte sur le suivi de trajectoire avec la commande par contrôleurs flous utilisant un ou deux capteurs. De l'information image deux grandeurs peuvent être déduite : la distance latérale et l'orientation. En supposant que l'axe de la caméra soit aligné par rapport à l'axe du véhicule, nous avons pour informations les relevés suivants :

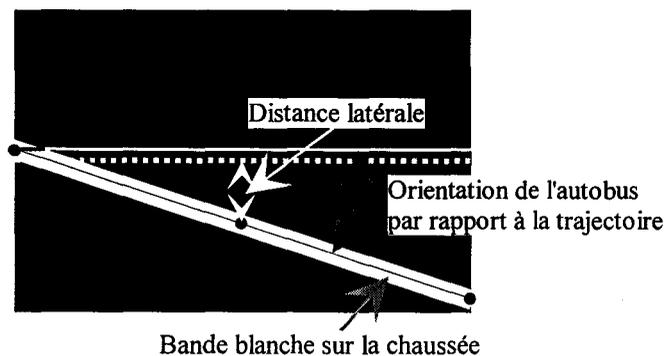


Figure III-74 . Information visuelle imagée de la caméra

Cette information supprime le deuxième capteur sur la commande floue. En sortie du traitement d'images, les informations peuvent être visualisées de la façon suivante :

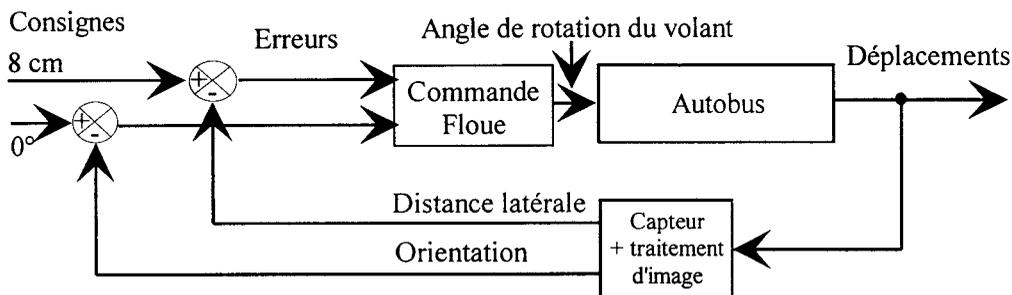


Figure III-75 . Commande pour suivi de trajectoire

Pourquoi ce type de commande ? Les essais sont réalisés avec une charge du véhicule égale à 19 tonnes. Un test sur la robustesse des commandes sur la variation de la charge a été réalisé. Les meilleurs résultats sont obtenus par la commande floue, par exemple sur une charge du véhicule égale au poids à vide du véhicule (11 tonnes).

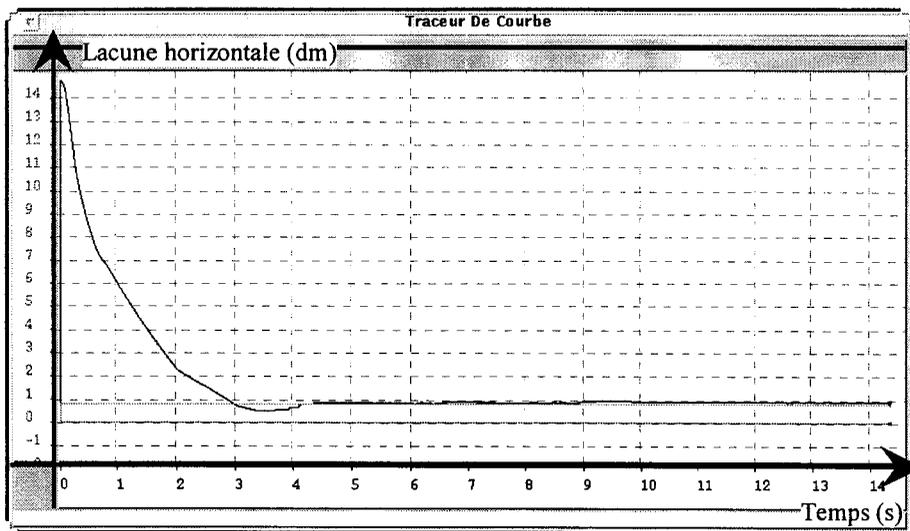


Figure III-76 . Evolution de la lacune horizontale en fonction temps

La lacune horizontale finale correspond à notre cahier des charges pour un véhicule circulant sans voyageur. D'autres tests ont été réalisés avec des charges comprises entre les limites de la charge (maximale et minimale). Pour savoir si l'accostage est totalement réussi, regardons la variation de l'orientation.

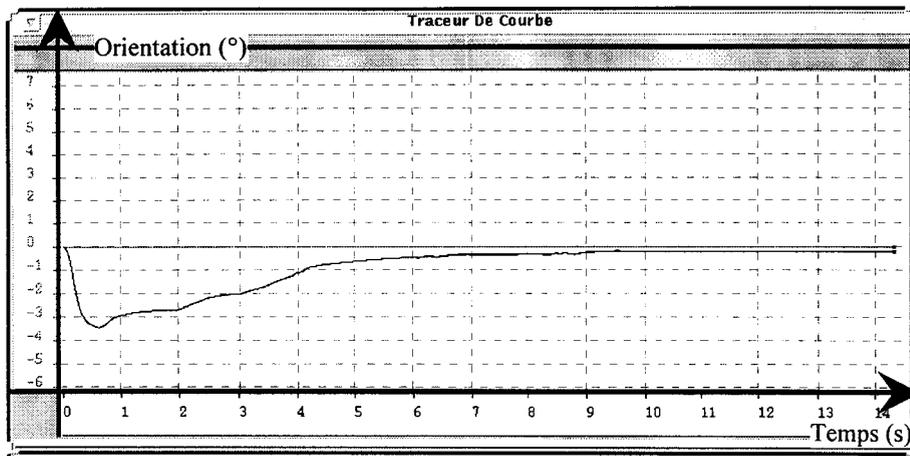


Figure III-77. Evolution de l'orientation de l'autobus en fonction temps

Notre objectif fixé est atteint. La lacune horizontale à l'avant et à l'arrière sont égales toutes deux à 8 centimètres. Les résultats de nos tests supplémentaires avec des charges comprises entre le poids à vide du véhicule et le poids total en charge sont très concluants.

Conclusion Générale et Perspectives

Au travers de ce mémoire, une solution pour rendre l'autobus accessible aux personnes à mobilité réduite a été présentée. La première partie intitulée "Accessibilité des transports" a posé le problème de la mobilité et de l'accessibilité dans les transports collectifs. La prise en compte des problèmes des personnes à mobilité réduite dès la conception d'un système de transport est une démarche plus répandue dans le domaine des transports guidés. Chercher à améliorer l'accessibilité de l'autobus (montée et descente du véhicule) implique des aménagements du véhicule (plancher surbaissé, capteurs), ainsi que de la station et de l'environnement immédiat, ce qui contribue en même temps à l'amélioration de l'image de marque de ce mode de transport.

Les diverses études présentées ont montré que l'autobus urbain se heurtait à deux problèmes dans le domaine de l'accessibilité : la marche, ou lacune verticale, ainsi que la lacune horizontale.

L'accessibilité des autobus pratiquée à ce jour ne peut se satisfaire du niveau de prestation fournie. Il est impératif de diminuer, voire supprimer, la marche située à l'entrée du véhicule et d'améliorer les lacunes horizontales à l'arrêt, grâce à un meilleur positionnement des autobus.

Ainsi, des expériences et des réalisations ont été menées pour améliorer l'accessibilité des transports urbains non-guidés. Les études ont tout d'abord porté sur la conception du matériel roulant, comme les dispositifs installés au niveau des portes qui facilitent l'accès au véhicule. Cependant, ces techniques montrent rapidement leurs limites en terme de coût et d'exploitabilité.

Les autobus à plancher surbaissé évitent la présence de marches à l'entrée du véhicule et offrent un accès de plain-pied. Cependant, ils ne règlent pas la totalité des problèmes concernant l'accessibilité.

Lors des échanges de voyageurs à la station, la marche ou lacune verticale entre le quai et le plancher du véhicule peut être faible grâce à la surélévation du quai et éventuellement au choix d'un système d'agenouillement du bus mais l'espace, ou lacune horizontale, existant entre la bordure du quai et le seuil du véhicule peut demeurer important.

Les études sur les aménagements des points d'arrêt réalisées à ce jour ne répondent pas de manière satisfaisante au problème posé. En effet, l'objectif est de minimiser la lacune horizontale en amenant l'autobus le plus près possible du quai de la station. La réponse au problème de meilleur positionnement passe par la définition d'une nouvelle fonction appelée "aide à l'accostage". L'objectif de cette fonction est la réalisation d'un accostage optimal avec une précision de quelques centimètres.

L'état de l'art pratiqué sur les systèmes d'aide à l'accostage existants, sur les capteurs et systèmes disponibles, a montré que la solution idéale n'existait pas.

Notre contribution s'inscrit dans le cadre de l'automatisation de la conduite de véhicules routiers non guidés. Le but est de réaliser un système semi-automatique de conduite d'autobus permettant un guidage immatériel et un accostage quai/bus de manière à positionner le véhicule parallèlement au quai à une distance inférieure à 8 cm.

Le travail présenté dans cette thèse est une première étape indispensable pour arriver à cet objectif. L'étude a commencé par la réalisation d'un état de l'art des différents systèmes de guidage existants (mécaniques ou électroniques), suivie d'une étude sur les différents capteurs afin de choisir ceux qui conviennent le mieux à notre application. Notre étude se plaçant dans un objectif de commande du véhicule, elle s'est attachée à élaborer le modèle mathématique du processus à piloter. Ce modèle appelé MOCA s'appuie sur des considérations cinématiques et dynamiques du véhicule. Il a été validé sur plate-forme de simulation sur la base d'expérimentations menées sur un véhicule réel.

Ainsi, notre travail embrayé sur l'étude des différents types de commandes pour le guidage de véhicules lourds, dans le souci de choisir la commande adéquate. Les premiers résultats concluent que la commande basée sur les contrôleurs flous, qui mime le comportement du conducteur d'un autobus, est la plus adaptée à notre application. En effet, elle répond au cahier des charges et convient mieux au confort de la conduite, en raison de l'absence de changements brusques d'orientation du véhicule. Ainsi, une conduite douce est recommandée pour le confort des passagers.

Parmi les perspectives données, il est souhaitable d'aborder le problème de changement de mode, c'est-à-dire le passage du mode manuel au mode automatique et inversement. Il faut aussi étudier l'asservissement en direction du véhicule car c'est l'élément de base de l'automatisation du poste de conduite d'un véhicule. En outre, une étude de l'adaptation des conducteurs d'autobus au système de conduite semi-automatique doit être envisagée. L'étude de la sécurité de ces véhicules dans un environnement réel ne devra pas être oubliée.

La réalisation d'un tel système pourrait être transférable à l'accostage des poids lourds aux quais de chargement, au stationnement des voitures sur un parking et à la réalisation des créneaux.

Dans l'état actuel de notre étude, il est difficile d'évaluer la part du coût de ce système dans le coût global d'un autobus équipé. Néanmoins, les premières estimations laissent à prévoir un coût inférieur à 1/10^e du prix d'un autobus. La valeur ajoutée en terme de qualité de service pour les clients justifie très certainement ce surcoût.

Bibliographie

PREMIERE PARTIE : ACCESSIBILITE DES TRANSPORTS

- [ARE - 95] N. Arensonas, "Une offre de matériels mieux adaptés pour circuler dans la ville". Le courrier des maires, pp 26-27, 19 mai 1995.
- [BAL - 95] J.N. Balog et al, "Rendre les infrastructures de transport accessibles aux personnes à mobilité réduite, c'est plus facile qu'on pense". Actes du 7^{ème} congrès sur la mobilité et sur le transport des personnes âgées et à mobilité réduite, pp 211 à 222, Reading GB, 16 au 19 juillet 1995.
- [BAT - 92] Battelle, "Status of low-floor transit bus development". US Department of Transportation, FTA-OH-06-0060-92-1, Mai 1992.
- [BRI - 95] C. Briaux-Trouverie, "Pour des autobus accessibles à tous, mais aussi pour qu'ils s'arrêtent à des arrêts accessibles et confortables pour tous". Actes du 7^{ème} congrès sur la mobilité et sur le transport des personnes âgées et à mobilité réduite, pp 144 à 151, Reading GB, 16 au 19 juillet 1995.
- [CAR - 70] K.H.F. Cardew, "The automatic steering of vehicles-an experimental system to a DS 19 Citroën car", Road Research Laboratory, GB, RLL Report RL 340, 1970.

- [CLE - 83] G.T. Clemence et G.W. Hurlbut, "The application of acoustic ranging to the automatic control of a ground vehicle", IEEE, VT 32, n°3, Charles Stark Draper Lab. Inc., Cambridge, MA, août 1983.
- [COL - 1.93] Conseil national des transports Comité de Liaison pour le TRANsport des personnes Handicapées (COLITRAH), "Argumentaire concernant les dispositions à prendre en compte pour l'aménagement des points d'arrêt d'autobus". mars 1993
- [COL - 2.93] Conseil national des transports Comité de Liaison pour le TRANsport des personnes Handicapées (COLITRAH), "Transport des personnes handicapées, législation et réglementation". Edition 2, septembre 1993.
- [COL - 3.93] Conseil national des transports Comité de Liaison pour le TRANsport des personnes Handicapées (COLITRAH), "Recommandations pour l'accessibilité à tous les points d'arrêt d'autobus". 14 décembre 1993.
- [COS - 94] Groupe de travail véhicule COST 322, "Rapport final des questionnaires des autobus à plancher bas", UITP, mars 1994.
- [COS - 95] COST 322, "Low floor buses", interim report, mars 1995.
- [DAV - 84] Y. David, "Guidage mécanique et électronique des autobus : le projet allemand SPURBUS". Recherche Transports Sécurité. mars 1984.
- [DEB - 93] : P. Debay, "Guidage automatique des autobus en station pour les rendre accessibles aux personnes à mobilité réduite", Rapport DEA sur convention INRETS-USTL, juin 1993.
- [DEJ - 88] M. Dejeammes, J.L. Flores et V. Blanchet, "Capacités fonctionnelles motrices d'une population : répercussions sur l'accessibilité des transports collectifs". Rapport INRETS N°81, novembre 1988.
- [DEJ - 90] M. Dejeammes, "Aperçu de l'évolution de l'accessibilité des autobus en Europe". Recherche Transports Sécurité, N°25, pp 55 à 58, mars 1990.
- [DEJ - 92] M. Dejeammes, "L'autobus urbain : évaluation des solutions d'accessibilité aux personnes à mobilité réduite". Rapport INRETS N°150, février 1992.
- [DEJ - 1.93] M. Dejeammes et J. Carvalhais, "Concept d'accessibilité autobus/infrastructure urbaine : évaluation de l'expérience de Caen". Rapport INRETS/LESCO 9303, mars 1993.

-
- [DEJ - 2.93] M. Dejeammes, C. Dolivet, R. Trauchessec et J. Scandella, "Guidage des autobus en station - Etude des arrêts", Rapport INRETS-LESCO 93-12, octobre 1993
- [DEJ - 3.93] M. Dejeammes, G. Pachiaudi, A. Dangleterre, et Y. Blanchet, "Etude ergonomique du système SK 6000", Rapport INRETS-LESCO 93-14, octobre 1993.
- [DEJ - 95] M. Dejeammes et C. Dolivet, "Les systèmes de transport public urbain en France". Actes du 7^{ème} congrès sur la mobilité et sur le transport des personnes âgées et à mobilité réduite, pp 161 à 170, Reading GB, 16 au 19 juillet 1995.
- [DEJ - 96] M. Dejeammes, "Les transports et les personnes à mobilité réduite". Actes INRETS de la journée spécialisée du 14 mars 1996 n°49, mai 1996.
- [DEL - 89] P. Delesalle, "Le contrôle avancé". Revue AFCET / INTERFACES, N°77, mars 1989
- [DEP - 90] J.P. Deparis, "Réalisation d'un prototype de protection de chantier de peinture, Route et informatique", Colloque, Paris, 13 au 15 mars 1990.
- [DOL - 95] C. Dolivet, R. Zac et J. Lardière, "Evaluation des palettes permettant l'accessibilité des futurs autobus à plancher surbaissé du réseau de Grenoble". Rapport LBSU, diffusion restreinte, 9501, janvier 1995.
- [ELA - 92] M. Elarbi-Boudihiris, "Guidage de robots mobiles par vision assistée par ordinateur", Thèse de l'INP de Lorraine, octobre 1992.
- [ESS - 95] Essener Verkehrs-AG, "Spurbus Essen". Publication SNV-Studiengesellschaft Verkehr mbH, Hamburg, 1995.
- [FRE - 92] H. Frey et P. Vuillat, "L'accessibilité de plain-pied aux autobus : un outil d'aménagement urbain et un support de développement des réseaux". 20th PTRC meeting, seminar F. pp 37-56, septembre 1992.
- [FRO - 89] H.Frohn et W.V. Seelen, "Visocar : An autonomous industrial transport vehicle guided by visual navigation", IEEE International Conference On Robotics and Automation, Vol 2, pp 1155-1159, mai 1989.
- [GAR - 60] K. Gardels, "Automatic car control for electronic highways, General Motors Corporations", Warren, MI, Rep. GMR-276, juin 1960.
-

