

Chapitre

Nouveaux dispositifs de guidage mécanique et immatériel pour véhicules urbains sur pneus

1801

D. Aubert, J. L. Maupu, S. Ambellouis, D. Bied-Charreton

4.1. Introduction (J-L M.)

Un système de transport comprend deux ensembles qui coopèrent très étroitement : la flotte de véhicules et le réseau de voies. Ses performances et ses difficultés, ou ses coûts, dépendent beaucoup de la qualité des interfaces entre véhicule et voie, ainsi qu'entre le système et le territoire où il opère (voir le chapitre Liens entre ville et transport guidé). Et le guidage, qui est au cœur des interactions d'interface, peut avoir un impact considérable sur l'efficacité et l'attractivité du transport collectif à travers la capacité, la vitesse, le confort, la qualité du site propre (son tracé, sa position, ses priorités au carrefour et sa lisibilité), l'accessibilité en station, la sécurité, la propreté et le silence de la traction...

Il est difficile d'imaginer aujourd'hui un nouveau dispositif de guidage, tant sont lourdes les exigences fonctionnelles et les contraintes diverses qui pèsent sur son cahier des charges. Il doit, par exemple, être traversable à niveau et savoir converger et diverger (entrer et sortir), avec de bonnes disponibilité et sécurité. Par ailleurs se pose toujours la question délicate de la compatibilité avec les réseaux existants.

Les innovations concernent alors plus souvent les systèmes existants, en majorité ferroviaire, avec une grande diversité d'améliorations bien illustrée dans cet ouvrage.

Toutefois sont apparus de nouveaux guidages mécaniques et immatériels de véhicules urbains sur pneus, présentés ici. Une petite histoire des fonctions du guidage, liée à celle du roulement et de la traction, puis un petit détour par les atouts et limites de la technique ferroviaire nous permettront de mieux comprendre dans quels contextes s'exprime la pertinence de ces différentes innovations.

4.2. Fonctions du guidage (J-L M.)

4.2.1. Petite histoire du guidage

L'histoire du guidage montre l'évolution de ses fonctions en lien étroit avec les techniques de roulement et de traction. Dès les antiquités chinoise et romaine, les chariots sont parfois guidés par des ornières creusées dans la chaussée. Ceci impose un écartement normalisé des roues, encore d'actualité dit-on ! Le but semble être surtout de forcer leur trajectoire en particulier pour passer des portes ou des traversées piétonnières surélevées ou pour tourner dans les carrefours urbains.

Plus près de nous l'objectif du guidage devient l'amélioration de la productivité de la traction animale, voire humaine, avec la forte réduction de la résistance au roulement et de ses aléas, grâce au maintien des roues cerclées de fer sur deux poutres (tram) dures, lisses et propres, mais étroites pour une réalisation économique de la voie (tramway). Finis les bourbiers ou les nids-de-poule. Le roulement quitte le fond de l'ornière, trop vite sale, pour un rebord saillant, ou sommet de rail, et, par souci de symétrie ou réversibilité, chacune des roues est équipée d'un mentonnet ou boudin qui peut prendre appui sur la face interne de l'une des deux poutres. Le dispositif n'est déjà plus compatible avec le chemin ordinaire. Au début, il n'est guère accepté sur les routes ou dans les rues. Toutefois il devient traversable en enterrant les rails et en creusant le long de leurs champignons des gorges étroites pour recevoir le boudin. Et une invention fondamentale va le rendre universel : le rail mobile ou aiguille permet, sans même ralentir, de bifurquer ou converger pour constituer un réseau. Notons que la complexité des traversées et des aiguillages de certaines inventions a pu limiter leur diffusion : roulement sur monorail, véhicules suspendus, traction par câble ; guidages par petites roues horizontales, coussins d'air ou aimants prenant appui sur les surfaces verticales de murets ou glissières...

La faible résistance au roulement profite aux premiers moteurs de traction peu puissants, d'abord à vapeur, puis électriques et à explosion. La motorisation et le freinage progressent. L'attelage multiplié allonge le convoi. La vitesse, la capacité et le confort deviennent "inouïs", avec des gains si considérables qu'ils justifient le développement rapide d'un réseau propre sur emprises nouvelles. Dans un effort gigantesque, l'Europe du 19^e siècle se couvre de voies et d'ouvrages défiant le relief. Les villes se réorganisent autour des gares. Une nouvelle civilisation émerge...

Au début la voie est en bois, ses deux poutres s'habillant bientôt de fonte puis d'acier et le bois ne restant que pour les traverses... Et voilà que béton ou bitume constituent aujourd'hui la voie des systèmes sur pneus guidés ! Beau paradoxe, quand les pneus, avec le diesel, ont su si bien libérer le véhicule du rail en conservant certaines performances ! Pour comprendre l'intérêt de les guider, il faut se souvenir qu'ils constituent une liaison souple entre véhicule et sol, avec une faible pression et une bonne adhérence ; et il faut s'attarder sur les fonctions actuelles du guidage, libérées des anciennes contraintes techniques du roulement et de la traction.

4.2.2. Fonctions actuelles du guidage

La puissance étant devenue facile, ce qui nous intéresse à présent du guidage pour le transport urbain, c'est la garantie d'une trajectoire précise de tous les essieux, quel que soit leur nombre et en toutes situations probables. Elle concerne davantage les interfaces entre le système et la rue ou ses habitants. Les autres atouts du ferroviaire gardent leurs valeurs, surtout en interurbain : faible résistance à l'avancement, forte charge à l'essieu et grande à très grande vitesse. Si la puissance reste facile, l'énergie redevient rare.

La multiplication du nombre d'essieux guidés permet au véhicule d'offrir de grandes charge et surface utiles, soit trois possibilités simultanées : grande capacité, bon confort et petite emprise ou petit gabarit, en jouant sur la longueur. Elle permet aussi, avec une masse donnée du convoi, de réduire la charge à l'essieu pour réduire l'usure ou la fatigue, ou pour utiliser des petites roues ou des pneus...

