



**HAL**  
open science

# Commande assistée au conducteur basée sur la conduite en formation de type "banc de poissons"

Audrey Morand

► **To cite this version:**

Audrey Morand. Commande assistée au conducteur basée sur la conduite en formation de type "banc de poissons". Physique mathématique [math-ph]. Université de Bordeaux, 2014. Français. NNT : 2014BORD0335 . tel-01142147

**HAL Id: tel-01142147**

**<https://theses.hal.science/tel-01142147v1>**

Submitted on 14 Apr 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# THÈSE

PRÉSENTÉE À

**L'UNIVERSITÉ de BORDEAUX**

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR

par

**Audrey MORAND**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

**DOCTEUR**

SPÉCIALITÉ : AUTOMATIQUE

*Commande assistée au conducteur basée sur la conduite en  
formation de type « banc de poissons »*

*Soutenue le 17 décembre 2014*

Après avis de : M. DUGARD, Luc *Rapporteurs*  
M. BONNIFAIT, Philippe

Devant la Commission d'examen formée de :

M. DUGARD, Luc, M. BONNIFAIT, Philippe	Directeur de Recherche au CNRS Professeur à l'Université de Technologie de Compiègne	<i>Rapporteurs</i>
M. MOREAU, Xavier M. MELCHIOR, Pierre	Professeur à l'Université de Bordeaux Maitre de conférences à l'Institut Polytechnique de Bordeaux	<i>Directeur de thèse</i> <i>Co-encadrant</i>
M. BASSET, Michel M. OUSTALOUP, Alain M. MOZE, Mathieu	Professeur à l'Université de Haute Alsace Professeur à l'Institut Polytechnique de Bordeaux Docteur à la direction scientifique de PSA Peugeot Citroën	Président <i>Examineurs</i>
M. GUILLEMARD, Franck	Docteur à la direction scientifique de PSA Peugeot Citroën	



# Remerciements

Je tiens à remercier, en premier lieu, mon directeur de thèse, Monsieur Xavier Moreau ainsi que Monsieur Pierre Melchior, mon co-encadrant, pour leurs conseils et leur accueil au sein du laboratoire IMS.

Je remercie également Messieurs Mathieu Moze et Franck Guillemard co-encadrants de ma thèse, pour m'avoir fait confiance et confié ce projet. Qu'ils soient assurés de ma sincère reconnaissance pour leur encadrement, l'optimiste inépuisable de Mathieu Moze et l'expertise de Franck Guillemard.

Je remercie aussi Monsieur Philippe Bonnifait, Professeur à l'Université de Technologie de Compiègne et Monsieur Luc Dugard, Directeur de Recherche au CNRS, d'avoir accepté la charge de rapporteurs de cette thèse, ainsi que Monsieur Michel Basset Professeur à l'Université de Haute Alsace, d'avoir accepté de présider ce jury.

Je remercie également Monsieur Alain Oustaloup, Professeur à l'Institut Polytechnique de Bordeaux, pour sa convivialité ainsi que pour sa participation à ce jury.

Je remercie l'ensemble de l'équipe CRONE pour leur accueil et leur convivialité. Merci aux anciens et aux nouveaux doctorants qui m'ont intégrée à l'équipe à chacun de mes séjours à Bordeaux.

Je remercie l'ensemble de l'équipe SIEP, les anciens et les nouveaux. Merci à Junior et Ammar pour nos débats philosophiques sans fin lors de nos séjours à Bordeaux. Merci à tous mes collègues qui ont rendu ces trois années sympathiques au quotidien et une mention spéciale pour les locataires du côté obscur qui ne le rendent pas triste !

Heureux hasard, le laboratoire se situe à Bordeaux, là où mes amis Aymeric et Pauline se sont installés quelques mois avant le début de ma thèse. Alors, merci à eux de m'avoir si souvent accueillie à diner.

Pour conclure, merci à ma famille pour leurs encouragements durant ces trois années et merci à Baptiste pour son soutien indéfectible et parce qu'ensemble on s'arrange bien.



# Table des matières

<b>Introduction générale et organisation de la thèse .....</b>	<b>9</b>
Notations et abréviations .....	13
<b>Chapitre 1 L'assistance à la conduite.....</b>	<b>15</b>
1.1. Introduction.....	17
1.2. Etat de l'art .....	17
1.2.1. Contexte .....	17
1.2.2. Programmes de recherche académiques et industriels.....	19
1.2.3. Perspectives.....	32
1.2.4. Limitations .....	34
1.3. Système d'aide à la conduite proposé .....	35
1.3.1. Approche bio-inspirée : les bancs de poissons .....	35
1.3.2. Architecture fonctionnelle .....	37
1.4. Conclusion .....	40
<b>Chapitre 2 Modèles « banc de poissons » et approche non entière : analyse et synthèse des outils fondamentaux.....</b>	<b>41</b>
2.1. Introduction.....	43
2.2. Déplacement en essaim : Modèle « banc de poissons » .....	43
2.2.1. Définition et historique .....	43
2.2.2. Formalisme des modèles « banc de poissons » .....	44
2.2.3. Le modèle de Reynolds .....	45
2.2.4. Le modèle de Vicsek .....	50
2.2.5. Le modèle d'Olfati-Saber.....	53
2.2.6. Bilan des modèles.....	56
2.3. Intégration non entière .....	59
2.3.1. Bref historique.....	60
2.3.2. Définitions .....	60
2.3.3. Propriétés .....	61
2.3.4. Potentiel généralisé.....	63
2.3.5. Commande CRONE .....	67
2.4. Conclusion .....	75

<b>Chapitre 3 Approche « Banc de poissons » pour la génération de trajectoire.....</b>	<b>77</b>
3.1. Introduction.....	79
3.2. Règles de circulation et mode de conduite dans le trafic autoroutier .....	79
3.3. Suivi de voie.....	82
3.3.1. Méthode 1 : basée sur le modèle de Reynolds.....	82
3.3.2. Méthode 2 : basée sur le potentiel attractif de Ge et Cui .....	84
3.3.3. Méthode 3 : basée sur le potentiel attractif fractionnaire .....	86
3.3.4. Comparaison des trois méthodes .....	86
3.4. Intégration dans le trafic routier .....	89
3.4.1. De la distance de cohésion à la distance de sécurité.....	90
3.4.2. Interaction entre les véhicules : force de répulsion.....	91
3.5. Synthèse sur les méthodes de déplacement des véhicules en « banc de poissons »	97
3.5.1. Simulations avec un seul véhicule équipé.....	98
3.5.2. Simulations avec plusieurs véhicules équipés .....	102
3.6. Conclusion .....	105
<b>Chapitre 4 Prise en compte de la dynamique du véhicule pour le suivi de la trajectoire.....</b>	<b>107</b>
4.1. Introduction.....	109
4.2. Eléments de dynamique du véhicule .....	109
4.2.1. Généralités .....	109
4.2.2. Modélisation.....	110
4.2.3. Modélisation des pneumatiques.....	113
4.3. Modèle véhicule utilisé .....	117
4.3.1. Schéma global, normes d'écriture .....	117
4.3.2. Dynamique longitudinale .....	119
4.3.3. Dynamique de lacet.....	119
4.3.4. Dynamique transversale.....	120
4.3.5. Dynamique de rotation des roues.....	120
4.3.6. Transferts de charge.....	120
4.3.7. Trajectoire .....	121
4.3.8. Modèle de validation .....	122
4.4. Régulation de vitesse longitudinale .....	122
4.4.1. Modèle d'analyse .....	122
4.4.2. Incertitudes du système .....	126
4.4.3. Analyse de la sensibilité .....	127

4.4.4.	Synthèse des régulateurs dans le domaine fréquentiel .....	128
4.4.5.	Analyse des performances .....	133
4.5.	Régulation du déplacement transversal .....	139
4.5.1.	Modèle lacet-dérive linéarisé.....	139
4.5.2.	Modèle simplifié pour la synthèse.....	142
4.5.3.	Synthèse des régulateurs dans le domaine fréquentiel .....	143
4.5.4.	Analyse des performances temporelles en simulation.....	150
4.6.	Conclusion .....	154
<b>Chapitre 5 Mise en œuvre et évaluation du système d'aide à la conduite sur simulateurs de conduite et de trafic.....</b>		<b>157</b>
5.1.	Introduction.....	159
5.2.	Validation des systèmes ADAS .....	159
5.2.1.	Test de l'élan .....	159
5.2.2.	Norme ISO 26262 .....	160
5.3.	Essais sur simulateur de conduite.....	162
5.3.1.	Description du simulateur de conduite.....	162
5.3.2.	Mise en œuvre du système .....	163
5.3.3.	Protocole expérimental.....	165
5.3.4.	Analyse des résultats.....	166
5.4.	Simulation du trafic routier .....	176
5.4.1.	Différents modèles .....	177
5.4.2.	Variables du trafic routier .....	178
5.4.3.	Modèle de Gipps .....	180
5.5.	Essais avec un logiciel de simulation de trafic .....	183
5.5.1.	Présentation du logiciel Aimsun.....	183
5.5.2.	Protocole d'essai .....	183
5.5.3.	Analyse des résultats.....	184
5.6.	Conclusion .....	187
<b>Conclusion générale et perspectives .....</b>		<b>189</b>
Annexe .....		193
Bibliographie.....		201

---



# Introduction générale et organisation de la thèse

## 1 Contexte de l'étude

La présente thèse a été conduite dans le cadre d'une Convention Industrielle de Formation par la REcherche (CIFRE) au sein de l'équipe CRONE du groupe Automatique du laboratoire IMS, UMR 5218 CNRS, et au sein de l'équipe Mécatronique de l'entité DSTF/SIEP de la DRIA (Direction de la Recherche et de l'Ingénierie Avancée) de PSA Peugeot-Citroën, dans le cadre de l'OpenLab PSA-IMS « *Electronics and Systems for Automotive* ». Les travaux ont été effectués sous la direction de Xavier MOREAU, Professeur à l'Université de Bordeaux, co-encadrés par Pierre MELCHIOR, Maître de conférences à l'Institut National Polytechnique de Bordeaux, et sous la responsabilité au sein de l'entreprise de Franck GUILLEMARD et Mathieu MOZÉ, Docteurs et Ingénieurs de la DRIA.

L'objectif de ce travail est de permettre l'amélioration de la sécurité routière qui reste un axe de recherche privilégié pour tous les constructeurs automobiles. En effet, au regard des statistiques de la sécurité routière en France depuis les années 70, des progrès significatifs ont été obtenus. Ainsi, malgré une augmentation du trafic automobile, les chiffres pour 2012 sont de 3653 décès quand plus de 18 000 décès étaient déplorés en 1972. Ces progrès sont le résultat de la mise en place de mesures législatives (limitations de vitesse) et d'avancées technologiques telles que l'amélioration de la carrosserie et l'introduction des systèmes mécatroniques.

Depuis quelques années, une nouvelle étape est franchie avec la multiplication des systèmes d'assistance au conducteur qui permettent de prévenir les accidents dus à des erreurs de comportement. En effet, avec les développements de nouveaux capteurs, de nouvelles fonctionnalités tendent à apparaître avec des systèmes d'assistance à la conduite relativement avancés : régulateur de vitesse adaptatif, aide au maintien de voie... La multiplication de ce type de fonctions permet de concevoir une automobile sans conducteur capable de se déplacer de manière autonome. Toutefois, alors que les technologies existent déjà et que les premiers prototypes sont élaborés, la perspective d'une utilisation généralisée de tels systèmes reste éloignée, freinée par d'importants obstacles économiques, sociétaux et juridiques.

## 2 Objectifs de la thèse

L'observation des déplacements de certains animaux permet d'identifier les caractéristiques d'un mouvement en essaim, par lequel un ensemble d'individus

autopropulsés se déplacent en groupe uniquement à l'aide de la connaissance locale de leur environnement. En 1987, C.W. Reynolds a, le premier, décrit ces phénomènes au moyen de modèles mathématiques qu'il a appliqués avec succès à la simulation de bancs de poissons.

L'objectif scientifique de la thèse est d'appliquer ce type de comportement aux véhicules se déplaçant sur un profil routier. L'enjeu est de concevoir un système d'assistance à la conduite capable de suggérer au conducteur la trajectoire à suivre pour améliorer son confort et sa sécurité.

Cette assistance doit être complète, agissant sur le contrôle longitudinal et latéral du véhicule et simple à prendre en main par le conducteur afin de faciliter l'acceptation du système. Ce système complet permet :

- un suivi de voie
- un maintien de la vitesse autorisée
- un dépassement des véhicules lents
- une prise en compte du comportement des véhicules environnants.

Afin de regrouper toutes ces fonctions en un seul système, il a fallu conjuguer l'inspiration théorique de la dynamique des bancs de poissons aux contraintes liées à l'environnement routier, aux règles de circulation et à la dynamique du véhicule. Enfin, le système d'aide à la conduite est mis en œuvre, non seulement sur un simulateur dynamique de conduite afin de recueillir le ressenti des conducteurs, mais aussi au sein d'un logiciel de simulation de trafic pour évaluer les gains obtenus lorsqu'un ensemble de véhicules en est équipé.

### **3 Contribution spécifique et organisation de la thèse**

Le mémoire de thèse concerne donc la commande assistée au conducteur basée sur la conduite en formation de type « banc de poissons » et est structurée en cinq chapitres.

Le **chapitre 1** présente l'avancement de la recherche dans le domaine de l'assistance à la conduite au travers des différents programmes académiques et industriels menés ces dernières années, et ce en esquissant les limites et les perspectives. Puis, l'idée puisée dans l'approche bio-inspirée qui guide la conception du présent système d'aide à la conduite ainsi que la stratégie de hiérarchisation mise en place sont également présentées.

Le **chapitre 2** livre l'analyse et la synthèse des principaux outils utilisés pour cette étude. Cette dernière s'inspirant des déplacements collectifs de certains animaux, les principaux modèles mathématiques décrivant les déplacements en essaim dans la littérature sont présentés et comparés. Dans une seconde partie, ce chapitre propose un rappel concernant le concept mathématique qu'est la dérivation non entière. Les principales propriétés sont présentées, ainsi que les outils applicatifs tels que le potentiel généralisé utilisé en planification de trajectoire et la commande CRONE (Commande Robuste d'Ordre Non Entier), permettant de synthétiser des régulateurs dans le domaine fréquentiel.

Le **chapitre 3** décrit les mécanismes par lesquels le système ADAS proposé s'inspire des « bancs de poissons » pour bâtir des trajectoires. Tout d'abord, les règles particulières qui doivent être intégrées à la loi de guidage pour obtenir une trajectoire correspondant aux

mouvements d'un véhicule sur la route sont définies. Puis, à partir des modèles de type bancs de poissons, présentés au chapitre précédent, et de la hiérarchie établie pour concevoir le système ADAS, le suivi de voie (niveau 1) puis l'intégration dans le trafic (niveau 2) sont élaborés. Deux lois de guidage répondant aux contraintes sont alors conçues et évaluées par simulation.

Le **chapitre 4** propose de revenir sur les éléments de la dynamique du véhicule. Après avoir établi le modèle véhicule utilisé pour la suite, l'étude sur le contrôle longitudinal du véhicule réalisé par un régulateur de vitesse basé sur la commande CRONE est présentée. Une comparaison entre cette approche et un régulateur à actions Proportionnelle et Intégrale (PI) utilisé dans le cas des véhicules commercialisés est réalisée. Une seconde étude similaire est développée pour le contrôle latéral du véhicule.

Enfin, le **chapitre 5** présente l'évaluation du système d'aide à la conduite conçu au cours de cette thèse. Dans un premier temps, les procédures de validation des systèmes ADAS actuels sont décrites. Dans un second temps, la mise en œuvre, le protocole et les résultats obtenus lors de l'évaluation sur simulateur de conduite sont exposés. Puis, les notions essentielles de la simulation du trafic routier ainsi qu'une étude menée sur un logiciel de simulation du trafic routier sont présentés.



# Notations et abréviations

$M_t$  : masse totale  
 $l_{av}$  : demi-voie avant  
 $l_{ar}$  : demi-voie arrière  
 $L_{av}$  : demi-empattement avant  
 $L_{ar}$  : demi-empattement arrière  
 $X_G$  : position en X du centre gravité  
 $Y_G$  : position en Y du centre gravité  
 $H_G$  : hauteur en Z du centre gravité  
 $V$  : vitesse  
 $V_x$  : composante longitudinale de la vitesse  
 $V_y$  : composante transversale de la vitesse  
 $\Gamma_x$  : accélération longitudinale  
 $\Gamma_y$  : accélération transversale  
 $\Psi$  : angle de lacet  
 $\beta_v$  : angle de braquage  
 $\delta_G$  : angle de dérive  
 $F_x$  : effort longitudinal du pneumatique  
 $F_y$  : effort transversal du pneumatique  
 $F_g$  : force de gravité  
 $F_a$  : résistance aérodynamique  
 $\alpha_r$  : pente de la route  
 $\rho$  : masse volumique de l'air  
 $S_x$  : surface projetée du véhicule dans la direction longitudinale  
 $C_x$  : coefficient de trainée aérodynamique  
 $F_{rr}$  : résultante de la résistance au roulement  
 $f_{0x}$  : rafale de vent longitudinale  
 $f_{0y}$  : rafale de vent latérale  
 $\Omega$  : vitesse angulaire de la roue  
 $J_r$  : inertie de la roue  
 $r_0$  : rayon de la roue  
 $C_m$  : couple moteur appliqué à la roue  
 $C_f$  : couple dû au frottement visqueux  
 $b_r$  : coefficient de frottement visqueux

<b>ADAS</b>	Systèmes d'aide à la conduite, de l'anglais « Advanced Driver Assistance System »
<b>CRONE</b>	Commande Robuste d'Ordre Non Entier
<b>ESP=ESC</b>	Correcteur électronique de trajectoire, de l'anglais « Electronic Stability Program » ou « Electronic Stability Control »
<b>Euro NCAP</b>	Programme d'évaluation européenne des automobiles, de l'anglais « European New Car Assessment Program »,
<b>IHM</b>	Interface Homme/Machine
<b>TIV</b>	Temps Inter-Véhiculaire (TIV)
<b>TTC</b>	Délai précédant la collision, de l'anglais « Time To Collision »

# Chapitre 1

## L'assistance à la conduite

---

1.1.Introduction .....	17
1.2.Etat de l'art.....	17
1.2.1. Contexte .....	17
1.2.2. Programmes de recherche académiques et industriels .....	19
1.2.3. Perspectives .....	32
1.2.4. Limitations.....	34
1.3.Système d'aide à la conduite proposé .....	35
1.3.1. Approche bio-inspirée : les bancs de poissons .....	35
1.3.2. Architecture fonctionnelle .....	37
1.4.Conclusion .....	40

---



## **1.1. Introduction**

Un système d'aide à la conduite, souvent désigné par l'acronyme ADAS (de l'anglais « Advanced Driver Assistance System »), est un système permettant d'assister le conducteur dans sa tâche de conduite pour :

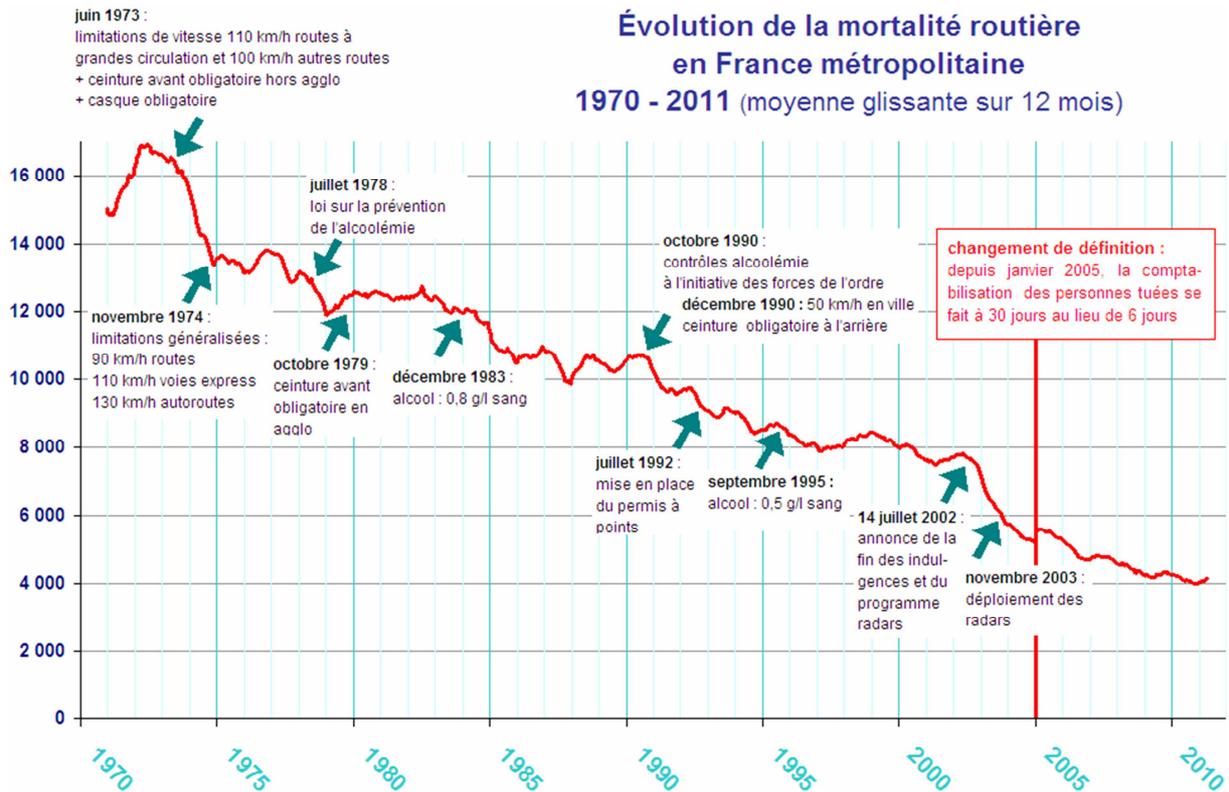
- le libérer d'un certain nombre de tâches qui risquent d'atténuer sa vigilance ;
- l'assister dans sa perception de l'environnement ;
- éviter l'apparition de situations dangereuses risquant de créer un accident.

