

INTRODUCTION AU PILOTAGE D'UN VÉHICULE AUTONOME

I. OBJET ET ENJEUX DE L'ÉTUDE.

La conception des véhicules automatisés, ou robots mobiles, à roues est un domaine de recherche en pleine expansion. Ces véhicules sont utilisés dans l'industrie comme moyen de transport, d'inspection, ou d'opération, et sont particulièrement adaptés à des interventions en environnement hostile. La conception mécanique, les systèmes de vision et de localisation, la planification ainsi que la commande de ces véhicules, ont suscité de nombreux travaux. Ainsi, cette étude a pour objet la mise en œuvre de réseaux de neurones pour la commande d'un tel véhicule. Ce dernier est un système intrinsèquement non linéaire de par sa cinématique et ses caractéristiques dynamiques (actionneurs, moteur thermique). La commande d'un tel système est donc un problème qui, pour être résolu de façon satisfaisante, doit prendre ces non linéarités en considération. Les réseaux de neurones sont de bons candidats : d'une part, ils permettent d'identifier le comportement dynamique du véhicule, souvent complexe, et d'autant plus difficile à modéliser physiquement que les constructeurs fournissent rarement toutes les informations nécessaires ; d'autre part, l'apprentissage de correcteurs utilisant un modèle neuronal du véhicule prend en considération toutes les non linéarités identifiées. Enfin, des perturbations non modélisées et non mesurées telles que des changements d'adhérence du terrain, ou des perturbations mesurées telles que sa pente, doivent être compensées par l'organe de commande, besoin que les méthodes de commande neuronales par modèle interne présentées dans la première partie de ce mémoire sont à même de satisfaire.

L'objet de cette partie applicative est de donner un exemple des performances effectives des réseaux de neurones pour une tâche concrète, tout en complétant l'illustration des aspects théoriques développés dans ce mémoire, illustration déjà esquissée dans les chapitres 4 et 6 sur des exemples mettant en œuvre des processus simulés, ainsi que l'actionneur d'un bras de robot. Nous montrons également comment l'utilisation des techniques neuronales s'imbrique avec celle des techniques classiques de l'ingénieur automatique ; nous verrons en particulier comment la modélisation " boîte noire " neuronale se conjugue avec l'analyse physique des phénomènes mis en jeu par le processus, et de quelle manière les préoccupations qui guident la conception d'un système de commande " classique " interviennent dans celle de son homologue " neuronal ".

Dans cette introduction, nous présentons l'*architecture de mobilité classique* d'un véhicule autonome, ainsi que les choix effectués pour sa réalisation au moyen de réseaux de neurones. Enfin, nous décrivons le véhicule, REMI, qui a servi de banc d'essais pour ces recherches.

II. ARCHITECTURE DE MOBILITÉ D'UN VÉHICULE AUTONOME.

Véhicules automatisés.

Pour intervenir dans des milieux dangereux, pollués, impropres à la vie humaine, ou pour remplacer l'homme dans l'exécution de tâches répétitives, l'utilisation de véhicules automatisés se généralise. Un véhicule automatisé est un véhicule capable d'exécuter sa tâche sans opérateur humain à bord.

Véhicules autonomes.

Un véhicule autonome est un véhicule automatisé susceptible de remplir sa tâche *sans intervention* aucune d'un opérateur humain, même à distance. Pour de nombreuses applications industrielles, il n'est pas encore envisageable, pour des raisons de sécurité et d'efficacité, de laisser un véhicule automatisé évoluer en autonomie complète dans un environnement peu structuré. Comme nous le verrons au §II.1, il existe donc en général pour des véhicules dits autonomes plusieurs niveaux possibles pour l'intervention à distance d'un opérateur humain (par liaison radio par exemple), afin de compenser l'incapacité du véhicule à s'adapter à des changements trop radicaux de son environnement.

Architecture de mobilité d'un véhicule automatisé.