Moins avare en surface ou masse, le véhicule accepte des loges de conduite plus confortables et davantage d'espace pour chaque voyageur et ses bagages, sacs, poussette et vélo, ou encore des surcharges exceptionnelles. Il accepte aussi des volumes techniques sur plancher bas, des auxiliaires encombrants ou lourds (climatisation, accumulateurs...), des renforcements de la résistance au choc...

La grande capacité permet d'assurer un bon débit avec un intervalle entre rames assez grand pour que deviennent crédibles la vraie priorité aux carrefours et la convivialité de la rue. L'accouplement en rame rend la capacité évolutive ou modulable en fonction de la demande sans trop toucher la fréquence optimale.

La précision de trajectoire pour tous les essieux et en toutes situations, réduit le gabarit dynamique de la rame et donc la largeur d'emprise du système (Gabarit Limite d'Obstacle ou GLO), qui, dans le tissu dense et contraint de la ville, facilite l'insertion de son site propre, en continu, en voie double, selon le tracé idéal et en position nominale, de préférence axiale pour faciliter les accès riverains. Elle améliore l'accessibilité des véhicules avec une lacune de 30 à 50 mm entre quai et plancher. Elle rend leur trajectoire prévisible par les autres usagers de la

rue. Elle permet un traitement esthétique de la plate-forme avec pierre ou gazon entre les pistes étroites de roulement, avec le fer comme avec le pneu.

Le rail métallique du guidage mécanique offre aussi un retour de courant par le sol qui simplifie la captation d'énergie. Avec une seule ligne aérienne de contact (LAC), nul besoin de guidage latéral des frotteurs, ni donc d'aiguillages aériens, ni de supports nombreux, surtout en courbe, et la perte de contact devient rare. De plus les poids et volume d'un stockage d'énergie embarqué pénalisent moins les véhicules à guidage mécanique moins limités en charge ou longueur. Ce stockage améliore la gestion de l'énergie et, sans perdre la propreté de l'électricité, il offre une autonomie partielle qui facilite la traversée de sites remarquables, la conception du dépôt, l'exploitation en mode dégradé (voir le chapitre sur l'autonomie embarquée)...

Le guidage réversible permet de supprimer les boucles de retournement encombrantes en terminus et d'exploiter partiellement la ligne en cas d'obstacle sur la voie. Enfin le guidage mécanique simplifie beaucoup l'automatisation du système.

4.3. Guidage mécanique (J-L M.)

4.3.1. Atouts et limites du ferroviaire urbain

Le gabarit dynamique précis est ici garanti en situation dégradée par la présence pour chaque essieu d'une butée latérale mécanique indépendante des aléas de l'adhérence des roues sur la piste : les boudins ou mentonnets constituent un rappel gravitaire. Les dérapages sont contrôlés ! La sécurité repose sur l'efficacité pérenne de cette butée. Chaque roue doit rester chargée. Son boudin ne doit ni se dérober, ni monter sur le rail. Il n'est en théorie qu'une butée qui corrige les limites du guidage nominal. En effet, le ferroviaire classique, avec les essieux monoblocs, biconiques et liés par paire, ne constitue pas une simple liaison mécanique mais un véritable asservissement en position par rapport à une trajectoire de consigne matérialisée par les rails : mesure d'écart, énergie, amplificateur et actionneur forment une boucle purement mécanique (voir le paragraphe sur la dynamique ferroviaire). Cet asservissement a des caractéristiques non linéaires étonnantes. Mais il n'est pas capable de suivre les courbes trop serrées. Le boudin y joue alors son rôle.

Les raideurs et adhérences au contact entre roue et rail confèrent à la technique ferroviaire ses qualités, comme la très faible résistance au roulement et l'absence d'échauffement, avec la forte capacité de charge ou la très grande vitesse. Mais elles peuvent compliquer les problèmes de prise de courbe, de patinage ou de vibration (bruit ; dilatation, usure ou fatigue des matériaux...). Elles s'avèrent alors peu adaptées aux tracés sinuex et à l'exploitation saccadée de certains contextes urbains. L'intérêt des rames capacitatives a alors conduit à développer des métros puis des tramways sur pneus. La concurrence du pneu a poussé le ferroviaire à s'améliorer en optimisant ses composants ou en développant de nouvelles architectures : essieux orientables ou pilotés, roues indépendantes, roues élastiques, rames articulées et autres. L'exigence du plancher bas pour un tramway plus accessible a aussi contraint à innover. Les solutions restent souvent sans suite, quand elles perdent les qualités essentielles de simplicité, de robustesse et d'auto-orientation des essieux monoblocs et biconiques et du bogie. Elles peuvent moins tolérer les défauts géométriques, modifier la nature de l'usure des profils de roue et rail et nécessiter une maintenance plus suivie pour garantir dans le temps le confort ou la sécurité. Et, même si des progrès ont été faits avec de belles astuces, parfois coûteuses, il reste souvent des problèmes de maîtrise des frottements secs, des déformations, des jeux et des usures. Il faut encore mettre en œuvre des voies sur dalle suspendue pour ne pas transmettre ses vibrations aux bâtiments riverains ; graisser les boudins en courbe pour éviter l'usure prématuée et les risques de déraillement ; sabler le rail pour ne pas patiner ; recourir aux patins magnétiques pour freiner en urgence ; usiner régulièrement les roues pour supprimer leurs petits "plats" ou reformer leurs boudins ; rectifier les rails pour gommer l'usure ondulatoire ou les recharger en matière ; réduire aussi la vitesse en entrée de courbe...