Ce premier chapitre présente l'avancement de la recherche dans le domaine de l'assistance à la conduite et en esquisse les limites et les perspectives. L'inspiration qui guide la conception du système d'aide à la conduite développé au cours de cette thèse, ainsi que la stratégie de hiérarchisation mise en place, sont également présentées.

## **1.2. Etat de l'art**

### **1.2.1. Contexte**

En France, le secteur automobile s'est développé à partir de la deuxième moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle jusqu'à ce que la voiture devienne, dans les années 1960, le moyen de transport le plus répandu (Collet et al. 2013). La démocratisation de ce nouveau moyen de locomotion permise notamment par la baisse du prix d'achat et du pétrole et l'extension des possibilités de crédit, a coïncidé avec la prise de conscience par le grand public de sa dangerosité, faute d'une réglementation suffisante de la circulation routière. Pendant ces années, le nombre de décès sur les routes ne cesse en effet d'augmenter jusqu'à atteindre un maximum avec 16 545 morts en 1972. L'organisme interministériel de la sécurité routière est alors créé et les premières mesures visant notamment à limiter la vitesse sont adoptées. Leur impact sur le nombre de décès peut être observé sur la figure 1.1 qui présente l'évolution du nombre de décès sur les routes françaises depuis 1970, associée à la mise en place des principales mesures de sécurité routière.



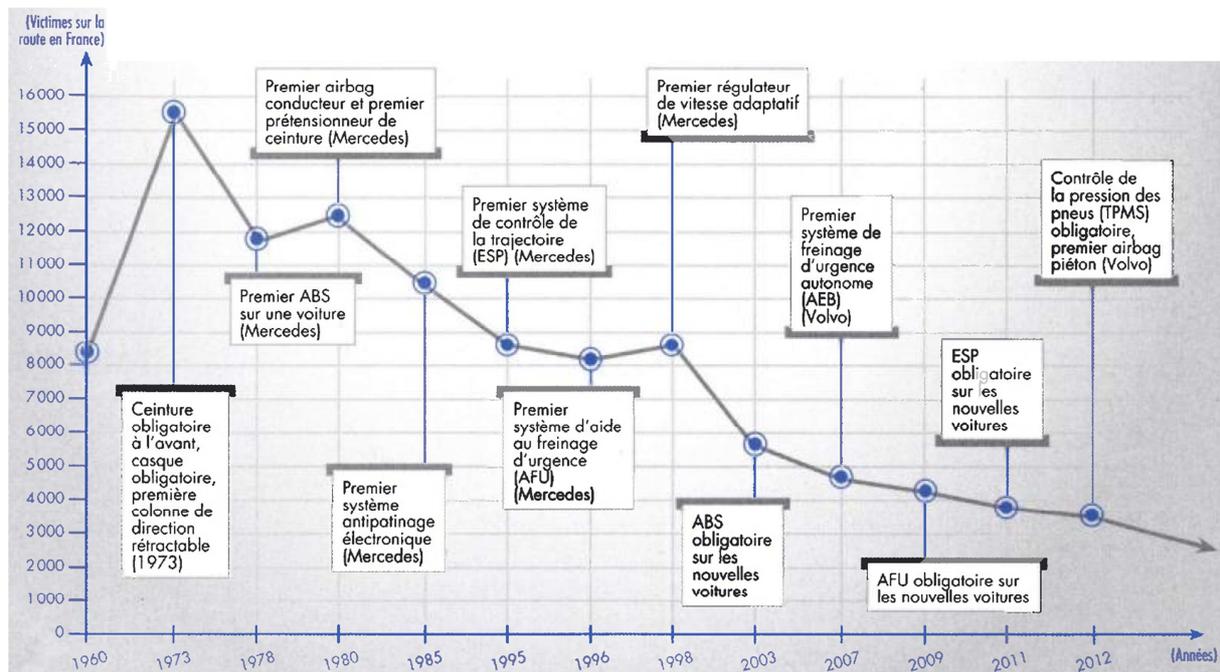
**Figure 1.1** – Evolution du nombre de décès sur les routes françaises depuis 1970, associée à la mise en place des principales mesures de sécurité routière (ONISR 2013)

Outre le volet règlementaire, la sécurité routière a également été favorisée par le perfectionnement du véhicule automobile lui-même.

Les constructeurs sont dans un premier temps intervenus en matière de sécurité secondaire (dite palliative ou passive) qui a pour but de réduire les dommages causés aux passagers du véhicule lors d'un accident. Des progrès ont été enregistrés en matière de résistance, ainsi que d'absorption du choc de la caisse, de même que des coussins gonflables (airbags) ont été intégrés aux véhicules. Le développement de ces équipements a été encouragé par la création en 1997 de l'Euro NCAP (en anglais « European New Car Assessment Program », programme d'évaluation européenne des automobiles). Cet organisme indépendant a pour fonction principale d'effectuer des essais de choc (crash tests) afin de fournir aux consommateurs une évaluation de la sûreté des voitures les plus vendues en Europe.

Les constructeurs sont ensuite intervenus sur la sécurité primaire (dite préventive ou active) qui regroupe l'ensemble des équipements destinés à éviter qu'un accident se produise. C'est à cette catégorie qu'appartiennent actuellement la plupart des systèmes d'aide à la conduite. L'arrivée de l'électronique dans l'automobile a permis d'ouvrir de nouvelles possibilités en la matière. Ainsi, au milieu des années 90, des systèmes tels que l'antiblocage des roues (ABS) ont fait leur apparition sur les voitures haut de gamme jusqu'à devenir obligatoires sur tous les nouveaux véhicules depuis 2004. Ces dernières années, le développement de capteurs, associés à de nouvelles fonctionnalités, favorisent l'apparition de systèmes innovants d'assistance à la conduite, tels que le régulateur de vitesse adaptatif ou encore l'aide au maintien de voie. Toutes ces avancées ont un impact sur les chiffres de la sécurité routière comme l'illustre la figure 1.2 qui présente l'évolution du nombre de décès

sur les routes françaises depuis 1960, associée à la disponibilité de systèmes d'aide à la conduite. Certains analystes (Page et al. 2011) estiment que sur la période 2000-2010, les avancées en matière de sécurité primaire et secondaire ont contribué à sauver 16% des victimes passagers et 11% de l'ensemble des victimes (passagers + piétons).



**Figure 1.2** – Evolution du nombre de décès sur les routes françaises depuis 1960, associée à la disponibilité de systèmes d'aide à la conduite (Perrin 2013)

### 1.2.2. Programmes de recherche académiques et industriels

Le domaine de l'assistance à la conduite fait partie du domaine des systèmes intelligents de transport (en anglais ITS pour «Intelligent Transportations Systems») qui se partage, selon l'angle abordé, entre les secteurs de la "voiture intelligente" ou de la "route intelligente". L'ensemble de ces technologies appliquées au transport vise à le rendre plus sûr, plus efficace ou plus écologique. Dans cette optique, l'enjeu principal est de doter le conducteur de systèmes qui l'informent et l'assistent dans ses manœuvres. Les systèmes à l'étude prennent ainsi en compte chacune des composantes de l'opération, c'est-à-dire tant le véhicule que l'infrastructure et le conducteur. A terme, ces systèmes sont susceptibles de transformer l'usage des automobiles pour renforcer sensiblement la sécurité de la circulation.

Les objectifs des programmes de recherche concernant l'assistance à la conduite sont centrés sur la réduction de l'accidentologie et des congestions. Les principales stratégies d'assistance sont fondées sur la notion de trajectoire de référence : position latérale, vitesse et accélération du véhicule. Le but est de conseiller le conducteur ou d'encadrer ses actions pour minimiser les risques tout en le laissant maître de son véhicule. La méthode envisagée pour répondre à cette problématique consiste à effectuer un guidage latéral couplé à un contrôle avancé de la vitesse longitudinale au moyen des techniques de perception. La perception de l'environnement est un axe de recherche à part entière souvent basé sur la fusion de données. Ces données peuvent être issues de plusieurs capteurs tels que radar,

caméra, lidar ou délivrées par une cartographie ou une communication locale avec l'infrastructure et/ou les véhicules environnants.

Les paragraphes suivants présentent les programmes de recherche récents et en cours d'exécution dans le domaine de l'assistance à la conduite.

- **DARPA Grand Challenge** (2004; 2005; 2007)

*Durée* : Environ 18 mois entre l'annonce du challenge et la finale

*Objectif* :

Le DARPA Grand Challenge est une compétition organisée par la DARPA (« Defense Advanced Research Projects Agency » : agence responsable des projets de recherche avancée pour la Défense aux États-Unis) mettant en jeu des véhicules terrestres qui devaient naviguer et atteindre une cible sans pilote de manière autonome.

*Partenaires* : La plupart des équipes sont issues de laboratoires universitaires souvent associés à des industriels (Ford, Delphi, Volkswagen ...).

*Financement* : DARPA et les sponsors des équipes

*Résultat* :

Lors de la première édition (2004), aucun véhicule n'a été en mesure de terminer le circuit de 241,4km traversant le désert du sud-ouest des Etats-Unis. En 2005 (figure 1.3), sur un circuit similaire, cinq véhicules achèvent le parcours dont seulement quatre dans les délais impartis (10h). La troisième édition (2007) est renommée DARPA Urban Challenge puisqu'elle se déroule sur un circuit représentant un milieu urbain. Après une série d'épreuves de sélection seulement onze équipes participent à la l'épreuve finale. Six véhicules réussissent à franchir la ligne d'arrivée dont seulement quatre en moins de 6h (Tartan Racing - Pittsburgh, PA ; Stanford Racing Team - Stanford, CA ; Victor Tango - Blacksburg, VA ; MIT - Cambridge, MA).



**Figure 1.3** – Véhicule vainqueur du DARPA Grand Challenge 2005

*Références* :

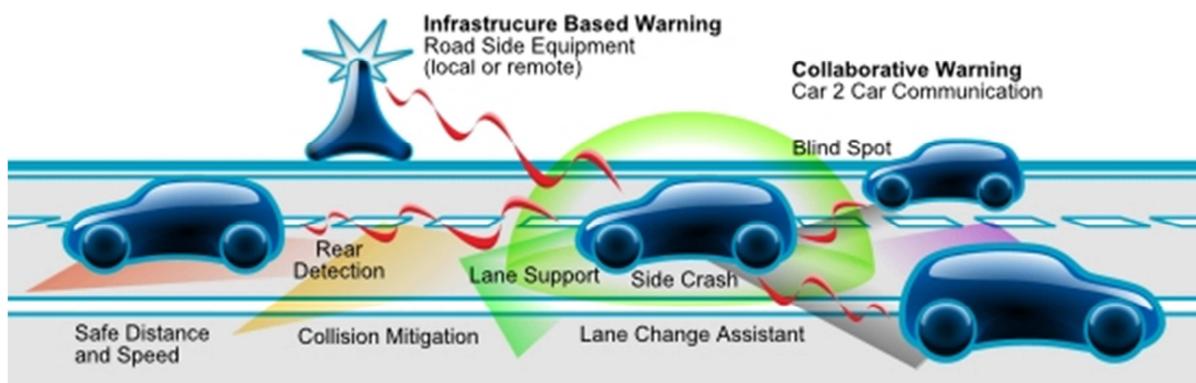
Les archives des différentes éditions sont consultables sur le site de la DARPA:  
<http://archive.darpa.mil/> ->grandchallenge04 ; ->grandchallenge05 ; ->grandchallenge

• **SAFESPOT**

*Durée* : 4 ans, de 2006 à 2010

*Objectif* :

L'objectif était de créer des réseaux de coopération dynamiques où les véhicules et l'infrastructure routière communiquent et partagent les informations recueillies à bord et au bord de la route pour améliorer la perception de l'environnement pour le conducteur du véhicule (figure 1.4). Ce projet intégrait aussi le développement de l'architecture du réseau qui devait être ouverte, flexible et modulaire avec des plates-formes de communication, mais aussi définir la stratégie de déploiement de ces systèmes, l'évaluation de la responsabilité et les aspects de normalisation.



**Figure 1.4** – Schéma illustrant le « safety margin assistant » pour détecter les dangers potentiels

*Partenaires* : 42 (19 industriels, 19 laboratoires, 4 institutionnels)

Constructeurs automobiles :

- Fiat
- Daimler
- Renault
- Volvo

*Financement* : Commission européenne et EUCAR (European Council for Automotive R&D)

*Résultat* :

Ce projet a réalisé différentes démonstrations en France, Espagne, Allemagne, Italie, Suède et aux Pays-Bas permettant de démontrer la faisabilité de la mobilité coopérative grâce à un réseau entre les véhicules et l'infrastructure. La conclusion principale est donc que la coopération est possible dès aujourd'hui et est une étape clé pour assurer une mobilité avec toujours plus de sécurité et d'efficacité. Depuis, d'autres projets européens intégrant des essais opérationnels comme SCORE@F et maintenant SCOOP@F sont en cours.

*Références* :

Tous les livrables de ce projet sont consultables sur le site du projet : [www.safespot-eu.org](http://www.safespot-eu.org).

- **Aktiv** – (en allemand : « *Adaptive und Kooperative Technologien für den Intelligenten Verkehr* ») Technologies adaptatives et coopératives pour le trafic intelligent

Durée : 4 ans, de 2006 à 2010

Objectif :

Dans le but d'améliorer à la fois la sécurité routière et la fluidité du trafic, les partenaires ont travaillé ensemble pour concevoir, développer et évaluer de nouveaux systèmes. Ce programme se divisait en trois projets :

- Aktiv-AS (sécurité active) qui traitait de la mise au point de systèmes d'assistance au conducteur avec un accent sur les applications de sécurité (figure 1.5).
- Aktiv-VM (gestion du trafic) a développé des technologies pour contribuer l'amélioration de la performance du réseau routier.
- Cocar (voitures coopératives) visait le développement des technologies de communication mobiles (3G) pour les applications de véhicules coopératifs (C2C et C2I).



**Figure 1.5** – Système « assistant latéral intégré » pour le suivi et le changement de voie

Partenaires : 29 (22 industriels, 7 laboratoires)

Constructeurs automobiles :

- BMW
- Audi
- Volkswagen
- Daimler
- Ford
- Opel
- MAN

Financement : Etat allemand

Résultat :

Après quatre années de travail de recherche intensif, les partenaires du projet AKTIV ont visualisé la façon d'améliorer la sécurité routière, soulager les conducteurs et d'harmoniser les flux de trafic à travers de nombreuses démonstrations et simulations lors de la présentation finale.

Références :

Toutes les informations sur ce programme sont disponibles sur le site : [www.aktiv-online.org](http://www.aktiv-online.org).

• **CityMobil**

*Durée* : 5 ans, de 2006 à 2011

*Objectif* :

Ce projet de recherche d'envergure traitait de l'intégration des systèmes de transport automatisés en milieu urbain. L'objectif du projet était la mise en œuvre de systèmes de transport automatisés sur les implémentations réelles de quatre sites d'essai :

- la mise en œuvre de cyber-voitures à Rome (Italie) et La Rochelle (France, figure 1.6) ;
- une technologie de pointe mise en œuvre sur des bus à Castellón (Espagne) ;
- la mise en œuvre de PRT (Personal Rapid Transit = transport rapide personnalisé) à l'aéroport d'Heathrow (Royaume-Uni).



**Figure 1.6** – CyberCar testée à La Rochelle

*Partenaires* : 31 (16 industriels, 10 laboratoires, 5 institutionnels)

*Financement* : Commission européenne

*Résultat* :

En plus des trois démonstrations prévues, une quatrième a eu lieu à La Rochelle où pendant trois mois des véhicules entièrement automatisés ont assuré le transport de passagers. Tous ces essais ont permis de recueillir des données importantes sur la réaction des utilisateurs, les difficultés techniques et les performances des différents systèmes. Ce projet a mis en évidence que les obstacles principaux à l'introduction à grande échelle des systèmes de transport automatisés ne sont pas de nature technologique. L'obstacle le plus important est la sécurité, et plus particulièrement la certification des différents systèmes. L'un des résultats du projet de CityMobil est un ensemble de procédures de certification, mais il y a un long chemin à parcourir avant que celles-ci soient largement acceptées par tous. Un nouveau projet CityMobil 2 est actuellement en cours depuis 2012 et jusqu'en 2016.

*Références* :

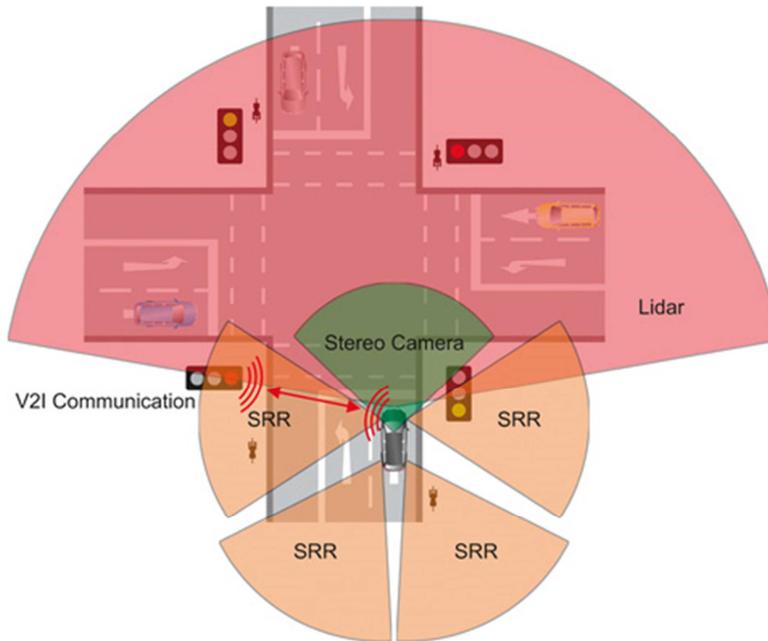
Tous les livrables de ce projet sont consultables sur le site du projet : [www.citymobil-project.eu](http://www.citymobil-project.eu).