-
- [GRO - 94] H. Grossmann et T. Krämer, "Bordsteinausbildung an Haltestellen für Niederflurbusse. Verkehr und Technik", Heft 9, pp 405 à 408, 1994.
- [GRRT - 92] GRRT-INRETS, "Nouvelles technologies et perspectives des transports collectifs pour villes moyennes". Actes INRETS N°32, journée d'étude GRRT-INRETS, Villeneuve d'Ascq, 12 juin 1992, novembre 1992.
- [HAR - 95] L.J. Harman et R.H. Thatcher "Options en matière de transports accessibles aux PMR : l'approche adoptée par les Etats Unis", Actes du 7^{ème} congrès sur la mobilité et sur le transport des personnes âgées et à mobilité réduite, pp 228 à 237, Reading GB, 16 au 19 juillet 1995.
- [HAY - 93] S. Hayat et G. Uster, "Guidage des autobus en station. Etude bibliographique". Rapport INRETS/CRESTA 93-125, octobre 1993.
- [HER - 89] M. Hermelin et D. Velche, "Considérations sur la signalétique à partir des difficultés rencontrées par certains usagers". Actes INRETS N°20, septembre 1989.
- [ITO - 73] T. Ito et al, "An automatic driving system of automobiles by guidance cables", Int Automotive Eng. Congress, Detroit, MI, SAE Paper n°730 127, 8 au 12 janvier 1973.
- [JOH - 79] A.R. Johnston, T. Assefi et J.Y. Lai, "Automated guidance using discrete reference markers", IEEE, VT 28, n°1, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, février 1979.
- [KAR - 93] M. Karl et R. Viennet, "Le transport public tient salon". Transport public, pp 20 à 27, septembre 1993.
- [KLI - 91] M. Klingler et G. Uster "Les réseaux de transport en commun australiens". Rapport INRETS/CRESTA 91-112, novembre 1991.
- [LAI - 93] C. Lailier, "Guidage par vision artificielle d'un véhicule autonome sur route matérialisée par la signalisation horizontale", Thèse de Doctorat, Centre d'Automatique de Lille, 11 Juin 1993.
- [LAM - 94] C. Lamure, "Compte rendu de mission Brasilia", Curitiba du 3 au 9 décembre 1993, note interne INRETS, janvier 1994.
- [LAM - 84] D. Lamy, "Guidage de véhicules de transports terrestres par essieu asservi", rapport sur convention MIR-IRT et IRT-AFME, INRETS CRESTA, juillet 1984.
-

-
- [LOH - 93] LOHR Industrie, "Guidage TRANSLOHR". Note 93/317/APC/MW, 1993.
- [MAR - 91] A. Marcon, "Curitiba, la révolution écologique". Plaquette réalisée à l'occasion du Forum des villes à Curitiba, 1991.
- [MAY - 82] R.J. Mayhan et R.A. Bishel, "A two frequency radar vehicles lateral control", IEEE, VT 31, n°1, Ohio State University, Colombus, OH, février 1982.
- [MIN - 85] P. Minaire, J.L. Flores, J. Cherpain et D. Weber, "Epidémiologie du handicap : étude fonctionnelle d'une population". Rapport INRETS N°11, 1985.
- [MIT - 95] C.G.B. Michell, "Définitions de l'accessibilité". Actes du 7^{ème} congrès sur la mobilité et sur le transport des personnes âgées et à mobilité réduite, pp 17 au 21, Reading GB, 16 au 19 juillet 1995.
- [MTM - 93] Documentation commerciale de la société MTM, p 13, 1993.
- [OKA - 93] Y. Okawa, "Vehicle guidance by digital picture processing and successive state estimation", Fac. of Eng., Gifu University, Gifu, Japan, 1993.
- [OLS - 77] K.W. Olson, "Wire reference configurations in vehicle lateral control", IEEE VT 26, n°2, Ohio State University, Colombus, OH, mai 1977.
- [OXL - 85] P.R. Oxley et M. Benwell, "An experimental study of the use of buses by ederly and disabled people", Rapport TRRL N°33, 1985.
- [OXL - 1.95] P.R. Oxley, P. Barham et T. Show, "Design guidelines for public transport infrastructure", 7th international conference on mobility and transport for ederly and disabled people. Reading, UK, 16 au 19 juillet 1995.
- [OXL - 2.95] P.R. Oxley, "Discours d'ouverture du 7^{ème} congrès sur la mobilité et sur le transport des personnes âgées et à mobilité réduite", Reading GB, 16 au 19 juillet 1995.
- [OXL - 3.95] P.R. Oxley et C. Gallon, "Les personnes à mobilité réduite et les transports". Actes du 7^{ème} congrès sur la mobilité et sur le transport des personnes âgées et à mobilité réduite, pp 71 à 80, Reading GB, 16 au 19 juillet 1995.
- [PWRI - 95] Public Works Reasearch Institute, "The guideway-bus system, plaquette de présentation", Ministry of Construction, Japon, 1995.
-

-
- [REN - 95] Renault Véhicules Industriels, "AGORA. Plaquette commerciale", mai 1995.
- [ROB - 94] Nouveau Petit Robert "dictionnaire de la langue française", 1994.
- [SAL - 90] M. Salavessa, M. Dejeammes et G. Pachiaudi, "Evaluation du confort et de l'accessibilité de l'autobus R312 : enquête auprès des usagers de l'agglomération lyonnaise", Rapport INRETS-LESCO 9008, septembre 1990.
- [SCH - 95] J.J. Schuster et M.M. Hood, "Améliorations de l'accès au transport résultant de la loi sur les américains à mobilité réduite". Actes du 7^{ème} congrès sur la mobilité et sur le transport des personnes âgées et à mobilité réduite", pp 296 à 299, Reading GB, 16 au 19 juillet 1995.
- [SER - 94] SERIC, "Les véhicules industriels au Japon", Etude pour le compte du PREDIT, 1994.
- [SMI - 95] T. Smith, "Accessibilité et transports : perspectives commerciales et occasions d'affaires". Actes du 7^{ème} congrès sur la mobilité et sur le transport des personnes âgées et à mobilité réduite, pp 39 à 47, Reading GB, 16 au 19 juillet 1995.
- [STE - 89] P. Stevoux, J.F. Hugues et M. Smolar, "Déplacement des personnes aveugles et mal voyantes. Utilisation des transports en commun". Actes INRETS N°20, septembre 1989.
- [STI - 95] P. Stich, "Autobus surbaissés : l'explosion". Transport Magazine, pp 82 à 91, juin 1995.
- [STU - 93] STUVA et Vestische Strassenbahnen GmbH, "Niederflur - bussystem Abstandshilfen." BMFV 70 387/92, novembre 1993.
- [TAK - 87] H. Takero et al., "An automatic guidance system of a self-controlled vehicle", IEEE, 1987.
- [TRA - 94] Transport public, "Bus à plancher bas : plus qu'un véhicule, un système à part entière". Revue Transport public, dossier pp 24 à 35, février 1994.
- [TSU - 81] T. Tsumura, N. Fujiwara et T. Shirakawa, "An experimental system for automatic guidance of ground vehicle following the commanded guidance route on map", Proceeding of the 8th Triennial World Congress of IFAC, Kyoto, Japan, XVII pp 119-124, 24-28 Août 1981.
-

- [TSU - 95] T. Tsumura, "Automatic vehicle guidance by laser", 32nd IEEE, VT conf., Coll. Of Eng., University of Osaka, Osaka, Japan, 1995.
- [UTI - 93] The Urban Transport Industries, "Guided bus". Dossier de trois articles, The Urban Transport Industries report, pp 56 à 61, 1993.
- [VIE - 95] R. Viennet, "Marché des autobus en France : vers une concurrence accentuée". Transport public, pp 48 à 54, novembre 1995.

Bibliographie

DEUXIEME PARTIE : LE GUIDAGE SEMI-AUTOMATIQUE DES AUTOBUS EN ZONE D'ACCOSTAGE

- [ACK - 90] J. Ackermann, "Robust control for automatic steering", Proceeding of the 29th conference on decision and control, Honolulu, Hawaï, décembre 1993.
- [ACK - 93] J. Ackermann, "Robust yaw damping of car with front a rear wheel steering", IEEE transaction on control systems technology Vol N°1, mars 1993.
- [ACK - 94] J. Ackermann, "Robust decoupling steering dynamics and Yaw stabilization of 4WS cars", Automatica, vol 30, N°11, pp. 1761-1768, 1994.
- [AND, LJU - 83] P. Andersson, L. Ljung, "A test case for adaptive control : Car steering", Departement of Electrical Engineering, Linköping University, 1983.
- [BOU - 93] B. Bouchon-Meunier, "*La logique floue, Que sais-je ?*" N°2702, Presses Universitaires de France, 1993.
- [BOR et al - 93] P. Borne, G. Dauphin-Tanguy, J.P. Richard, F. Rotella, I. Zambettakis, "Analyse et régulation des processus industriels Tome 1 Régulation Continue", Collection Automatique Edition technip 27 rue Ginoux 75737 Paris Cedex 15, 1993.
- [CES, THE - 67] J. Cessac, G. Théherne, "Physique", Edition Fernand Nathan, 18, rue Monsieur-le-Prince, Paris-VI, 1967.

-
- [COR, FEN - 80] W.H. Cormier et Robert E. Fenton, "On the steering of automated vehicles - A velocity-adaptive controller", IEEE, Transactions on vehicular technology, VT 29, n°4, novembre 1980.
- [DAR - 81] W. Darenberg, F. Panik, W. Weidemmann, "Automated guidance system for buses and trucks", Proceedings of the 1st Int. Conf. On AGVS, Stratford Upon Avon, Daimler-benz AG, Stuttgart, RFA, 1981.
- [DEB et al - 1.94] P. Debay, M. Edel, S. Hayat, "Etude bibliographique sur les modèles existants de véhicules routiers commandés en direction", Rapport mi-parcours sur convention INRETS-USTL N°93.128, juin 1994.
- [DEB - 2.94] P. Debay, "Guidage automatique des autobus en station pour faciliter l'accessibilité aux personnes à mobilité réduite", Communication à la rencontre annuelle de tous les doctorants dans le domaine des transports, organisée par l'AFIT Paris, 24 octobre 1994.
- [DEB et al - 1. 95] P. Debay, S. Hayat, M. Edel, "Immaterial lateral guidance of a bus in boarding phase : modelling and simulation", Publication à la XII International conference on systems science, p 359-366, Wroclaw Pologne, 12-15 septembre 1995.
- [DEB et al - 2.95] P. Debay, S. Hayat, M. Edel, "Modèles dynamique et géométrique pour la réalisation du guidage automatique des autobus en station", Rapport sur convention N°93.128 INRETS-USTL, Rapport INRETS N°95.052, juin 1995.
- [DEB et al - 3.95] P. Debay, S. Hayat, M. Edel, "Guidage automatique des autobus en station", Rapport sur convention GRRT N°95-69, octobre 1995.
- [DEB et al - 4.95] P. Debay, S. Hayat, M. Edel, "Modélisation transversale pour la réalisation de la commande automatique d'un autobus à l'approche d'un quai", Communication au Club EEA-Gdr Automatique et TdSI du CNRS-MENESRIP, Nancy France, 5-7 octobre 1995.
- [DEB et al - 1.96] P. Debay, S. Hayat, M. Edel, "Control for the immaterial lateral guidance of a bus in boarding", International Conference "ICSE'96" Eleventh International Conference on Systems Engineering, 9-11 juillet 1996.
- [DEB et al - 2.96] P. Debay, S. Hayat, M. Edel, "A Bus dynamic modelling and simulation of the guidance near the bus stations". International Conference IEEE-SMC - IMACS "CESA'96", LILLE, France, 9-12 juillet 1996.
-

-
- [DEB et al - 3.96] P. Debay, V. Eude, S. Hayat, M. Edel, "Fuzzy control for the future automatic guidance near the bus station". "FUZZ-IEEE'96" International Conference IEEE on Fuzzy Systems, New Orleans Louisiana, 8-11 septembre 1996.
- [DEB et al - 4.96] P. Debay, S. Hayat, M. Edel, "PID, Adaptive and fuzzy controls for the immaterial lateral guidance of a bus in boarding phase". International Conference IEEE SMC "SMC'96" on Systems, Man and Cybernetics, BEIJING, Chine, 14-17 octobre 1996.
- [DEB et al - 5.96] P. Debay, V. Eude, S. Hayat, M. Edel, "Reduction of the number of necessary sensors for the fuzzy control realisation for the automatic bus guidance". "EUFIT'96" International Conference on Intelligent Techniques and Self Computing, Aachen, Allemagne, 2-5 septembre 1996.
- [DEJ et al - 93] M. Dejeammes, C. Dolivet, R. Trauchessec, J. Scandella, "Guidage des autobus en station. Etude des arrêts", Rapport Inrets-Lesco n°93.012, octobre 1993.
- [DEM - 94] B. Demaya, "Commande floue de systèmes à dynamiques complexes, Application à la commande d'un moteur thermique", Thèse présentée au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS, Toulouse, Soutenue le 17 octobre 1994.
- [DUB - 92] D. Dubois, "Raisonnement approximatif", Présentation Greco Automatique, Paris, Mars 1992.
- [DUG, LAN - 88] L. Dugard, I.D. Landau, "Commande adaptative, Méthologie et Applications" Edition Hermès, 51, rue Rennequin - 75017 Paris, 1988.
- [EUD, HAY - 95] V. Eude, S. Hayat, "Faisabilité d'une commande floue pour le guidage automatique des autobus en station" Rapport INRETS N°95.062, septembre 1995.
- [FEN - 76] R.E. Fenton, and al., "On the steering of automated vehicles : theory and experiments", IEEE, AC 21, n°3, Ohio State University Columbus, OH, juin 1976.
- [GIL - 92] T.D. Gillespie, "Fundamentals of Vehicle Dynamics", Published by : Society of Automotive Engineers (SAE) , 1992.
- [HAR - 94] H. Harada "Stability criteria and Evaluation of steering maneuver in driver vehicle system", JSME International journal, Series C, Vol.37, N°1, 1994.
- [HEU - 90] J.C. Heudin, "L'intelligence artificielle appliquée au contrôle de procédés complexes", Automation 90 CETIM Paris, mai 1990.
-

-
- [JEA - 01] C. Jeantaud, "Automobiles électriques", :Paris : Vve Ch. Dunod, éditeur, 49, Quai des Grands-Augustins, 1901.
- [JUL - 63] M. Julien, "Cinématique, dynamique et stabilité de la direction en régime permanent", Rapport ingénieurs de l'automobile SIA 37 année, Tome XXXVI, N°7, juillet 1963.
- [KAG, NAG - 95] I. Kageyama, R. Nagai, "Stabilization of passenger car-caravan combination using four wheel steering control", Vehicle System Dynamics, 24, pp.313-327, 1995.
- [KAP et al - 94] S. Kaplan, M.F. Dessaigne, M. Dejeammes, "Etude ergonomique de la fonction accostage du bus", Rapport INRETS-LESCO n°9413, juillet 1994.
- [KAU - 77] A. Kaufmann, "Introduction à la théorie des ensembles flous", Editions Masson, Tome 1, Tome 2, Tome 3, Tome 4, 1977-1978.
- [LAG - 74] T.L. Lague, "Optimization of the automatic steering control of a vehicle in a guideway with positive mechanical", 1st Int. Conf. on Dual Mode Transportation, Rohr Industries, 29-31 mai 1974.
- [LAI - 93] C. Lailier, "Guidage par vision artificielle d'un véhicule autonome sur route matérialisée par la signalisation horizontale", Thèse de Doctorat, Centre d'Automatique de Lille, 11 juin 1993.
- [LAM - 96] D. Lamy, "Guidage de véhicule : Commande Neuronale", Rapport final, Convention INRETS-ICAM, juillet 1996.
- [LAR - 93] P. de Larminat, "Automatique. Commande des systèmes linéaires", Editions Hermès, Paris, 1993.
- [MAY - 82] R.J. Mayhan, R.A. Bishel, "A two frequency radar vehicles lateral control", IEEE, VT 31, n°1, Ohio State University, Colombus, OH, février 1982.
- [MEV, GUE - 87] A. Mével, T. Guéguen, "Smalltalk-80", Edition Eyrolles, 61, boulevard Saint-Germain - 75005 Paris, 1987.
- [MOS - 94] M. Mostefaï, "Un modèle d'architecture orienté objet pour la conception de plate-formes de simulation interactive", Thèse présentée à l'Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, Soutenue le 1 février 1994.
- [MUR - 83] S.S. Murthy et R.E. Fenton, "A velocity adaptative, microprocesor based, vehicle lateral controller", Ifac Control in Transportation Systems, Baden-Baden, République Fédérale d'Allemagne 1983.
-

-
- [ONO - 89] H. Ono, T. Ohnishi and Y. Terada, "Combustion control of refuse incineration plant by fuzzy logic", *Fuzzy Sets and systems*, vol.32, n°2, p193-206, septembre 1989.
- [PEN et al - 1.92] H. Peng, T. Hessburg, M. Tomizuka, W. Zhang, Y. Lin, P. Devlin, S. Shladover, A. Arai, "A theoretical and experimental study on vehicle lateral control", *American Control Conference*, Vol.2, pp. 1738-1742, Chicago, 1992.
- [PEN et al - 2.92] H. Peng, W. Zhang, A. Arai, Y. Lin, T. Hessburg, P. Devlin, M. Tomizuka, S. Shladover, "Experimental automatic lateral control system for an automobile", *PATH Research Report*, UCS-ITS-PRR-92-11, novembre 1992.
- [PHA - 82-83] A. Tuan Pham, "Dynamique longitudinale et transversale de l'automobile", *Rapport SIA*, Session 82-83.
- [PHA - 83-84] A. Tuan Pham, "Aspects modernes de la tenue de route et de la direction des voitures particulières", *Rapport SIA*, Session 83-84.
- [PHA - 85-86] A. Tuan Pham, "Modélisation mathématique du comportement dynamique d'une automobile dans le domaine non-linéaire", *Rapport SIA*, Session 85-86.
- [PHA - 90-91] A. Tuan Pham, "Nouvelle méthode de modélisation de la dynamique de véhicule", *Rapport SIA*, Session 90-91.
- [RO, KIM - 94] P.I. Ro, H. Kim, "Improvement of high speed 4 WS vehicle handling performance by sliding mode control", *Proceedings of the American Control conference*, Baltimore, Maryland, juin 1994.
- [RIC - 91] J. Richalet, "Pratique de l'identification", Editions Hermès, Paris, 1991.
- [SCH - 90] T. J. Schwartz, "Fuzzy systems in the real world", *A.I. Expert*, August 1990.
- [SER - 47] M. Serruys, "La suspension et la direction des véhicules routiers", Editions DUNOD, Paris, 1947.
- [TAN, KOS - 95] K. Tanaka, T. Kosaki, "Path tracking control of an automobile robot with a trailer using parallel distributed compensation", 1995.
- [TSU - 81] T. Tsumura, N. Fujiwara, T. Shirakawa, "An experimental system for automatic guidance of ground vehicle following the commanded guidance route on map", *Proceeding of the 8th Triennial World Congress of IFAC*, Kyoto, Japon, PP XVII-119-124 24-28 août 1981.
-

[ZAD - 65]

L.A. Zadeh, "Fuzzy sets", Information and Control, vol. 8, p 338-353, 1965.