4.3.2. Métro et tramway sur pneus

Les phénomènes de force de dérive d'une roue et de saturation du contact, évoqués dans le paragraphe sur la dynamique ferroviaire, sont généraux. La raideur de dérive du pneu, bien que trente fois plus faible que celle du fer, à charge égale, lui donne le pouvoir de guider un véhicule. Et le pneu bénéficie d'une meilleure adhérence nominale. La dérive produit aussi dans l'aire de contact entre pneu et chaussée un moment stabilisant appelé "couple d'auto-alignement". Le pneu a également des souplesses, en toute direction, qui filtrent bien les défauts de voie de courte longueur ou les brutalités du pilotage. Mais son adhérence peut localement chuter sur piste polluée. Et il lui manque la capacité de s'orienter lui-même.

Il existe alors l'alternative du "pilotage" mécanique, voire ferré, d'un essieu équipé de pneus. Le principe général est simple (Voir la figure 1). Un rail central matérialise la consigne de trajectoire. Un palpeur le suit et pilote le braquage de l'essieu via une sorte de bras ou timon solidaire en lacet de l'essieu (sans jeu), tout comme

la rotule d'attelage suit le tracteur et pilote l'essieu d'une remorque. En termes de dynamique, les pneus produisent l'effort de guidage du véhicule : dès que l'essieu s'écarte de la trajectoire de consigne, le timon l'oblige à prendre un angle de dérive et donc à produire un effort de rappel. Comme la dérive - et donc la force de dérive - dépendent aussi de la vitesse transversale, le mouvement est naturellement amorti. Et un deuxième palpeur permet de limiter l'amplitude des louvoiements de l'essieu. Il est porté à l'arrière par un autre timon ayant du jeu par rapport à l'essieu. Quand le jeu du timon arrière est consommé, les deux palpeurs remplissent le rôle fondamental de butée transversale de guidage (comme sur la figure 1). Ils sont constitués de petits galets roulant sur le rail et munis de boudins en acier.

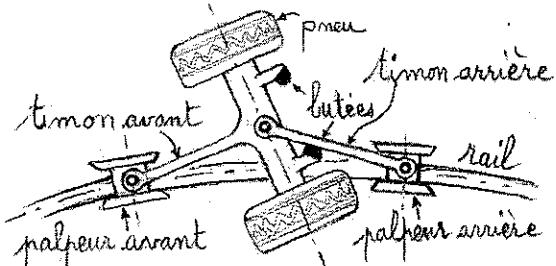
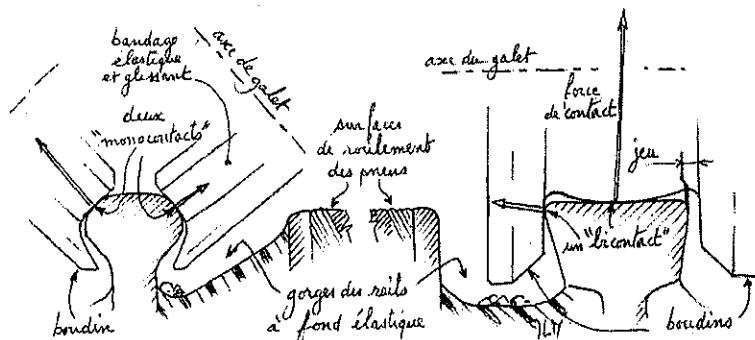


Figure 1. Schéma de principe général du pilotage ferré du pneu

Le support de voie ne vibre plus avec la faible charge des palpeurs rigides et la bonne souplesse des pneus chargés. Il peut rester du bruit, de l'usure et des instabilités, quand les galets sont à gorge profonde, roulent avec un jeu transversal, heurtent et frottent leurs boudins sur le bord du rail ou oscillent. Une paire de galets disposés en V sur le rail (fig. 2) supprime, sous effort nominal, le jeu transversal du palpeur et les instabilités qu'il pouvait engendrer. Ces galets inclinés pouvant être peu chargés et n'étant pas freinés, ils peuvent recevoir un petit bandage élastique et peu adhérent capable de supprimer le bruit à la source et d'atténuer l'usure. Le retour du courant par le rail nécessite alors un frotteur. Par ailleurs l'inclinaison des galets en V dispense de réaliser un pivot entre palpeur et timon, autre source de bruit et d'instabilités. Un anti-lacet par frottement peut jouer un rôle stabilisateur, mais il sollicite davantage les palpeurs.

Deux gorges ménagées de part et d'autre du rail reçoivent les boudins. Elles sont assez étroites pour être aussi facile à traverser qu'un rail à gorge de tramway classique. Avec le monorail peu chargé, l'appareil de voie, ou aiguillage, devient simple et de dimension réduite. L'asservissement est ici capable de suivre des courbes serrées (retournement de terminus, aiguillages des communications de voie et du dépôt...). Mais on ne descend guère en dessous de 10 ou 11 m de rayon pour limiter les angles entre caisses. Le dispositif peut devenir réversible : les deux timons avant et arrière sont articulés sur la traverse d'essieu et des cales actionnées par des vérins électriques permettent d'échanger leurs jeux et donc leurs rôles.



a. Galets en V

b. Galet à gorge

Figure 2. Schéma de principe du guidage des palpeurs sur le rail

En ferroviaire la sécurité au déraillement impose surtout de maintenir dans certaines limites le taux de déchargement des roues, l'angle du plan tangent au contact dans les boudins et leur adhérence. Comme ici les palpeurs sont volontairement déchargés, leurs mentonnets ne peuvent plus exercer leur rôle de butée avec la même géométrie (fig. 3). Et ils ne sont plus toujours capables de laminer un petit objet dur tombé dans une des gorges. Il faut user d'astuces comme celles de la paire de galets en V dont les boudins enserrent le rail ou comme le petit chasse corps sortant l'objet et sinon le fond de gorge élastoplastique, dans lequel peut s'enfoncer le petit objet dur.