• **INTERSAFE 2 – Cooperative Intersection Safety System (CISS)**

*Durée* : 3 ans, de 2008 à 2011

*Objectif* :

L'objectif était de développer et de démontrer l'utilité d'un système de sécurité coopératif qui est capable de réduire considérablement les blessures et les accidents mortels aux intersections (figure 1.7). Le système combine les fonctions d'alerte et d'intervention. Il permet une amélioration significative de la fluidité du trafic et donc de réduire la consommation de carburant en milieu urbain.



**Figure 1.7** – Schéma des différents capteurs mise en jeu dans le système CISS

*Partenaires* : 11 (8 industriels, 3 laboratoires)

Constructeurs automobiles :

- BMW
- Volvo
- Volkswagen

*Financement* : Commission européenne

*Résultat* :

Ce système a été testé sur trois véhicules (deux voitures et un poids lourd). Le système développé est capable de détecter les composants statiques et dynamiques d'une intersection. La géométrie de la route est estimée. Les obstacles sont détectés, suivis et ensuite classés selon leur type (par exemple, piétons, véhicules, poteaux de feux) et donc leur importance dans le trafic.

*Références* :

Le site du projet INTERSAFE-2 est hors ligne. Cependant, des informations sur le CISS (Système de sécurité coopératif pour les intersections) peuvent être trouvées sur le site du CVIS (Cooperative Vehicle Infrastructure Systems) : [www.cvisproject.org](http://www.cvisproject.org).

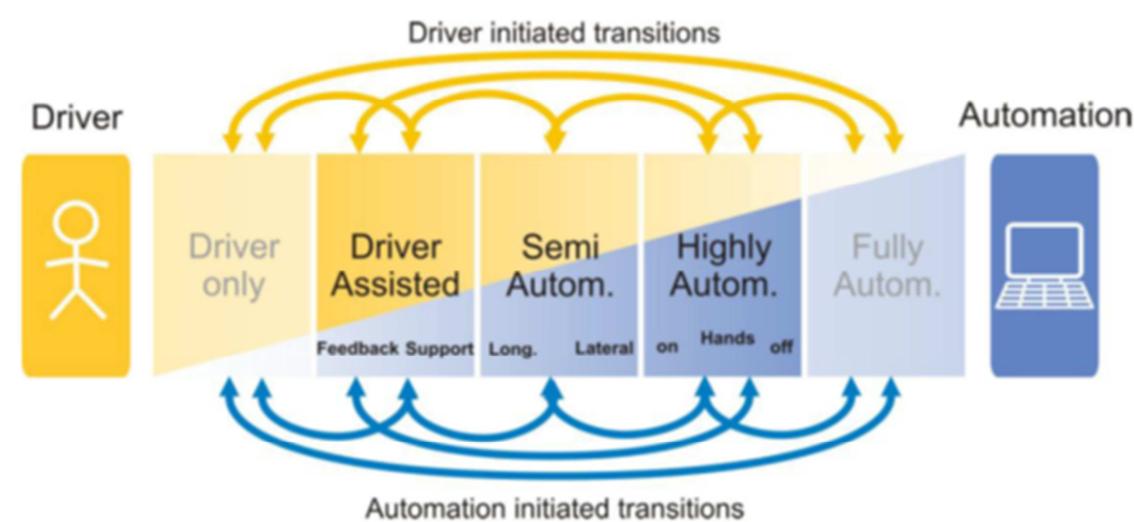
• **HAVEit** – *Highly Automated Vehicles for Intelligent Transport*

*Durée* : 3 ans, de 2008 à 2011.

*Objectif* :

L'objectif était de réaliser la vision à long terme de la conduite hautement automatisée pour le transport intelligent à travers trois mesures :

- conception de la répartition des tâches entre le conducteur et le système de co-conduite (ADAS) dans le système commun (figure 1.8) ;
- réalisation d'une architecture véhicule tolérante aux fautes intégrant une gestion de la redondance ;
- développement et validation de la prochaine génération d'ADAS dirigée vers un niveau d'automatisation plus élevé par rapport à l'état actuel de la technique.



**Figure 1.8** – Niveaux d'automatisation considérés par le projet HAVEit

*Partenaires* : 23 (13 industriels, 10 laboratoires)

Constructeurs automobiles :

- Volvo Technology (Suède)
- Volkswagen (Allemagne)

*Financement* : Commission européenne

*Résultat* :

Lors de l'événement final du projet, sept véhicules de démonstration ont été exposés. Un véhicule automatisé a conduit à travers un chantier de construction sans intervention du conducteur. Une autre voiture a été capable de dépasser un véhicule, après que le conducteur ait appuyé sur le bouton approprié. Enfin, un camion a reconnu une situation d'embouteillage et a ralenti automatiquement.

*Références* :

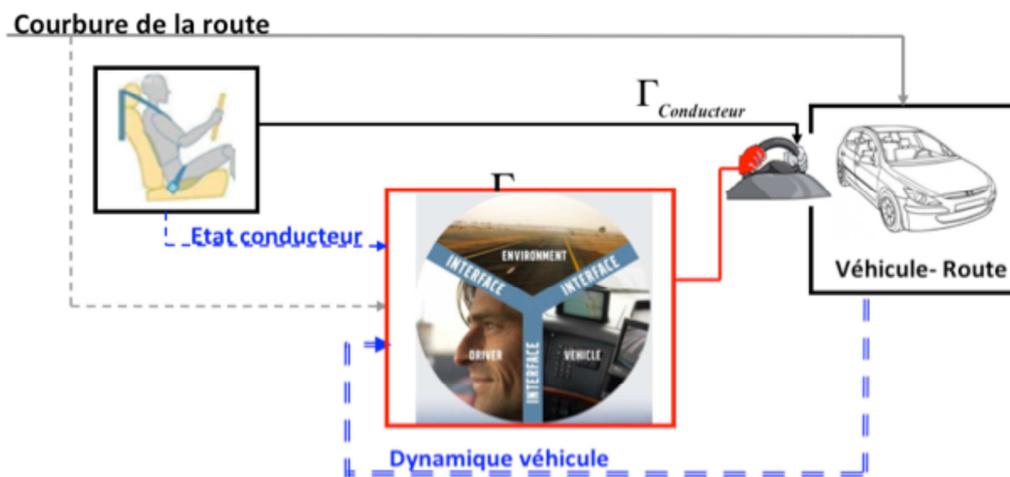
Tous les livrables de ce projet sont consultables sur le site du projet : [www.haveit-eu.org](http://www.haveit-eu.org).

• **PARTAGE** – *Contrôle partagé entre conducteur et assistance à la conduite automobile pour une trajectoire sécurisée*

*Durée* : 4 ans, 2008 à 2012

*Objectif* :

Ce projet traitait de la coopération entre dispositifs techniques (automates d'assistance à la conduite) et conducteurs en y intégrant des questions cruciales de facteurs humains, comme par exemple celles concernant l'acceptabilité individuelle et sociale du partage de la commande. La recherche s'est concentrée sur le mode de contrôle mutuel (avertissement sonore ou haptique d'écart à une trajectoire sûre ou suggestion haptique d'action sur le volant) pour aller vers le concept plus ambitieux de contrôle partagé. Dans ce cadre, l'automate combine son action avec celle du conducteur pour sécuriser la trajectoire. Avec le mode de contrôle partagé continu, l'initiative de la commande peut venir de part et d'autre (figure 1.9). Ces modes constituent de réelles innovations qui peuvent préparer la voie au «steer by wire».



**Figure 1.9** – *Principe de la solution de contrôle partagé*

*Partenaires* : 8 (2 industriels, 5 laboratoires, 1 institutionnel)

Constructeur automobile :

- Renault

*Financement* : Agence Nationale de la Recherche (ANR) France

*Résultat* :

Ce projet s'est conclu par plusieurs essais sur véhicule et simulateur de conduite. Trois dispositifs de correction de la trajectoire ont été développés, un contrôle partagé (continu) a été réalisé auquel est intégré un modèle du conducteur, pour n'agir qu'en complément. Le contrôle de la vitesse (mode limite ou régulé) à l'approche de virage a été mis en œuvre sur véhicule d'essai. Enfin, une étude sur l'acceptabilité et l'acceptation du contrôle partagé a été menée et a apporté des conclusions positives.

*Références* :

Le site du projet PARTAGE est hors ligne mais les conclusions finales sont consultables sur le site : [www.predit.prd.fr/predit4/projet/40441](http://www.predit.prd.fr/predit4/projet/40441).

- **GCDC – Grand Cooperative Driving challenge**

*Durée* : 2 ans, 2009 à 2011

*Objectif* :

GCDC était une compétition internationale (figure 1.10), ce projet visait à réunir l'industrie et le milieu universitaire pour accélérer le développement et la mise en œuvre de technologies de coopération entre véhicules. GCDC s'est concentré sur un type spécifique de conduite coopérative : les trains de véhicules (pelotons). Le but était donc pour chaque équipe de développer un régulateur de vitesse adaptatif et coopératif (CACC). Le véhicule équipé peut ainsi suivre le véhicule précédent avec une distance inter-véhicule courte. La raison principale de se concentrer sur le CACC est la promesse d'une augmentation significative de la capacité routière (débit) et une diminution correspondante de la consommation de carburant sans compromettre la sécurité.



**Figure 1.10** – Photo de l'équipe Scoop (Suède) lors de la finale du GCDC

*Partenaires* : 11 équipes avec comme leader une université

*Financement* : TNO (organisme néerlandais pour la recherche scientifique appliquée) et High Tech Automotive Systems (programme de recherche néerlandais)

*Résultat* :

La compétition a eu lieu sur l'autoroute A270, aux Pays-Bas entre Helmond et Eindhoven qui a été fermée au public pendant le week-end de la finale. C'est l'équipe allemande AnnieWAY qui a remporté cette compétition.

Une nouvelle édition est lancée depuis 2013, le challenge final aura lieu en 2016.

*Références* :

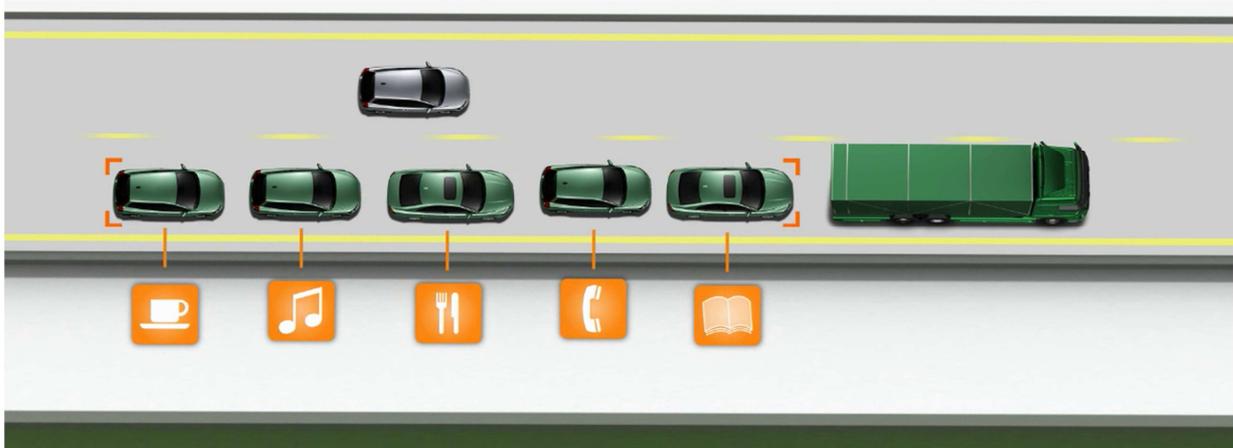
Le site de la prochaine édition est ouvert aux inscriptions : [www.gcdc.net](http://www.gcdc.net).

• **SARTRE** – *Safe Road Trains for the Environment*

*Durée* : 3 ans, de 2009 à 2012

*Objectif* :

Ce projet visait à développer des stratégies et des technologies pour permettre à des trains routiers (pelotons de véhicules, figure 1.11) de circuler sur les voies publiques apportant ainsi d'importants avantages environnementaux, de sécurité et de confort. Le programme élaboré donne la responsabilité du peloton au véhicule de tête qui est conduit par un pilote professionnel. Les véhicules suivants entrent alors dans un mode de contrôle semi-autonome qui permet au conducteur de la voiture de faire d'autres choses normalement interdites pour des raisons de sécurité; par exemple, utiliser un téléphone, lire un livre ou regarder un film.



**Figure 1.11** – Illustration du projet SARTRE

*Partenaires* : 7 (6 industriels, 1 laboratoire)

Constructeurs automobiles :

- Volvo (Suède)

*Financement* : Commission européenne

*Résultat* :

Le système SARTRE a abouti à une démonstration sur route ouverte. Un train de véhicules, composés de 2 camions et 3 voitures a parcouru 200 kilomètres sur une autoroute près de Barcelone. Une distance de 6 mètres séparait chaque élément du convoi, qui a adopté une vitesse moyenne de 85 km/h. Grâce à des capteurs, des lasers et des caméras, seul le véhicule de tête était contrôlé par un humain.

*Références* :

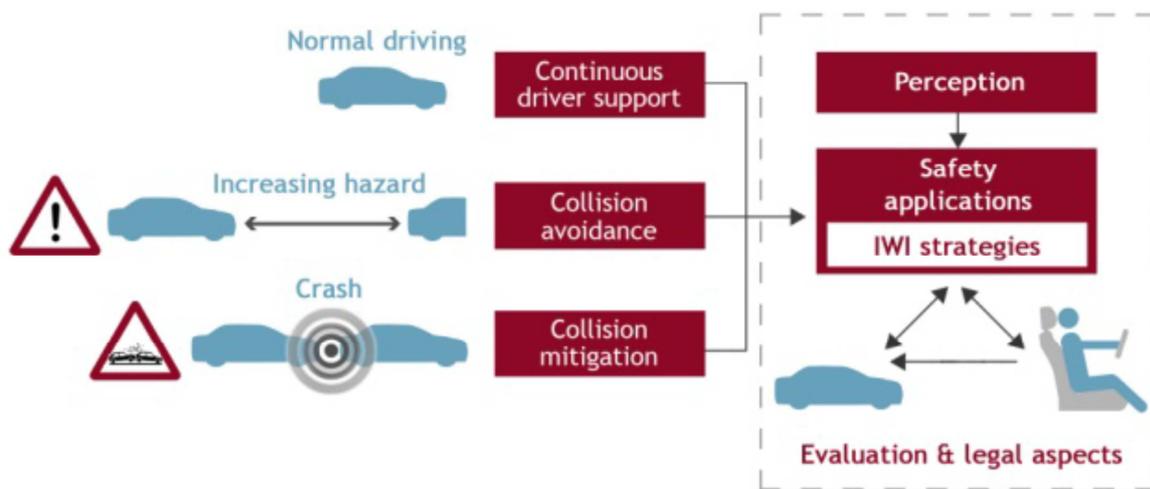
Tous les livrables de ce projet sont consultables sur le site du projet : [www.sartre-project.eu](http://www.sartre-project.eu).

• **Interactive** – *accident avoidance by active intervention for Intelligent Vehicles*

*Durée* : 4 ans, de 2009 à 2013

*Objectif* :

Le but était de développer des ADAS pour une conduite plus sûre et plus efficace (figure 1.12). Le conducteur est constamment assisté par des systèmes d'aide interactifs qui l'avertissent dans des situations potentiellement dangereuses. Les systèmes ne réagissent pas seulement aux situations dangereuses, mais sont également en mesure d'intervenir (action sur les freins et la direction) dans le but de protéger les occupants et les usagers de la route.



**Figure 1.12** – Schéma illustrant les différents objectifs du projet Interactive

*Partenaires* : 29 (13 industriels, 16 laboratoires)

Constructeurs automobiles :

- Ford
- BMW
- Fiat
- Daimler
- Volvo
- Volkswagen

*Financement* : Commission européenne

*Résultat* :

Sept véhicules de démonstration (six voitures particulières des différentes catégories et un camion) ont été construits pour développer, tester et évaluer la prochaine génération de systèmes de sécurité.

*Références* :

Tous les livrables de ce projet sont consultables sur le site du projet : [www.interactive-ip.eu](http://www.interactive-ip.eu)

- **ABV – Automatisation Basse Vitesse**

*Durée* : 4 ans, de 2009 à 2013

*Objectif* :

ABV visait l'automatisation de la conduite à basse vitesse (jusqu'à 50km/h) sur des itinéraires sécurisés avec un désengagement partiel ou complet du conducteur (contrôle longitudinal et latéral du véhicule). L'objectif était la réalisation de deux prototypes (figure 1.13) et de moyens de simulation et aussi permettre d'évaluer l'impact sur le trafic et l'environnement de ces nouveaux types de véhicule sur route ouverte.



**Figure 1.13** – Exemple de l'IHM du système ABV

*Partenaires* : 10 (4 industriels, 6 laboratoires)

*Financement* : Agence Nationale pour la Recherche (ANR) (France)

*Résultat* :

Dans le cadre du projet, trois prototypes ont été développés. Le partage de la conduite a été mis en œuvre et évalué sur simulateur en utilisant notamment le driver monitoring, ainsi que des IHM visuelles et haptiques. La détection des voies et des obstacles, la planification et le contrôle automatisé ont été testés sur véhicules (C1 et 307).

*Références* :

Le site du projet ABV est hors ligne mais les conclusions finales sont consultables sur les sites : [www.predit.prd.fr/predit4/projet/4047](http://www.predit.prd.fr/predit4/projet/4047) et <http://serres.ifsttar.fr/action-4-optimisation-de-la-conception-du-systeme-routier/livrables/abv-automatisation-basse-vitesse/>.

- **Google Car** – *Voiture sans conducteur*

*Durée* : toujours en cours, probablement commencé en 2009

*Objectif* :

Le système de pilotage automatique utilise un lidar, une caméra, des radars, un récepteur GPS et des capteurs sur les roues motrices. L'itinéraire est d'abord parcouru une ou plusieurs fois de manière classique, avec un conducteur pilotant le véhicule, afin d'enregistrer la route et toute sa signalisation, et d'en dresser une carte très détaillée. Ces informations seront ensuite comparées avec les données récoltées lorsque la voiture sera autonome. Cela permettra notamment au véhicule de différencier les piétons des objets immobiles.



**Figure 1.14** – *Prototype de véhicule autonome présenté par Google en mai 2014*

*Partenaires* : aucun connu

*Financement* : Google

*Résultat* :

En octobre 2010, Google annonce avoir conçu un système de pilotage automatique pour automobile, déjà installé sur huit véhicules. En Avril 2014, Google a annoncé que leurs véhicules ont parcouru près de 700 000 miles (1,1 million de km) en autonomie. Après avoir transformé des véhicules du marché, Google souhaite construire son propre véhicule électrique et autonome pour le commercialiser (figure 1.14).

*Références* :

Des vidéos de la Google Car sont consultables sur différents sites :

<https://www.youtube.com/channel/UCCLyNDhxwpqNe3UeEmGHI8g>

<http://www.google.com/about/careers/lifeatgoogle/self-driving-car-test-steve-mahan.html>

### 1.2.3. Perspectives

Le nombre de projets de recherche en cours atteste de la multiplication à venir des systèmes d'assistance à la conduite, dont de plus en plus de véhicules commercialisés sont équipés. Les systèmes tels que le régulateur de vitesse adaptatif commercialisé pour la première fois sur un véhicule haut de gamme en 1998 sont ainsi présents aujourd'hui des véhicules de milieu de gamme.