Un véhicule automatisé remplit le plus souvent d'autres tâches qu'un simple déplacement. Par exemple, un véhicule forestier doit non seulement pouvoir se déplacer en forêt, mais aussi abattre les arbres ; un véhicule minier doit à la fois se déplacer dans les carrières, et effectuer des forages. Nous nous intéressons ici uniquement à la tâche de déplacement, et à donc l'architecture du système qui organise et commande le déplacement d'un véhicule automatisé, ou *architecture de mobilité*.

II.1. ARCHITECTURE DE MOBILITÉ CLASSIQUE.

Architecture fonctionnelle.

La chaîne fonctionnelle d'un véhicule automatisé, représentée sur la figure 1, fait traditionnellement intervenir trois modules de commande organisés hiérarchiquement [FRA93] :

- le module de **planification** calcule un itinéraire local sous forme de points de passage à partir d'une destination définie par un opérateur humain (déplacement associé à la tâche du véhicule). Il calcule également une vitesse moyenne ou un profil de vitesse de consigne associé à cet itinéraire, en fonction du délai spécifié par l'opérateur pour la réalisation de la tâche.
- le module de **guidage** calcule les consignes de vitesse et de cap qui permettent au centre de gravité du véhicule (ou à tout autre point du véhicule, appelé *point de commande*) de suivre une trajectoire interpolant les points calculés par le module de planification.

- le module de **pilotage** a pour fonction d'asservir la vitesse et le cap du point de commande sur les valeurs de consigne déterminées par le module de guidage, c'est-à-dire d'élaborer les commandes qu'il faut délivrer aux actionneurs de la vitesse et de la direction.

Un module de *localisation*, qui ne fait pas à proprement parler partie de l'architecture de mobilité, est nécessairement présent à bord du véhicule. Il fournit aux différents étages hiérarchiques les informations de position, d'attitude (cap, roulis et tangage) et de vitesse du véhicule. Nous revenons sur les éléments constitutifs de ce module au paragraphe III. L'architecture de mobilité est représentée sur la figure 1.

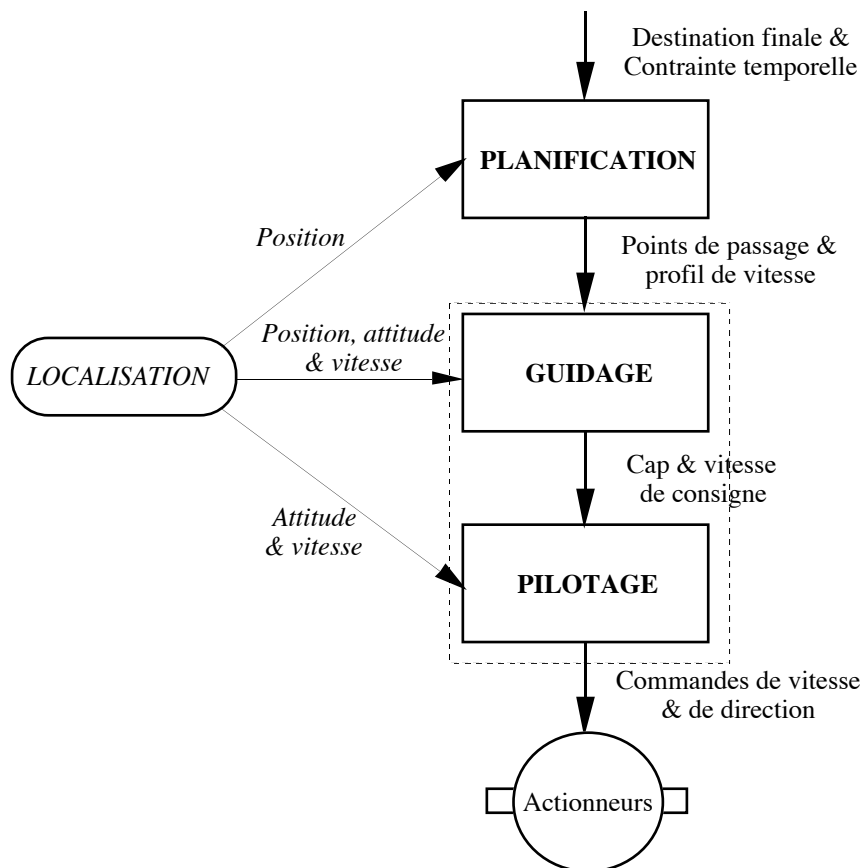


Figure 1.
Architecture de mobilité classique d'un véhicule automatisé.