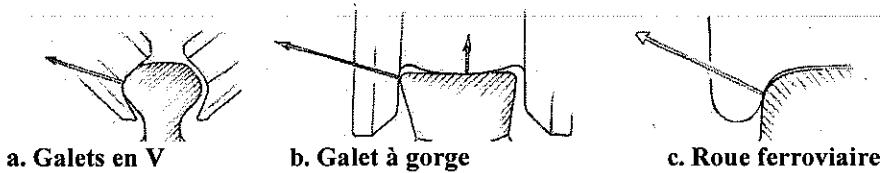


Figure 3 Efforts en butée de guidage

Le guidage en V a été étudié au Laboratoire des Technologies Nouvelles (LTN) de l'Inrets. Il a été retenu pour équiper le Translohr. Ce tramway sur pneus répond à un cahier des charges établi avec la participation du LTN (architecture et faisabilité technique entre autres). Il a été mis au point par le bureau d'étude dirigé par Jean-Luc André chez Lohr-Industrie. Il est exploité avec succès à Clermont-Ferrand et Padoue et retenu pour plusieurs projets en France, Italie, Chine, Espagne... Son guidage devrait bientôt équiper le nouveau métro automatique de Siemens.

Pour les métros sur pneus actuels, chaque bogie, ou essieu (VAL), est guidé par quatre roues horizontales, fixées aux quatre coins d'un cadre et prenant appui, avec une précontrainte, sur les faces verticales de deux rails latéraux. Ce dispositif n'utilise pas le pouvoir directeur des pneus dont l'action d'ailleurs le perturbe et peut réduire le confort. La précontrainte augmente la résistance au roulement. Il faut un guidage auxiliaire avec des mentonnets pour passer les aiguillages ou les traversées à niveau et pour garantir la précision de guidage en cas de crevaison d'une des roues. Ces mentonnets produisant les efforts de guidage du véhicule et d'orientation du bogie, ils ne peuvent agir que localement, seulement comme guidage auxiliaire, pour ne pas s'user trop vite. Enfin il faut une suspension transversale entre la caisse et les bogies ou essieux, pour filtrer les défauts inévitables de ces deux guidages. Ces divers inconvénients disparaissent avec le nouveau dispositif.

Il est tentant de profiter de la liberté apparente qu'offre les souplesses du pneu pour quitter le rail, afin d'économiser sa pose là où il est inutile ou mal accepté, d'étaler les investissements ou d'assouplir l'exploitation en situation dégradée. Mais on perd alors les qualités fonctionnelles du guidage mécanique, temporairement sur les tronçons en mode routier : la trajectoire précise et l'accostage en station. On perd surtout définitivement sur l'ensemble de la ligne : la grande capacité, incompatible avec les limitations de charge à l'essieu et de longueur des convois routiers, la modularité de l'accouplement en rame, la simplicité de la captation électrique... Autre paradoxe, cette "bimodalité" de pilotage peut compliquer l'exploitation et engendrer les situations dégradées dont elle voulait assouplir la gestion : les options et les changements de modes de fonctionnement sont toujours délicats à réaliser en sécurité et la présence permanente du volant, imposé par le code de la route, peut induire des surcharges dangereuses sur le guidage du premier palpeur.

4.3.1. Conclusion partielle

La butée mécanique caractérise donc les guidages mécaniques. Sans elle, d'ailleurs, pourquoi s'embêter à poser des rails solides ? Elle a un coût, mais un coût justifié par la valeur de ses fonctions, en particulier le gain de capacité des véhicules accompagnée de la réduction d'emprise du système. Elle différencie le guidage mécanique de la conduite automatique d'un bus qui peut toujours se déporter même sans défaillance du pilote, par exemple sous un grand vent traversier, sur un coup de frein ou un effort moteur mal réparti, un jour de mauvaise adhérence, surtout en courbe. Car à l'approche de son seuil de saturation, appelé poids adhérent, l'effort tangent au contact entre pneu et chaussée doit se partager vectoriellement entre ses composantes longitudinale (freinage ou traction) et transversale (guidage) : l'une croît aux dépens de l'autre. Et le poids adhérent est victime d'aléas (pollution avec lubrifiant, intempérie...). La sécurité et la disponibilité reposent alors sur une réserve en largeur de l'emprise (GLO) ou sur la vigilance et la compétence du conducteur, qui ne peut gérer un trop grand nombre d'essieux¹. Les gains en capacité et en emprise se trouvent donc limités.

Comme l'expression "pilotage automatique" est déjà utilisée pour désigner la commande des accélérations et freinages des métros, le contrôle non mécanique de la trajectoire est souvent appelé "guidage immatériel". Pourtant le pneu, qui produit l'effort de guidage, est bien matériel. Et d'ailleurs son flanc peut venir à faible vitesse en butée mécanique sur la bordure du quai d'une station, quand elle est bien dessinée. Et l'accostage ainsi permis, même en conduite manuelle, offre l'accès facile aux personnes dont la mobilité est réduite par un handicap ou un bagage.

¹ Le petit train touristique sur pneus n'est pas un bon contre-exemple : il est limité en longueur et en capacité, roule lentement sur des aires peu contraintes, n'a pas une trajectoire toujours précise, n'accoste pas un quai, ne sort pas les jours de grand vent ou mauvais temps...

4.4. Guidage immatériel 5,5 pages

Le guidage immatériel se caractérise par l'absence de liaison mécanique entre la trajectoire à suivre et un organe du véhicule. Ce qui le rend léger et simplifie l'installation de matériels fixes. Ces solutions sont donc économiques du point de vue de leur installation et de leur maintenance. La trajectoire est, dans ce cas, matérialisée par une « trace » implantée sur la chaussée. Son suivi sera difficile à mettre en œuvre pour des véhicules très longs tels un métro ou un train. Ce type de guidage est, par conséquent, dédié aux transports de petite et de moyenne capacité, c'est-à-dire aux bus, aux mini-bus et aux véhicules individuels, de préférence en site propre. Les avantages premiers d'un guidage immatériel sont sa légèreté et la simplicité des installations fixes qu'il requiert.