Annexe 1.1

LE FILOGUIDAGE

Parmi les différents procédés de guidage viables, celui qui mesure l'état latéral du véhicule par la détection du champ magnétique produit par un courant B.F. circulant dans un câble est appelé filoguidage.

La trajectoire que suit le véhicule est obligatoirement fermée (figure 1.1-1). Un câble est enterré sous la piste de roulement à environ 1,3 centimètre de profondeur. Il est parcouru par un courant sinusoïdal de fréquence comprise entre 5 et 15 KHz et de valeur efficace 0,35 A. Les différentes trajectoires autorisées sont matérialisées par des boucles analogues, chacune d'entre elles fonctionnant sur une fréquence spécifique. Les changements de trajectoire n'ont lieu qu'en certains endroits repérés par des balises de jonctions. A l'approche de l'une de ces balises, le véhicule a la possibilité d'emprunter une nouvelle route en commutant son détecteur sur une autre fréquence.

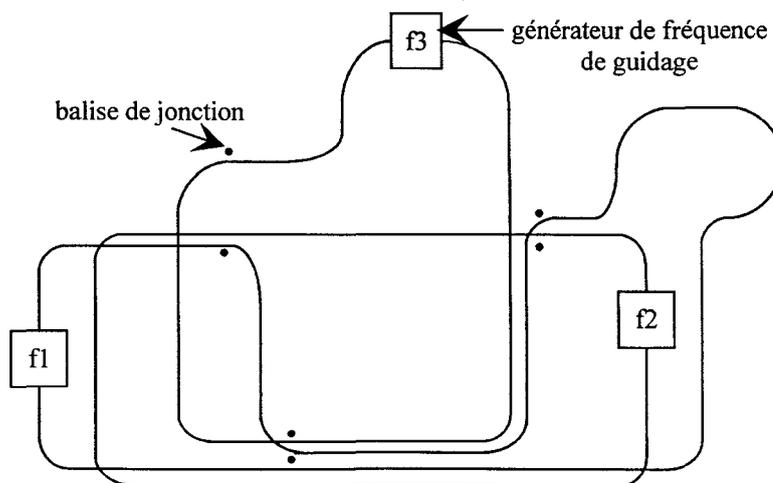


Figure 1.1-1. Disposition typique d'un réseau pour filoguidage

Principe n°1 : la détection d'amplitude.

Ce type de détection, bien que sensible aux perturbations, est le plus employé actuellement. On le trouve notamment : dans les ateliers flexibles où le guidage des chariots de manutention est géré par ordinateur, chez le constructeur automobile Peugeot où un système de guidage installé sur une piste d'essais sert à étudier le comportement et l'endurance des véhicules sur des revêtements difficiles afin de dispenser les pilotes de ces essais très éprouvants, dans le domaine du transport en Allemagne où, sous l'égide du ministère allemand de la recherche, deux groupes (Daimler-Benz et Bosch-Man) travaillent depuis 1975 sur le guidage automatique des autobus.

Le capteur utilisé pour le filoguidage est constitué de deux bobines orthogonales situées à l'avant du véhicule à une hauteur h d'environ 0,7 mètres (Figure 1.1-2). L'une d'elle, montée verticalement, est sensible à la composante verticale du champ $B_z(x)$. L'autre, montée transversalement, est sensible à la composante transversale $B_x(x)$. Les allures des composantes du champ sont représentées en fonction de l'écart latéral à la figure 1.1-3 pour un écart latéral nul.

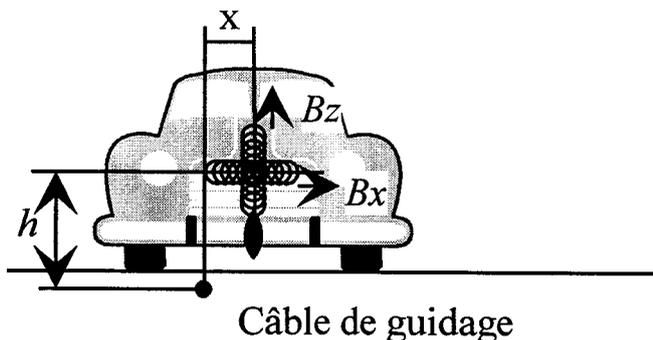


Figure 1.1-2. Configuration des bobines en détection d'amplitude

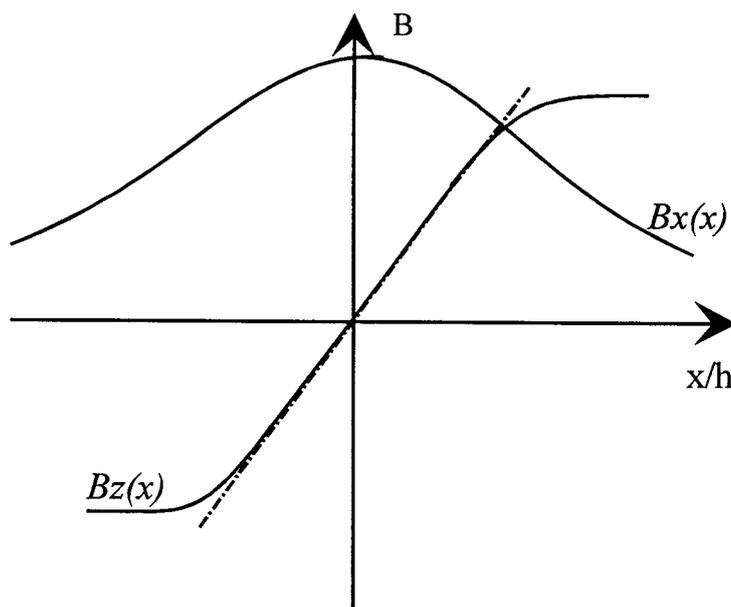


Figure 1.1-3. Composantes du champ pour un écart latéral nul

L'amplitude de l'écart latéral est déterminée par la mesure de la composante $Bz(x)$, l'étendue de la zone linéaire de la caractéristique étant ajustée par la modification de l'altitude h des capteurs. La direction de l'écart est donnée par comparaison des phases de $Bz(x)$ et de $Bx(x)$. La caractéristique position mesurée en fonction de l'écart latéral est très sensible aux variations de la valeur efficace du courant. Elle est, par ailleurs, très sensible à la présence de structures métalliques : le décalage entre la trajectoire mesurée et la trajectoire réelle est de 6 centimètres en suivi de ligne droite et de 15 centimètres lors d'une opération de dégagement par bretelle, ceci lors d'essais sur une piste en béton armé.

Principe n°2 : la détection de phase.

Le capteur est placé à l'avant du véhicule. Il est constitué de N bobines espacées de $\Delta x = 1,27$ centimètres disposées verticalement, et d'une bobine montée transversalement au câble servant de référence (Figure 1.1-4).

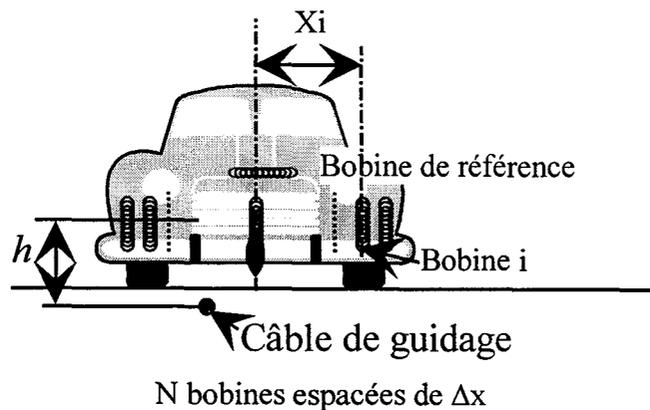


Figure 1.1-4. Configuration des bobines en détection de phase

Le système utilise N détecteurs de phase. Chacun d'entre eux reçoit d'une part le signal de la bobine de référence et d'autre part celui de l'une des N bobines verticales. La sortie du $i^{\text{ème}}$ détecteur est représentée (Figure 1.1-5) comme une fonction de la position latérale de la $i^{\text{ème}}$ bobine par rapport au câble de référence.

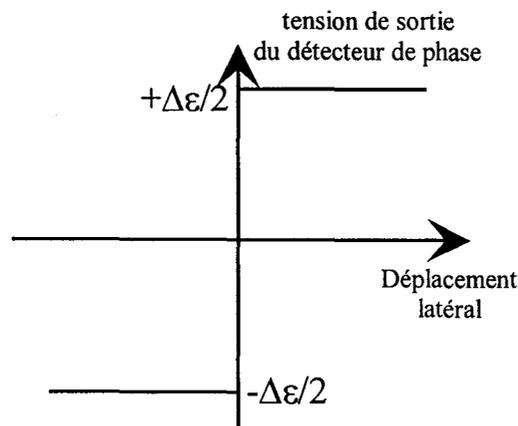


Figure 1.1-5. Caractéristique d'un détecteur de phase

Pour chaque détecteur de phase, la communication de la sortie apparaît pour une position latérale différente. De manière spécifique, l'abscisse de commutation du $i+1^{\text{ème}}$

détecteur est déplacée de Δx par rapport à celle de $i^{\text{ème}}$. La somme des sorties des N détecteurs fournit la caractéristique discrète de la mesure de l'écart latéral (Figure 1.1-6). Cette approche conduit à une résolution de 0,65 centimètres dans la détermination de la trajectoire à suivre.

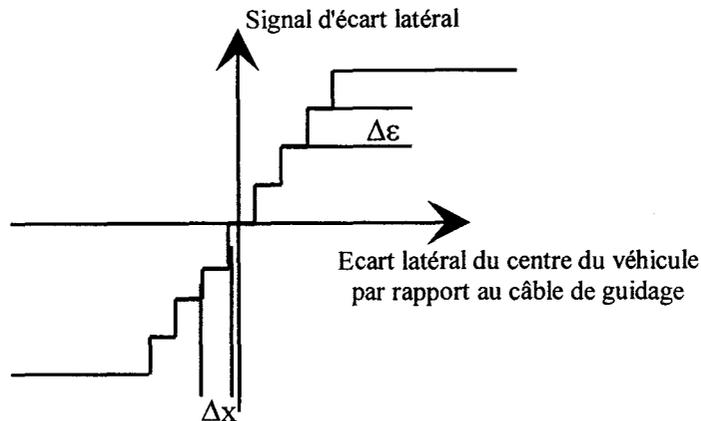


Figure 1.1-6. Caractéristique de la mesure d'écart latéral

Les performances sont excellentes : la pente de la caractéristique n'est pas affectée par une variation de la valeur efficace du courant de 0,07 à 0,57 A ; la mesure de la trajectoire est très peu affectée par les structures métalliques avoisinantes, le décalage entre la trajectoire mesurée et la trajectoire réelle n'excède pas 0,6 centimètres en suivi de ligne droite et reste inférieur à 1,3 centimètres pic à pic lors d'un dégivement de voie.

A notre connaissance, seule l'équipe de R. E. Fenton [FEN - 76] (Ohio State University) utilise le capteur à détection de phase pour la mise au point de la commande et l'évaluation des performances de la commande.

N. B. : Cette technique de prise d'informations de guidage sert de référence [MAY - 82] pour comparer divers systèmes de commande et pour évaluer d'autres techniques de guidage.

Les inconvénients de ce système sont liés à l'utilisation du câble comme support de l'information : une modification du réseau nécessite un ouvrage important. La rupture du câble (par mouvement de terrain, effondrement, explosion, etc...) conduit à une situation d'urgence et à l'indisponibilité du système.

Les avantages essentiels sont : la disponibilité du système quelles que soient les conditions atmosphériques et l'utilisabilité en environnement sévère (piste maculée par la graisse, l'huile, la boue, etc...).

En parallèle à la mise au point de systèmes de référence, des chercheurs ont développé des modèles de comportement dynamique latéral de véhicule. Ils ont conçu et testé divers systèmes de commande sur piste et sur autoroute (fermée à la circulation générale).

Le modèle de comportement dynamique latéral généralement choisi est à deux degrés de liberté, modifié de façon à tenir compte des braquages induits par le roulis de la caisse. Ce modèle valable pour de faibles accélérations latérales (<0,1g) et de faibles écarts de trajectoire se justifie parfaitement lors de la conduite sur autoroute (très grand rayon de courbure et dévers de la voie en courbe). Il est obtenu par mesure de réponse en fréquence, mesures statiques, données de constructeurs. Les mesures sur modèle font clairement apparaître la

dépendance de celui-ci vis-à-vis de la vitesse, de l'état et de la pression des pneus, de la charge du véhicule et de la composition et l'état de la chaussée.

Deux approches sont couramment utilisées pour déterminer les structures de commande. L'une est basée sur la théorie classique des systèmes asservis. Le signal de référence est considéré comme déterministe. Les performances recherchées sont :

- (1) une faible erreur de poursuite ($< 0,1$ mètre) en ligne droite et en courbe à grand rayon,
- (2) une réponse, indépendante de la vitesse de progression et de l'adhérence pneu piste,
- (3) un confort latéral garanti (accélération latérale $< 0,05$ g) sauf en situation d'urgence.

L'autre [DAR - 81], [LAG - 74] est basée sur la théorie de la commande optimale. On cherche alors à minimiser une fonction coût, de type critère quadratique, pénalisant les écarts de trajectoire les plus importants et les accélérations latérales trop importantes. Le signal de référence est considéré déterministe ou aléatoire selon les auteurs.

Les actionneurs utilisés pour les fonctions principales (accélération, freinage, braquage) sont, de manière générale, du type électrohydraulique. Il est facile et relativement peu onéreux d'appliquer ce type de commande aux véhicules munis de direction assistée comme les poids lourds et les autobus, l'organe de puissance étant en place.

Annexe 2.1

MODELISATION DYNAMIQUE D'UN VEHICULE

Nous avons ici appliqué la démarche et les hypothèses de Pham pour la modélisation d'un autobus en phase d'accostage.

La loi fondamentale pour l'analyse de la dynamique du véhicule est donnée par la seconde loi fondamentale formulée par Newton ; elle s'applique aux deux systèmes de rotation et de translation.

1 SYSTEMES SOUMIS A UNE TRANSLATION

La somme des forces extérieures appliquées à un corps dans une direction donnée, est égale au produit de la masse par l'accélération dans cette direction (avec une hypothèse sur l'invariance de la masse) :

$$\sum F_x = M \cdot a_x$$

où F_x : forces dans la direction X

M : masse du corps

a_x : accélération sur l'axe X

2 SYSTEMES SOUMIS A UNE ROTATION

La somme des moments de torsion sur un axe donné est égale au produit d'un moment d'inertie et de l'accélération de rotation suivant cet axe :

$$\sum T_x = I_{xx} * \alpha_x$$

où T_x : moment de torsion sur l'axe x

I_{xx} : moment d'inertie sur l'axe x

α_x : accélération sur l'axe x

3 MODELISATION DYNAMIQUE DU VEHICULE

La loi fondamentale pour l'analyse de la dynamique du véhicule est donnée par la seconde loi fondamentale formulée par Newton. Elle est appliquée aux deux systèmes de rotation et de translation.

3.1 POINT DE DEPART

Dans un plan, le mouvement d'un autobus provient de deux mouvements élémentaires angulaires et linéaires.

Les six degrés de liberté d'un véhicule sont les rotations (roulis, tangage et lacet) autour des axes de référence et les translations avant-arrière, gauche-droite et haut-bas (secousses ou translations verticales). Les variables nécessaires à la description du mouvement, avec ce modèle à 6 degrés de liberté, sont dans l'ordre :

- x : le déplacement longitudinal du centre de gravité,
- y : le déplacement transversal,
- z : le déplacement vertical.

Ainsi que les angles d'Euler :

- φ : rotation de tangage,
- ψ : rotation de lacet,
- θ : rotation de roulis.

Ces degrés sont visualisés sur la figure 2.1-1.

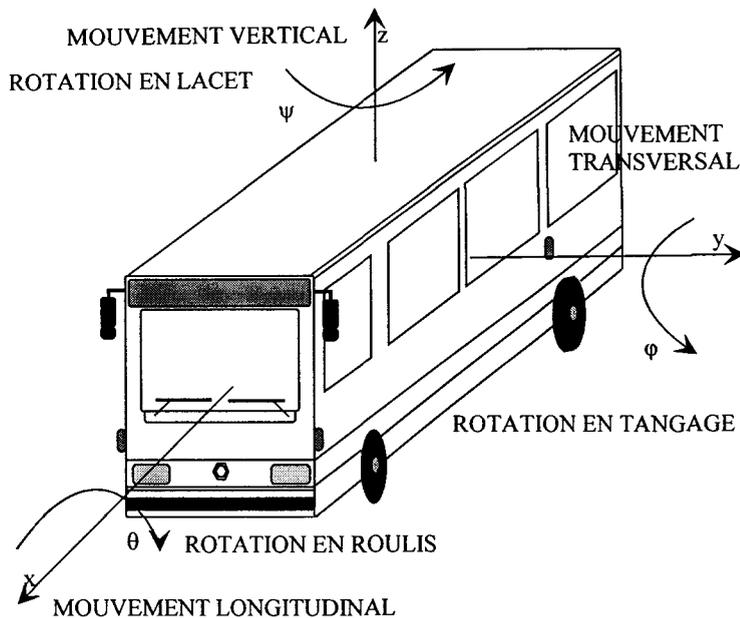


Figure 2.1-1 . Six degrés de liberté

Pour toute modélisation, nous sommes amenés à formuler des hypothèses :

- dans l'étude de la dynamique, nous ne considérons pas le mouvement de translation longitudinale "x" qui intéresse surtout les études de performance du véhicule et le guidage longitudinal d'un véhicule,
- du fait de la symétrie du véhicule par rapport à un plan vertical longitudinal le moment d'inertie croisé I_{xy} est supposé nul ($I_{xy} = 0$). Ce moment d'inertie est relativement petit (253 kg.m^2) par rapport au moment d'inertie de I_{yy} ou de I_{zz} ($200\,000 \text{ kg.m}^2$),
- il y a une séparation entre les mouvements longitudinaux (z, θ) et les mouvements transversaux (y, φ et ψ) (symétrie longitudinale),
- la force transversale due à l'action aérodynamique est négligée car la vitesse d'évolution du véhicule est faible ($>40 \text{ km/h}$),
- nous nous intéressons aux mouvements transversaux suivant y, φ et ψ , car ces grandeurs donnent directement la valeur des angles de dérive présents sur chacune des roues.