Niveaux d'intervention.

Dans le cas d'une autonomie partielle, selon le niveau où l'opérateur humain intervient, on donne une dénomination différente au mode de commande du véhicule automatisé :

- on parle de **télépilotage** (ou téléconduite) lorsque les ordres, ou consignes, qui sont transmis au véhicule par un opérateur humain, sont les commandes des actionneurs. Ce mode de commande suppose l'opérateur à un poste de commande reproduisant le véhicule et ses actionneurs, et qu'il dispose d'informations sensorielles (visuelles surtout) représentatives de celles qu'il aurait s'il se trouvait à bord du véhicule. C'est le mode de commande où l'autonomie du véhicule est la plus limitée. Il est relativement sûr, puisque voisin d'une conduite humaine, mais n'est véritablement

praticable qu'à basse vitesse, et en terrain peu accidenté. En effet, il n'est plus possible à haute vitesse de négliger le temps de transfert des ordres de l'opérateur et des informations en provenance du véhicule dans le réseau de communication : au delà de 30 km/h, un système télépiloté devient en général instable. De plus, les informations sensorielles communiquées à l'opérateur sont le plus souvent insuffisantes pour une conduite correcte en tout terrain (champ de vision limité, insuffisance du retour d'informations concernant d'autres modalités sensorielles, telles que les sons, vibrations, accélérations...).

- il s'agit de **téléguidage**, lorsque les consignes communiquées au véhicule sont des consignes de vitesse et de cap (et/ou de position). La fonction de pilotage est dans ce cas assurée par le véhicule. Un tel mode de commande ne souffre pas des inconvénients du télépilotage. L'autonomie du véhicule y est cependant encore restreinte, puisque le choix de la manière de suivre la trajectoire incombe à l'opérateur. Pour que ce choix soit optimal, il est nécessaire que l'opérateur ait une bonne connaissance de la dynamique du véhicule.
- on parle de **téléplanification**, lorsque le véhicule reçoit comme consignes une liste de points de passage assortie d'une contrainte temporelle, qui peut être modifiée par l'opérateur dans le cas de la présence inopinée d'obstacles. Les fonctions de pilotage et de guidage sont assurées au niveau du véhicule. Ce mode de commande est particulièrement sûr, puisque le guidage est bien adapté à la trajectoire à suivre.
- l'**autonomie** est effective, si toutes les fonctions de planification, guidage et pilotage sont assurées par le véhicule. En présence d'obstacles (localisés par un système de détection d'obstacles), le module de planification embarqué redéfinira lui-même les points de passage et les contraintes à respecter, en s'appuyant sur des cartes numérisées du terrain où il évolue.

Enjeux industriels.

Comme nous l'avons déjà observé, le mode de totale autonomie est à l'heure actuelle irréaliste pour la plupart des véhicules automatisés industriels ou militaires. En revanche, le stade de la téléplanification est parfaitement réalisable tout en offrant de meilleures garanties de sécurité que le télépilotage ou le téléguidage, et en ayant l'avantage de moins solliciter l'opérateur, qui doit souvent veiller au déroulement correct d'autres opérations que celle du seul déplacement du véhicule (comme pour les véhicules forestiers ou miniers).

Pour ces raisons, nous avons choisi de réaliser à l'aide de réseaux de neurones les **fonctions réalisées par les modules de guidage et de pilotage** (encadrés en pointillés sur la figure 1), pour un fonctionnement aussi bien en mode téléplanifié qu'en mode autonome, lorsque celui-ci sera industriellement envisageable.

Dans une optique moins roboticienne, on peut aussi envisager l'utilisation pour des véhicules de série d'une partie des fonctions du guidage-pilotage, pour la réalisation de systèmes de "cruise-control" par exemple (ces systèmes permettent de maintenir la vitesse d'un véhicule autour d'une valeur nominale).

II.2. RÉALISATION NEURONALE.