Mise à part la « trace », un système de guidage immatériel est aussi constitué d'un capteur associé à une unité de traitement permettant de détecter et de caractériser cette « trace », d'un actionneur sur la direction, essieux ou sur les roues ainsi que d'un dispositif de commande pour asservir la direction du véhicule sur la « trace » et d'une interface avec le conducteur.

4.4.1. Guidage immatériel et sécurité dans les transports en commun

4.4.1.1. Introduction

Un système de transport collectif urbain à guidage immatériel peut être vu comme une amélioration de l'autobus classique, ou bien comme la recherche d'un système de transport guidé beaucoup moins coûteux que le tramway. Le guidage immatériel de l'autobus présente de nombreux avantages :

- réduction de la lacune horizontale quai-véhicule en station ;
- allègement de la tâche du conducteur.

aa remarques DA autres : simplicité / rapidité de l'installation, recherche d'un guidage plus précise (confort sur les accélérations transversales et longitudinales), moins de bruit (rail, etc.), sécurité accrue, modification manuelle de la trajectoire en cas de problèmes (risque de collision, travaux, blocage), coût de l'installation et de la maintenance, subjectif : image (haute technicité, modernité), etc.

Par ailleurs, dans le cas où les quais sont à la même hauteur que le plancher des véhicules, un système de guidage immatériel permet d'assurer l'accessibilité du véhicule aux voyageurs et au Personnes à Mobilité Réduite.

Il faut noter que ces systèmes de guidage sont débrayables par le chauffeur notamment lorsque certaines situations à risque apparaissent. En entrant en mode manuel, le système offre ainsi une meilleure sécurité ou un meilleur déblocage du réseau lorsqu'un véhicule est immobilisé sur son site propre. Notons également que des véhicules peuvent faire appel à de tels systèmes uniquement lorsque cela s'avère nécessaire comme par exemple à l'approche des stations.

Inconvénients :

En France, l'autobus à guidage immatériel doit respecter la réglementation des véhicules routiers ainsi que celle des transports guidés. On applique donc le principe GAME et il faut l'intervention d'un EOQA en application du décret n° 2003-425 (voir chapitre **DBC** sur le contrôle de la sécurité).

Afin de garantir le niveau de sécurité du système, les conséquences d'une défaillance de chaque élément du système doit être considérées. Dans ce contexte, il ne s'agit pas seulement de connaître la précision du système lorsque les éléments fonctionnent correctement, il s'agit également de mesurer l'écart maximum qui peut être atteint lorsqu'un ou plusieurs de ces éléments sont défaillants. La solution est alors de définir gabarit limite d'obstacle (GLO) afin de garantir une marge de sécurité. Toutefois, il est important de noter que la mise en place d'un GLO augmente généralement l'emprise du véhicule sur la voirie.

4.4.1.2. Le bus à guidage optique de Renault et Siemens

Les grands principes de fonctionnement retenus par le constructeur Siemens STS sont les suivants :

- seul l'essieu avant est guidé ce qui signifie que le véhicule n'est pas monotrace ;
- quand le système de guidage devient inopérant, il avertit le conducteur par un signal sonore et lumineux, et celui-ci reprend le volant.

L'Événement Redouté (ER) qui a guidé les études de sécurité est précisément qu'il n'y ait pas d'avertissement du conducteur alors que le guidage automatique n'est plus opérationnel.

Le principe de ce guidage est le suivant :

- le marquage au sol est constitué de deux lignes blanches pointillées parallèles,
- à l'avant du véhicule, une caméra est orientée vers ces lignes blanches,
- cette caméra alimente en images un système de traitement de l'information qui fournit en sortie une consigne électrique à un moteur-couple mécaniquement solidaire de la direction. L'ensemble réalise un asservissement.
- Le guidage n'est opérationnel qu'en approche et en dégagement de station.

Ce traitement de l'information est contrôlé par un système redondant et toute divergence conduit à une alarme adressée au conducteur. Toute perte des lignes blanches (suite à des intempéries) conduit à cette même alarme ainsi qu'à la coupure de l'alimentation du moteur-couple.

Le conducteur est en charge de l'accélération et du freinage du véhicule et doit de ce fait rester très vigilant.

Les analyses de sécurité par Arbres de Causes se sont avérées être délicates car les taux de défaillance de certains capteurs (gyroscopes par exemple) sont très difficiles à établir. L'occurrence prévisionnelle de l'ER se situe entre 10^{-6} et 10^{-7} par heure.

Ce type de bus guidé est en service à Rouen, aa DA autre Italie, Bologne (Italie) et Las vegas (USA).

4.4.1.3. Le Phileas, autobus à guidage magnétique

Le Syndicat Mixte des Transports du Douaisis (SMTD, 59) a passé commande d'un système de type Phileas proche de celui déjà en service à Eindhoven aux Pays-Bas et construit par APTS. Pour la fonction guidage (c'est-à-dire « rester dans le gabarit »), les autorités Françaises veulent un système GAME par rapport à un tramway. Ceci conduit à retenir le niveau d'Intégrité de Sécurité SIL 4 de la norme EN 50129 pour les automatismes.

La chaussée est équipée de petits plots magnétiques (un tous les quatre mètres) que les capteurs du véhicule détectent. Un asservissement informatisé et sécurisé par des mécanismes de redondance assujettit alors la trajectoire du véhicule à cette ligne de plots. De plus, cette trajectoire est mémorisée dans les ordinateurs du bus. Tous les essieux sont guidés ce qui permet de réaliser un véhicule monotrace. À l'approche d'une station, des capteurs à ultra-son facilitent l'accostage par rapport au quai.