La révision du barème de notation de l'Euro NCAP devrait renforcer le déploiement de ce type de système. Depuis 2009 une quatrième catégorie « système d'assistance » a été ajoutée au barème qui ne comportait que les trois suivantes :

- Protection des occupants adultes ;
- Protection des occupants enfants ;
- Protection des piétons.

Cette nouvelle catégorie ne considérait jusqu'en 2012 que les systèmes d'alerte au bouclage de ceinture, le contrôle électronique de stabilité (ESC=ESP) et le limiteur de vitesse. Avec les évolutions à venir (Miller et al. 2013), il sera quasiment impossible, à l'horizon 2016, d'atteindre la note globale de 5 étoiles sur 5 sans avoir de système d'alerte au maintien de voie et/ou de freinage automatique d'urgence, comme l'indique la figure 1.15.

	2013	2014	2016
 protection des occupants adultes	50% 36 points	40% 38 points	40% 38 points
 protection des occupants enfants	20% 49 points	20% 49 points	20% 49 points
 protection des piétons	20% 36 points	20% 36 points	20% 42 points
 aide à la sécurité	10% 9 points	20% 13 points	20% 13 points

**Figure 1.15** – Notation Euro NCAP

L'Union Européenne pourrait également légiférer dans le sens d'Euro NCAP comme ce fut le cas dans le passé pour l'ESP, devenu obligatoire pour tous les nouveaux véhicules depuis 2012.

Enfin, la recherche semble de plus en plus se diriger vers l'automatisation des véhicules et le véhicule autonome. La suite logique semble donc passer par des systèmes d'automatisation à basse vitesse ou sur des routes sécurisées telles qu'une autoroute. Ainsi,

la prochaine étape pourrait être la délégation de conduite dans une situation précise, en embouteillage par exemple.

En 2012, l'institut fédéral allemand de recherche routière (« Bundesanstalt für Straßenwesen », BAST) a proposé un premier formalisme des niveaux d'automatisation de la conduite comprenant cinq niveaux (Gasser 2012). En 2013, l'agence américaine chargée de la sécurité routière (« National Highway Traffic Safety Administration », NHTSA) puis, en 2014, l'association internationale des ingénieurs de l'automobile (SAE International) ont elles aussi publié leur définition des niveaux d'automatisation (NHTSA 2013) (SAE 2014).

Ces définitions présentées sur la figure 1.16 sont maintenant communément admises. Les constructeurs et les équipementiers préfèrent cette approche progressive misant sur une collaboration entre l'homme et le système. Les systèmes existant correspondent aux deux premiers niveaux. Le système proposé dans le cadre de cette thèse tend vers le niveau 3.

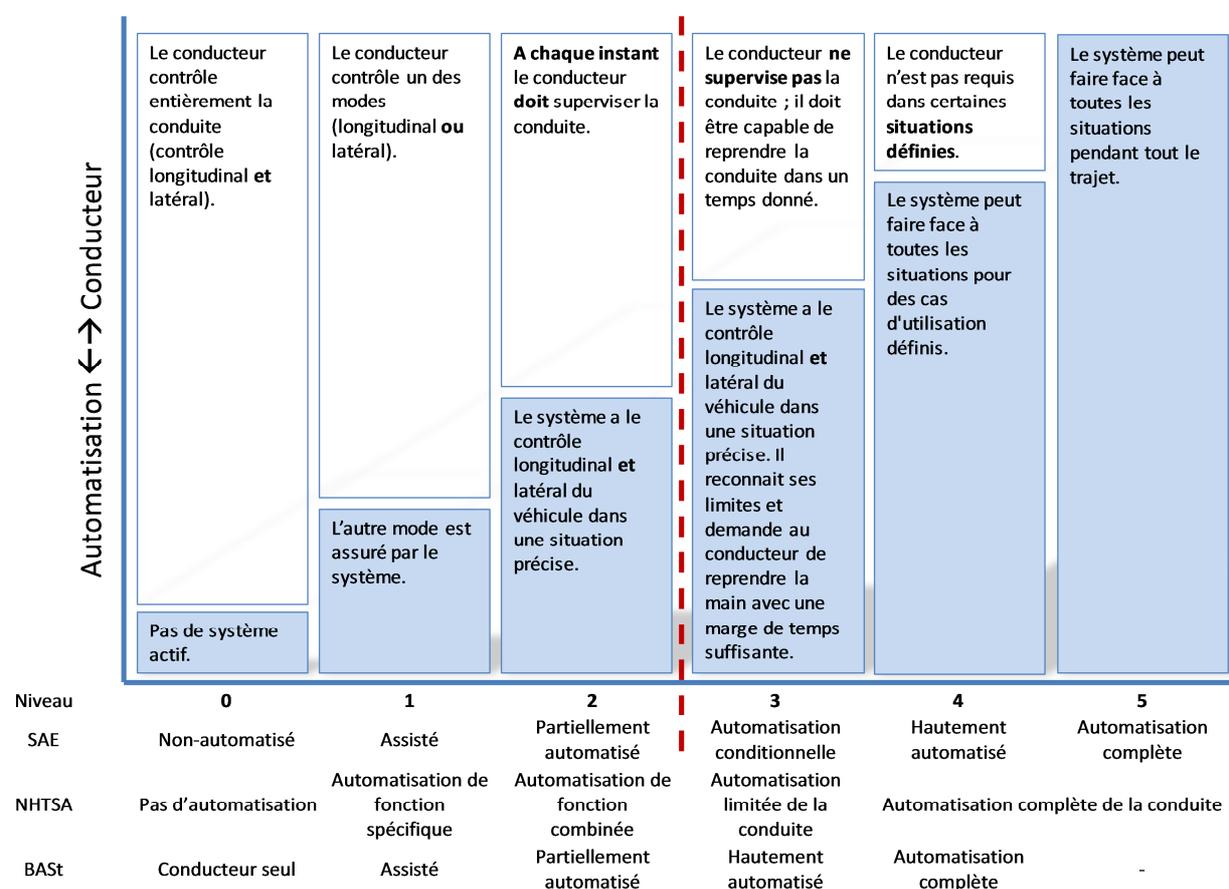


Figure 1.16 – Niveaux d'automatisation de la conduite

L'idée de véhicules intelligents capables de penser décrite dans le roman « Sally » de l'auteur de sciences fiction I. Asimov, ne semble plus si éloignée de la réalité. La recherche dans ce domaine est d'autant plus encouragée que de tels équipements constituent de réels facteurs d'attractivité et de différenciation pour un constructeur automobile.

## **1.2.4. Limitations**

Le développement des systèmes existants d'aide à la conduite se heurte à des limitations, en matière de responsabilité, de fiabilité et d'acceptabilité.

### ***1.2.4.1. Responsabilité***

La première des limitations vers l'automatisation de la conduite est aujourd'hui d'ordre juridique et concerne la responsabilité en cas d'accident dû à une défaillance du système.

La question de la responsabilité en matière de circulation routière est aujourd'hui réglée, à l'échelle internationale, par un traité international : la convention de Vienne de 1968. L'article 8.1 de ce texte précise que « tout conducteur doit constamment avoir le contrôle de son véhicule ». De même, « tout conducteur de véhicule doit rester, en toutes circonstances, maître de son véhicule, de façon à pouvoir se conformer aux exigences de la prudence et à être constamment en mesure d'effectuer toutes les manœuvres qui lui incombent. Il doit, en réglant la vitesse de son véhicule, tenir constamment compte des circonstances, notamment de la disposition des lieux, de l'état de la route, de l'état et du chargement de son véhicule, des conditions atmosphériques et de l'intensité de la circulation, de manière à pouvoir arrêter son véhicule dans les limites de son champ de visibilité vers l'avant ainsi que devant tout obstacle prévisible. Il doit ralentir et, au besoin, s'arrêter toutes les fois que les circonstances l'exigent, notamment lorsque la visibilité n'est pas bonne » (article 13.1).

Les lois nationales ont toutefois précisé la portée de ce texte international, notamment pour prendre en compte l'utilisation des systèmes ADAS. Une première autorisation d'exploitation a été délivrée aux Etats-Unis pour la Google Car. Le Nevada a adopté une loi en juin 2011 sur le fonctionnement des voitures sans conducteur, qui est entrée en vigueur le 1<sup>er</sup> mars 2012. Une Toyota Prius expérimentale, modifiée avec la technologie sans conducteur de Google, a ensuite été autorisée par le Département du Nevada of Motor Vehicles (DMV) en mai 2012. Le règlement du Nevada exige cependant qu'une personne soit derrière le volant et une autre sur le siège passager lors des essais.

En l'absence de réglementation plus protectrice sur la question de la responsabilité, il est vraisemblable que les constructeurs restent peu enclins à la commercialisation de tels systèmes.

### ***1.2.4.2. Fiabilité***

Une deuxième limite au développement des systèmes ADAS réside en matière de fiabilité. En effet, pour recueillir les données de l'environnement, la plupart de ces systèmes utilisent des capteurs (radar, caméra, lidar) dont la précision varie selon les conditions météorologiques (neige, brouillard et même jour/nuit).

Les systèmes automatisés présentent ainsi intrinsèquement des risques en matière de sécurité, d'autant que tout nouveau système est à priori moins fiable que ses prédécesseurs dont les erreurs et défauts sont déjà connus et traités.

En général, des réponses de deux natures différentes peuvent être apportées selon les cas de défaillance rencontrés :

- la redondance pour les défauts mécaniques, circuit électrique et informations capteur ;
- une Interface Homme/Machine (IHM) pour gérer les changements en matière de contrôle (conducteur humain / système automatisé) et alerter le conducteur en cas de défaillance.

Cette dernière solution reste la plus complexe à établir puisqu'il faut ici assurer le retour du conducteur aux commandes du véhicule.

Enfin, des solutions techniques restent à élaborer pour permettre la compatibilité entre systèmes de véhicules distincts et garantir la sécurité des informations échangées dans le cadre de la communication véhicule/infrastructure et/ou véhicule/véhicule nécessaire à certains systèmes. La mise en place de normes spécifiques à ce type de système doit être étudiée. Cette question est traitée dans le Chapitre 5.

### **1.2.4.3. Acceptabilité**

L'arrivée des systèmes d'aide à la conduite entraîne inévitablement un changement des habitudes de conduite. Or, le comportement qui consiste à conduire son véhicule tout en tolérant des régulations automatiques n'est pas intuitif pour le conducteur et suppose une évolution des mentalités et des pratiques.

Les facteurs clés de l'acceptabilité d'un système sont l'utilité et la facilité d'utilisation. Pour cela, les constructeurs et équipementiers cherchent à rendre l'action du système évidente en assurant un déclenchement approprié et capable de s'adapter à une large palette de styles de conduite. Enfin, ils développent des IHM et des modes de prise en main intuitifs. L'objectif est de ne surtout pas créer de gêne. En revanche, le risque est réel de voir le conducteur abaisser son implication dans la conduite en tablant sur une régulation des systèmes embarqués. Enfin, l'acceptabilité est à mettre en lien avec la confiance. Le conducteur qui n'a pas confiance dans le système risque, in fine, de le désactiver purement et simplement, ce qui réduira à néant les bénéfiques potentiels de cette technologie.

## **1.3. Système d'aide à la conduite proposé**

Sur la base des avancées technologiques en matière d'assistance à la conduite, le système présenté ci-après a été élaboré dans l'optique d'offrir au conducteur une *assistance* qui pourra le libérer de certaines tâches sans lui ôter son rôle prépondérant dans la conduite du véhicule. Ce système se place sur l'échelle de l'automatisation du véhicule entre les niveaux 2 et 3 ainsi, le conducteur doit toujours avoir les mains sur le volant.

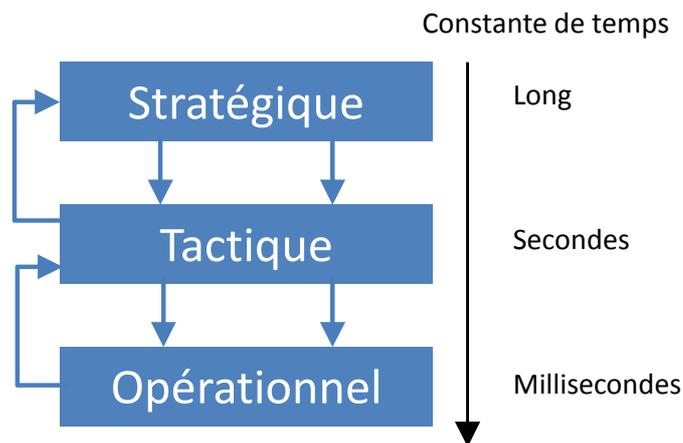
### **1.3.1. Approche bio-inspirée : les bancs de poissons**

*L'objectif principal de cette thèse est de créer un système d'assistance à la conduite capable d'apporter sécurité et confort au conducteur. Pour cela, une solution globale est présentée qui permet une prise en compte simultanée des dynamiques longitudinales et latérales (couplage) ainsi que des gains en termes d'encombrement, de masse et de flux d'informations.*

Le choix de limiter le système à l'assistance au conducteur et non de proposer une automatisation complète est censé permettre une meilleure acceptabilité de la fonction par le conducteur. De plus, pour apporter plus de confort, cette étude tend aussi à prendre en compte la gestion de trafic en analysant les effets d'un tel système sur les embouteillages.

Le système doit être capable d'analyser la situation et d'apporter une proposition au conducteur. L'activité de conduite réalisée par l'Homme a été modélisée par Michon (Michon 1985) en 1985 comme une hiérarchie de tâches dont les trois niveaux sont décrits par la figure 1.17.

- Le **niveau stratégique** (navigation) se réfère aux activités liées à la planification du trajet et de l'itinéraire.
- Le **niveau tactique** (manœuvre) intègre les processus d'analyse de l'environnement, de prise de décision et de planification des actions de conduite à engager selon le cas, comme l'évitement d'obstacles ou le changement de voie.
- Le **niveau opérationnel** (contrôle) concerne la planification détaillée des actions de conduite : le suivi de voie et le contrôle longitudinal et latéral du véhicule.



**Figure 1.17** – Hiérarchisation des tâches de conduite selon Michon

*Le système d'aide à la conduite présenté ici se place sur les deux derniers niveaux (tactique et opérationnel).*

En situation de conduite, chaque usager doit partager la route en évitant toute collision avec les autres véhicules, les piétons et l'infrastructure routière. Cet objectif commun à tous les conducteurs favorise l'émergence d'un comportement de déplacement en groupe comme l'illustre la figure 1.18. Les déplacements en groupe ou déplacements en essaim se retrouvent dans la nature, notamment chez les poissons lorsqu'ils se déplacent en bancs ou encore chez les oiseaux qui migrent en nuées. Toutefois, deux différences fondamentales séparent la conduite sur route du déplacement :

- tous les conducteurs ne partagent pas la même destination ;
- l'objectif des conducteurs sur les routes n'est pas de former des chaînes connectées (trains routiers, pelotons).



**Figure 1.18** – Illustration de l'analogie banc de poissons / trafic routier

*Notre système s'inspire de la capacité des poissons à se déplacer en groupe pour élaborer les décisions de manœuvres à réaliser.*

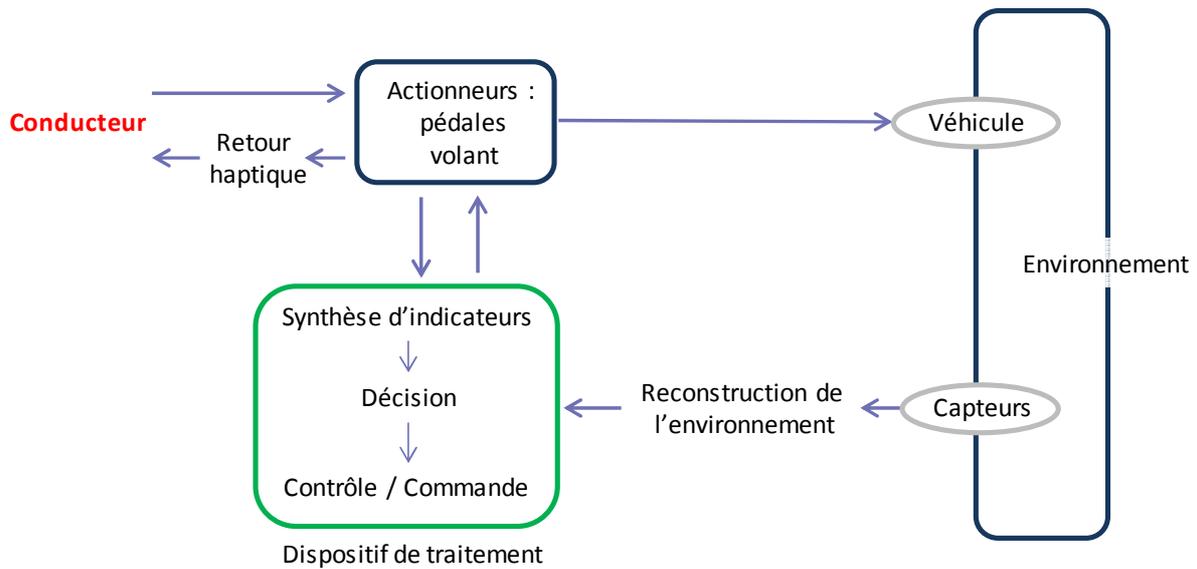
Au niveau opérationnel, le conducteur garde le contrôle du véhicule. Cependant, le système va lui transmettre les actions les plus adaptées à la situation, ce qui revient à un contrôle partagé où le conducteur reste le superviseur. Ce contrôle partagé a été décrit par Flemish (Flemisch et al. 2003) comme la métaphore du cheval (en anglais « H-metaphor »). L'interaction entre le conducteur et le véhicule est comparée à l'interaction entre le cavalier et le cheval. L'idée principale est d'avoir un partage continu de la tâche de conduite entre le conducteur et le véhicule. La métaphore se réfère aux extrêmes de l'interaction, c'est-à-dire rênes libres ou bride serrée. Le mode libre caractérise un mode où le pilote peut être distrait tandis que le cheval/véhicule a la responsabilité de se déplacer en toute sécurité dans son environnement et ainsi d'éviter tout obstacle. A l'inverse, lorsque les rênes sont serrées, le cavalier indique qu'il est conscient de la situation et peut alors forcer le cheval à initier des actions.

Enfin, un autre élément important d'un système d'aide à la conduite est l'IHM pour communiquer avec le conducteur. Si les voies de communications les plus utilisées sont visuelle et sonore, le choix privilégié ici est le *retour haptique* qui fait référence au sens du toucher ou plus précisément à la perception kinesthésique, c'est-à-dire la perception du retour de force. En effet, la vue étant un sens déjà très sollicité lors de la conduite, le choix d'ajouter des voyants représente une surcharge pour le conducteur. Quant au retour sonore, celui-ci n'est pas toujours facilement interprétable. Pour ces raisons, mais aussi parce qu'un retour haptique est un phénomène réactif inconscient plus rapide et donc plus efficace que l'adaptation consciente, le retour haptique est la voie de communication utilisée pour ce système d'aide à la conduite (Toffin et al. 2003).