Fonction assurée par le système de commande neuronal.

Le système de commande neuronal doit donc assurer les fonctions de l'ensemble guidage-pilotage. Ceci consiste, à partir des points de passage et du profil de vitesse de consigne déterminés par le module de planification (mode autonome) ou par l'opérateur (mode téléplanifié), à calculer les commandes à délivrer aux actionneurs de manière à respecter au mieux ces consignes.

Réalisation neuronale du guidage-pilotage.

Traditionnellement, le module de guidage, après avoir calculé une trajectoire continue à partir des points de passages, sélectionne à chaque instant un *point-cible* sur cette trajectoire. La position de ce point, et la vitesse de consigne qui lui est associée, sont les données utilisées par le module de guidage pour calculer le cap et la vitesse à imposer au véhicule de manière à atteindre l'objectif de poursuite. Ce *cap* et cette *vitesse* constituent les consignes transmises au module de pilotage. Nous avons conçu un premier système de commande selon ce principe [RIV93] [RIV94]. Dans le système retenu, les consignes transmises au module de pilotage neuronal sont des consignes de *cap*, de *vitesse*, et de *position*. Une comparaison entre les deux approches est présentée dans [RIV93]. La réalisation neuronale des modules de guidage et de pilotage, dont nous allons maintenant présenter les modules constitutifs, est représentée schématiquement sur la figure 2.

Le **module de guidage** est constitué des deux éléments suivants :

Le générateur de trajectoire.

À chaque réception d'une mission, ce module interpole les points de passage, fournissant ainsi une trajectoire continue (interpolation linéaire si les points sont suffisamment rapprochés, à l'aide de B-splines sinon). À chaque point de la trajectoire est associée une vitesse correspondant à la contrainte temporelle de la mission (profil de vitesse ou vitesse moyenne constante). Cette opération est donc habituellement aussi réalisée par le module de guidage.

Le sélecteur du point-cible.

À chaque instant, ce module détermine le point-cible, qui est donc le point de la trajectoire dont il faut se donner la vitesse, la position et le cap pour objectif. Intuitivement, ce point doit être choisi à une certaine distance en avant du véhicule. La détermination de la loi gouvernant la distance au point-cible ne peut donc être effectuée qu'en fonction des modules de commande intervenant en aval du sélecteur du point-cible, détermination que nous décrivons au chapitre 8.