Ces hypothèses réduisent le nombre de degrés de liberté à trois : le tangage, le lacet et le mouvement transversal.

Pour des raisons liées à la physique des mesures, le déplacement transversal "y" n'est pas commode à utiliser. Les mécaniciens ont pris l'habitude d'introduire l'angle de dérive (général) du véhicule.

$$\begin{aligned}
 x &\rightarrow x \\
 [y] &\rightarrow [\alpha] \\
 z &\rightarrow z \\
 \psi &\rightarrow \psi \\
 \varphi &\rightarrow \varphi \\
 \theta &\rightarrow \theta
 \end{aligned}$$

Le véhicule présente toujours une symétrie par rapport au plan (C_G, x, z) . Il en résulte un découpage longitudinal / transversal.

$$\left. \begin{array}{l} x \rightarrow x \\ z \rightarrow z \\ \varphi \rightarrow \varphi \end{array} \right\} \text{longitudinal}$$

$$\left. \begin{array}{l} \psi \rightarrow \psi \\ y \rightarrow \alpha \\ \theta \rightarrow \theta \end{array} \right\} \text{transversal}$$

D'après l'état de l'art ([ACK - 90], [ACK - 93], [ACK - 94], [COR, FEN - 80], [HAR - 94], [TSU - 81], [KAG, NAG - 95], [RO, KIM - 94], [AND, LJU - 83], [TAN, KOS - 95], et [PEN et al - 1.92]), l'approche théorique des problèmes liés au comportement routier de véhicules se réalise par le calcul d'un modèle non-linéaire et par sa linéarisation. Nous obtenons un modèle mathématique linéaire, suivant l'étude menée. Nous allons suivre cette voie, donc nous débutons par la modélisation dynamique non-linéaire.

Pour réaliser le modèle non-linéaire, nous définissons trois repères de calcul :

- le repère galiléen (référence) R_0 lié au quai,
- le repère intermédiaire R_i ,
- le repère caisse R_c .

Un modèle dynamique à trois degrés de liberté est un juste compromis pour l'étude transversale :

- l'angle de dérive α (ou balance),
- l'angle de cap ψ (ou lacet),
- l'angle de roulis θ de la masse suspendue. La masse suspendue correspond à la masse du véhicule moins la masse des organes de suspension et des pneumatiques.

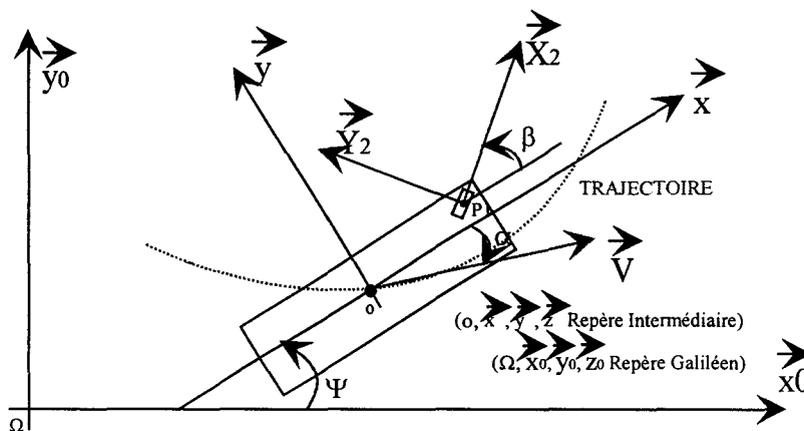


Figure 2.1-2 . Les repères

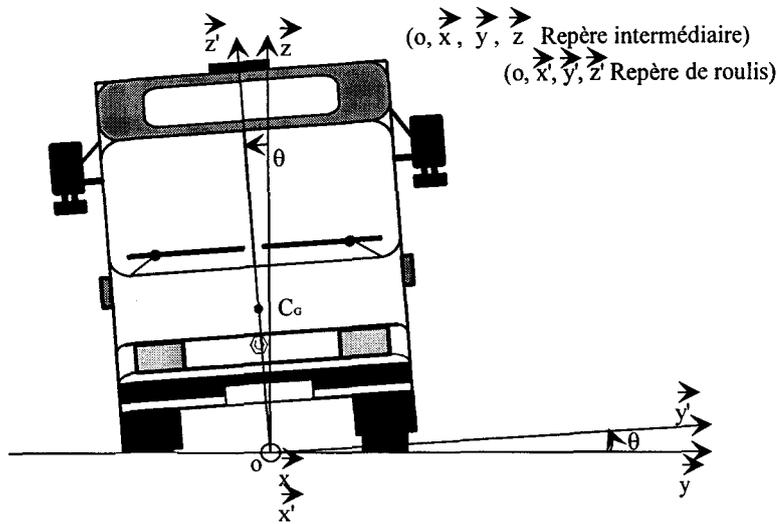


Figure 2.1-3. Définition des repères

La caisse du véhicule est considérée comme un corps solide. On distinguera :

- la masse totale du véhicule M ,
- la masse suspendue m .

3.2 EQUATIONS QUI LIENT LES CHANGEMENTS DE REPERE

La modélisation non-linéaire comporte une partie transversale et une partie longitudinale, normalement découplées dynamiquement (du point de vue des moments d'inertie et des élasticités) dues à la symétrie du véhicule.

Nous considérons trois repères :

- Le repère galiléen R_0 de référence lié à la chaussée ($\vec{\Omega}$, \vec{x}_0 , \vec{y}_0 , \vec{z}_0)

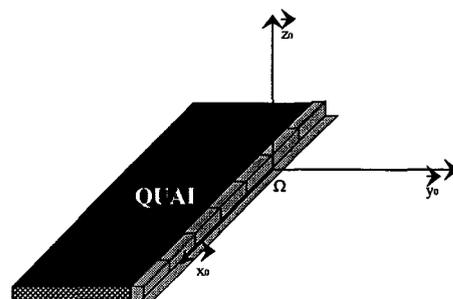


Figure 2.1-4. Repère Galiléen lié au quai

- Le repère intermédiaire R_i :

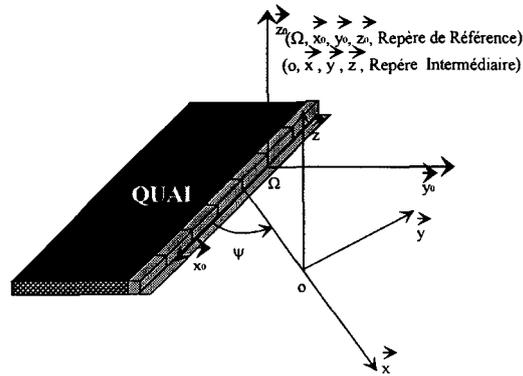


Figure 2.1-5. Repère Intermédiaire

le passage du repère de référence au repère intermédiaire se fait par une translation $\vec{\Omega}o$ et par une rotation ψ autour de z_0 . ψ étant appelé l'angle de cap ou l'angle de lacet :

Le passage du repère de référence au repère intermédiaire se fait par : $\dot{\psi} \vec{z} = \dot{\psi} \vec{z}_0$

$$\vec{\omega}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{x}_0 \\ \vec{y}_0 \\ \vec{z}_0 \end{pmatrix}$$

- Le repère de "caisse" R_c :

nous passons du repère intermédiaire R_i au repère "caisse" R_c par deux rotations d'Euler successives θ "roulis" et ϕ "tangage".



1^{ère} rotation d'Euler, angle de roulis θ autour de l'axe ox →

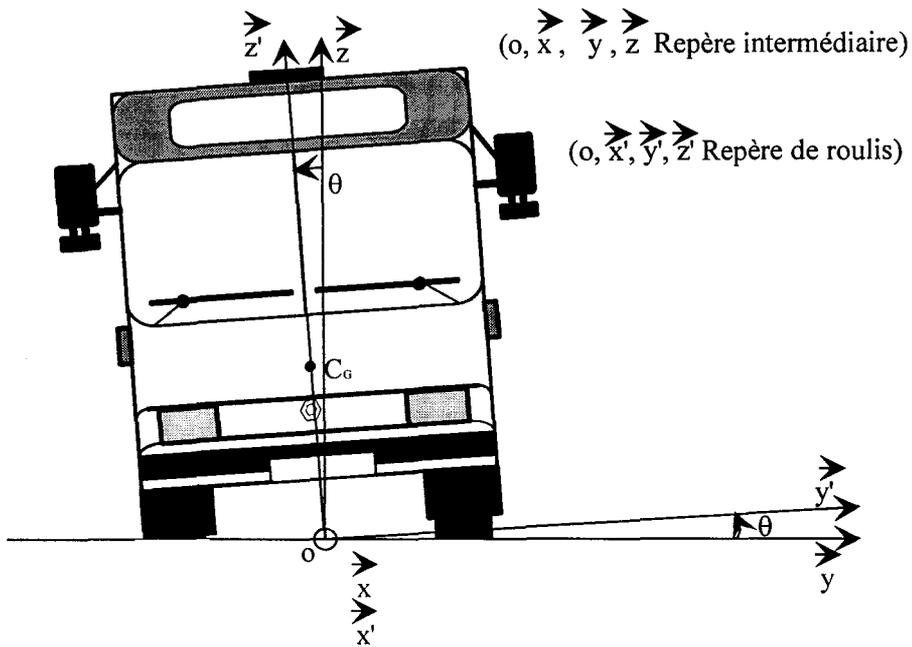


Figure 2.1-6. 1^{ère} rotation de l'angle de roulis θ

$$\begin{cases} \vec{x}' = \vec{x} \\ \vec{y}' = \cos\theta \vec{y} + \sin\theta \vec{z} \\ \vec{z}' = -\sin\theta \vec{y} + \cos\theta \vec{z} \end{cases}$$

(Système d'équation N° 1)

2^{ème} rotation de l'Euler, angle de galop φ autour de oy' →

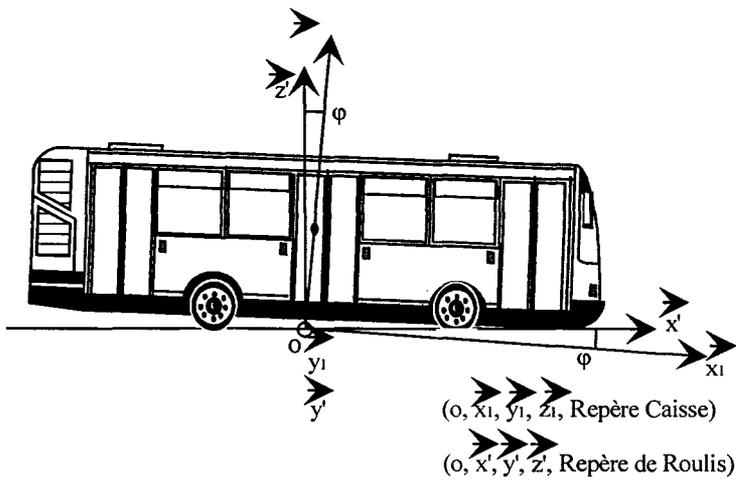


Figure 2.1-7. 2^{ème} rotation de l'angle de galop φ

$$\begin{cases} \vec{x}_1 = \cos \varphi \vec{x}' - \sin \varphi \vec{z}' \\ \vec{y}_1 = \vec{y}' \\ \vec{z}_1 = \sin \varphi \vec{x}' + \cos \varphi \vec{z}' \end{cases} \quad (\text{Système d'équation N° 2})$$

Soit, en utilisant le repère intermédiaire :

$$\begin{cases} \vec{x}_1 = \cos \varphi \vec{x} - \sin \varphi \left(-\sin \theta \vec{y} + \cos \theta \vec{z} \right) \\ \vec{y}_1 = \cos \theta \vec{y} + \sin \theta \vec{z} \\ \vec{z}_1 = \sin \varphi \vec{x} + \cos \varphi \left(-\sin \theta \vec{y} + \cos \theta \vec{z} \right) \end{cases} \quad (\text{Système d'équation N° 3})$$

D'où, les cosinus directeurs des vecteurs $\vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1$ dans le repère intermédiaire R_i :

$$\begin{matrix} \vec{x}_1/R_i & \begin{vmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \sin \theta \\ -\sin \varphi \cos \theta \end{vmatrix} & , & \vec{y}_1/R_i & \begin{vmatrix} 0 \\ \cos \theta \\ \sin \theta \end{vmatrix} & , & \vec{z}_1/R_i & \begin{vmatrix} \sin \varphi \\ -\sin \theta \sin \varphi \\ \cos \varphi \cos \theta \end{vmatrix} \end{matrix} \quad (\text{Système d'équation N° 4})$$

Les changements de repère effectués, nous déterminons la vitesse angulaire du repère "caisse" par rapport au repère "intermédiaire" R_c/R_i .

Soit $\vec{\omega}$, la vitesse angulaire de R_c/R_i .

D'après la formule donnée par Anh Tuan Pham,

$$\vec{\omega} = \dot{\theta} \vec{x} + \dot{\varphi} \vec{y}' \quad (\text{Equation N° 5})$$

En tenant compte du changement de repère, nous obtenons l'équation suivante :

$$\vec{\omega} = \dot{\theta} \vec{x} + \dot{\varphi} \left(\cos \theta \vec{y} + \sin \theta \vec{z} \right) \quad (\text{Equation N° 6})$$

Les composantes de $\vec{\omega}$ dans R_i sont :

$$\vec{\omega}_{(R_c/R_i)/R_i} \begin{vmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \cos \theta \\ \dot{\varphi} \sin \theta \end{vmatrix} \quad (\text{Equation N° 7})$$

Ces équations déterminées nous pouvons appliquer les lois fondamentales de la dynamique.

3.3 APPLICATION DES PRINCIPES FONDAMENTAUX DE LA DYNAMIQUE

L'étude des mouvements du véhicule découle de l'application des principes fondamentaux de la dynamique des corps solides :

$$\sum \vec{M}_{\text{ext}} = I \frac{d}{dt} \vec{\omega} \quad (\text{Equation N}^\circ 8)$$

L'équation N°8 traduit l'équilibre des moments dynamiques par rapport aux moments extérieurs.

$$\sum \vec{F}_{\text{ext}} = M \vec{\gamma} \quad (\text{Equation N}^\circ 9)$$

L'équation N°9 traduit le principe de Newton concernant les forces.

Nous avons divisé ici le calcul de ces équations en deux. La première partie sera consacrée à la détermination du moment et des forces dynamiques. La seconde portera sur l'étude des forces et moments extérieurs.

3.4 DETERMINATION DU MOMENT DYNAMIQUE

Le moment dynamique est égal à :

$$H(\vec{O})_{R_c} = I \frac{d}{dt} \vec{\omega} \quad (\text{Equation N}^\circ 10)$$

Ce calcul s'effectue dans le repère "caisse" $R_c (O, x_1, y_1, z_1)$ dans lequel les moments d'inertie de la partie suspendue sont constants.

Nous exprimons le moment dynamique dans le repère centré en O de la façon suivante :

$$H(\vec{O})_{R_c} = \underbrace{H(\vec{C}_G)}_{\text{3ème terme}} + \underbrace{O\vec{C}_G \wedge m \gamma_a(\vec{C}_G)_{R_c}}_{\text{2ème terme}} \quad (\text{Equation N}^\circ 11)$$

Pour ce calcul, nous déterminons les trois termes ci-dessus.

3.4.1 Détermination de l'accélération absolue dans le repère "caisse"

L'accélération dans le repère "caisse" s'exprime à partir de l'accélération absolue dans le repère "intermédiaire" par l'équation suivante :

$$\gamma_a(\vec{C}_G)_{R_c} = \gamma_a^x \vec{x}_{R_i} + \gamma_a^y \vec{y}_{R_i} + \gamma_a^z \vec{z}_{R_i} \quad (\text{Equation N}^\circ 12)$$

Voici maintenant les composantes de l'accélération absolue de C_G dans le repère intermédiaire :

$$\vec{\gamma}_a(C_G) = \vec{\gamma}_r(C_G) + \vec{\gamma}_c(C_G) + \vec{\gamma}_e(C_G) \tag{Equation N° 13}$$

avec :

- $\vec{\gamma}_a(C_G)$ = accélération absolue par le repère intermédiaire,

- $\vec{\gamma}_r(C_G)$ = accélération relative,

- $\vec{\gamma}_c(C_G)$ = accélération de Coriolis,

- $\vec{\gamma}_e(C_G)$ = accélération d'entraînement.

Le repère intermédiaire R_i est choisi comme repère relatif :

$\vec{\omega} = \vec{\omega}_{R_i/R_0}$, le repère d'expression de cette relation sera aussi R_i .

3.4.1.1 Détermination de l'accélération relative

Pour déterminer la vitesse relative $\vec{V}_R(C_G)$, nous utilisons la relation suivante :

$$\vec{V}_R(C_G) = \frac{d}{dt} OC_{GR_i} \tag{Equation N° 14}$$

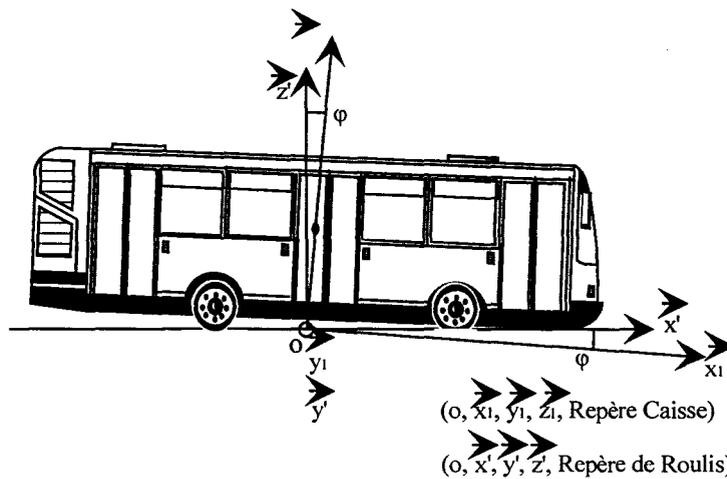


Figure 2.1-8. Hauteur du centre de gravité G

Soit

$$OC_G = h z_1 \tag{Equation N° 15}$$

$$\vec{OC}_{G/R_i} \begin{vmatrix} h \sin \varphi \\ -h \sin \theta \cos \varphi \\ h \cos \theta \cos \varphi \end{vmatrix} \quad (\text{Equation N}^\circ 16)$$

Nous faisons cependant l'hypothèse de découpage du mouvement transversal par rapport au mouvement longitudinal, ce qui revient à dire que lorsqu'on ne s'intéresse qu'au mouvement transversal, nous considérons que : $\varphi = 0$

Dans ce cas,

$$\vec{OC}_{G/R_i} \begin{vmatrix} 0 \\ -h \sin \theta \\ h \cos \theta \end{vmatrix} \quad (\text{Equation N}^\circ 17)$$

La vitesse relative au point C_G s'exprime de la façon suivante :

$$V_r(\vec{C}_G)_{/R_i} = \frac{d}{dt} \vec{OC}_{G/R_i} = \begin{vmatrix} 0 \\ -h \dot{\theta} \sin \theta \\ -h \dot{\theta} \cos \theta \end{vmatrix} \quad (\text{Equation N}^\circ 18)$$

D'où l'accélération relative :

$$\gamma_r(\vec{C}_G)_{/R_i} = \frac{d}{dt} V_r(\vec{C}_G)_{/R_i} = \begin{vmatrix} 0 \\ h \dot{\theta}^2 \sin \theta - h \ddot{\theta} \cos \theta \\ -\left(h \dot{\theta}^2 \cos \theta + h \ddot{\theta} \sin \theta \right) \end{vmatrix} \quad (\text{Equation N}^\circ 19)$$

avec :

$h =$ hauteur du centre de gravité par rapport à l'axe de roulis.