### 1.3.2. Architecture fonctionnelle

*Dans le cadre de la thèse, l'environnement du véhicule est supposé connu, l'étude ne concerne pas sa reconstruction. Le but final est de réaliser un algorithme à tester sur simulateur de conduite. De plus, il a été choisi de se limiter aux situations sur autoroute. Deux points importants sont identifiés : la solution retenue doit prendre en compte à la fois les dynamiques latérales et longitudinales simultanément et enfin la thèse se place dans un contexte d'assistance, il ne s'agit pas de conduite autonome. La figure 1.19 présente le*

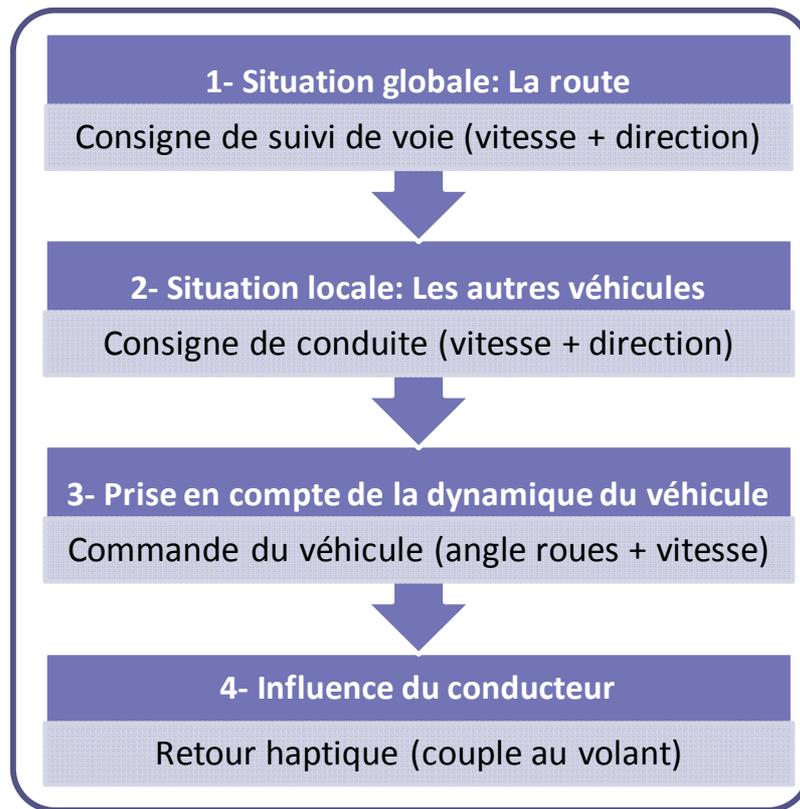
positionnement de cette étude, le travail qui est réalisé se situe dans le cadre vert. Cela consiste à synthétiser les informations de l'environnement et du véhicule afin d'établir la meilleure trajectoire et les commandes véhicules à réaliser pour la suivre.



**Figure 1.19** – Positionnement de l'étude

La stratégie adoptée consiste à utiliser une solution qui présente une architecture hiérarchisée. Ainsi, la situation globale du positionnement sur la route est d'abord analysée, puis, la voiture dans son environnement proche (les autres véhicules, les obstacles), l'aspect dynamique du véhicule (respecter les contraintes) et l'interaction avec le conducteur. Le système utilise des retours haptiques avec le conducteur (volant seulement en l'absence de pédale active disponible) qui ont pour fonction de lui indiquer comment éviter une zone à risque lorsqu'il s'en approche.

La solution se base sur le principe de hiérarchisation en fonction de l'échelle du lointain au plus proche, du temps de traitement et du niveau de sécurité attendu. Le système présente quatre niveaux, chaque niveau fournissant une consigne au niveau suivant. Les différents niveaux sont présentés sur la figure 1.20.



**Figure 1.20** – Architecture du système d'aide à la conduite

### **1.3.2.1. Niveau 1 : la route**

Le niveau 1 se situe à une échelle globale car il a pour objectif de calculer la trajectoire permettant de rouler au centre de la voie de droite à la vitesse maximale autorisée. Il s'appuie essentiellement sur les données relatives à l'environnement statique, c'est-à-dire la route (largeur, nombre de voies, courbure...), ainsi que sur les données propres au véhicule. Le véhicule équipé du système d'aide à la conduite est appelé l'égo-véhicule.

Ce premier niveau permet d'obtenir une consigne de suivi de voie sans prise en compte des autres utilisateurs possibles de la route. Si l'égo-véhicule est seul sur la route, la consigne obtenue peut directement passer au niveau 3.

Les détails mathématiques du calcul de la consigne sont présentés dans le Chapitre 3.

### **1.3.2.2. Niveau 2 : les autres véhicules**

Le niveau 2 gère l'environnement local. Il doit recalculer l'action souhaitable en prenant en compte la consigne du niveau 1 ainsi que tous les véhicules et obstacles à proximité de l'égo-véhicule. L'objectif est d'obtenir la vitesse et la direction à suivre pour rouler en toute sécurité et avec un maximum de confort.

Pour cela, une zone autour du véhicule est définie comme sa zone de connaissance. Tout véhicule ou autre obstacle présent dans celle-ci est pris en compte dans le calcul de la consigne au travers de sa position et sa vitesse. L'algorithme utilisé pour ce niveau s'inspire

du déplacement des bancs de poissons présenté au Chapitre 2 et est adapté pour prendre en considération les spécifications de l'environnement autoroutier.

La méthode de calcul concernant ce niveau est présentée dans le Chapitre 3.

### ***1.3.2.3. Niveau 3 : dynamique du véhicule***

Le niveau 3 a pour but d'adapter la consigne précédente en fonction des performances possibles du véhicule grâce à la modélisation de la dynamique du véhicule. Il s'agit d'obtenir l'angle de braquage des roues et la vitesse nécessaire pour réaliser au mieux la consigne précédente.

Ici, les caractéristiques complètes de l'égo-véhicule sont connues (masse, dimensions, ...) afin d'ajuster la consigne pour qu'elle soit atteignable par le véhicule. Il s'agit donc de concevoir des régulateurs adaptés à l'égo-véhicule.

Les détails concernant ce niveau sont présentés dans le Chapitre 4.

### ***1.3.2.4. Niveau 4 : communication avec le conducteur***

Le niveau 4 gère l'interface système/conducteur par le biais d'un retour haptique sur le volant. L'objectif est de commander l'actionneur pour inciter le conducteur à suivre la consigne calculée. Ici, il s'agit d'ajouter un couple additionnel dans le volant pour faire ressentir au conducteur la consigne à suivre. La force additionnelle est toujours limitée afin que le conducteur puisse aller où il veut.

Les détails concernant ce niveau sont présentés dans le Chapitre 5.

## **1.4. Conclusion**

Depuis le milieu des années 90, la recherche se tourne donc vers la sécurité primaire ; des systèmes de sécurité tels que l'antiblocage des roues (ABS) sont apparus. Aujourd'hui avec les développements de nouveaux capteurs, de nouvelles fonctionnalités tendent à apparaître telles que de réels systèmes d'assistance à la conduite : régulateur de vitesse adaptatif, aide au maintien de voie... La multiplication de ce type de fonctions se rapproche du rêve du véhicule intelligent capable de se conduire de manière autonome.

Aujourd'hui, plusieurs niveaux d'autonomisation du véhicule, de 0 à 5 pour le véhicule autonome, sont communément admis. Les constructeurs et les équipementiers préfèrent cette approche progressive misant sur une collaboration entre l'homme et le système. Les systèmes existants correspondent aux deux premiers niveaux. Le système proposé dans le cadre de cette thèse tend vers le niveau 3.

# Chapitre 2

## Modèles « banc de poissons » et approche non entière : analyse et synthèse des outils fondamentaux

---

2.1.Introduction .....	43
2.2.Déplacement en essaim : Modèle « banc de poissons » .....	43
2.2.1. Définition et historique .....	43
2.2.2. Formalisme des modèles « banc de poissons » .....	44
2.2.3. Le modèle de Reynolds .....	45
2.2.4. Le modèle de Vicsek.....	50
2.2.5. Le modèle d’Olfati-Saber.....	53
2.2.6. Bilan des modèles.....	56
2.3.Intégration non entière .....	59
2.3.1. Bref historique.....	60
2.3.2. Définitions .....	60
2.3.3. Propriétés .....	61
2.3.4. Potentiel généralisé.....	63
2.3.5. Commande CRONE.....	67
2.4.Conclusion .....	75

---



## 2.1. Introduction

Ce chapitre présente les principaux outils utilisés pour cette étude. Cette dernière s'inspire des déplacements collectifs de certains animaux tels que les poissons, capables de se mouvoir de manière fluide et coordonnée en grand nombre. L'enjeu est alors de concevoir, à l'aide des principaux modèles mathématiques décrivant les déplacements en essaim, une loi de guidage pour le véhicule qui reproduise ce modèle de comportement afin d'aboutir à un système d'aide à la conduite avancé permettant d'augmenter la sécurité et le confort des usagers.

Premièrement, le déplacement en essaim est défini ainsi que les principaux modèles mathématiques qui le décrivent. Deuxièmement, les notions essentielles sur l'intégration non entière, le potentiel généralisé et la commande CRONE (Commande Robuste d'Ordre Non Entier) sont rappelées. Cet outil, déjà employé dans des domaines aussi variés que la mécanique, l'automatique, la thermique ou encore l'électrochimie, est notamment utilisé dans cette étude pour la régulation de vitesse du véhicule.

## 2.2. Déplacement en essaim : Modèle « banc de poissons »

La bio-inspiration ou encore le bio-mimétisme est un domaine d'étude qui vise à s'inspirer de la nature pour développer de nouveaux systèmes. Ici, le comportement social en déplacement de certains animaux est observé pour créer une loi de guidage coopératif.

### 2.2.1. Définition et historique

Des études ont permis d'analyser les mécanismes individuels qui permettent à certains groupes d'animaux de se déplacer « en essaim », c'est-à-dire en grand nombre, sans collision et dans une même direction, alors même qu'aucun individu ne guide l'opération, tels que les bancs de poissons, les nuées d'oiseaux ou encore les essaims d'abeilles. Ce phénomène se retrouve également à l'échelle humaine dans les comportements de foule (Helbing et al. 2000).

Les bancs de poissons ont d'abord été étudiés par les biologistes. Ainsi, il a été énoncé qu'un banc de poissons est constitué d'au moins trois individus. En effet, « si le groupe de poissons n'est constitué que de deux entités, le comportement naturel des poissons montre qu'il émerge un leader que suivra simplement le second poisson. Au contraire, lorsque le groupe est composé de trois poissons ou davantage, chacun d'eux a une influence sur les autres » (Partridge 1982).

Le sujet n'intéresse pas uniquement les biologistes, mais également les physiciens, les ingénieurs ou encore les concepteurs d'animation virtuelle. Ainsi, le premier modèle mathématique de ce comportement a été conçu par Reynolds (Reynolds 1987) pour son film d'animation, réalisé en 1987. Il a identifié trois comportements caractéristiques qui sont :

- **l'attraction** (ou cohésion), qui permet aux individus de rester proches pour former un groupe ;
- **la répulsion** (ou séparation), qui éloigne suffisamment les individus les uns des autres afin d'éviter toute collision ;

- ***l'imitation*** (ou alignement) qui permet aux individus d'adopter la même vitesse et la même direction.

Il est fondamental ici de noter qu'il s'agit d'un *comportement individuel* qui provoque un effet sur le *comportement collectif*. Autrement dit, un système propre à chaque individu permet l'émergence d'un effet sur l'ensemble du groupe.

Ce modèle initial est aujourd'hui exploité dans le domaine de la robotique pour l'étude des comportements collaboratifs, également dits intelligents ou « *swarm robotics* » en anglais. De même, en automatique, les systèmes dits distribués, décentralisés ou multi-agents font référence à ce type de modèle au sein duquel de multiples agents suivent des règles simples qui leur permettent de s'auto-organiser sans contrôle centralisé. Ce type de comportement collectif intéresse l'ingénierie en raison de sa nature distribuée et de son application possible dans les réseaux de capteurs, pour la surveillance militaire, les missions de recherche et sauvetage, les véhicules autonomes, etc.

### 2.2.2. Formalisme des modèles « banc de poissons »

Les modèles dénommés ici « banc de poissons » s'appuient sur la notion de coopération. Les systèmes coopératifs sont omniprésents dans une multitude d'environnements et à tous les niveaux, du niveau microscopique avec le comportement des bactéries jusqu'à de grandes organisations sociologiques impliquant par exemple des hommes et des machines à travailler ensemble. Il n'existe pas dans la littérature une seule et même définition des systèmes coopératifs. Cependant, plusieurs études (Qu 2009), (Grundel et al. 2007) leur accordent des caractéristiques communes. Ainsi, un système coopératif :

- comporte plusieurs entités ;
- les entités ont un comportement dynamique qui influe sur l'espace de décision ;
- les entités partagent au moins un objectif commun ;
- les entités sont en mesure de partager des informations sur elles-mêmes et leur environnement de manière active ou passive.

Dans la suite de la thèse, les différents modèles présentés sont donc composés d'un groupe constitué de  $N$  entités ayant pour objectif de se déplacer ensemble de manière fluide et sans collisions. Chaque entité a donc connaissance de son environnement, c'est-à-dire de la position et la vitesse de ses voisins ainsi que des obstacles pouvant être présents. L'objectif est alors pour chacun d'homogénéiser sa vitesse sur celle de ses voisins. Les voisins pris en compte pour le calcul de la vitesse à adopter sont définis selon le modèle comme :

- tous les individus du groupe
- les  $N_v$  individus les plus proches
- les individus se trouvant dans un rayon  $r_v$ .

Le comportement dynamique de chaque entité  $i$  est défini dans le plan orthonormé de dimension  $n_{dim}=2$  par :

$$\dot{p}_i = v_i, \quad (2.1)$$

avec  $p_i(x_i, y_i)$  sa position et  $\vec{v}_i$  son vecteur vitesse défini tel que :

$$\vec{v}_i = v_{x_i} \vec{e}_x + v_{y_i} \vec{e}_y = V_i e^{i\theta_i}, \quad (2.2)$$

où  $\vec{e}_x$  et  $\vec{e}_y$  sont les vecteurs unitaires du plan,  $v_{xi}$  et  $v_{yi}$  sont les composantes selon X et Y du vecteur  $\vec{v}_i$  avec  $V_i = \|\vec{v}_i\|$  sa norme et  $\theta_i$  son orientation.

Trois modèles sont maintenant présentés en respectant la notation établie.

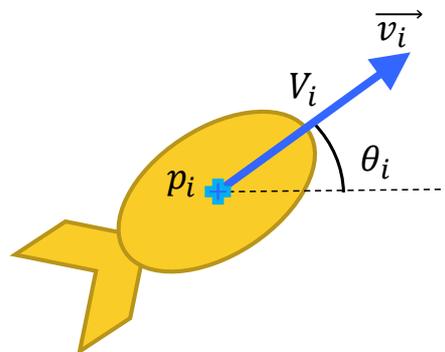
### 2.2.3. Le modèle de Reynolds

L'algorithme de Reynolds (Reynolds 1987) a été développé afin d'éviter d'avoir à déterminer la trajectoire de chaque personnage d'un film d'animation lorsqu'ils sont trop nombreux, sans risque de nuire au réalisme de la scène. Reynolds a appliqué les trois comportements présentés ci-dessus à chaque « boid » (bird – oid). La technique a par la suite été reprise pour recréer le vol des chauves-souris dans le film « *Batman's Return* » de Tim Burton.

#### 2.2.3.1. Description

Le principe, présenté dans (Rochefort et al. 2011), est que tous les boids s'influencent les uns les autres en fonction de la distance  $L$  qui les sépare en utilisant les trois comportements caractéristiques qui définissent alors le vecteur vitesse instantanée  $\vec{v}_i$  de chaque boid. L'application directe de ce principe permet alors de respecter une inter-distance désirée, appelée distance de cohésion  $D$ .  $D$  est dans ce cas la seule consigne.

Chaque boid est représenté par son vecteur vitesse  $\vec{v}_i$ , de norme  $V_i = \|\vec{v}_i\|$ , d'orientation  $\theta_i$  et d'origine la position  $p_i(x_i, y_i)$  du boid, comme représenté sur la figure 2.1.



**Figure 2.1** – Variables utilisées pour la représentation d'un boid

L'application du principe passe par la détermination du vecteur vitesse à appliquer sur un boid (dénommé égo-boid par la suite) au travers de deux étapes :

1. calculer la contribution de chaque boid qui entoure l'égo-boid;
2. calculer l'influence de chaque boid qui entoure l'égo-boid.

Ces étapes sont maintenant successivement présentées en introduisant le vecteur  $\vec{d}$  unitaire, orienté de l'égo-boid  $i$  vers le boid  $j$ .

### 2.2.3.1.1. Calcul de la contribution de chaque voisin

Le calcul de la contribution de chaque boid, indexé  $j$  dans les développements suivants, a pour objectif de déterminer les caractéristiques du comportement qu'il induit sur l'égo-boid, indexé  $i$ . Pour cela, les vecteurs  $\vec{v}_{att/ij}$ ,  $\vec{v}_{rep/ij}$  et  $\vec{v}_{im/ij}$ , associés à chaque comportement caractéristique sont tout d'abord calculés.

- Dans le cas de l'attraction,

$$\begin{aligned} \vec{v}_{att/ij} &= \|\vec{v}_{att/ij}\| \vec{d} \\ \|\vec{v}_{att/ij}\| &= \begin{cases} V_{\max} & \text{si } (\vec{v}_i, \vec{d}) < \frac{\pi}{2} \\ V_{\min} & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{ici : } \vec{v}_{att/ij} = V_{\max} \vec{d}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Ce cas est représenté par la figure 2.2, dans laquelle l'égo-boid (en violet) cherche à se rapprocher de cet autre boid (en jaune). Ici, avec le boid jaune placé devant le violet, la norme de la vitesse est égale à la vitesse maximale.

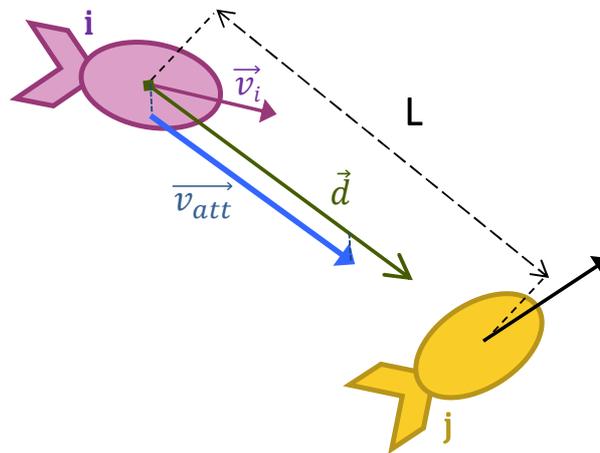


Figure 2.2 – Cas de l'attraction

- Dans le cas de la répulsion,

$$\begin{aligned} \vec{v}_{rep/ij} &= -\|\vec{v}_{rep/ij}\| \vec{d} \\ \|\vec{v}_{rep/ij}\| &= \begin{cases} V_{\min} & \text{si } (\vec{v}_i, \vec{d}) < \frac{\pi}{2} \\ V_{\max} & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{ici : } \vec{v}_{rep/ij} = -V_{\min} \vec{d}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Ce cas est représenté par la figure 2.3, dans laquelle l'égo-boid cherche à s'éloigner de cet autre boid. Le boid jaune étant placé devant le violet, la norme de la vitesse est alors égale à la vitesse minimale.

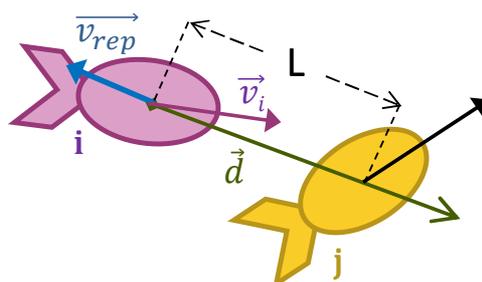
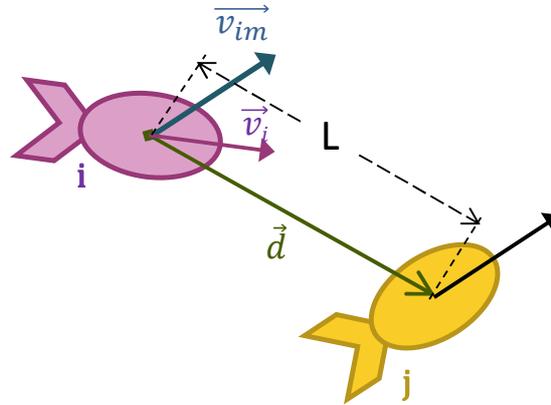


Figure 2.3 – Cas de répulsion

- Dans le cas de l'imitation,

$$\vec{v}_{im/ij} = \vec{v}_j. \quad (2.5)$$

Ce cas est représenté par la figure 2.4 dans laquelle l'égo-boid cherche à reproduire le déplacement de cet autre boid.