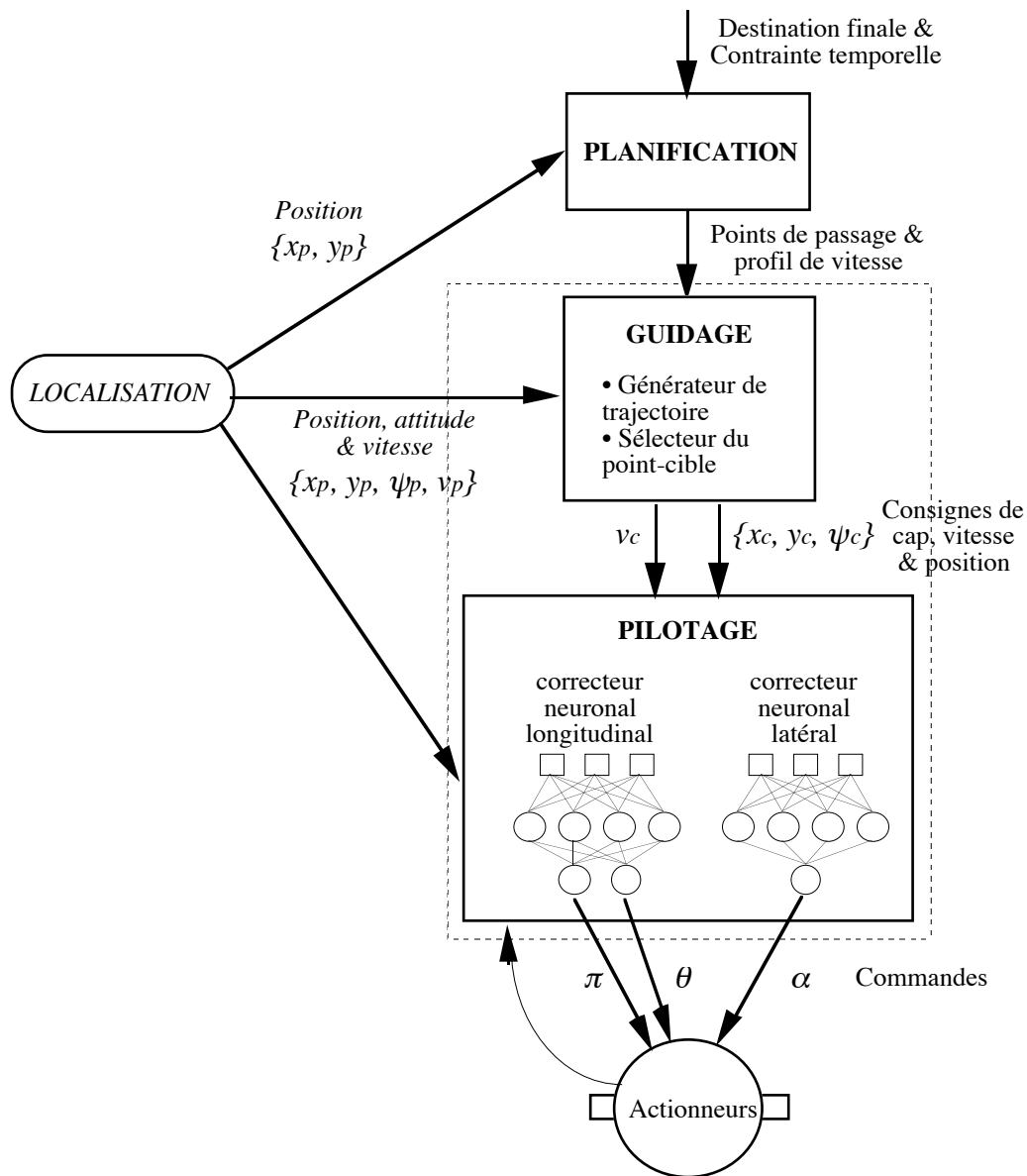


Figure 2.
Architecture de mobilité neuronale.

Le *module de pilotage* est constitué de deux correcteurs neuronaux :

D'après des résultats bien connus dans le domaine de la commande de robots mobiles à roues du type de REMI, c'est-à-dire soumis à des contraintes non-holonomes, il est possible d'asservir la position du véhicule sur une trajectoire, indépendamment de sa vitesse, par retour d'état statique continu stationnaire [SAM92]. Nous rappelons ces résultats au chapitre 8. C'est cette solution que nous avons choisie, ou solution de "path-following" (opposée à la solution, également envisageable, de "path-tracking", qui désigne l'asservissement de posture, c'est-à-dire à la fois de la position et du cap). Cette solution a l'avantage de demander la synthèse de deux correcteurs *indépendants*, un correcteur latéral pour l'asservissement sur trajectoire, et un correcteur longitudinal pour l'asservissement de la vitesse.

a) Correcteur latéral.

Ce correcteur a pour consignes la position du point-cible sélectionné, et l'orientation de la vitesse de consigne qui lui est associée, ou cap de consigne. En fonction de l'état du véhicule, il calcule la commande du volant pour l'asservissement du véhicule sur la droite passant par le point-cible et orientée selon le cap de consigne (cette droite est donc la tangente à la trajectoire de consigne passant par le point-cible).

b) Correcteur longitudinal.

Ce correcteur a pour consigne la vitesse du point-cible sélectionné. Il calcule, en fonction de cette consigne et de l'état du véhicule, les commandes des freins, de l'accélérateur, et du sélecteur des vitesses.

Identification des sous-systèmes correspondant aux deux correcteurs.