3.4.1.2 Détermination de l'accélération de Coriolis

L'accélération de Coriolis est égale à :

$$\gamma_c(\vec{C}_G)_{/R_i} \begin{vmatrix} 2h \dot{\psi} \dot{\theta} \cos \theta \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \quad (\text{Equation N}^\circ 20)$$

avec :

$h =$ hauteur du centre de gravité par rapport à l'axe de roulis.

L'accélération de Coriolis n'a qu'une composante suivant \vec{X}_i dans le repère intermédiaire.

3.4.1.3 Détermination de l'accélération d'entraînement

Par définition, l'accélération d'entraînement est celle du point O, origine du repère intermédiaire par rapport au repère absolu.

Soit $\vec{V}(O)$, la vitesse du point O par rapport au repère absolu.

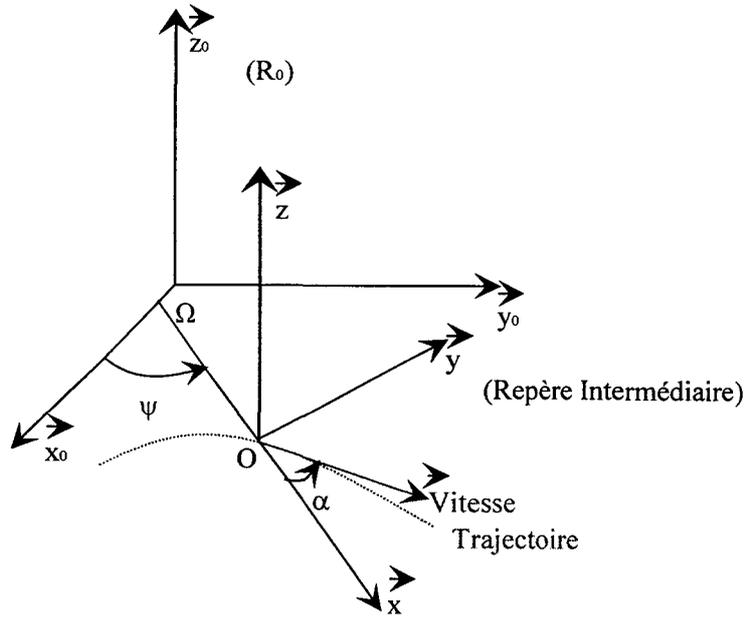


Figure 2.1-9. Vitesse au point O

Supposons que $|\vec{V}(O)|$ est constante, alors l'expression de l'accélération d'entraînement comprend trois termes :

$$\vec{\gamma}_e(C_G) = \vec{\gamma}_a(O) + \underbrace{\frac{d\vec{\omega}}{dt} \wedge \vec{OC}_G + \vec{\omega} \wedge (\vec{\omega} \wedge \vec{OC}_G)}_{\text{termes complémentaires}} \tag{Equation N° 21}$$

$\vec{\gamma}_a(O)$ s'obtient par dérivation de $\vec{V}(O)$

$$\vec{\gamma}_a(O) = \frac{d}{dt} \vec{V}(O) \tag{Equation N° 22}$$

En utilisant le repère intermédiaire soit :

$$\vec{V}(O)_{/R_1} \begin{vmatrix} V \cos \alpha \\ V \sin \alpha \\ 0 \end{vmatrix} \quad (\text{Equation N}^\circ 23)$$

Calcul de $\gamma_a(\vec{O})$ par dérivation de l'équation précédente dans un repère mobile :

$$\vec{\gamma}_a(O) = \frac{d}{dt} \vec{V}(O) + \vec{\omega} \wedge \vec{V}(O), \quad (\text{Equation N}^\circ 24)$$

Nous obtenons :

$$\vec{\gamma}_a(\vec{O})_{/R_1} \begin{vmatrix} -V \dot{\alpha} \sin \alpha & 0 & V \cos \alpha \\ V \dot{\alpha} \cos \alpha & 0 \wedge & V \sin \alpha \\ 0 & \dot{\psi} & 0 \end{vmatrix}, \quad (\text{Equation N}^\circ 25)$$

$$\vec{\gamma}_a(\vec{O})_{/R_1} \begin{vmatrix} -V \dot{\alpha} \sin \alpha & -\dot{\psi} V \sin \alpha \\ V \dot{\alpha} \cos \alpha & \dot{\psi} V \cos \alpha \\ 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (\text{Equation N}^\circ 26)$$

donc :

$$\vec{\gamma}_a(\vec{O})_{/R_1} \begin{vmatrix} -V(\dot{\alpha} + \dot{\psi}) \sin \alpha \\ V(\dot{\alpha} + \dot{\psi}) \cos \alpha \\ 0 \end{vmatrix} \quad (\text{Equation N}^\circ 27)$$

Calculons maintenant

$$\frac{d\vec{\omega}}{dt} \wedge \vec{OC}_G \quad (\text{Equation N}^\circ 28)$$

avec

$$\frac{d\vec{\omega}}{dt}_{/R_1} \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\psi} \end{vmatrix} \quad \text{et} \quad \vec{OC}_{G/R_1} \begin{vmatrix} 0 \\ -h \sin \theta \\ h \cos \theta \end{vmatrix} \quad \text{pour} \quad \varphi = 0, \quad (\text{Equations N}^\circ 29 \text{ et } 30)$$

donc :

$$\left(\frac{\vec{d}\omega}{dt} \wedge \vec{OC}_G \right)_{/R_i} = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 \wedge & -h \sin \theta \\ \ddot{\psi} & h \cos \theta \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} h \ddot{\psi} \sin \theta \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \quad (\text{Equation N}^\circ 31)$$

Calcul de $\vec{\omega} \wedge (\vec{\omega} \wedge \vec{OG})$

$$\left(\vec{\omega} \wedge \vec{OC}_G \right)_{/R_i} = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 \wedge & -h \sin \theta \\ \dot{\psi} & h \cos \theta \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} h \dot{\psi} \sin \theta \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \quad (\text{Equation N}^\circ 32)$$

$$\text{donc } \left(\vec{\omega} \wedge (\vec{\omega} \wedge \vec{OC}_G) \right)_{/R_i} = \begin{vmatrix} 0 & h \dot{\psi} \sin \theta \\ 0 \wedge & 0 \\ \dot{\psi} & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ h \dot{\psi}^2 \sin \theta \\ 0 \end{vmatrix} \quad (\text{Equation N}^\circ 33)$$

Nous en déduisons les forces composantes de l'accélération d'entraînement dans le repère intermédiaire :

$$\gamma_e(\vec{C}_G)_{/R_i} = \begin{vmatrix} -V(\dot{\alpha} + \dot{\psi}) \sin \alpha + h \ddot{\psi} \sin \theta \\ V(\dot{\alpha} + \dot{\psi}) \cos \alpha + h \dot{\psi}^2 \sin \theta \\ 0 \end{vmatrix} \quad (\text{Equation N}^\circ 34)$$

avec :

h = hauteur du centre de gravité par rapport à l'axe de roulis,

V = vitesse du centre de gravité du véhicule sur sa trajectoire.

Donc, à partir de ces trois composantes, nous obtenons l'accélération absolue dans le repère intermédiaire :

$$\vec{\gamma}_a(\vec{C}_G)_{/R_i} = \begin{vmatrix} -V(\dot{\alpha} + \dot{\psi}) \sin \alpha + h \ddot{\psi} \sin \theta + 2h \dot{\psi} \dot{\theta} \cos \theta \\ V(\dot{\alpha} + \dot{\psi}) \cos \alpha + h \dot{\psi}^2 \sin \theta + h \dot{\theta}^2 \sin \theta - h \ddot{\theta} \cos \theta \\ -\left(h \dot{\theta}^2 \cos \theta + h \ddot{\theta} \sin \theta \right) \end{vmatrix} \quad (\text{Equation N}^\circ 35)$$

avec :

h = hauteur du centre de gravité par rapport à l'axe de roulis,

V = vitesse du centre de gravité du véhicule sur sa trajectoire.

Nous reprenons maintenant l'équation n°12 :

$$\gamma_a(\vec{C}_G)_{R_c} = \gamma_a \vec{X}_{/R_i} \vec{X} + \gamma_a \vec{Y}_{/R_i} \vec{Y} + \gamma_a \vec{Z}_{/R_i} \vec{Z} \quad (\text{Equation N° 12})$$

Nous effectuons le changement de repère dans l'hypothèse de découpage entre les mouvements longitudinaux et transversaux qui induit que $\varphi = 0$.

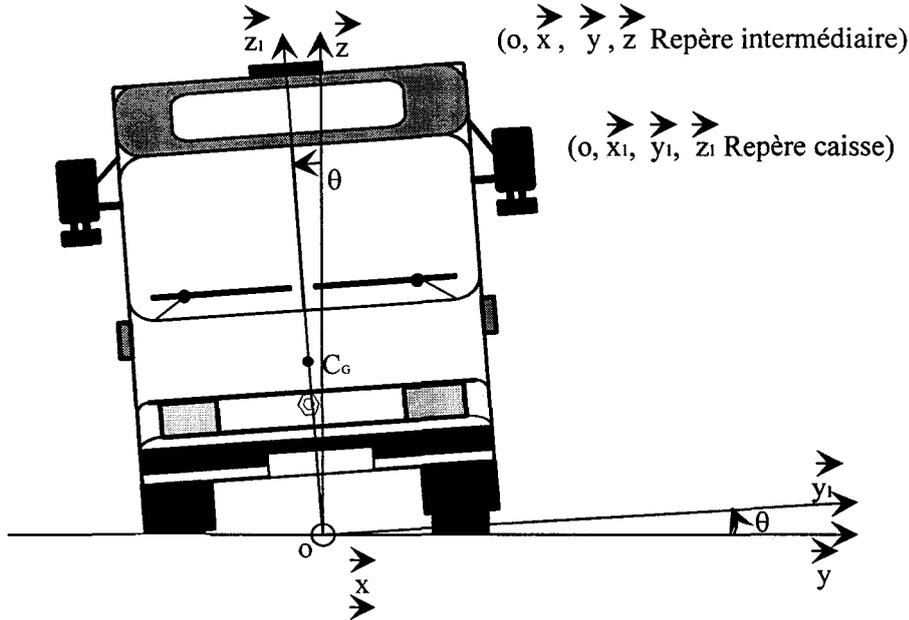


Figure 2.1-10. Passage du repère intermédiaire au repère caisse avec $\varphi = 0$

$$\gamma_a(\vec{C}_G)_{R_c} = \gamma_a \vec{X}_{/R_i} \vec{X}_1 + \gamma_a \vec{Y}_{/R_i} (\cos\theta \vec{y}_1 - \sin\theta \vec{z}_1) + \gamma_a \vec{Z}_{/R_i} (\cos\theta \vec{z}_1 + \sin\theta \vec{y}_1) \quad (\text{Equation N° 36})$$

Nous obtenons, les composantes de l'accélération absolue.

$$\vec{\gamma}_a(\vec{C}_G)_{R_c} = \begin{pmatrix} -V(\ddot{\alpha} + \ddot{\psi}) \sin\alpha + h \ddot{\psi} \sin\theta + 2h \dot{\psi} \dot{\theta} \cos\theta \\ V(\ddot{\alpha} + \ddot{\psi}) \cos\alpha \cos\theta + h \dot{\psi}^2 \sin\theta \cos\theta - h \ddot{\theta} \\ -V(\ddot{\alpha} + \ddot{\psi}) \cos\alpha \sin\theta - h \dot{\psi}^2 \sin^2\theta - h \ddot{\theta} \end{pmatrix} \quad (\text{Equation N° 37})$$

3.4.2 Détermination du produit vectoriel

Nous calculons le terme $\vec{OC}_G \wedge m \gamma_a(\vec{C}_G)_{R_c}$,

$$\vec{OC}_G / R_c = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ h \end{pmatrix} \quad \text{(Equation N° 38)}$$

Nous obtenons :

$$\left(\vec{OC}_G \wedge m \gamma_a(\vec{C}_G) \right) / R_c = \begin{pmatrix} -mhV(\dot{\alpha} + \dot{\psi}) \cos \alpha \cos \theta - mh^2 \dot{\psi}^2 \sin \theta \cos \theta + mh^2 \ddot{\theta} \\ -mhV(\dot{\alpha} + \dot{\psi}) \sin \alpha + mh^2 \ddot{\psi} \sin \theta + 2mh^2 \dot{\psi} \dot{\theta} \cos \theta \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{(Equation N° 39)}$$

avec :

- h = hauteur du centre de gravité par rapport à l'axe de roulis,
- V = vitesse du centre de gravité du véhicule sur sa trajectoire,
- m = masse suspendue.

3.4.3 Calcul du moment dynamique en C_G

Equation de départ :

$$H(\vec{C}_G) = \frac{d\sigma(\vec{C}_G)}{dt} \quad \text{(Equation N° 40)}$$

Considérons d'abord un repère "caisse" centré en C_G , centre de gravité de la partie suspendue $R_{CG} (C_G, x', y', z')$.

Le moment dynamique s'obtient par dérivation du moment cinétique en un point fixe, ou en C_G . Or, nous voulons obtenir le moment dynamique dans un repère lié à la caisse, mais centré au point O.

Le moment dynamique en C_G peut s'écrire :

$$\frac{d\sigma(\vec{C}_G)}{dt} = \frac{d\sigma(\vec{C}_G) / R_{CG}}{dt} + \vec{\omega}_{R_{CG}} \wedge \sigma(\vec{C}_G) / R_{CG} \quad \text{(Equation N° 41)}$$

Nous avons deux termes à déterminer : le produit vectoriel et la dérivée.

3.4.3.1 Détermination du produit vectoriel

Soit $\vec{\omega}$, vitesse angulaire R_{CG} par rapport à R_0 , exprimée dans R_C :

$$\vec{\omega}'_{R_{CG}/R_0} = \dot{\psi} \vec{z} + \dot{\theta} \vec{x} \tag{Equation N° 42}$$

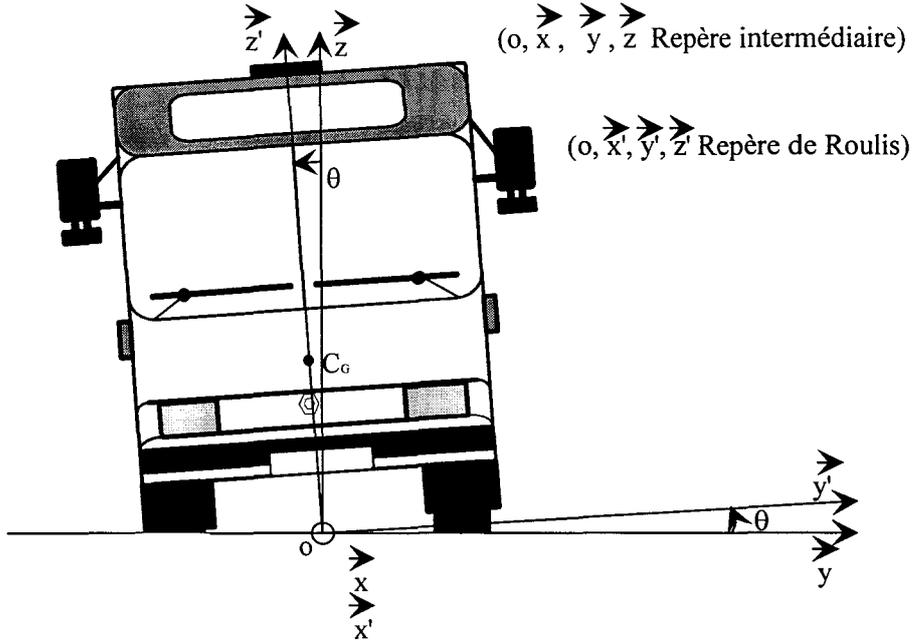


Figure 2.1-11. 1ère rotation de l'angle de roulis θ

Or,

$$\vec{z} = \cos\theta \vec{z}' + \sin\theta \vec{y}' \tag{Equation N° 43}$$

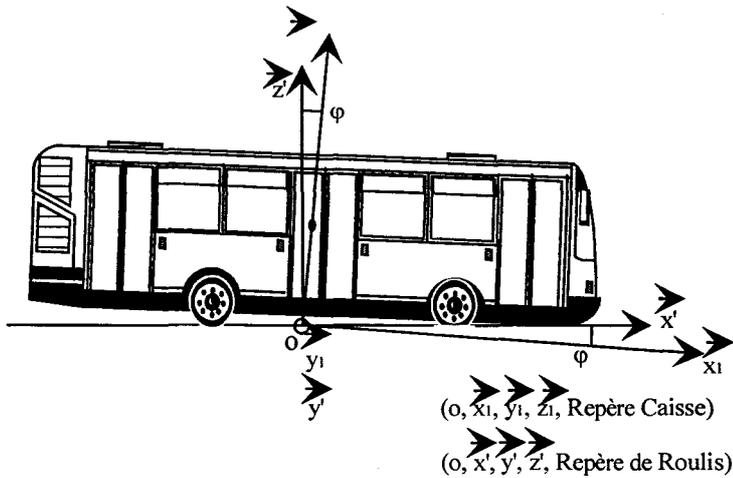


Figure 2.1-12. 2ème rotation de l'angle de galop ϕ

nous obtenons :

$$\vec{z} = \cos\theta \vec{z}' + \sin\theta \vec{y}'_1 \tag{Equation N° 44}$$

Dans l'hypothèse de découpage,

$$\varphi = 0,$$

(Equation N° 45)

donc \vec{z} est confondu avec \vec{z}_1 , et \vec{x} avec \vec{x}_1 .

$$\text{Dans ce cas : } \vec{z} = \cos\theta \vec{z}_1 + \sin\theta \vec{y}_1,$$

(Equation N° 46)

$$\text{et : } \omega_{R_{CG}}^{\vec{z}} = \dot{\psi} (\cos\theta \vec{z}_1 + \sin\theta \vec{y}_1) + \dot{\theta} \vec{x}_1$$

(Equation N° 47)

L'équation finale devient :

$$\omega_{\left(\frac{R_{CG}}{R_C}\right) / R_{CG}}^{\vec{z}} = \begin{vmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \sin\theta \\ \dot{\psi} \cos\theta \end{vmatrix} \quad \text{(Equation N° 48)}$$

D'où l'expression du moment cinétique en C_G sachant que $I_{XY} = I_{YZ} = 0$ d'après les hypothèses choisies :

$$\sigma_{(C_G) / R_{CG}}^{\vec{z}} = \begin{bmatrix} I_x & 0 & -I_{xz} \\ 0 & I_y & 0 \\ -I_{xz} & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \sin\theta \\ \dot{\psi} \cos\theta \end{bmatrix} \quad \text{(Equation N° 49)}$$

donc

$$\sigma_{(C_G) / R_{CG}}^{\vec{z}} = \begin{vmatrix} \dot{\theta} I_x - I_{xz} \dot{\psi} \cos\theta \\ I_y \dot{\psi} \sin\theta \\ -I_{xz} \dot{\theta} + I_z \dot{\psi} \cos\theta \end{vmatrix} \quad \text{(Equation N° 50)}$$

avec :

I_x =moment d'inertie autour de l'axe de roulis de la masse suspendue,

I_y =moment d'inertie autour de l'axe de tangage (total du véhicule),

I_z =moment d'inertie autour de l'axe de lacet,

I_{xz} =produit d'inertie de la masse suspendue.