**Figure 2.4 – Cas de l'imitation**

La contribution globale de chaque boid est alors obtenue par une moyenne pondérée, effectuées selon les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \|\vec{v}_{ij}\| &= \frac{\alpha_{rep/ij} V_{rep/ij} + \alpha_{att/ij} V_{att/ij} + \alpha_{im/ij} V_{im/ij}}{\alpha_{rep/ij} + \alpha_{att/ij} + \alpha_{im/ij}}, \\ \theta_{ij} &= \arctan \frac{\alpha_{rep/ij} \sin \theta_{rep/ij} + \alpha_{att/ij} \sin \theta_{att/ij} + \alpha_{im/ij} \sin \theta_{im/ij}}{\alpha_{rep/ij} \cos \theta_{rep/ij} + \alpha_{att/ij} \cos \theta_{att/ij} + \alpha_{im/ij} \cos \theta_{im/ij}}, \end{aligned} \quad (2.6)$$

sachant que

$$\alpha_{rep} + \alpha_{att} + \alpha_{im} = 1. \quad (2.7)$$

Les paramètres  $\alpha_{rep}$ ,  $\alpha_{att}$  et  $\alpha_{im}$  permettent de mettre en avant un des trois comportements caractéristiques en fonction de la distance  $L$  qui sépare le boid de l'égo-boid en comparant la distance  $L$  à la distance de cohésion désirée  $D$ . La figure 2.5, issue de (Rochefort et al. 2011), représente les coefficients  $\alpha$  de pondération en fonction de la distance.

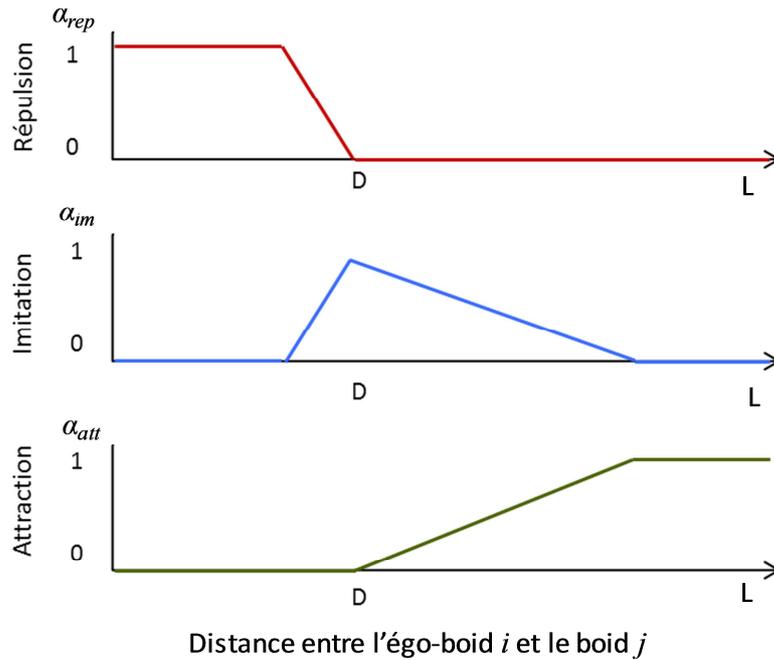


Figure 2.5 – Coefficients de pondération des comportements de base

### 2.2.3.1.2. Calcul de l'influence de chaque voisin

Après avoir déterminé la contribution comportementale de chaque voisin  $j$ , son influence est associée à un coefficient, dénoté  $\beta_{ij}$  et unitaire lorsque  $L=D$  par définition, selon la caractéristique représentée sur la figure 2.6, issue de (Rochefort et al. 2011). Ainsi, les boids les plus proches ont plus d'influence.

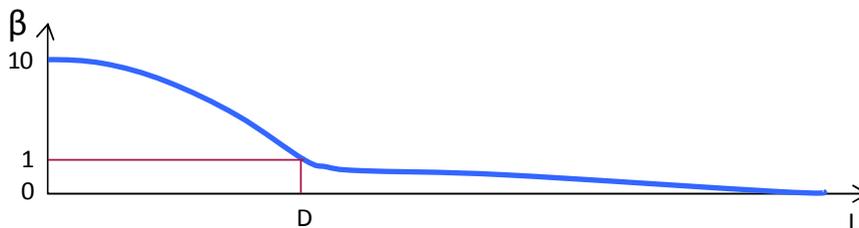


Figure 2.6 – Coefficients d'influence des voisins  $\beta_{ij}$

Afin de « fluidifier » son déplacement, l'auto-influence de l'égo-boid est également prise en compte dans le calcul du prochain vecteur vitesse, en fixant le coefficient  $\beta_{ii}=1$ .

Le vecteur final est obtenu par une moyenne pondérée par les coefficients d'influence :

$$\|\vec{v}_i\| = \frac{\sum_j \beta_{ij} V_{ij}}{\sum_j \beta_{ij}} \quad (2.8)$$

$$\theta_i = \arctan \frac{\sum_j \beta_{ij} \sin \theta_{ij}}{\sum_j \beta_{ij} \cos \theta_{ij}}$$

Ainsi, par exemple, pour la configuration de la figure 2.7, le résultat suivant est obtenu :

$$\|\vec{v}_1\| = \frac{\beta_{11}V_{11} + \beta_{12}V_{12} + \beta_{13}V_{13}}{\beta_{11} + \beta_{12} + \beta_{13}} \quad (2.9)$$

$$\theta_1 = \arctan \frac{\beta_{11} \sin \theta_{11} + \beta_{12} \sin \theta_{12} + \beta_{13} \sin \theta_{13}}{\beta_{11} \cos \theta_{11} + \beta_{12} \cos \theta_{12} + \beta_{13} \cos \theta_{13}}$$

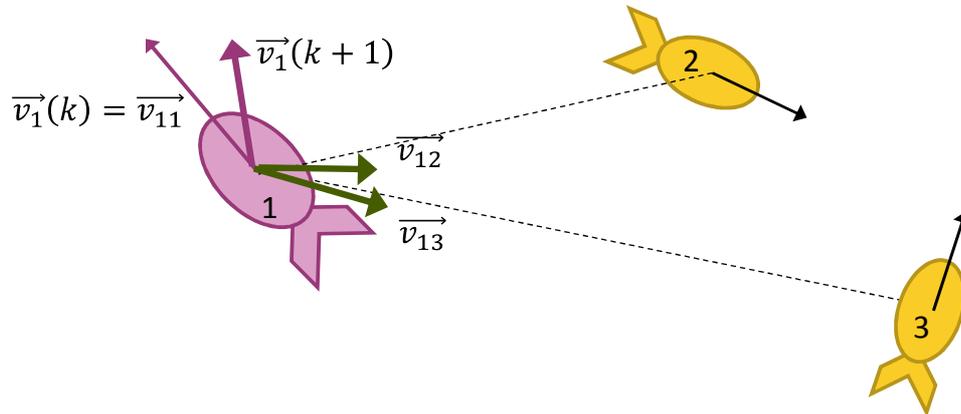


Figure 2.7 – Configuration pour le calcul du vecteur vitesse du boid violet

### 2.2.3.2. Algorithme

L'algorithme présenté figure 2.8 résume les étapes de calcul pour réaliser un déplacement en essaim avec le modèle de Reynolds.

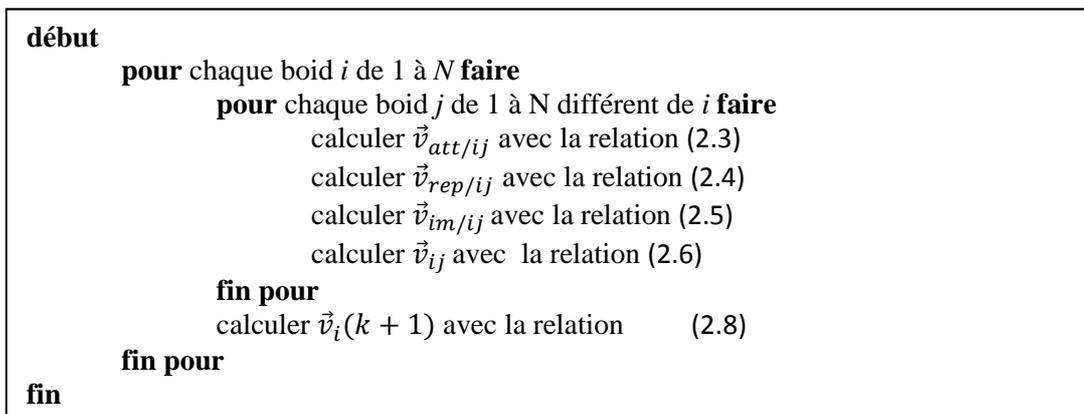
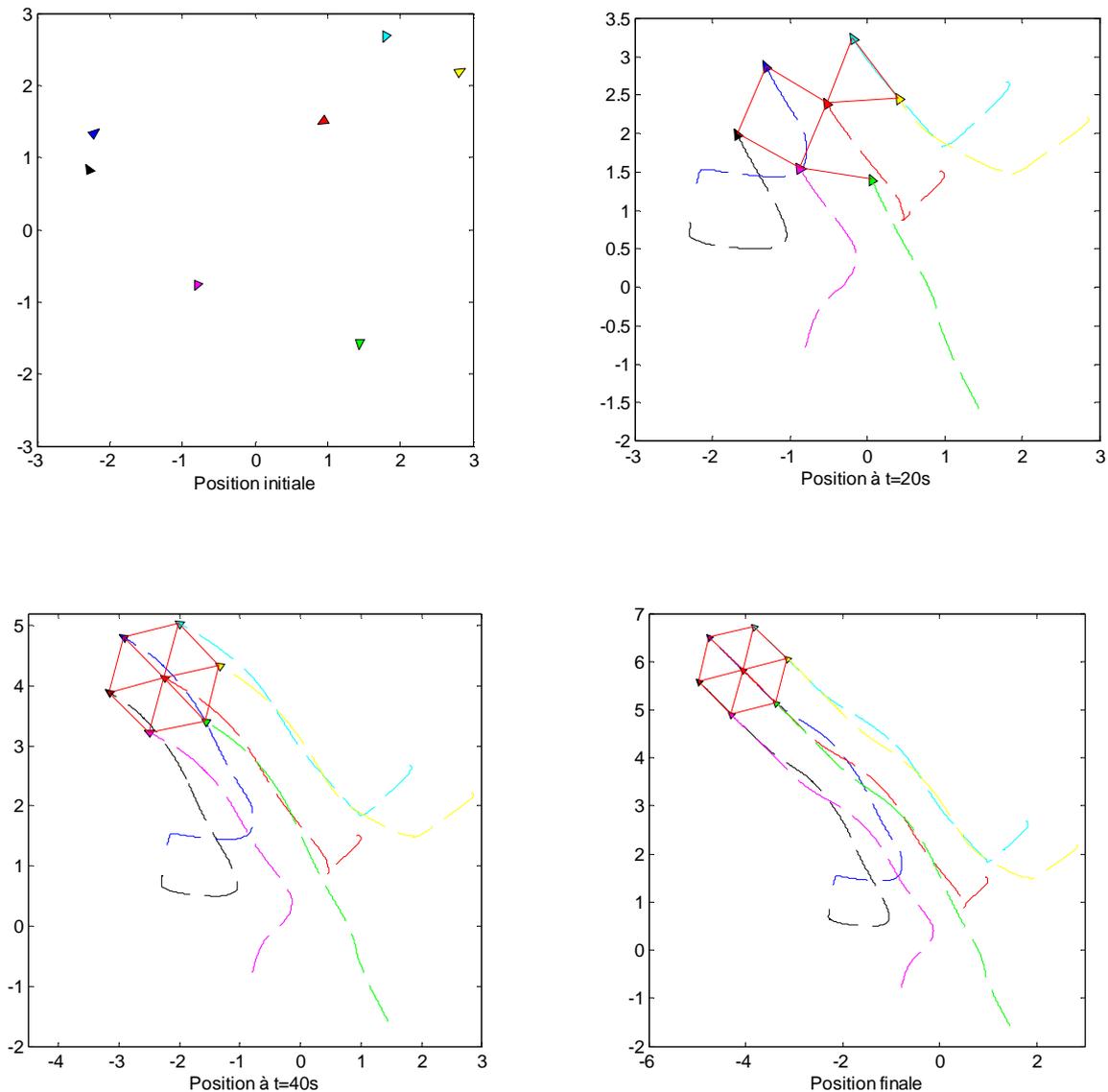


Figure 2.8 – Algorithme du modèle de Reynolds

### 2.2.3.3. Exemple

Un exemple réalisé avec le logiciel Matlab est présenté sur la figure 2.9. Au départ, sept boids sont placés aléatoirement dans un espace en deux dimensions de 3 par 3. Puis, chaque boid utilise les équations précédentes pour se déplacer. Ici, la distance désirée est de 1, le pas de temps est de 0.05 et les vitesses minimale et maximale sont respectivement 0.05 et 0.2.



**Figure 2.9** – Exemple pour sept boids réalisé avec le modèle de Reynolds

Avec cet algorithme, les boids s’attirent de proche en proche et convergent vers la même direction. Cette direction n’est pas connue a priori et dépend seulement de la position initiale des poissons. Ce modèle propose une mise en œuvre simple pour reproduire un déplacement en essaim mais ne possède pas de critères permettant de vérifier la convergence du groupe.

#### 2.2.4. Le modèle de Vicsek

Le physicien Vicsek a également élaboré un modèle (Vicsek et al. 1995) pour reproduire le déplacement en essaim. Il s’appuie directement sur des relations mathématiques. Son objectif est d’étudier l’apparition spontanée de mouvements ordonnés au sein de systèmes de type colonie de bactéries. Il étudie alors la convergence des directions de particules se déplaçant à vitesse constante soumises à un modèle d’interaction de type règle du plus proche voisin. Afin de rendre le modèle plus réaliste, Vicsek y ajoute des erreurs avec l’introduction de bruit.

### 2.2.4.1. Description

Le modèle contient  $N$  particules placées dans un espace carré (deux dimensions, bornées) de longueur  $L_v$  avec des conditions périodiques aux limites. Ces conditions permettent de simuler un environnement infini puisque lorsqu'une particule quitte l'espace par un coté, elle réapparaît par le côté opposé.

Chaque particule est représentée par sa position  $p_i(t)$  et son vecteur vitesse, représenté par le nombre complexe associé  $v_i(t)$ :

$$v_i(t) = V_0 e^{i\theta_i(t)}. \quad (2.10)$$

Toutes les particules se déplacent à la même vitesse  $V_0$ . La direction du mouvement (l'orientation) donnée par l'angle  $\theta_i(t)$  est le seul élément qui change, d'une particule à l'autre.

Afin d'exprimer la loi d'interaction entre les particules,  $U_i(r_v, t)$  désigne le voisinage de chaque particule comme étant un disque de rayon  $r_v$  centré sur  $p_i(t)$  et  $k_i(t)$  désigne le nombre de particules contenues dans ce voisinage. Ainsi, la vitesse moyenne  $\bar{V}_i(t)$  des particules présentes dans le voisinage est :

$$\bar{V}_i(t) = \frac{1}{k_i(t)} \sum_{j: p_j \in U_i} v_j(t), \quad (2.11)$$

ce qui représente simplement la somme vectorielle des vitesses divisée par le nombre de particules. A partir de ces définitions, le calcul de la commande de chaque particule à chaque pas de temps  $\Delta t$  est donné par la mise à jour de l'orientation et de la position selon :

$$\begin{aligned} \theta_i(t + \Delta t) &= \arg(\bar{V}_i(t)) + \eta \zeta_i(t) \\ v_i(t + \Delta t) &= v_0 e^{i\theta_i(t + \Delta t)}, \\ p_i(t + \Delta t) &= p_i(t) + v_i(t) \Delta t \end{aligned} \quad (2.12)$$

où  $\zeta_i(t)$  représente une perturbation aléatoire uniformément distribuée dans l'intervalle  $[-\pi, \pi]$  et  $\eta$  est l'intensité du bruit (paramètre positif).

Lorsque  $\eta = 1$ , les particules effectuent une marche aléatoire, tandis qu'elles ne subissent aucune perturbation et tendent à s'aligner rapidement pour  $\eta = 0$ . (Chaté et al. 2008) montrent que  $\eta_c$ , le seuil critique de bruit à partir duquel le comportement du système passe d'un état désordonné à un état ordonné, dépend de la densité de particules dans le système. Les systèmes de plus grande densité moyenne sont capables de réaliser cette transition à un niveau de bruit plus élevé (Maffeo 2008).

### 2.2.4.2. Algorithme

L'algorithme présenté figure 2.10 résume les étapes de calcul pour réaliser un déplacement en essaim avec le modèle de Vicsek.

```

début
  pour chaque particule  $i$  de 1 à  $N$  faire
    calculer  $\bar{V}_i(t)$  avec la relation (2.11)
    calculer  $\theta_i(t+\Delta t)$  avec la relation (2.12)
    calculer  $\vec{v}_i(t+\Delta t)$  avec la relation (2.12)
  fin pour
fin
    
```

Figure 2.10 – Algorithme du modèle de Vicsek

### 2.2.4.3. Exemple

La figure 2.11 présente une simulation réalisée avec sept particules positionnées aléatoirement. Elles utilisent le déplacement de Vicsek défini par l’algorithme précédent programmé sous Matlab/Simulink. Ici, le rayon de voisinage est de 5, le pas de temps est de 0.05 et l’intensité du bruit de 0.2.

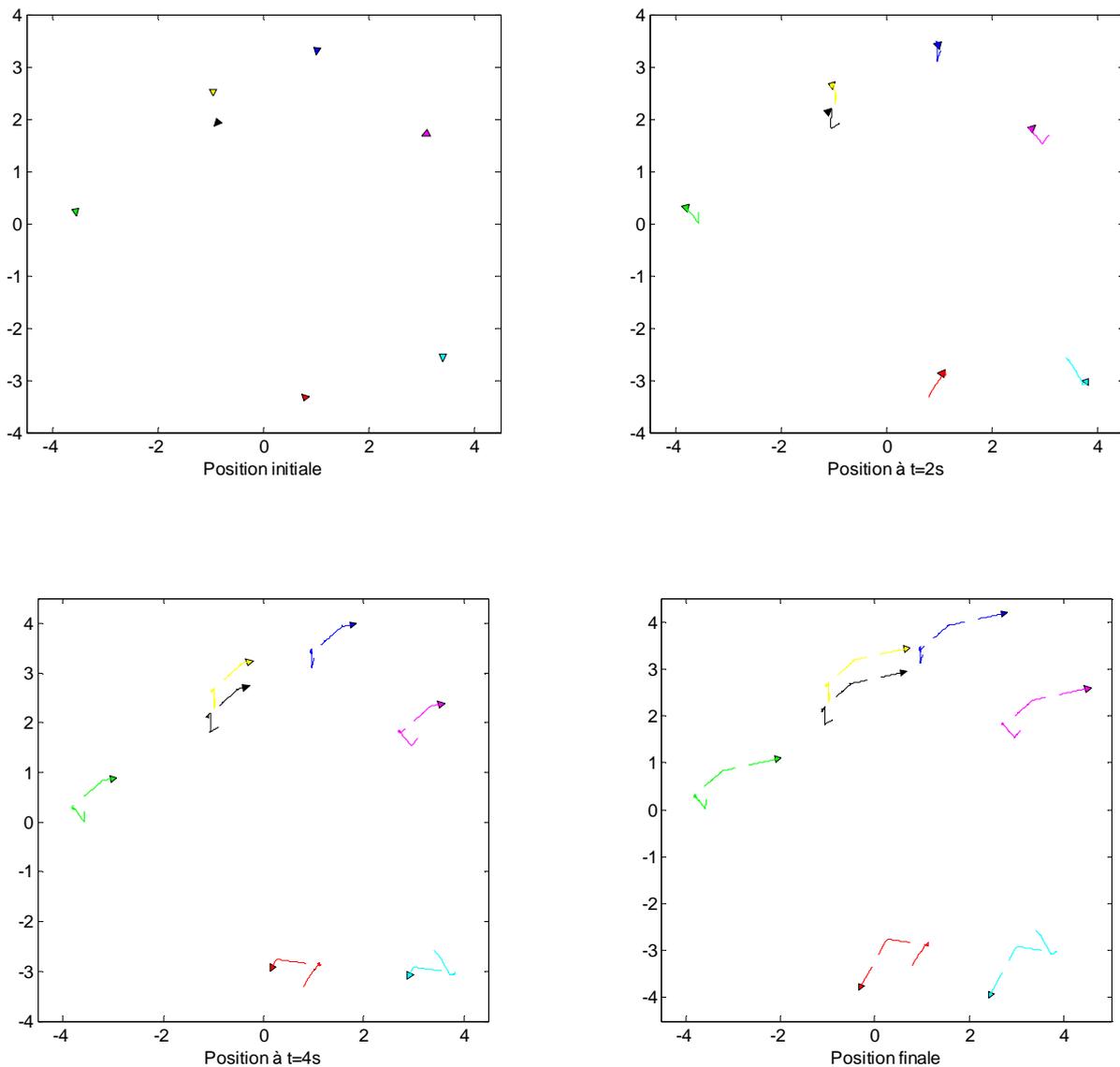


Figure 2.11 – Exemple réalisé avec le modèle de Vicsek

Le modèle de Vicsek permet l'émergence de groupes mais il ne possède toutefois aucun mécanisme d'attraction visant à empêcher les particules de s'éloigner de leurs groupes. Si cet éloignement devient trop important, la particule isolée n'a plus aucune information provenant du groupe et commence à suivre une marche aléatoire.