L'asservissement par rapport à la ligne fictive représentée par les plots, se fait dans une bande de largeur + ou - 15 cm. Dès que le véhicule sort de cette emprise, il y a déclenchement d'un frein de sécurité qui garantit que l'on ne sortira pas du Gabarit Limite d'Obstacle, le GLO.

En cas de défaillance du guidage automatique, il y a déclenchement d'un freinage automatique de service. Il va de soi que le conducteur est en charge de l'accélération et du freinage du véhicule. En cas d'action du conducteur sur le volant, le véhicule s'arrête automatiquement. Ceci peut se produire en cas de tentative d'évitement d'un obstacle imprévu.

Ce système, guidé tout au long de son parcours, a été rebaptisé Evéole à Douai ; il peut également être exploité en mode de guidage manuel, mais la vitesse doit alors être réduite. Il a été présenté aux usagers par le SMTD comme étant un tramway.

4.4.1.3. Conclusion

Cette brève présentation des deux types de guidage immatériel utilisés dans les transports en Commun en France montre deux approches conceptuelles très différentes. Dans le cas du guidage magnétique d'APTS, le véhicule est asservi tout au long de sa trajectoire et est intrinsèquement d'un niveau de sécurité SIL 4. Dans le cas du guidage optique avec traitement d'images de STS, le conducteur est averti et reprend la main en cas de défaillance des automatismes.

4.4.2. Guidage par vision

Le but de cette approche est de détecter et caractériser un marquage réfléchissant peint au sol servant de guide pour le système de contrôle latéral automatique du véhicule. Depuis les travaux de Dickmanns [Dic86] présentés en 1986, la littérature abonde de méthodes pour localiser les marquages routiers visibles dans une séquence d'images. C'est donc tout naturellement que des systèmes de transport collectif s'intéressent à cette technologie.

4.4.2.1. Principe

Outre l'actionneur et le dispositif de contrôle du véhicule, un système de guidage par vision est constitué d'une « trace » représentée par un marquage réfléchissant peint au sol, d'un capteur optique (1 ou 2 caméras noir et blanc ou couleur) regardant à l'avant du véhicule et d'une unité de traitement.

Trois phases caractérisent généralement le traitement :

- la mise en évidence de formes « marquage ». L'objectif est de localiser dans l'image l'emplacement des formes pouvant correspondre à des portions du marquage recherché. Pour ce faire l'algorithme de reconnaissance de formes va s'appuyer sur des caractéristiques du marquage telles que sa luminance, sa couleur et sa forme locale (largeur entre autres). Cependant, d'autres formes dans l'image peuvent avoir localement la signature d'un marquage.
- la recherche d'une cohérence globale. hypothèses « marquage » émises dans la phase étape consiste à rechercher le sous-ensemble alignement compatible avec un modèle marquage (généralement la projection polynôme ou d'une cloïde).
- la caractérisation du marquage dans la scène. dans l'image est rétro-projeté dans la scène pour expression dans le repère du véhicule. La « trace » est ensuite déterminée ainsi que la position relative du véhicule (angle de lacet et écart latéral) par rapport à cette dernière.



Parmi l'ensemble des précédentes, cette formant un longitudinal de perspective d'un

Le marquage localisé obtenir son géométrie de la

4.4.2.2. Avantages / inconvénients

L'avantage le plus flagrant de ce type d'approche est que la « trace », de même que sa mise en œuvre, sont compatibles avec l'existant. Ainsi, quelle que soit la forme du marquage, un chauffeur pourra sans problème se guider sur la « trace » dans le cas d'une reprise manuelle de la conduite. Il s'agit d'un dispositif passif nécessitant peu de travaux sur l'infrastructure.

Par ailleurs, la caméra offre un champ de vue étendu ce qui permet d'anticiper les variations de géométrie de la « trace ». Finalement, l'emploi de formes spécifiques de marquage permet de mieux le discriminer dans la scène, mais peut aussi servir à coder des informations selon le principe des « codes barres » ou servir de code d'erreur pour repérer des malveillances.

Il faut cependant pondérer le tableau idéal qui vient d'être brossé. En effet, plusieurs problèmes peuvent perturber le fonctionnement du système.

En premier lieu, le marquage peut être masqué partiellement (feuilles mortes, salissures) ou totalement (neige), présenter un contraste faible (marquage usé, route mouillée) ou être erroné (acte de malveillance). Il faut donc pouvoir garantir la détectabilité du marquage en utilisant la peinture appropriée (micro-billes de taille suffisantes pour la bonne perception du marquage sous une couche d'eau), en assurant une maintenance adéquate (nettoyage et entretien du marquage) et en proposant une redondance ou un codage d'information (dans le cas de navettes sans chauffeur).

Comme tout capteur optique, le signal issu de la caméra est perturbé par les conditions d'illumination et les perturbations atmosphériques. Il faut donc s'équiper d'une caméra présentant une dynamique et une sensibilité suffisantes, réaliser des algorithmes fiables fonctionnant correctement malgré ces perturbations et positionner la caméra derrière une zone nettoyée.

4.4.2.3. Dispositifs existants

Le système CIVIS est représentatif de cette technologie (voir figure 4).

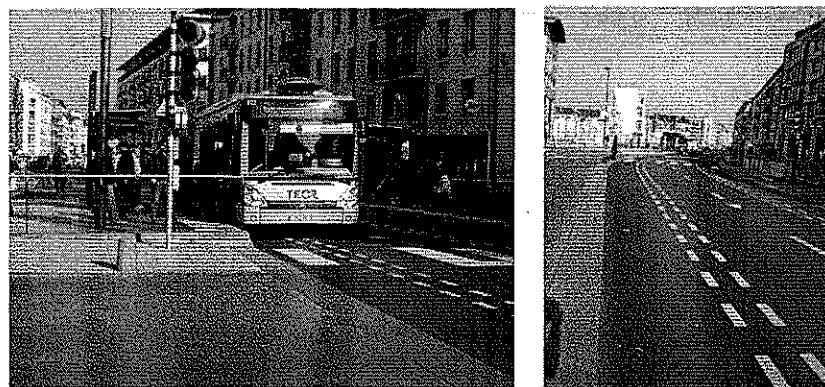


Figure 4. A gauche, un bus TEOR à un arrêt à Rouen. A droite, les marquages spécifiques du bus TEOR.