Nous avons maintenant tous les éléments nécessaires pour calculer le produit vectoriel.

$$\vec{\omega}_{R_{CG}} \wedge \vec{\sigma}(C_G)_{/R_{CG}} = \begin{vmatrix} \dot{\theta} & \begin{vmatrix} \dot{\theta} I_x - I_{xz} \dot{\psi} \cos \theta \\ I_y \dot{\psi} \sin \theta \\ -I_{xz} \dot{\theta} + I_z \dot{\psi} \cos \theta \end{vmatrix} \\ \dot{\psi} \sin \theta & \\ \dot{\psi} \cos \theta & \end{vmatrix} \quad (\text{Equation N}^\circ 51)$$

Nous trouvons donc :

$$\vec{\omega}_{R_{CG}} \wedge \vec{\sigma}(C_G)_{/R_{CG}} = \begin{vmatrix} I_z \dot{\psi}^2 \sin \theta \cos \theta - I_y \dot{\psi}^2 \sin \theta \cos \theta - I_{xz} \dot{\psi} \dot{\theta} \sin \theta \\ (I_x - I_z) \dot{\psi} \dot{\theta} \cos \theta + I_{xz} (\dot{\theta}^2 - \dot{\psi}^2 \cos^2 \theta) \\ I_{xz} \dot{\psi}^2 \sin \theta \cos \theta + (I_y - I_x) \dot{\psi} \dot{\theta} \sin \theta \end{vmatrix} \quad (\text{Equation N}^\circ 52)$$

3.4.3.2 Détermination de la dérivée

Nous allons maintenant calculer la dérivée : $\frac{d\vec{\sigma}(C_G)_{/R_{CG}}}{dt}$ (Equation N° 53)

$$\frac{d\vec{\sigma}(C_G)_{/R_{CG}}}{dt} = \frac{\begin{vmatrix} \dot{\theta} I_x - I_{xz} \dot{\psi} \cos \theta \\ I_y \dot{\psi} \sin \theta \\ -I_{xz} \dot{\theta} + I_z \dot{\psi} \cos \theta \end{vmatrix}}{dt} \quad (\text{Equation N}^\circ 54)$$

L'équation finale est égale à :

$$\frac{d\vec{\sigma}(C_G)_{/R_{CG}}}{dt} \begin{vmatrix} \ddot{\theta} I_x - I_{xz} \ddot{\psi} \cos \theta - I_{xz} \dot{\psi} \dot{\theta} \sin \theta \\ I_y \ddot{\psi} \sin \theta - I_y \dot{\psi} \dot{\theta} \cos \theta \\ I_{xz} \ddot{\theta} - I_z \ddot{\psi} \cos \theta - I_z \dot{\psi} \dot{\theta} \sin \theta \end{vmatrix}$$

3.4.3.3 Détermination du moment dynamique en C_G

Le moment dynamique est égal à :

$$H(\vec{C}_G) = \frac{d\sigma(\vec{C}_G)}{dt} \tag{Equation N° 56}$$

D'après l'équation N° 41,

$$\frac{d\sigma(\vec{C}_G)}{dt} = \frac{d\sigma(\vec{C}_G)_{/R_{CG}}}{dt} + \vec{\omega}_{R_{CG}} \wedge \sigma(\vec{C}_G)_{/R_{CG}} \tag{Equation N° 41}$$

Nous obtenons, finalement :

$$\frac{d\sigma(\vec{C}_G)}{dt} = \begin{vmatrix} \ddot{\theta} I_x - I_{xz} \ddot{\psi} \cos\theta + I_{xz} \dot{\psi} \dot{\theta} \sin\theta & I_z \dot{\psi}^2 \sin\theta \cos\theta - I_y \dot{\psi}^2 \sin\theta \cos\theta - I_{xz} \dot{\psi} \dot{\theta} \sin\theta \\ I_y \ddot{\psi} \sin\theta + I_y \dot{\psi} \dot{\theta} \cos\theta & + (I_x - I_z) \dot{\psi} \dot{\theta} \cos\theta + I_{xz} (\dot{\theta}^2 - \dot{\psi}^2 \cos^2 \theta) \\ -I_{xz} \ddot{\theta} + I_z \ddot{\psi} \cos\theta - I_z \dot{\psi} \dot{\theta} \sin\theta & I_{xz} \dot{\psi}^2 \sin\theta \cos\theta + (I_y - I_x) \dot{\psi} \dot{\theta} \sin\theta \end{vmatrix} \tag{Equation N° 57}$$

$$\frac{d\sigma(\vec{C}_G)}{dt} = \begin{vmatrix} \ddot{\theta} I_x - I_{xz} \ddot{\psi} \cos\theta + I_z \dot{\psi}^2 \sin\theta \cos\theta - I_y \dot{\psi}^2 \sin\theta \cos\theta \\ I_y \ddot{\psi} \sin\theta + (I_y + I_x - I_z) \dot{\psi} \dot{\theta} \cos\theta + I_{xz} (\dot{\theta}^2 - \dot{\psi}^2 \cos^2 \theta) \\ -I_{xz} \ddot{\theta} + I_z \ddot{\psi} \cos\theta + I_z \dot{\psi} \dot{\theta} \sin\theta + I_{xz} \dot{\psi}^2 \sin\theta \cos\theta + (I_y - I_x) \dot{\psi} \dot{\theta} \sin\theta \end{vmatrix} \tag{Equation N° 58}$$

En regroupant, nous obtenons :

$$H(\vec{C}_G) = \frac{d\sigma(\vec{C}_G)}{dt} = \begin{vmatrix} \ddot{\theta} I_x - I_{xz} \ddot{\psi} \cos\theta + (I_z - I_y) \dot{\psi}^2 \sin\theta \cos\theta \\ I_y \ddot{\psi} \sin\theta + (I_y + I_x - I_z) \dot{\psi} \dot{\theta} \cos\theta + I_{xz} (\dot{\theta}^2 - \dot{\psi}^2 \cos^2 \theta) \\ -I_{xz} \ddot{\theta} + I_z \ddot{\psi} \cos\theta + I_{xz} \dot{\psi}^2 \sin\theta \cos\theta + (I_y - I_x + I_z) \dot{\psi} \dot{\theta} \sin\theta \end{vmatrix} \tag{Equation N° 59}$$

3.4.4 Calcul total du moment dynamique

$$H(\vec{O})_{R_c} = \underbrace{H(\vec{C}_G)}_{3^{\text{ème}} \text{ terme}} + \underbrace{O\vec{C}_G \wedge m\gamma a(\vec{C}_G)_{R_c}}_{2^{\text{ème}} \text{ terme}} \tag{Equation N° 60}$$

Le moment dynamique en O s'écrit, finalement :

$$H(O)_{R_c/R_{CG}} \left\{ \begin{array}{l} \ddot{\theta} I_x - I_{xz} \ddot{\psi} \cos\theta + (I_z - I_y) \dot{\psi}^2 \sin\theta \cos\theta - mhV(\dot{\alpha} + \dot{\psi}) \cos\alpha \cos\theta - mh^2 \dot{\psi}^2 \sin\theta \cos\theta + mh^2 \ddot{\theta} \\ I_y \ddot{\psi} \sin\theta + (I_y + I_x - I_z) \dot{\psi} \dot{\theta} \cos\theta + I_{xz} (\dot{\theta}^2 - \dot{\psi}^2 \cos^2\theta) - mhV(\dot{\alpha} + \dot{\psi}) \sin\alpha + mh^2 \ddot{\psi} \sin\theta + 2mh^2 \dot{\psi} \dot{\theta} \cos\theta \\ -I_{xz} \ddot{\theta} + I_z \ddot{\psi} \cos\theta + I_{xz} \dot{\psi}^2 \sin\theta \cos\theta + (I_y - I_x + I_z) \dot{\psi} \dot{\theta} \sin\theta \end{array} \right. \quad (\text{Equation N° 61})$$

Il nous reste maintenant à calculer le deuxième membre de l'équation qui correspond à la somme des moments des forces extérieures.

$$\underbrace{\sum \vec{M}_{ext}}_? = \underbrace{I \frac{d}{dt} \vec{\omega}}_{\vec{H}(O)_{R_c}} \quad (\text{Equation N° 62})$$

Avant de passer à la détermination des moments extérieurs, il nous faut employer la seconde loi qui est $\sum \vec{F}_{ext} = M \vec{\gamma}$ (Equation N° 9)

Cette loi correspond au principe de Newton concernant les forces.

3.5 DETERMINATION DE LA FORCE D'INERTIE

Le principe de Newton s'exprime par l'équation suivante :

$$\sum \vec{F}_{ext} = M \vec{\gamma} \quad (\text{Equation N° 9})$$

La force inertie est égale à $\vec{F}_i = M \vec{\gamma}$ (Equation N° 63)

Elle s'obtient en affectant le coefficient M (masse totale du véhicule) aux termes ne contenant pas θ et le coefficient m (masse suspendue du véhicule) aux termes contenant θ dans les coordonnées de l'accélération absolue [PHA - 82-83], [PHA - 83-84], [PHA - 85-86], [PHA - 90-91].

Nous rappelons les coordonnées de l'accélération absolue :

$$\vec{\gamma}_a(C_G)_{R_i} \left\{ \begin{array}{l} -V(\dot{\alpha} + \dot{\psi}) \sin\alpha + h \ddot{\psi} \sin\theta + 2h \dot{\psi} \dot{\theta} \cos\theta \\ V(\dot{\alpha} + \dot{\psi}) \cos\alpha + h \dot{\psi}^2 \sin\theta + h \dot{\theta}^2 \sin\theta - h \ddot{\theta} \cos\theta \\ -\left(h \dot{\theta}^2 \cos\theta + h \ddot{\theta} \sin\theta \right) \end{array} \right. \quad (\text{Equation N° 35})$$

En appliquant ce principe, nous obtenons les coordonnées de \vec{F}_i :

$$\begin{matrix} \vec{F}_i/R_i \\ \left| \begin{array}{l} -MV(\dot{\alpha} + \dot{\psi}) \sin \alpha + mh \ddot{\psi} \sin \theta + 2mh \dot{\psi} \dot{\theta} \cos \theta \\ MV(\dot{\alpha} + \dot{\psi}) \cos \alpha + mh \dot{\psi}^2 \sin \theta + mh \dot{\theta}^2 \sin \theta - mh \ddot{\theta} \cos \theta \\ -mh(\dot{\theta}^2 \cos \theta + \ddot{\theta} \sin \theta) \end{array} \right. \end{matrix} \quad (\text{Equation N}^\circ 64)$$

Lorsque nous écrivons la relation de Newton à l'équilibre ($\vec{\gamma} = \vec{0}$) $\vec{F}_i = \sum \vec{F}_{ext}$, le système d'axes utilisé est celui du repère intermédiaire R_i .

Par contre, lorsque nous écrivons l'équilibre des moments $H(\vec{O}) = \sum \vec{M}_{ext}$, le système d'axes utilisé est celui du repère caisse R_c .

Nous allons maintenant exposer le calcul des moments extérieurs.

3.6 ETUDE DES FORCES ET MOMENTS EXTERIEURS

Les forces et les moments extérieurs s'exerçant sur un véhicule terrestre déterminant son mouvement sont de plusieurs natures.

- Les forces horizontales, contenues dans le plan du sol proviennent des réactions de contact de la liaison des pneumatiques avec le sol. Dans un grand domaine de vitesse, ces forces sont prépondérantes. Ce sont les forces latérales de guidage ou longitudinales de freinage ou de propulsion. Elles sont "couplées" dynamiquement, c'est à dire qu'il y a une interdépendance étroite des unes par rapport aux autres.
- Les forces verticales sont des réactions des ressorts, des barres antiroulis ou des amortisseurs. Elles ont une influence déterminante sur le comportement routier du véhicule.
- Les forces et les moments d'origine aérodynamique : portance et déportance verticale, les poussées latérales, les forces et les moments de couplage roulis - lacet.

Nous recherchons maintenant trois valeurs pour le second membre. Nous ne tenons compte que de trois degrés de liberté : deux moments et une force. Les moments sont ceux de roulis et de lacet. Pour la force, nous recherchons la force exercée suivant l'axe transversal "y".

Cette force est essentiellement due aux forces de guidage des pneumatiques.

3.6.1 Détermination des forces de guidage des pneumatiques

Les forces de guidage des pneumatiques (forces latérales) prennent naissance lorsqu'il y a la présence simultanée d'un angle de dérive et d'une force d'appui verticale.

Les forces de guidage sont données par les équations présentées ci-dessous :

Dans l'hypothèse, nous nous situons dans la zone linéaire (zone de pseudo glissement) de la courbe $F = f(\delta)$ (figure 2.1-13).

Nous pouvons écrire que la force transversale [GIL - 92] égale à :

$$F_Y = D\delta$$

(Equation N° 65)

avec :

D = rigidité de dérive (sous charge) d'un pneu,

δ = angle de dérive d'un pneu.

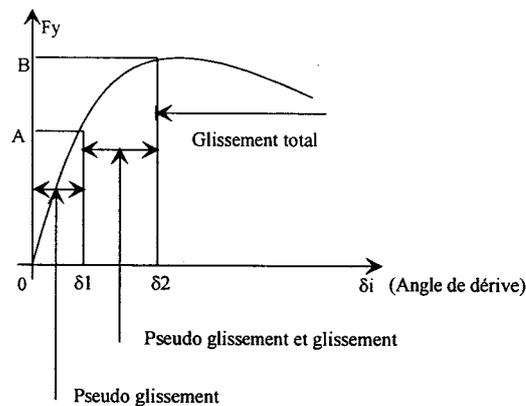


Figure 2.1-13 . Courbe force transversale = F (l'angle de dérive)

Les pneumatiques ont leurs propres réseaux de courbes "isodérives". Connaissant l'angle de dérive δ_i , une simple interpolation permet de calculer F_{yi} .

Nous recherchons quatre valeurs pour les forces de guidage :

$$F_{YAVG}, F_{YAVD}, F_{YARG}, F_{YARD}$$

Nous arrivons aux expressions suivantes.

- Force transversale exercée par le train avant :

$$F_{YAV} = -D_{AV}(\delta_{AVG} + \delta_{AVD})$$

(Equation N° 66)

- Force transversale exercée par le train arrière :

$$F_{YAR} = -D_{AR}(\delta_{ARG} + \delta_{ARD})$$

(Equation N° 67)

Nous obtenons la force totale par addition des deux forces.

- Force transversale totale :

$$F_Y = F_{YAV} + F_{YAR} = -D_{AV}(\delta_{AVG} + \delta_{AVD}) - D_{AR}(\delta_{ARG} + \delta_{ARD}) \quad (\text{Equation N}^\circ 68)$$

avec :

- D_{AV} = rigidité de dérive (sous charge) des pneus avant,
- D_{AR} = rigidité de dérive (sous charge) des pneus arrière,
- δ_{AVG} = angle de dérive du pneu avant gauche,
- δ_{AVD} = angle de dérive du pneu avant droit,
- δ_{ARG} = angle de dérive du pneu arrière gauche,
- δ_{ARD} = angle de dérive du pneu arrière droit.

A partir de cette équation, il est possible de calculer l'angle de dérive sur chaque pneu. Cet angle est donné par l'équation suivante :

$$\sin \delta_i = \frac{V_{M1/R0}^{\vec{M1}} \cdot \vec{Y}}{|V_{M1/R0}^{\vec{M1}}|} \quad (\text{Equation N}^\circ 69)$$

L'angle de dérive est calculé à partir de la vitesse du point M_1 dans le repère R_0 .

La force transversale s'exerçant sur une roue est proportionnelle à l'angle que fait le plan de la roue avec la vitesse absolue du point de contact du pneu avec le sol.

Nous calculons les angles de dérive respectifs pour chaque pneu, sans linéarisation.