Les techniques de commande neuronale que nous utilisons sont de type indirect, c'est-à-dire utilisent un modèle du véhicule. Il est donc nécessaire de réaliser préalablement la modélisation de la dynamique du véhicule pour les comportements latéral et longitudinal. D'autres techniques de commande de véhicules par réseaux de neurones n'utilisent pas de modèle. Par exemple, Pomerleau propose un système qui réalise l'apprentissage d'un réseau de neurones dont l'entrée est une image de la route, et la sortie la commande du volant, à l'aide d'un " professeur " humain [POM91] [POM94].

Nous allons maintenant présenter REMI, le véhicule automatisé qui a servi de banc d'essais à nos recherches ; nous décrivons la nature et le fonctionnement des actionneurs et des capteurs nécessaires à la commande et à la localisation, éléments propres à chaque véhicule automatisé.

III. PRÉSENTATION DU VÉHICULE REMI.

REMI (Robot Evaluator for Mobile Investigations) est un véhicule de série Mercedes à essence à quatre roues motrices. Il est entièrement équipé par la société SAGEM des actionneurs et des capteurs nécessaires à la commande et à la localisation du véhicule. Le véhicule est représenté sur la figure 3.

Actionneurs.

a) Actionneur utilisé pour l'asservissement latéral : c'est un moteur à courant continu sur la colonne de direction, avec mesure de position angulaire.

b) Actionneurs utilisés pour l'asservissement longitudinal :

* accélération : l'action sur le papillon des gaz est effectuée par un moteur à courant continu.

* freinage : un groupe hydraulique fournit l'énergie, et une servo-valve permet de modifier la pression dans le circuit de freinage, avec mesure de la pression.

* passage des rapports de vitesse : il est réalisé par un moteur à courant continu agissant sur le manche du sélecteur des vitesses, avec mesure de position angulaire.