4.4.3. Guidage électro-magnétique

Le but de cette approche est de se positionner / localiser relativement à un champ électromagnétique.

4.4.3.1. Principe

- Câbles électriques

Dans cette technologie, la « trace » est matérialisée par le champ magnétique généré par un câble électrique alimentée en courant alternatif. Plusieurs magnétomètres placés sous le véhicule assurent la détection de ce signal. La tension mesurée est dépendante de la distance du capteur au câble. Connaissant la courbe d'atténuation il est aisément, après filtrage, d'en déduire la position relative du véhicule par rapport au câble et donc de se guider dessus.

- Marquages magnétiques

Il s'agit de la version passive (non alimentée) du dispositif précédent. Elle source d'alimentation, cas précédent. Elle électromagnétiques de nécessite pas de réaliser possible d'y coder des qui permet d'anticiper sur



- Plots magnétiques

C'est la version discrétisée du marquage magnétique. Le champ est ici généré par des aimants intégrés dans l'infrastructure. Le positionnement du véhicule relativement à la « trace » est estimé par des capteurs proprioceptifs (principalement odomètres). Ce positionnement est recalé à chaque détection d'un aimant, la distance entre les aimants étant de 1 à 4 mètres selon les systèmes. Là aussi il est possible de coder une information sur la géométrie future de la route en jouant sur les polarités positive et négative des aimants à l'aide d'un code binaire informatique.

- Transpondeurs

Une version plus sophistiquée du principe précédent réside dans le transpondeur. Ce dispositif intégré dans le sol permet de se positionner mais aussi de lire des informations (identifiant, caractéristique de la trajectoire à venir) via une antenne intégrée sous le véhicule. Dans ce cas le positionnement est estimé par de l'odométrie. La lecture d'un transpondeur permet de se recaler sur la cartographie préenregistrée de la trajectoire à suivre. Le positionnement est moins précis qu'avec les technologies précédentes compte tenu du délai de lecture du transpondeur et de la DA du principe de détection (à vérifier : on passe dessus ou non => précision dépendante de la surface de réception).

Remarque de Marc Heddebaut : pas nécessairement car les transpondeurs peuvent être télé-alimentés au passage des véhicules (balise KVB) et leur réponse est instantanée.

4.4.3.2. Avantages / inconvénients

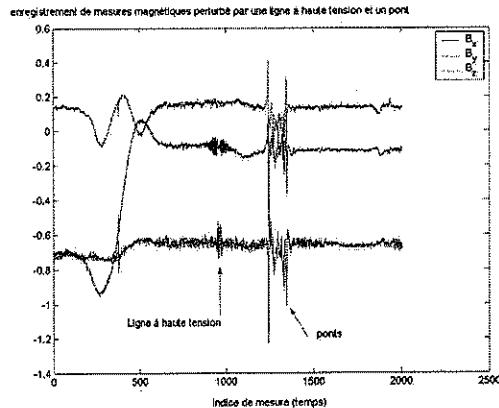
Le principal avantage de ce type de technologie est son insensibilité aux conditions d'illumination et aux perturbations atmosphériques. Ainsi le signal magnétique sera détectable à travers la neige ou une couche d'eau.

Par ailleurs, la précision de positionnement est généralement très bonne (sauf dans le cas des transpondeurs, à moins d'en multiplier le nombre). Ainsi, le positionnement peut-être de l'ordre de quelques millimètres. Cette précision dépend surtout de la hauteur de la tête de lecture par rapport à la source magnétique.

Si le signal n'est pas perturbé atmosphériques il est, par contre, perturbations électro-magnétiques tournant des roues, véhicule d'une ligne à haute tension, métallique, etc.). Il faudra donc ces perturbations et proposer un rapport signal/bruit suffisant sans ambiguïté.

L'autre inconvénient de ce est la nécessité, sauf pour le magnétique, de faire des trous transpondeur) ou des saignées dans la chaussée ce qui la fragilise autres, lors des forts gradients de température. Par ailleurs, il y a un risque de cassure du câble électrique au cours du temps.

Globalement et en opposition avec la technologie optique, la mesure est réalisée localement. On ne peut donc pas anticiper sur la géométrie future de la trajectoire, à moins d'un codage de l'information (en jouant sur les polarités des aimants ou sur l'enregistrement d'information dans la bande magnétique) ou d'une cartographie précise et préalable de l'itinéraire à suivre.



par les conditions sensibles aux (dynamo, champ polarisé, proximité passage sur un pont faire un relevé de dispositif présentant pour être détectable

type de technologie marquage (plot magnétique ou (câble électrique) localement, entre

4.4.3.3. Dispositifs existants

- Câbles électriques

Il y a eu une tentative d'exploitation de cette technologie sur un bus en Allemagne à Fürth il y a une vingtaine d'année.

Depuis cette technologie a été employée dans le cadre de transports très spécifiques. C'est le cas pour la navette routière du tunnel sous la manche ou dans pour le transport de golfeur le long de parcours au Japon (véhicule Yamaha).

- Marquages magnétiques

L'approche par marquage magnétique a récemment été étudiée dans le cadre du projet PREDIT ARCOS (Action de Recherche pour une CONduite Sécurisée). Aucun système existant n'exploite actuellement ce principe.

- Plots magnétiques

Le système PHILEAS est représentatif de cette technologie.