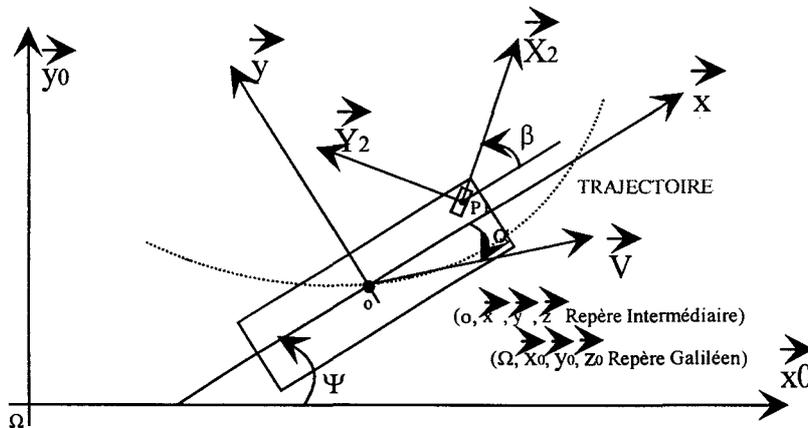


Figure 2.1-14. Définition des angles et des repères

Nous considérons les mouvements dans les plans des repères suivants :

- $R_0(\Omega, x_0, y_0, z_0)$
- $R_1(O, x, y, z)$
- $R_2(P_1, X_2, Y_2, Z_2)$

Soient les angles :

$$\left(\vec{\Omega} \times \vec{O}, \vec{O}x \right) = \psi ; \text{ angle de lacet (ou angle de cap),}$$

$$\left(\vec{O}x, P_1 \vec{X}_2 \right) = \alpha_G ; \text{ braquage des roues avant,}$$

$$\left(\vec{O}x, \vec{V} \right) = \alpha ; \text{ angle de dérive du véhicule.}$$

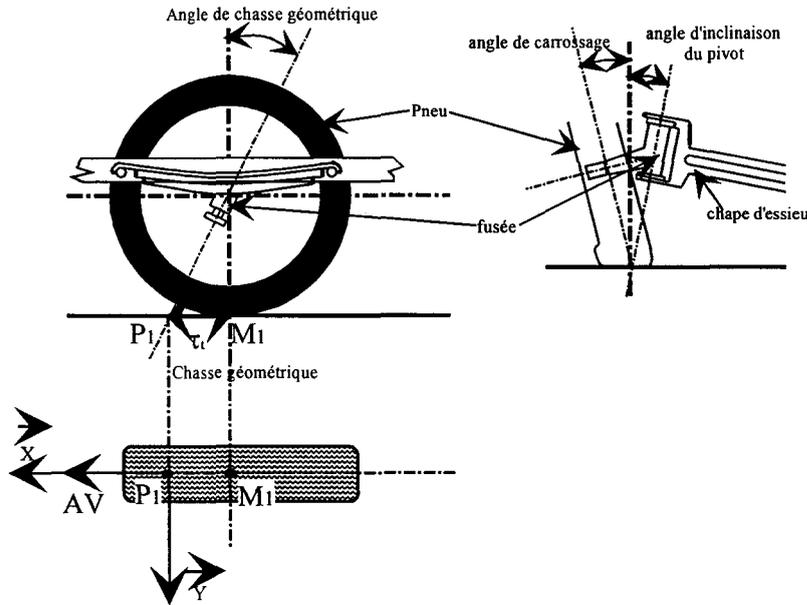


Figure 2.1-15 . Chasse géométrique

Dans le reste de l'étude nous ne tenons pas compte de l'angle de carrossage des roues avant. Angle que fait le plan d'une roue avec la verticale passant par le point de contact roue-sol.

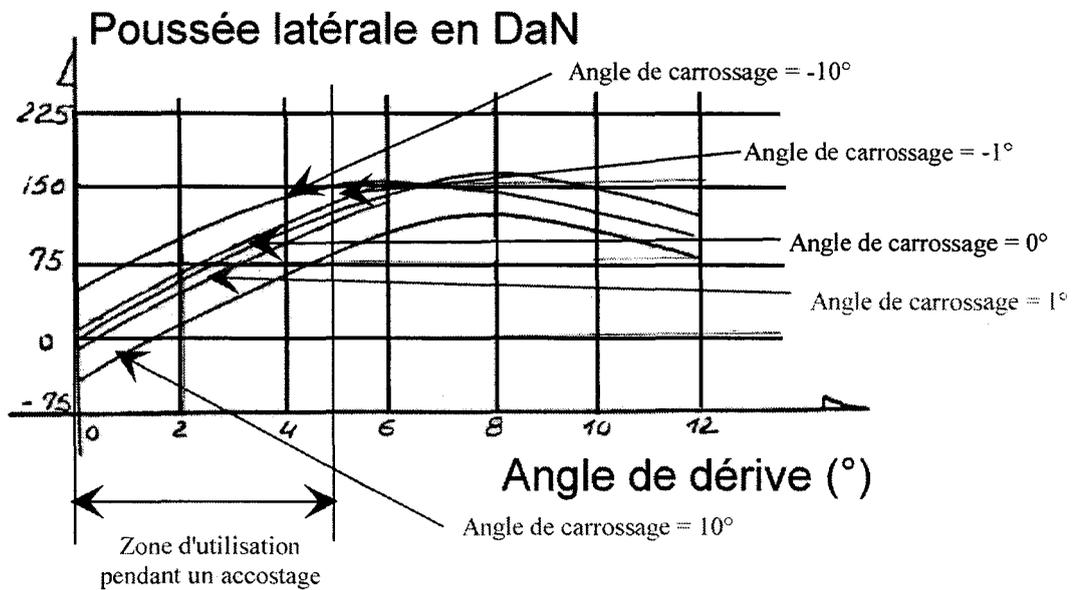


Figure 2.1-16 . Angle de carrossage

L'importance apporté dans cette modélisation à l'angle de dérive suggère que soit évoquée l'influence de l'angle de carrossage sur la valeur de l'angle de dérive. La figure 2.1-16 montre la nature du phénomène :

- un carrossage positif réduit les poussées de dérive, donc il peut compenser partiellement ou totalement la force opposée liée au dérive du véhicule
- un carrossage négatif augmente au contraire la poussée de dérive, ainsi la valeur maximale peut être sensiblement conservée.

Dans le cas de la modélisation d'un autobus R312 et d'après les données techniques du constructeur, l'angle de carrossage au maximum est égal à 1° lorsque le braquage de la roue est à son maximum soit 50° . Dans la phase expérimentale, nos relevés de braquage de l'angle présent sur les roues du véhicule n'ont pas dépassé 10° , ce qui implique un angle de carrossage maximum de $0,2^\circ$. D'une façon générale, les courbes de la poussée en fonction des angles de dérives montrent que lors d'un accostage la valeur de l'angle de dérive reste dans la zone linéaire (figure 2.1-16). Ce qui implique pour l'angle de dérive une valeur inférieure à 5° . D'après nos mesures, cet angle de carrossage provoque sur la valeur de la dérive une variation maximale de $0,03^\circ$. Cette variation est nettement négligeable devant la valeur de l'angle de dérive qui est de 5° .

Pour les roues avant, il y a lieu de distinguer le pivot P_1 (intersection de l'axe des pivots avec le sol) du point M_1 (milieu de l'aire de contact).

Calculons les vitesses (absolues) des points de contact des pneus avec le sol.

Soit M_1 le point de contact avec le sol, le vecteur vitesse a pour expression :

$$\vec{V}_M = \vec{V}_T = \omega R \vec{T} \quad (\text{Equation N}^\circ 70)$$

Ainsi \vec{V}_M peut être considéré comme le moment en M d'un vecteur $\vec{\Omega}$ porté par l'axe orienté (Oz).

$$\vec{V}_M = \vec{M}O \wedge \vec{\Omega} \quad (\text{Equation N}^\circ 71)$$

ou :

$$\vec{V}_M = \vec{\Omega} \wedge \vec{O}M \quad (\text{Equation N}^\circ 72)$$

$\vec{\Omega}$ vecteur glissant qui caractérise la rotation.

De cette équation, nous pouvons déduire les équations suivantes.

La vitesse du point M_1 dans le repère (R_0) s'écrit :

$$\vec{V}_{(R_0)}^{M_1} = \vec{V}_{(R_1)}^{M_1} + \vec{V}_{(R_1/R_0)}^{M_1} \quad (\text{Equation N}^\circ 73)$$

$$\text{avec } \vec{V}_{(R_1)}^{M_1} = \vec{V}_{(R_2)}^{M_1} + \vec{V}_{(R_2/R_1)}^{M_1} \quad (\text{Equation N}^\circ 74)$$

Comme la vitesse du point M_1 dans le repère R_2 est nulle, nous obtenons : $\vec{V}_{(R_2)}^{M_1} = \vec{0}$

$$\text{d'où } \vec{V}_{(R_1)}^{M_1} = \vec{V}_{(R_2)}^{M_1} + \vec{V}_{(R_2/R_1)}^{M_1} = \vec{0} + \vec{\Omega} \wedge P_1 \vec{M}_1 + \vec{V}_{(R_2/R_1)}^{P_1} \quad (\text{Equation N° 75})$$

qui peut encore s'écrire ainsi :

$$\vec{V}_{(R_1)}^{M_1} = \vec{V}_{(R_2)}^{M_1} + \vec{V}_{(R_2/R_1)}^{M_1} = \vec{0} + M_1 P_1 \wedge \vec{\omega}_{R_2, R_1} + \vec{V}_{(R_2/R_1)}^{P_1} \quad (\text{Equation N° 76})$$

Nous rappelons que la vitesse du point M_1 dans le repère (R_0) s'écrit :

$$\vec{V}_{(R_0)}^{M_1} = \vec{V}_{(R_1)}^{M_1} + \vec{V}_{(R_1/R_0)}^{M_1} \quad (\text{Equation N° 77})$$

En remplaçant les variables par leurs valeurs, nous obtenons :

$$\vec{V}_{(R_0)}^{M_1} = M_1 P_1 \wedge \vec{\omega}_{R_2, R_1} + \underbrace{\vec{V}_{(R_2/R_1)}^{P_1}}_0 + \vec{V}_{(R_1/R_0)}^G + M_1 C_G \wedge \vec{\omega}_{R_1, R_0} \quad (\text{Equation N° 78})$$

$$\vec{V}_{(R_0)}^{M_1} = M_1 P_1 \wedge \vec{\omega}_{R_2, R_1} + \vec{V}_{(R_1/R_0)}^G + M_1 C_G \wedge \vec{\omega}_{R_1, R_0} \quad (\text{Equation N° 79})$$

$$\vec{V}_{(R_0)}^{M_1} = M_1 P_1 \wedge \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\alpha}_G \end{pmatrix} + \vec{V}_{(R_1/R_0)}^G + M_1 C_G \wedge \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \psi \end{pmatrix} \quad (\text{Equation N° 80})$$

Calcul des vecteurs $\vec{M}_1 P_1$, $\vec{M}_1 C_G$ (C_G centre de gravité).

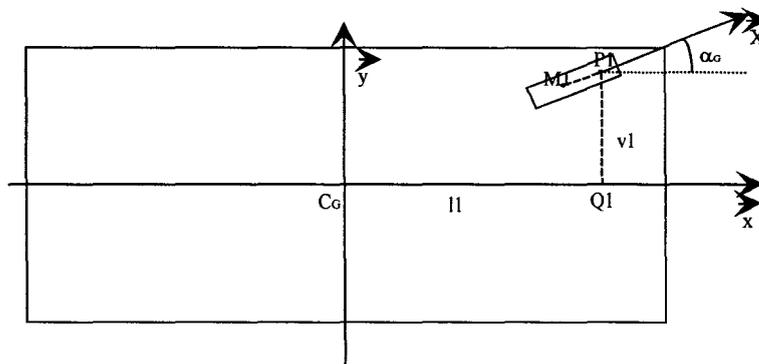


Figure 2.1-17. Définition des vecteurs

$$\vec{M}_1 C_G = \vec{M}_1 P_1 + \vec{P}_1 Q_1 + \vec{Q}_1 C_G \quad (\text{Equation N° 81})$$

Donc :

$$\vec{M}_1 \vec{C}_G = \tau_t \vec{X} - v_1 \vec{y} - l_1 \vec{x} \quad (\text{Equation N}^\circ 82)$$

avec :

$$\vec{X} = \cos \alpha_G \vec{x} + \sin \alpha_G \vec{y} \quad (\text{Equation N}^\circ 83)$$

nous obtenons

$$\vec{M}_1 \vec{C}_G = \tau_t \left(\cos \alpha_G \vec{x} + \sin \alpha_G \vec{y} \right) - v_1 \vec{y} - l_1 \vec{x} \quad (\text{Equation N}^\circ 84)$$

ou

$$\vec{M}_1 \vec{C}_G = (\tau_t \cos \beta - l_1) \vec{x} + (\tau_t \sin \beta - v_1) \vec{y} \quad (\text{Equation N}^\circ 85)$$

Calcul de $\vec{M}_1 \vec{P}_1$

$$\vec{M}_1 \vec{P}_1 = \tau_t \cos \alpha_G \vec{x} + \tau_t \sin \alpha_G \vec{y} \quad (\text{Equation N}^\circ 86)$$

Nous pouvons maintenant revenir au calcul de la vitesse $\vec{V}_{M1/R0}^{M1}$

$$\vec{V}_{(R0)}^{M1} = \vec{M}_1 \vec{P}_1 \wedge \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\alpha}_G \end{pmatrix} + \vec{V}_{(R1/R0)}^G + \vec{M}_1 \vec{C}_G \wedge \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \quad (\text{Equation N}^\circ 76)$$

L'expression de la vitesse $\vec{V}_{M1/R0}^{M1}$ devient :

$$\vec{V}_{(R0)}^{M1} = \begin{vmatrix} \tau_t \cos \alpha_G & 0 & V \cos \alpha & \tau_t \cos \alpha_G - l_1 & 0 \\ \tau_t \sin \alpha_G & 0 & V \sin \alpha & \tau_t \sin \alpha_G - v_1 & 0 \\ 0 & \dot{\alpha}_G & 0 & 0 & \dot{\psi} \end{vmatrix} \quad (\text{Equation N}^\circ 87)$$

$$\vec{V}_{(R0)}^{M1} = \begin{vmatrix} \tau_t \dot{\beta} \sin \beta & V \cos \alpha & (\tau_t \sin \beta - v_1) \dot{\psi} \\ -\tau_t \dot{\beta} \cos \beta & V \sin \alpha & -(\tau_t \cos \beta - l_1) \dot{\psi} \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (\text{Equation N}^\circ 88)$$

Soit la relation de la vitesse :

$$\vec{V}_{(R0)}^{M1} = \begin{vmatrix} \tau_t \dot{\alpha}_G \sin \alpha_G + V \cos \alpha + (\tau_t \sin \alpha_G - v_1) \dot{\psi} \\ -\tau_t \dot{\alpha}_G \cos \alpha_G + V \sin \alpha - (\tau_t \cos \alpha_G - l_1) \dot{\psi} \\ 0 \end{vmatrix} \quad (\text{Equation N}^\circ 89)$$

avec :

l_1 : empattement avant,

v_1 : demi-voie avant,

τ_t : chasse géométrique,

V : vitesse du centre de gravité du véhicule sur sa trajectoire,

α : angle de dérive général,

α_G : angle de braquage de la roue avant gauche.

L'angle de dérive δ_i que fait cette vitesse avec \vec{X} (plan de la roue) est précisément l'angle de dérive.

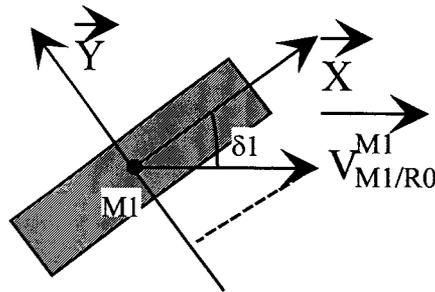


Figure 2.1-18. Définition de l'angle de dérive

Projetons $V_{M1/R0}^{\vec{M1}}$ sur l'axe \vec{Y} (axe de la roue).

$$\begin{aligned} V_{(R0)}^{\vec{M1}} * \vec{Y} &= \left(\tau_t \dot{\alpha}_G \sin \alpha_G + V \cos \alpha + (\tau_t \sin \alpha_G - v_1) \dot{\psi} \right) \vec{x} \vec{Y} \\ &+ \left(-\tau_t \dot{\alpha}_G \cos \alpha_G + V \sin \alpha - (\tau_t \cos \alpha_G - l_1) \dot{\psi} \right) \vec{y} \vec{Y} \end{aligned}$$

(Equation N° 90)

En remplaçant

$$\vec{X} = \cos \alpha_G \vec{x} + \sin \alpha_G \vec{y}$$

(Equation N° 91)

et

$$\vec{Y} = -\sin \alpha_G \vec{x} + \cos \alpha_G \vec{y},$$

(Equation N° 92)

Nous obtenons :

$$\vec{x} \vec{Y} = -\sin \alpha_G \underbrace{\vec{x} \vec{x}}_1 + \cos \alpha_G \underbrace{\vec{y} \vec{x}}_0 = -\sin \alpha_G$$

(Equation N° 93)

et

$$\vec{y} \vec{Y} = -\sin \alpha_G \underbrace{\vec{x} \vec{y}}_0 + \cos \alpha_G \underbrace{\vec{y} \vec{y}}_1 = \cos \alpha_G$$

(Equation N° 94)

L'équation de $V_{M1/R0}^{\vec{MI}}$ devient :

$$V_{(R0)}^{\vec{MI}} * \vec{Y} = - \left(\tau_t \dot{\alpha}_G \sin \alpha_G + V \cos \alpha + (\tau_t \sin \alpha_G - v_1) \dot{\psi} \right) \sin \alpha_G$$

(Equation N° 95)

$$+ \left(-\tau_t \dot{\alpha}_G \cos \alpha_G + V \sin \alpha - (\tau_t \cos \alpha_G - l_1) \dot{\psi} \right) \cos \alpha_G$$

Nous calculons maintenant les angles de dérive pour chacune des roues.

Ces équations sont de la forme suivante.