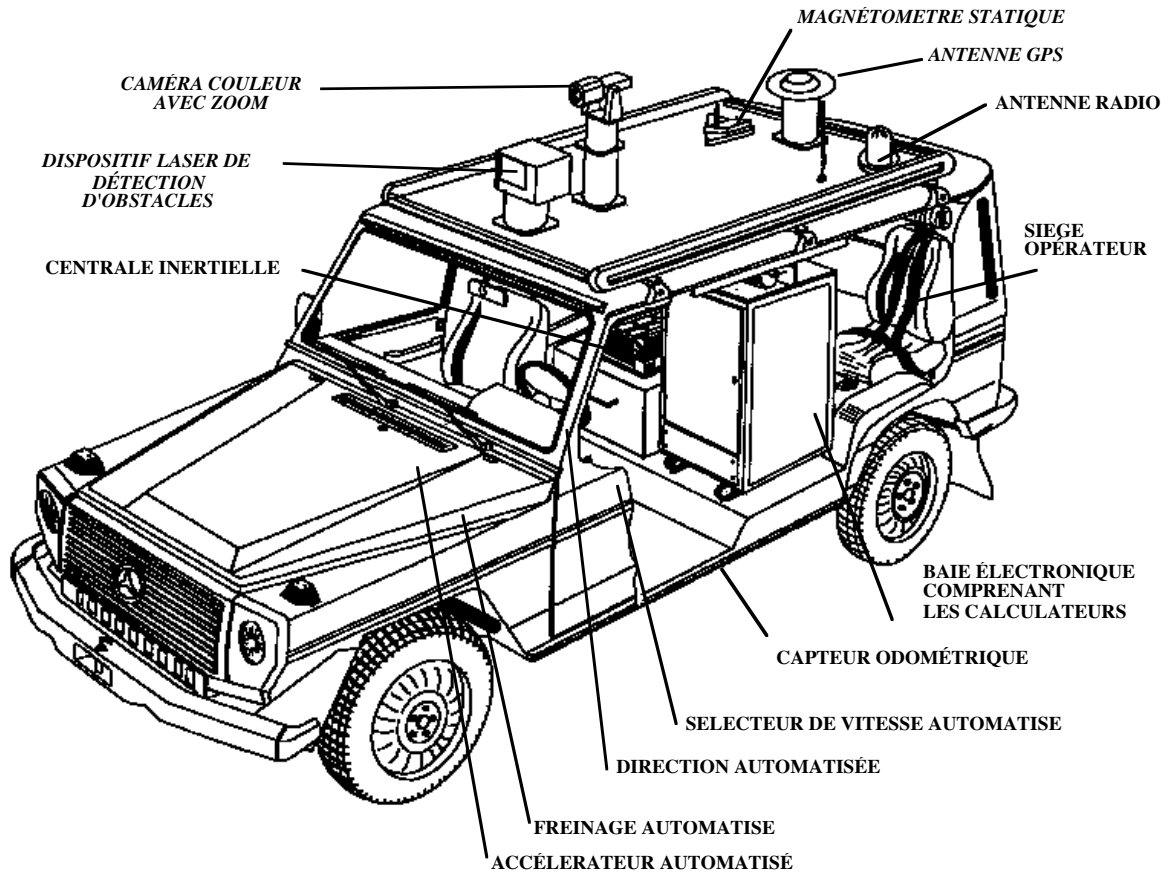


Figure 3.
Le véhicule REMI.

Capteurs.

La localisation est la fonction qui consiste à estimer, dans un repère de travail donné, certains paramètres de position et/ou d'attitude du véhicule nécessaires aux asservissements du pilotage-guidage. La méthode de localisation utilisée sur le véhicule REMI est dite "à l'estime". Par les méthodes de localisation à l'estime, la position courante est déterminée par intégration de déplacements successifs orientés depuis la position de départ, à partir d'informations fournies par des capteurs généralement proprioceptifs qui peuvent être :

- de nature odométrique (mesure du déplacement relatif par rapport au sol),
- de nature inertielle (mesure des accélérations et/ou des rotations par rapport à un repère galiléen),
- de nature gravitationnelle (inclinomètres) ou magnétique (compas).

REMI dispose ainsi d'une *centrale inertielle*, et le système de transmission est équipé d'un *odomètre*. En raison de son principe même d'intégration simple ou double, et de l'existence inévitable d'erreurs de la part des capteurs, la localisation à l'estime dérive en fonction du temps et/ou de la distance parcourue. Elle exige donc d'être recalée périodiquement par diverses

méthodes, présentées dans [FAR93] par exemple. Nous n'entrons pas dans ces détails techniques, car le mode de fonctionnement utilisé pour l'expérimentation des systèmes de commande ne nécessite pas de recalage, comme nous allons le voir au paragraphe suivant.

Mode de commande pour l'expérimentation du guidage-pilotage : pseudo-autonome.

Nous effectuons l'expérimentation du système de commande avec REMI dans les conditions suivantes :

- avant le départ, une mission (c'est-à-dire la liste de points de passage et la contrainte temporelle associée) est communiquée au véhicule. Le véhicule n'utilisant pas de système de détection d'obstacles, cette mission ne sera plus modifiée ;
- la mission est d'une longueur telle que la dérive du système de localisation est négligeable.

Ce mode de fonctionnement est équivalent au mode téléplanifié. Les éléments qui n'interviennent pas en mode d'expérimentation du guidage-pilotage sont indiqués en italique sur la figure 3 (essentiellement les éléments utilisés pour la détection d'obstacles, dont une description est donnée dans [VDB93]). Comme nous l'avons vu, les asservissements latéral et longitudinal peuvent, dans une large mesure, être réalisés indépendamment. Pour faciliter encore l'expérimentation, ils sont aussi souvent testés séparément, c'est-à-dire qu'un opérateur à bord du véhicule commandera éventuellement freins et accélérateur si le but de l'expérience est de tester l'asservissement latéral, et inversement, cet opérateur pourra commander le volant si l'expérience porte sur l'asservissement longitudinal.

INTRODUCTION AU PILOTAGE D'UN VÉHICULE AUTONOME	1
.....	1
41	
I. OBJET ET ENJEUX DE L'ÉTUDE.	1
.....	1
41	
II. ARCHITECTURE DE MOBILITÉ D'UN VÉHICULE AUTONOME.	1
.....	1
42	
II.1. Architecture de mobilité classique.	1
.....	1
42	
II.2. Réalisation neuronale.	1
.....	1
45	
III. PRÉSENTATION DU VÉHICULE REMI.	1
.....	1
47	