### 2.2.5. Le modèle d'Olfati-Saber

En 2006 dans (Olfati-Saber 2006), Olfati-Saber fournit une approche globale et un cadre théorique pour l'analyse et la conception d'algorithmes de déplacements en essaim, à la fois dans l'espace libre et en présence d'obstacles, qui sont très évolutifs et ne font pas apparaître de phénomènes de fragmentation. Ce modèle utilise à la fois la théorie des graphes (Bollobás 1998) et les champs de potentiels.

#### 2.2.5.1. Description

Pour ce modèle, les membres de l'essaim sont désignés comme des agents  $\alpha$ . Le groupe contient  $N$  agents  $\alpha$  se déplaçant dans un espace à  $n_{dim}$  dimensions et leur dynamique est décrite par :

$$\begin{cases} \dot{p}_i = v_i \\ \dot{v}_i = u_i \end{cases}, \quad (2.13)$$

où  $p_i$ ,  $v_i$ , et  $u_i \in \mathbb{R}^{n_{dim}}$  (ici,  $n_{dim} = 2$ ) désignent respectivement la position, la vitesse et le signal de commande de l'agent  $i$ . Le groupe formé par tous les agents  $\alpha$  est  $p = (p_1 \ p_2 \ \dots \ p_N) \in \mathbb{R}^{n_{dim} * N}$ .

Le réseau de proximité de chaque agent est un graphe dynamique  $G(p) = (v_s, \varepsilon(p))$  avec l'ensemble des sommets (ou nœuds)  $v_s = \{1, 2, \dots, N\}$  et l'ensemble des arêtes

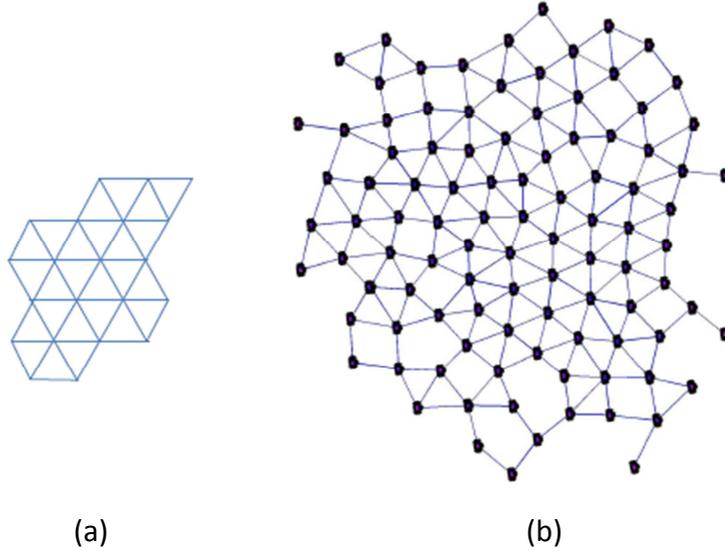
$$\varepsilon(p) = \{(i, j) \in v_s * v_s : \|p_j - p_i\| \leq r_v\}, \quad (2.14)$$

où  $r_v > 0$  est la portée de l'interaction entre les deux agents  $\alpha$ . La matrice d'adjacence de  $G(p)$  est une matrice non-négative  $A(p) = [a_{ij}(p)]$  avec  $a_{ij}(p)$  compris entre 0 et 1. L'ensemble des voisins de l'agent  $i$  est désigné par  $N_{v_i}(p) = \{j : (i, j) \in \varepsilon(p)\}$ .

La formation  $p$  est appelée un quasi-réseau si et seulement si chaque agent  $i$  est à peu près équitablement éloigné de tous ses voisins, à savoir :

$$\exists e, D > 0 : -e \leq \|p_j - p_i\| - D \leq e, \forall j \in N_{v_i}(p), \quad (2.15)$$

où  $D$ , appelée l'échelle du réseau, représente la distance désirée entre deux agents  $\alpha$ . Un réseau est équivalent à un quasi-réseau pour lequel  $e = 0$  comme le présente la figure 2.12.



**Figure 2.12** – Un réseau (a) et un quasi-réseau (b) (Olfati-Saber 2006)

Une commande présentée dans (Olfati-Saber 2006), conduit à l'émergence d'un comportement collectif de déplacement en essaim et peut être décrite comme suit :

$$u_i = f_i^\alpha = \underbrace{\sum_{j \in N_{v_i}} \varphi_\alpha \left( \|p_j - p_i\|_\sigma \right) d_{ij}}_{\text{basé sur le gradient}} + \underbrace{\sum_{j \in N_{v_i}} a_{ij}(p)(v_j - v_i)}_{\text{consensus}}, \quad (2.16)$$

avec  $d_{ij}$  un vecteur unitaire orienté selon la direction de  $p_i$  à  $p_j$ ,  $e \in [0; 1]$  et  $\|k\|_\sigma$  désigne la norme- $\sigma$  du vecteur  $k$  (variable générique), soit :

$$\begin{cases} d_{ij} = \frac{p_j - p_i}{\sqrt{1 + e \|p_j - p_i\|^2}} \\ \|k\|_\sigma = \frac{1}{e} \left( \sqrt{1 + e \|k\|^2} - 1 \right) \end{cases} \quad (2.17)$$

La composante  $\varphi_\alpha$  basée sur le gradient est calculée par :

$$\begin{cases} \varphi_\alpha(k) = \rho_h \left( \frac{k}{\|r_v\|_\sigma} \right) \varphi(k - \|D\|_\sigma) \\ \varphi(k) = \frac{1}{2} [(a+b)\sigma_1(k+c) + (a-b)] \\ \sigma_1 = \frac{k}{\sqrt{1+k^2}} \end{cases} \quad (2.18)$$

$\varphi(k)$  est une fonction sigmoïde impaire avec des paramètres qui satisfont  $0 < a \leq b$  ;  $c = |a - b| / \sqrt{4ab}$  pour garantir  $\varphi(0)=0$ .

$\rho_h(k)$  est une fonction scalaire qui varie régulièrement entre 0 et 1. Son but est de construire des fonctions potentielles lisses avec des seuils finis et des matrices d'adjacence lisses, soit :

$$\rho_h(k) = \begin{cases} 1 & k \in [0; h[ \\ \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos \left( \pi \frac{(k-h)}{1-h} \right) \right] & k \in [h; 1] \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}, \quad (2.19)$$

avec  $h \in [0; 1]$ .

Il est intéressant de noter que l'algorithme ci-dessus contient les trois règles de Reynolds : attraction, répulsion et imitation. Le terme basé sur le gradient de la relation (2.16) intègre les deux premières règles de Reynolds et le terme de consensus correspond à l'imitation.

Afin de guider l'essaim, il est possible d'ajouter une force  $f_i^\gamma$  résultant d'un régulateur de suivi de trajectoire linéaire, soit :

$$f_i^\gamma = -c_1^\gamma (p_i - p_r) - c_2^\gamma (v_i - v_r); \quad c_1^\gamma, c_2^\gamma > 0, \quad (2.20)$$

où  $(p_r; v_r)$  est l'état de l'agent  $\gamma$ , qui est un leader virtuel mobile aussi appelé cible. L'objectif de tous les agents  $\alpha$  est alors de suivre asymptotiquement un unique agent  $\gamma$  comme le présente la figure 2.13.

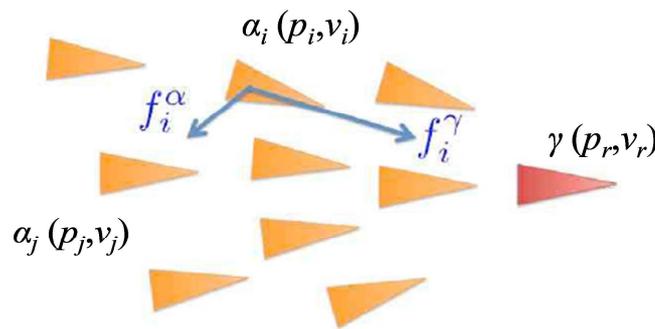


Figure 2.13 – Schéma de l'algorithme de déplacement en essaim avec cible

### 2.2.5.2. Algorithme

L'algorithme présenté figure 2.14 résume les étapes de calcul pour réaliser un déplacement en essaim avec le modèle d'Olfati-Saber.

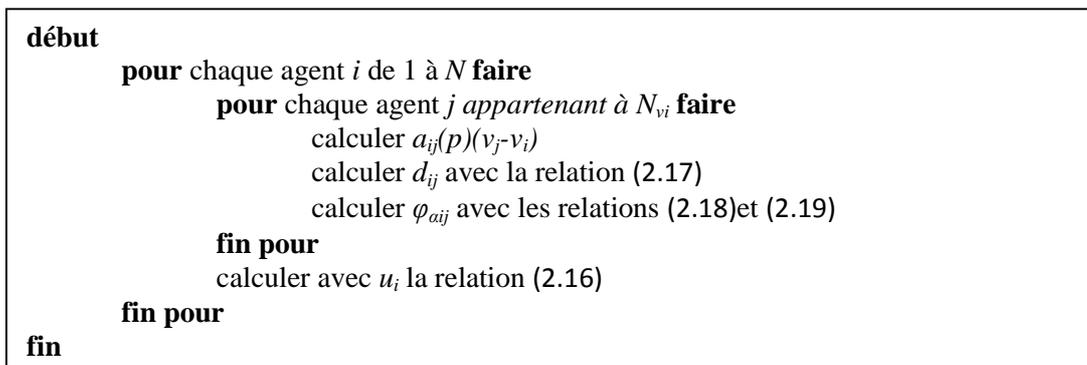
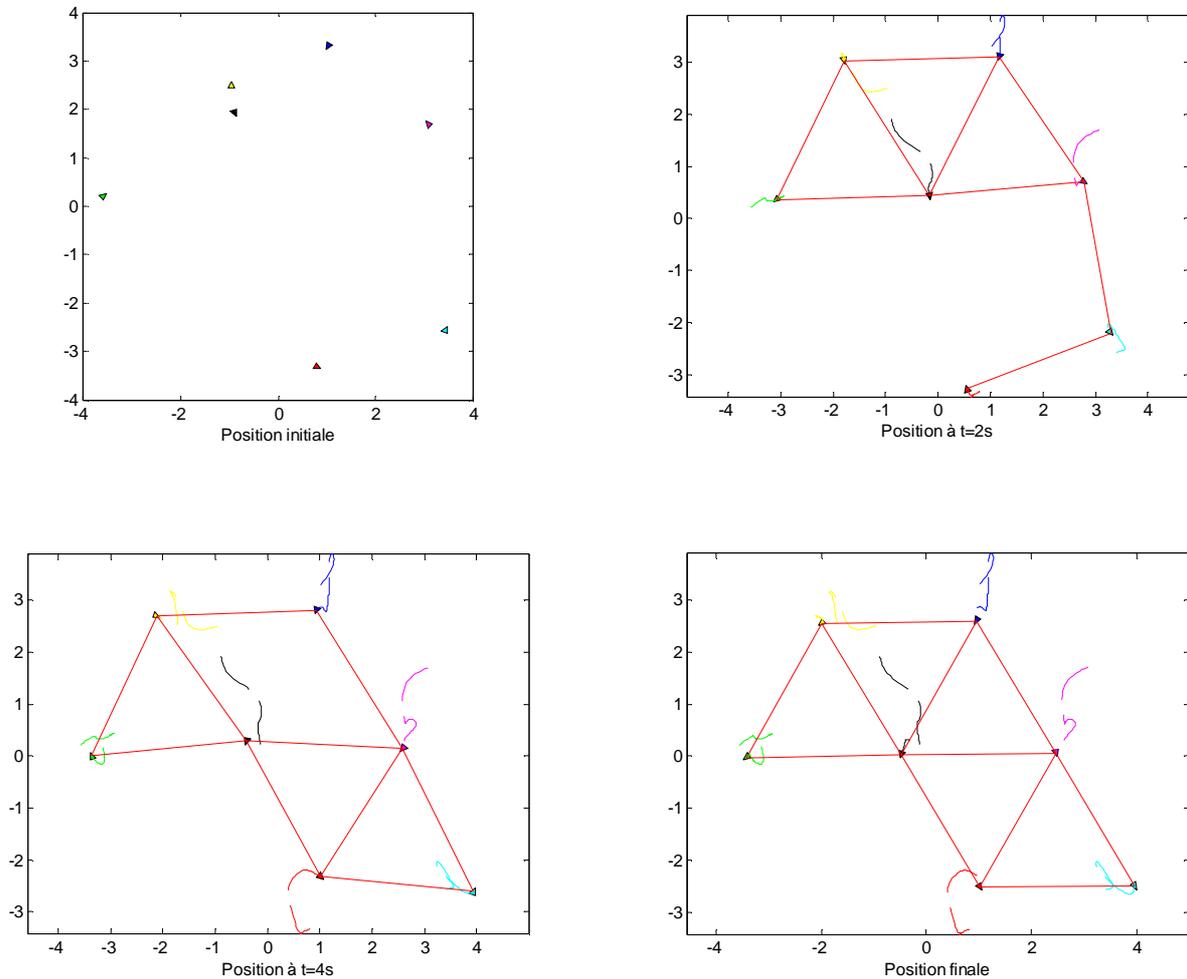


Figure 2.14 – Algorithme du modèle d'Olfati-Saber

### 2.2.5.3. Exemple

La figure 2.15 présente une simulation réalisée avec sept agents aux mêmes points de départ que ceux utilisés pour l'exemple avec le modèle de Vicsek. Ils utilisent le déplacement d'Olfati-Saber défini par la relation (2.16). Ici, la distance désirée est de 3 et le pas de temps est de 0.05.



**Figure 2.15** – Exemple réalisé avec le modèle d'Olfati-Saber

Cette figure confirme que cet algorithme permet d'obtenir un déplacement en essaim. Ce modèle propose un cadre mathématique rigoureux permettant une analyse fine de la convergence

### 2.2.6. Bilan des modèles

Olfati-Saber a montré que quatre quantités doivent être observées sur la trajectoire des agents afin de vérifier si le groupe réalise bien un déplacement en essaim. Elles sont définies de la manière suivante.

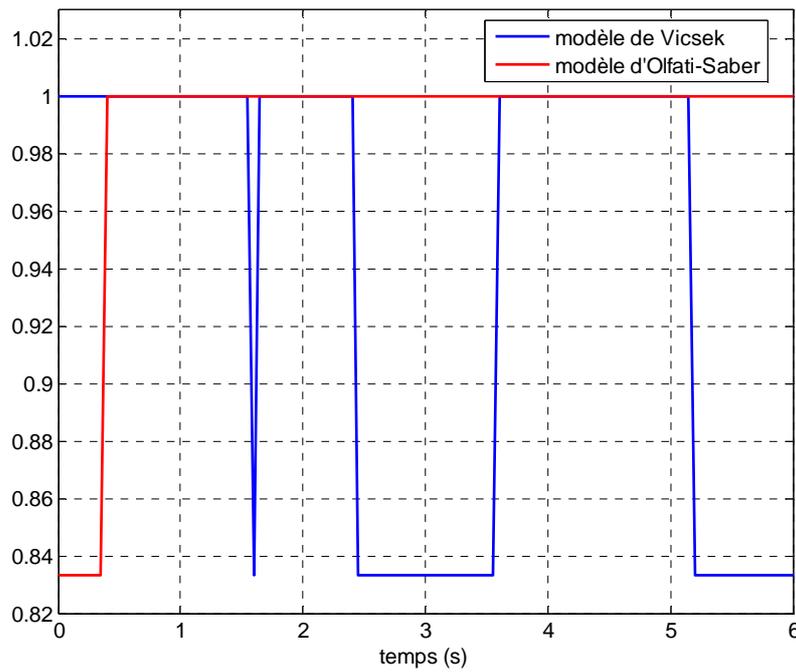
1. Connectivité relative :  $C(t) = \frac{1}{N-1} \text{rg}L_p(p(t)) \in [0; 1]$   
où  $L_p$  est le laplacien du graphe.
2. Rayon de cohésion :  $R(t) = \max_{i \in N} \|p_i(t) - p_c(t)\|$   
où  $p_c(t) = \text{moy}(p)$
3. Ecart d'énergie normalisé :  $\tilde{E}(t) = E(p)/D^2$

$$\text{où } E(p) = \frac{1}{(|\varepsilon(p)|+1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_{vi}} \varphi (\|p_j - p_i\| - D)$$

4. Discordance de vitesse normalisée :  $\tilde{K}(t) = K(v)/N$

$$\text{où } K(v) = \frac{1}{2} \sum_i \|v_i - v_c\|^2 \text{ avec } v_c = \text{moy}(v)$$

Pour que le groupe d'agents forme un quasi-réseau, la courbe représentative de  $C(t)$  doit être proche de 1 et le rester. Pour que le groupe reste cohérent, la fonction  $R(t)$  doit être bornée et les signaux  $\tilde{E}(t)$  et  $\tilde{K}(t)$  doivent décroître et rester faibles. Ces quatre quantités sont observées sur les figures 2.16, 2.17, 2.18 et 2.19 pour les deux exemples précédents.