- Angle de dérive du pneu avant gauche :

$$\sin \delta_{AVG} = \frac{V(\sin \alpha \cos \alpha_G - \cos \alpha \sin \alpha_G) + \dot{\psi}(\sin \alpha_G(v_1 - \tau_t \sin \alpha_G) + \cos \alpha_G(l_1 - \tau_t \cos \alpha_G)) - \tau_t \dot{\alpha}_G}{\left\{ \left(\tau_t \dot{\alpha}_G \sin \alpha_G + V \cos \alpha + \dot{\psi}(\tau_t \sin \alpha_G - v_1) \right)^2 + \left(-\tau_t \dot{\alpha}_G \cos \alpha_G + V \sin \alpha - \dot{\psi}(\tau_t \cos \alpha_G - l_1) \right)^2 \right\}^{1/2}}$$

(Equation N° 96)

- Angle de dérive du pneu avant droit :

$$\sin \delta_{AVD} = \frac{V(\sin \alpha \cos \alpha_D - \cos \alpha \sin \alpha_D) + \dot{\psi}(\sin \alpha_D(-v_1 - \tau_t \sin \alpha_D) + \cos \alpha_D(l_1 - \tau_t \cos \alpha_D)) - \tau_t \dot{\alpha}_D}{\left\{ \left(\tau_t \dot{\alpha}_D \sin \alpha_D + V \cos \alpha + \dot{\psi}(\tau_t \sin \alpha_D + v_1) \right)^2 + \left(-\tau_t \dot{\alpha}_D \cos \alpha_D + V \sin \alpha - \dot{\psi}(\tau_t \cos \alpha_D - l_1) \right)^2 \right\}^{1/2}}$$

(Equation N° 97)

- Angle de dérive du pneu arrière gauche :

$$\sin \delta_{ARG} = \frac{V \sin \alpha - l_2 \dot{\psi}}{\left\{ \left(V \cos \alpha - v_2 \dot{\psi} \right)^2 + \left(V \sin \alpha - l_2 \dot{\psi} \right)^2 \right\}^{1/2}}$$

(Equation N° 98)

avec : $v_1 = \frac{l''}{2}$ et $v_2 = \frac{l}{2}$

- Angle de dérive du pneu arrière droit :

$$\sin \delta_{ARD} = \frac{V \sin \alpha - l_2 \dot{\psi}}{\left\{ \left(V \cos \alpha + v_2 \dot{\psi} \right)^2 + \left(V \sin \alpha - l_2 \dot{\psi} \right)^2 \right\}^{1/2}}$$

(Equation N° 99)

A ce stade de la modélisation, nous connaissons les angles de dérive des quatre roues par rapport au sol. Ces angles suffisent pour calculer notre modèle de simulation. Mais ils sont

donnés en fonction des angles (lacet et dérive totale du véhicule) que nous allons obtenir à la fin de la modélisation. Nous allons finir cette modélisation et calculer les moments extérieurs.

3.6.2 Détermination du moment de lacet

Le moment de lacet est égal à :

$$\vec{N} = \vec{OM}_1' \wedge \vec{F}_{1y} + \vec{OM}_2' \wedge \vec{F}_{2y} \quad (\text{Equation N° 100})$$

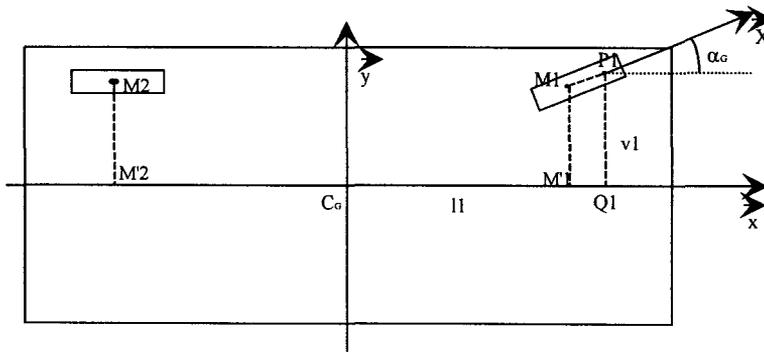


Figure 2.1-19 . Moment de lacet

En remplaçant \vec{OM}_1' et \vec{OM}_2' par leurs valeurs,

$$\vec{OM}_1' = \vec{OQ}_1 + \vec{Q}_1\vec{M}_1' = (l_1 - \tau_t \cos \alpha_G) \vec{x} \quad (\text{Equation N° 101})$$

et

$$\vec{OM}_2' = -l_2 \vec{x}, \quad (\text{Equation N° 102})$$

nous obtenons le moment de lacet égal à :

$$N = (l_1 - \tau_t \cos \alpha_G)(F_{YAVG} + F_{YAVD}) + l_2(F_{YARG} + F_{YARD}). \quad (\text{Equation N° 103})$$

3.6.3 Détermination du moment de roulis

Il est de la forme :

$$\vec{L} = -\left(K\theta + R\dot{\theta}\right) \vec{x}_1 \quad (\text{Equation N° 104})$$

ou,

R = viscosité en roulis des amortisseurs,

K = rigidité en roulis (ressorts + barres antiroulis).

Nous obtenons un modèle à trois degrés de liberté non linéaire.

3.7 FORMULATION MATHÉMATIQUE D'UN MODÈLE TRANSVERSAL

$$MV(\dot{\alpha} + \dot{\psi}) \cos \alpha + mh(\dot{\psi}^2 + \dot{\theta}^2) \sin \theta - mh\ddot{\theta} \cos \theta = -D_{AV}(\delta_{AVG} + \delta_{AVD}) - D_{AR}(\delta_{ARG} + \delta_{ARD})$$

(Equation N° 105)

$$I_X\ddot{\theta} - I_{XZ}\ddot{\psi} \cos \theta + (I_Z - I_Y)\dot{\psi}^2 \cos \theta \sin \theta - mhV(\dot{\alpha} + \dot{\psi}) \cos \alpha \cos \theta - mh^2 \cos \theta \sin \theta + mh^2\ddot{\theta} = -(K\theta + R\dot{\theta})$$

(Equation N° 106)

$$-I_{XZ}\ddot{\theta} + I_{XZ}\dot{\psi}^2 \cos \theta \sin \theta + I_Z\ddot{\psi} \cos \theta + (I_Y - I_X - I_Z)\dot{\psi}\dot{\theta} \sin \theta = (l_1 - \tau_t \cos \alpha_G)(F_{YAVG} + F_{YAVD}) + l_2(F_{YARG} + F_{YARD})$$

(Equation N° 107)

avec :

- M : masse totale du véhicule,
- m : masse suspendue,
- I_X : moment d'inertie autour de l'axe de roulis de la masse suspendue,
- I_Y : moment d'inertie autour de l'axe de tangage,
- I_Z : moment d'inertie autour de l'axe de lacet (total du véhicule),
- I_{XZ} : produit d'inertie de la masse suspendue,
- h : hauteur du centre de gravité par rapport à l'axe de roulis,
- l_1 : empattement avant,
- l_2 : empattement arrière,
- v_1 : demi-voie avant,
- v_2 : demi-voie arrière,
- τ_t : chasse géométrique,
- D_{AV} : rigidité de dérive (sous charge) d'un pneu avant,
- D_{AR} : rigidité de dérive (sous charge) d'un pneu arrière,
- R : viscosité en roulis des amortisseurs,
- K : rigidité en roulis (ressorts + barres anti-roulis),
- V : vitesse du centre de gravité du véhicule sur sa trajectoire,
- δ_i : angle de dérive des pneumatiques,
- F_{yi} : force transversale exercée sur les pneumatiques.

Nous allons faire la linéarisation et simplifier ces équations. En effet, après examen de la bibliographie [PEN et al - 2.92], les modèles linéaires n'expliquent pas certains comportements paradoxaux des véhicules automobiles. Ils apparaissent lors de manoeuvres dites "limites", (par exemple, lors de virages rapides en contre-braquage "contrôlé" ou lors de tête-à-queue). Mais, très rares sont les conducteurs d'autobus qui amorcent leur accostage en contre-braquage ou le finissent en tête-à-queue. Donc, dans cette modélisation, nous utilisons la théorie linéaire (principes de proportionnalité et de superposition). Lorsque le conducteur braquera le volant à droite, l'autobus virera à droite (quelle que soit la vitesse d'évolution). De même, si le braquage est deux fois plus important, l'autobus virera deux fois plus vite pour une même vitesse d'évolution.

3.8 LINEARISATION DU MODELE TRANSVERSAL

Nous passons à la linéarisation et la simplification des équations du modèle.

Nous écrivons les nouvelles hypothèses suivantes :

- τ_t , chasse géométrique faible ≈ 0 , en effet la chasse géométrique est égale à 0,011 m dans le cas de l'autobus R312. Nous avons calculé la différence entre l'angle de dérive avant et après simplification. La différence maximale est de $\# 0,000115^\circ$, ce qui représente une erreur de $5,83 \cdot 10^{-3} \%$ sur le calcul de l'angle de dérive du pneu avant,
- α , angle de dérive petit : $\alpha < 5^\circ$, donc $\cos\alpha = 1$, et $\sin\alpha = \alpha$, (en radians),
- θ , angle de roulis faible : $\theta < 5^\circ$, donc $\cos\theta = 1$, et $\sin\theta = \theta$, (en radians),
- α_G , angle de commande présent sur la roue avant gauche petit : $\alpha_G < 10^\circ$, donc $\cos\alpha_G = 1$, et $\sin\alpha_G = \alpha_G$, (en radians),
- δ_i , angle de dérive présent sur les roues avant, et arrière petit : $\delta_i < 5^\circ$, donc $\cos\delta_i = 1$, et $\sin\delta_i = \delta_i$, (en radians),

$$- \left| \vec{V}_{M1/R0}^{M1} \right| \cong V.$$

En négligeant les termes de puissance supérieure à 1 pour linéariser le modèle, les équations deviennent :

Equations générales :

$$\left(M \cdot V + \frac{2 \cdot D_{AV}}{V} \cdot l_1 + \frac{2 \cdot D_{AR}}{V} \cdot l_2 \right) \cdot \dot{\psi} - m \cdot h \cdot \ddot{\theta} + M \cdot V \cdot \dot{\alpha} + (2 \cdot D_{AV} + 2 \cdot D_{AR}) \cdot \alpha = 2 \cdot D_{AV} \cdot \alpha_G$$

(Equation N° 108)

$$-I_{xz} \cdot \ddot{\psi} - m \cdot h \cdot V \cdot \dot{\psi} + (m \cdot h^2 + I_x) \cdot \ddot{\theta} - R \cdot \dot{\theta} + K \cdot \theta - m \cdot h \cdot V \cdot \alpha = 0$$

(Equation N° 109)

$$I_z \cdot \ddot{\psi} + 2 \cdot \left(\frac{D_{AV}}{V} \cdot l_1^2 + \frac{D_{AR}}{V} \cdot l_2^2 \right) \cdot \dot{\psi} - I_{xz} \cdot \ddot{\theta} + 2 \cdot (D_{AV} \cdot l_1 + D_{AR} \cdot l_2) \cdot \alpha = 2 \cdot D_{AV} \cdot l_1 \cdot \alpha_G$$

(Equation N° 110)

Nous calculons maintenant les angles de dérive pour chacune des roues.

- Angle de dérive du pneu avant gauche :

$$\delta_{AVG} = \frac{V(\alpha - \alpha_G) + v_1 \alpha_G \dot{\psi} + l_1 \dot{\psi}}{V},$$

(Equation N° 111)

- Angle de dérive du pneu avant droit :

$$\delta_{AVD} = \frac{V(\alpha - \alpha_D) - v_1 \alpha_D \dot{\psi} + l_1 \dot{\psi}}{V},$$

(Equation N° 112)

- Angle de dérive du pneu arrière gauche :

$$\delta_{\text{ARG}} = \frac{V\alpha - l_2 \dot{\psi}}{V}, \quad (\text{Equation N}^\circ 113)$$

$$\text{avec : } v_1 = \frac{l_1''}{2} \text{ et } v_2 = \frac{l_2}{2}$$

- Angle de dérive du pneu arrière droit:

$$\delta_{\text{ARD}} = \frac{V\alpha - l_2 \dot{\psi}}{V}. \quad (\text{Equation N}^\circ 114)$$

Il reste à déterminer l'évolution temporelle de l'angle de dérive et de l'angle de lacet. Les relations recherchées sont de la forme suivante : $\psi(t) = f(\alpha_G(t))$ et $\alpha(t) = f(\alpha_G(t))$.

Nous considérons le système des trois équations de l'équilibre transversal de l'autobus. Nous supposons que le braquage des roues avant est constant : $\alpha_G(t) = \alpha_{G0} = \text{cst}$

Dans le cas d'un véhicule sous-vireur et à vitesse faible, la valeur de l'angle de roulis est finie et constante [PHA - 83-84] : $\ddot{\theta} = 0$, $\dot{\theta} = 0$, $\theta = \theta_0$.

Nous obtenons le nouveau système d'équations suivant :

$$\left(M.V + \frac{2.D_{\text{AV}}}{V} \cdot l_1 + \frac{2.D_{\text{AR}}}{V} \cdot l_2 \right) \cdot \dot{\psi} + M.V \cdot \dot{\alpha} + (2.D_{\text{AV}} + 2.D_{\text{AR}}) \cdot \alpha = 2.D_{\text{AV}} \cdot \alpha_G \quad (\text{Equation N}^\circ 115)$$

$$-I_{\text{xz}} \cdot \ddot{\psi} - m.h.V \cdot \dot{\psi} + K \cdot \theta - m.h.V \cdot \dot{\alpha} = 0 \quad (\text{Equation N}^\circ 116)$$

$$I_z \cdot \ddot{\psi} + 2 \cdot \left(\frac{D_{\text{AV}}}{V} \cdot l_1^2 + \frac{D_{\text{AR}}}{V} \cdot l_2^2 \right) \cdot \dot{\psi} + 2 \cdot (D_{\text{AV}} \cdot l_1 + D_{\text{AR}} \cdot l_2) \cdot \alpha = 2.D_{\text{AV}} \cdot l_1 \cdot \alpha_G \quad (\text{Equation N}^\circ 117)$$

Après l'intégration du système d'équations linéarisées [DEB et al - 3-95], nous accédons à l'évolution temporelle des deux variables du système [DEB et al - 4-95] en fonction du braquage de la roue avant gauche, en posant :

$$- a = -\frac{l_1 \cdot M \cdot V}{I_z} + \frac{2.D_{\text{AR}} \cdot l_2 \cdot (l_2 - l_1)}{V \cdot I_z}, \quad (\text{Equation N}^\circ 118)$$

$$- b = \frac{l_1^2 \cdot D_{\text{AV}} + l_2^2 \cdot D_{\text{AR}}}{V \cdot I_z} + \frac{D_{\text{AV}} + D_{\text{AR}}}{M \cdot V}, \quad (\text{Equation N}^\circ 119)$$

$$- c = -\frac{2(l_1 \cdot D_{\text{AV}} + l_2 \cdot D_{\text{AR}})}{I_z} + \frac{4 \cdot D_{\text{AV}} \cdot D_{\text{AR}} \cdot (l_2 - l_1)^2}{M \cdot V^2 \cdot I_z}, \quad (\text{Equation N}^\circ 120)$$

$$- d = \frac{a}{c}, \quad (\text{Equation N}^\circ 121)$$

$$- e = -d, \quad (\text{Equation N}^\circ 122)$$

$$- f = 1 - 2 \cdot b \cdot \frac{a}{c}, \quad (\text{Equation N}^\circ 123)$$

$$- g = -2 \cdot D_{AR} \cdot \frac{(l_2 - l_1)}{I_Z}, \quad (\text{Equation N}^\circ 124)$$

$$- h = \frac{g}{c}, \quad (\text{Equation N}^\circ 125)$$

$$- i = \frac{1}{c} - 2 \cdot \frac{b \cdot g}{c^2}, \quad (\text{Equation N}^\circ 126)$$

$$- j = -i, \quad (\text{Equation N}^\circ 127)$$

$$- l = 4 \cdot \frac{b^2}{c^2} \cdot g - \frac{g}{c} - 2 \cdot \frac{b}{c}, \quad (\text{Equation N}^\circ 128)$$

Nous obtenons, en fonction du temps et de l'angle présent sur la roue avant gauche, les formules suivantes.

- Angle de lacet,

$$\psi(t) = k_2 \left\{ h \cdot t + i + j \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{j} - b\right)^2 + (c - b^2)}{(c - b^2)}} \cdot e^{-b \cdot t} \cdot \sin\left(\sqrt{c - b^2} \cdot t + \rho\right) \right\} \quad (\text{Equation N}^\circ 129)$$

$$\text{avec : } \rho = \arctan\left(\frac{\sqrt{c - b^2}}{\frac{1}{j} - b}\right) \text{ et } k_2 = \alpha_G(t) \cdot 2 \cdot \frac{l_1 \cdot D_{AV}}{I_Z} \quad (\text{Equations N}^\circ 130 \text{ et } 131)$$

- Angle de dérive,

$$\alpha(t) = k \cdot \left\{ d + e \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{f}{e} - b\right)^2 + (c - b^2)}{(c - b^2)}} \cdot e^{-b \cdot t} \cdot \sin\left(\sqrt{c - b^2} \cdot t + \rho\right) \right\} \quad (\text{Equation N}^\circ 132)$$

$$\text{avec : } \rho = \arctan\left(\frac{\sqrt{c - b^2}}{\frac{f}{e} - b}\right) \text{ et } k = \alpha_G(t) \cdot 2 \cdot \frac{D_{AV}}{M \cdot V} \quad (\text{Equation N}^\circ 133 \text{ et } 134)$$

A partir de l'évolution temporelle de l'angle de dérive et de l'angle de lacet, nous déterminons les angles de dérive des roues avant et arrière. Nous obtenons la valeur du rayon

de courbure du modèle MOCA et ainsi, nous indiquons le déplacement horizontal, vertical et l'orientation de l'autobus.

La modélisation d'un autobus en phase d'accostage, réalisée ici, se base sur deux approches. Ainsi, le modèle transversal linéarisé permet une représentation d'état de la dynamique transversale. La prise en compte de la position des axes de roulis et de tangage et de leur évolution en fonction de l'écrasement des suspensions a été préférée à une modélisation des chaînes cinématiques de la suspension. Une approche entièrement comportementale est utilisée dans les modèles linéaires transversaux. La suspension complète est alors assimilée à une rigidité de roulis et à un amortissement de roulis.