Remarque Marc Heddebaut : programme PATH(USA)

Par ailleurs et durant de nombreuses années, des navettes de la société Hollandaise FROG ont desservi, sans chauffeur à bord, les parkings de l'aéroport Schiphol en Hollande. La localisation de la navette est réalisée grâce à une carte et une estimation par odométrie. Les plots magnétiques servent au recalage. C'est maintenant la société 2get'there qui exploite cette technologie FROG et propose des « Parkshuttle » et des « Cybercar ».

- Transpondeurs

Aa DA à vérifier (ex. : port de Rotterdam)

[Dic86] Dickmanns E.D., Zapp A., *A curvature-based scheme for improving road vehicle guidance by computer vision*, In proceeding SPIE Mobile Robot Conf., Cambridge, MA, oct. 1986, pp161-168.

Embryon de texte

NB Il s'agit ici d'une exception, cf réunion du 16 mai où on avait dit qu'on accepterait que ce texte puisse au besoin être complété plus tard.

Dynamique ferroviaire JL Maupu, + ...

Le premier essieu pivotant du chariot d'origine routière déraille trop facilement, malgré ses boudins, à chaque erreur d'orientation et surtout le matériel n'est pas symétrique : il est abandonné. Les essieux ferroviaires sont donc liés par paire, en lacet et ballant de façon plus ou moins rigide, pour donner la voiture ou le wagon à deux essieux puis à deux bogies.

Les roues d'un essieu, dont un des boudins (ou mentonnets) force la trajectoire sans bien l'orienter (cas du bogie en courbe serrée), peuvent être soumises à des moments importants de renversement, proportionnels au rayon de roulement et aux forces transversales de contact (force de dérive décrite plus loin) bien plus importantes que la force utile du guidage dynamique de la charge. Les rails, écartés par les mêmes forces, doivent être fixés fermement sur des traverses communes. Les paliers (ou moyeux) des roues indépendantes encaissent ces moments de renversement. Leurs techniques anciennes ne les supportent guère la petite roue guidée s'est imposée (wagonnet de mine). Sinon, pour leur éviter cette sollicitation, les roues sont liées en un essieu monobloc avec un axe (ou traverse) qui porte les paliers et elles reçoivent des tables coniques (essieu biconique) pour mieux prendre les courbes.

Et de la paire d'essieux monoblocs, biconiques et liés par un châssis naît alors un véritable asservissement en position entièrement mécanique : l'essieu biconique roulant sur deux rails combine la mesure d'un écart par rapport à la consigne de trajectoire, la commande d'orientation de l'essieu et l'actionneur produisant l'effort de recentrage. Le tracé de la voie matérialise la consigne. L'essieu biconique qui se décentre dans la voie présente une différence de rayon de roulement entre roues droite et gauche, mesurant l'écart de position. Quand l'essieu est monobloc, il roule en tournant, comme un cône sur un plan, et en ligne droite il revient vers la position centrale. S'il est seul, il dépasse cette position et oscille, mais deux essieux liés par un châssis contrôlent mutuellement leurs braquages et convergent vers la consigne.

L'essieu biconique monobloc s'inscrit en courbe en se décentrant, car la différence de longueur des chemins sur les rails intérieur et extérieur demande des rayons de roulement différents. L'inscription naturelle de la paire d'essieux est plus complexe. La stabilité et la précision de l'inscription en courbe dépendent de divers paramètres : masses, inerties, empattement, raideurs des liaisons via le châssis, vitesse, conicités des tables, jeux dans la voie ou les paliers, adhérence, frottements divers... Leurs optimisations sont contradictoires.

Au-delà d'un certain écart de position de l'essieu (moitié du jeu dans la voie), le boudin vient en contact sur le flanc du rail. Il joue son rôle fondamental de butée transversale qui corrige les limites de cet asservissement face aux perturbations (fort vent latéral, freinage d'urgence, défaut de voie, perte d'adhérence...) ou face à la trop forte variation de la consigne de direction, autrement dit la trop grande courbure de la trajectoire.

Il faut ajouter d'autres éléments de dynamique à notre description trop cinématique. Il a fallu attendre Rocard puis Kalker pour bien comprendre ce qui se passe dans l'aire de contact entre roue et piste ou rail. La roue et la piste s'y déforment sous charge et sous sollicitations tangentiales. Avec le roulement, les déformations se déplacent sur les tables et des glissements apparaissent dans certaines parties de l'aire de contact. Quand on sollicite transversalement la roue, elle réagit : elle prend un "angle de dérive" (angle entre son plan et sa trajectoire), d'abord proportionnel à l'effort de réaction (notion de "pouvoir directeur" ou de "raideur de dérive") et inversement il faut lui donner un angle de dérive pour qu'elle produise un effort transversal de guidage. La croissance des efforts tangents au contact se heurte progressivement à la limite constitué par le poids adhérent (produit de la charge normale et de l'adhérence).

Avec la conicité de la roue ferroviaire le roulement induit une rotation de l'aire de contact (ou spin) accompagnée d'une force transversale, comme lorsqu'on force un cône à rouler droit sur un plan. Les choses se compliquent avec la variation de l'angle du plan tangent au contact à l'approche du boudin ou sur profils usés, de conicité variable. Et une part du poids adhérent est prise par les composantes longitudinales des efforts tangents au contact, issues de la traction ou du freinage ou, pour l'essieu biconique monobloc, des moments de lacet. La complexité de la dynamique des systèmes ferroviaires vient aussi des nombreuses interactions non linéaires de leurs liaisons mécaniques : raideurs variables, jeux et butées, amortisseurs à front raide, frottement sec, variation de l'angle du plan tangent avec saut de contact, contact multiple, défauts géométriques aléatoires... Depuis quelque temps, les innovations concernent surtout les modèles de simulation numérique, ou codes de calcul. Ils aident à comprendre les problèmes et parfois à les résoudre : stabilité, confort, usure, fatigue, déraillement...

La modélisation du pneu présente des difficultés différentes du ferroviaire : matériaux hétérogènes, sculptures du bandage et grains de la chaussée, grandes déformations des flancs...