**Figure 2.16** – Connectivité relative  $C(t)$  des exemples précédents

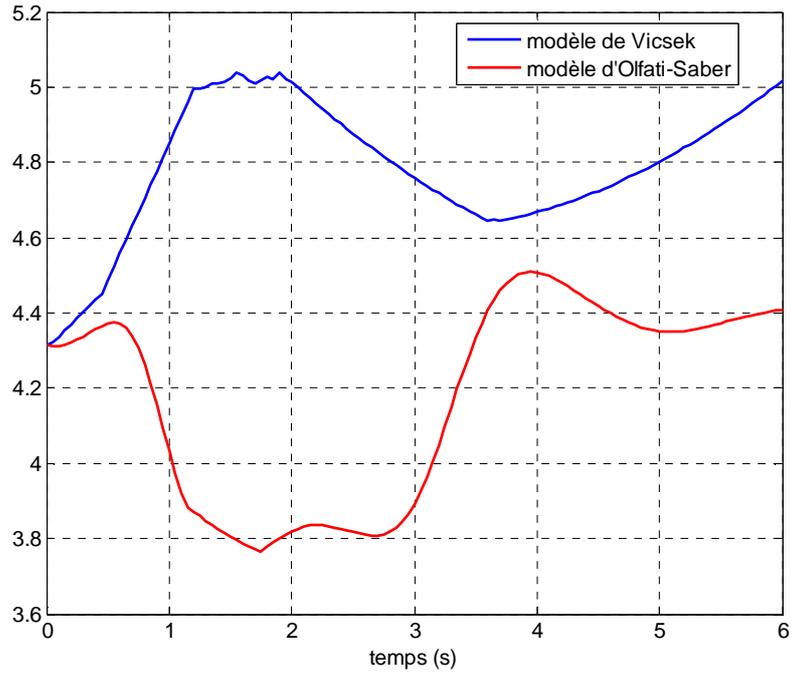


Figure 2.17 – Rayon de cohésion  $R(t)$  des exemples précédents

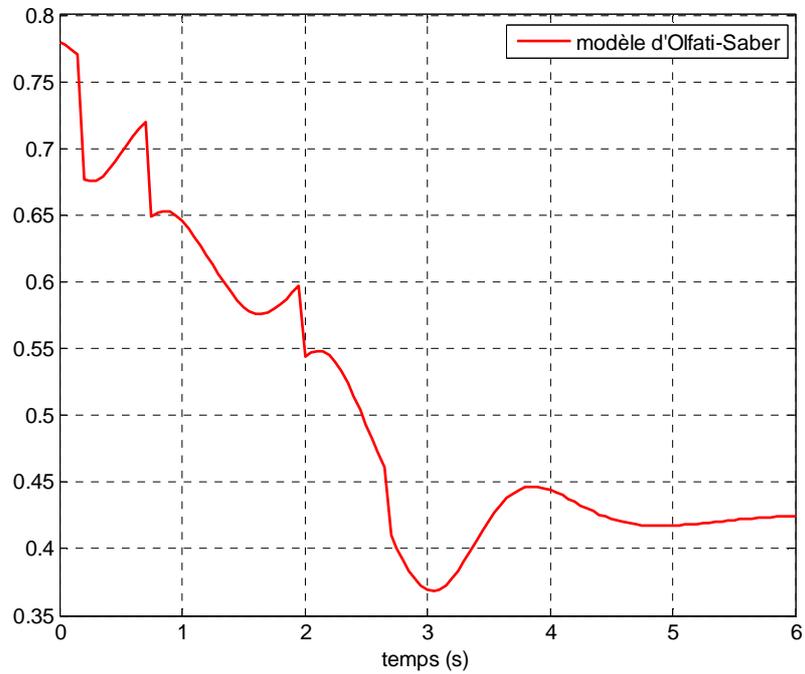
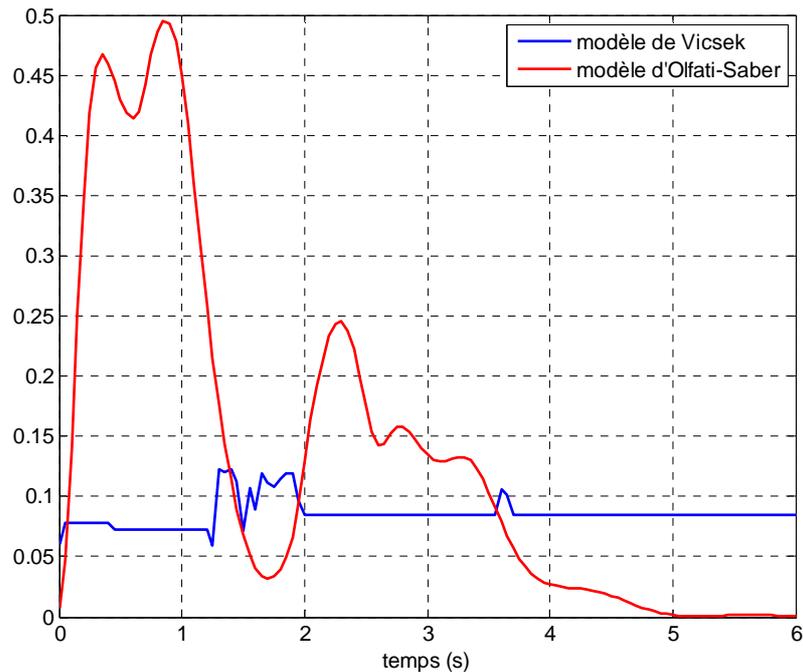


Figure 2.18 – Ecart d'énergie normalisée  $\tilde{E}(t)$  de l'exemple précédent



**Figure 2.19** – Discordance de vitesse normalisée  $\tilde{K}(t)$  des exemples précédents

Les résultats de la connectivité illustrent le fait que le modèle de Vicsek ne possède pas de comportement d'attraction capable de maintenir la cohésion du groupe contrairement au modèle d'Olfati-Saber. De même, le rayon de cohésion n'est pas borné et ne cesse d'augmenter suite à la formation de deux groupes. L'énergie normalisée comme définie par Olfati-Saber n'est pas calculable pour l'algorithme de Vicsek. La discordance de vitesse normalisée pour Vicsek n'est valable que pour la direction car toutes les particules ont la même norme pour la vitesse. Les résultats obtenus pour l'algorithme d'Olfati-Saber répondent positivement aux différentes contraintes imposées pour la validation du déplacement en essaim.

Le modèle de Reynolds a l'avantage de reposer sur une approche intuitive qui permet une implémentation rapide. Le modèle de Vicsek est issu du domaine de la physique et introduit des paramètres supplémentaires permettant de renforcer le caractère aléatoire de l'approche. Enfin, celui d'Olfati-Saber propose un cadre mathématique rigoureux permettant, au travers de développements théoriques avancés, une analyse fine de l'approche.

Pour la suite du développement du système d'aide à la conduite, l'approche d'origine développée par Reynolds reste l'inspiration majeure ainsi que la structure du modèle d'Olfati-Saber.

### 2.3. Intégration non entière

Après avoir présenté les différents modèles capables de reproduire les déplacements en essaim, cette partie présente le deuxième outil utile au développement de notre système d'aide à la conduite : l'intégration non entière.

### 2.3.1. Bref historique

Peu d'ouvrages retracent l'historique de l'intégration non entière, issue de correspondances scientifiques entre plusieurs mathématiciens célèbres comme L'Hôpital, Leibnitz, Euler, Lacroix, Fourier, Abel, Liouville, Riemann, Sonin, Laurent, Grünwald ou Letnikov. Pour une description détaillée de ces correspondances, le lecteur pourra se référer aux ouvrages de (Oldham & Spanier 1974), (Miller & Ross 1993), (Samko et al. 1993) ainsi que de (Dugowson 1994).

Le formalisme mathématique de l'intégration non entière a été établi au début du XIX<sup>ème</sup> siècle et relève principalement des travaux de Liouville et Riemann (Liouville 1832), (Letnikov 1868). Pendant longtemps, ce nouvel outil a été considéré par les physiciens comme un concept mathématique sans application possible pour les Sciences Physiques. Au siècle suivant, l'outil de dérivation non entière a montré son intérêt en automatique, notamment en identification et en commande. En identification, sa nature permettant de prendre en compte tout le passé d'une fonction le rend particulièrement intéressant pour la modélisation des systèmes physiques à mémoire longue, tels que les systèmes diffusifs thermiques, viscoélastiques ou électrochimiques, tout en assurant une parcimonie paramétrique des modèles obtenus. Un autre exemple étant celui de la commande CRONE qui, à travers ses trois générations, exploite les propriétés de cet opérateur, avec des ordres strictement réels pour les deux premières générations, puis complexes pour la troisième (Oustaloup 1991), (Oustaloup et al. 2005), (Oustaloup 2014).

### 2.3.2. Définitions

La première définition inspirée de la formule de Cauchy est celle de Riemann-Liouville. Il s'agit de celle de l'intégrale non entière (Riemann 1876) d'une fonction  $f(t)$  de  $\mathbb{R}$  dans  $\mathbb{C}$ , donnée par la relation suivante :

$$I_R^n f(t) = \frac{1}{\Gamma(n)} \int_c^t (t-\theta)^{n-1} f(\theta) d\theta, \quad (2.21)$$

où  $c$  est la référence de l'intégrale telle que  $t \geq c$ ,  $n$  est l'ordre non entier d'intégration et  $\Gamma(n)$  est la fonction gamma généralisée aux nombres complexes, soit :

$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{n-1} dx. \quad (2.22)$$

La difficulté d'attribuer à cet opérateur un sens géométrique ou physique, comparable à celui que l'on accorde à l'intégration d'ordre entier, n'est certes pas étrangère au peu d'intérêt que les physiciens lui ont porté. Lorsque l'ordre d'intégration  $n$  est complexe, l'image de « l'aire sous la courbe » ou de la « charge d'un condensateur » perd en effet son sens. Néanmoins, si  $n$  est réel, la définition (2.21) peut être interprétée comme étant l'aire de la surface définie par la fonction  $f(t)$  pondérée par un facteur d'oubli représenté par la fonction  $\frac{(t-\theta)^{n-1}}{\Gamma(n)}$ . Ainsi, si  $n$  est égal à 1,  $I^{n=1} f(t)$  est l'intégrale classique d'ordre 1 et toutes les valeurs de  $f(t)$  ont le même poids. En revanche, si  $n \in \mathbb{R} \cap ]0,1[$ , alors les valeurs les plus récentes ont plus de poids que les plus anciennes.

Une deuxième définition existe, l'intégrale généralisée au sens de Weyl qui est la suivante :

$$W^n f(t) = \frac{1}{\Gamma(n)} \int_t^{+\infty} (\theta - t)^{n-1} f(\theta) d\theta, \quad (2.23)$$

avec

$$\forall n > 0, W^n f(\infty) = 0. \quad (2.24)$$

Elle se déduit également de l'intégrale de Liouville : en notant  ${}_t I_L^n$  l'intégrale généralisée de Liouville à l'ordre  $n$  par rapport à la variable  $t$ , et  ${}_t W^n$  l'intégrale généralisée de Weyl à l'ordre  $n$  par rapport à la variable  $t$ , ces deux définitions de l'intégrale généralisée sont liées par la relation :

$${}_t W^n f(t) = {}_{-t} I_L^n f(-t). \quad (2.25)$$

### 2.3.3. Propriétés

#### 2.3.3.1. Transformée de Laplace

L'interprétation de l'équation (2.21) comme un produit de convolution permet le calcul de la transformée de Laplace de l'intégrale d'ordre complexe d'une fonction temporelle causale, soit (Oldham & Spanier 1974) :

$$\mathcal{L}\left\{{}_t I_0^n f(t)\right\} = \mathcal{L}\left\{\frac{t^{n-1} u(t)}{\Gamma(n)} \otimes f(t)\right\} = \mathcal{L}\left\{\frac{t^{n-1} u(t)}{\Gamma(n)}\right\} \mathcal{L}\{f(t)\} = \frac{1}{s^n} F(s). \quad (2.26)$$

où  $\Re(n) > 0$  et  $(s) = \mathcal{L}\{f(t)\}$ ,  $s = \sigma + j\omega$  désignant la variable de Laplace.

Cette relation traduit un résultat remarquable en ce sens qu'elle généralise la formule bien connue dans le cas entier.

#### 2.3.3.2. Caractérisation fréquentielle

Un dérivateur non entier réel est tel que sa grandeur de sortie ( $t$ ) s'identifie, à un facteur près, à la dérivée non entière de sa grandeur d'entrée ( $t$ ), soit :

$$y(t) = \tau^n D^n u(t), \quad (2.27)$$

où  $\tau$  désigne la constante de temps de différentiation et  $n \in \mathbb{R}$  l'ordre de dérivation réel ( $n$  pouvant être supérieur ou inférieur à 0, l'opérateur considéré étant alors soit un dérivateur, soit un intégrateur).

À l'aide de la relation (2.26) et sous l'hypothèse de conditions initiales nulles, la transformée de Laplace de l'équation (2.27) conduit à :

$$Y(s) = (\tau s)^n U(s), \quad (2.28)$$

soit, en posant  $\omega_u = 1/\tau$ , appelée fréquence au gain unité ou fréquence de transition :

$$Y(s) = \left(\frac{s}{\omega_u}\right)^n U(s), \quad (2.29)$$

d'où l'on tire la transmittance :

$$D(s) = \left(\frac{s}{\omega_u}\right)^n. \quad (2.30)$$

La réponse en fréquences d'un dérivateur non entier réel se déduit de sa transmittance en posant  $s=j\omega$ , soit :

$$D(s) = \left( \frac{j\omega}{\omega_u} \right)^n \quad (2.31)$$

Définis comme le module et l'argument de  $(j\omega)$ , le gain et la phase du dérivateur admettent des expressions de la forme :

$$\begin{cases} |D(j\omega)| = \left( \frac{\omega}{\omega_u} \right)^n \\ \text{Arg}(D(j\omega)) = n \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (2.32)$$

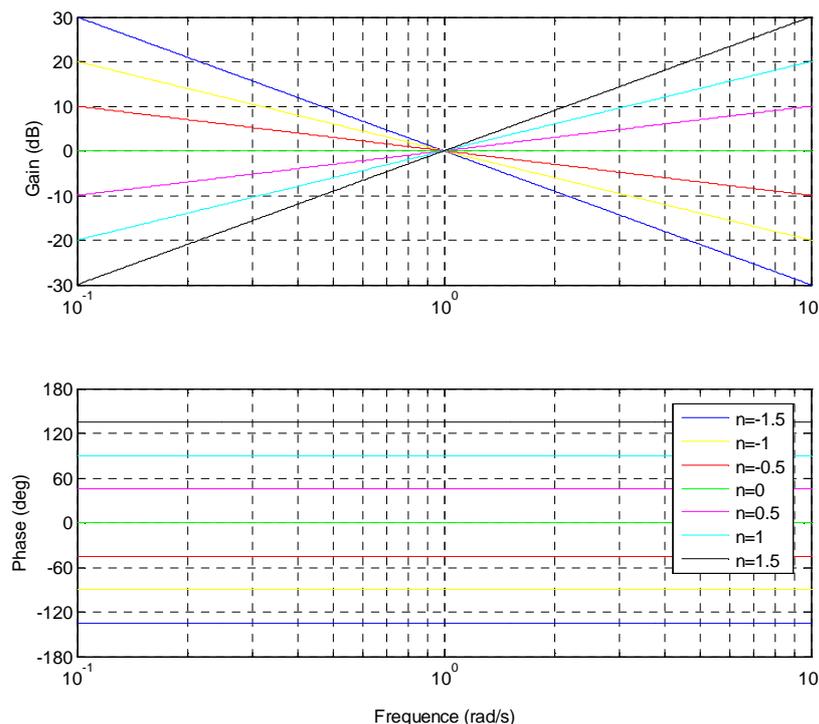
L'analyse d'un tel système d'équations révèle une propriété remarquable de ce type de dérivateur en ce sens que :

- le diagramme de gain est caractérisé par une droite oblique de pente  $20n$  dB par décade ;
- le diagramme de phase est caractérisé par une droite horizontale d'ordonnée  $\varphi = n \frac{\pi}{2}$  rad.

Le caractère non entier réel de l'ordre de dérivation  $n$ , permet ainsi d'assurer, tant au niveau du diagramme de gain que du diagramme de phase, une variation continue :

- de la pente de la droite de gain ;
- de l'ordonnée de la droite de phase.

La figure 2.20 représente les diagrammes de Bode d'un dérivateur et intégrateur non entier réel en fonction de la fréquence réduite  $\omega/\omega_u$  et pour des ordres de dérivation compris entre -1.5 et 1.5.



**Figure 2.20** – Diagrammes de Bode d'un dérivateur non entier réel,  $n \in [-1.5 ; 1.5]$

### 2.3.4. Potentiel généralisé

L'introduction de l'intégration généralisée en planification de trajectoire résulte initialement d'une collaboration entre le Laboratoire d'Automatique, Productique et Signal (LAP) et le Centre d'Etude Atomique (CEA-CESTA). Il s'agissait d'améliorer la sécurité des artificiers lors d'essais dangereux nécessitant la manipulation de substances pyrotechniques. Plusieurs thèses ont participé au développement de cette approche (Linarès 1996), (Orsoni 2002), (Poty 2006), (Inarn 2013).

Deux définitions du potentiel généralisé sont proposées dans cette partie :

- la première basée sur la définition de Riemann-Liouville de l'intégration généralisée,
- et la seconde sur la définition de Weyl.

#### 2.3.4.1. Limite de l'intégration généralisée définie par Riemann en électrostatique

La définition de Riemann-Liouville (relation (2.21)) implique que la borne  $t$  soit toujours supérieure à la référence de l'intégrale  $c$ , soit :

$$t \geq c. \quad (2.33)$$

Or, le choix d'une référence de potentiel nul à l'infini, comme c'est le cas en électrostatique, n'est donc pas possible avec cette définition. De plus, dans notre contexte d'étude la variable d'intégration est une distance et donc, elle n'admet pas de valeur négative. Par conséquent, la définition de Riemann-Liouville est inexploitable pour le choix d'une référence à l'infini.

En revanche, la définition de Weyl de l'intégrale généralisée (Weyl 1917), (Miller & Ross 1993), (Samko et al. 1993), permettant de considérer une référence de potentiel nul à  $+\infty$ , est tout à fait appropriée à la définition d'un potentiel généralisé.

#### 2.3.4.2. Le potentiel généralisé fondé sur la définition de Weyl

En considérant une fonction  $f_\mu(r)$  de la forme :

$$f_\mu(r) = \frac{K}{r^\mu}, \quad (2.34)$$

son intégration généralisée au sens de Weyl (relation (2.23)) s'écrit (Miller & Ross 1993) :

$$W^n(f_\mu(r)) = K \frac{\Gamma(\mu - n)}{\Gamma(\mu)} \frac{1}{r^{\mu-n}}, \quad (2.35)$$

avec  $r > 0$  et  $\Re(\mu) > \Re(n) > 0$ .

Dans le cas particulier du champ électrique coulombien créé dans le vide en un point par une charge ponctuelle, la relation (2.34) s'écrit :

$$E_{\mu=2}(r) = \frac{K}{r^2}, \quad (2.36)$$

où  $K = \frac{q}{4\pi\epsilon_0}$ .

L'utilisation de la définition de Weyl de l'intégration généralisée, donnée par la relation (2.23), permet ainsi de proposer une définition du potentiel généralisé d'une charge ponctuelle :

$$V_n(r) = W^n E(r) = W^n \left( \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r^2} \right) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 \Gamma(n)} \int_r^{+\infty} \frac{(\theta - r)^{n-1}}{r^2} d\theta. \quad (2.37)$$

L'expression analytique du potentiel généralisé fondé sur la définition de Weyl se déduit simplement de la relation (2.35) :

$$\forall n \in ]0;2[, V_n(r) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\Gamma(2-n)}{r^{2-n}}. \quad (2.38)$$

Pour  $n=1$ , la relation (2.38) permet de retrouver le cas particulier du potentiel coulombien d'une charge ponctuelle. Afin d'assurer le passage continu du potentiel coulombien d'une charge ponctuelle  $n=1$ , au potentiel coulombien d'une charge distribuée  $n=2$ , il est donc nécessaire d'étendre à  $n=2$  la relation (2.38) du potentiel généralisé.

### 2.3.4.3. Extension à $n=2$ du potentiel généralisé fondé sur la définition de Weyl

Lorsque  $n=2$ , le calcul du potentiel  $V_2(r)$  par la relation (2.38) est impossible. En revanche, il peut l'être en utilisant les développements limités suivant et en faisant tendre  $n$  vers 2 :

$$\frac{1}{r^{2-n}} = 1 + (n-2)\ln(r) + O((n-2)^2) \quad (2.39)$$

et :

$$\Gamma(2-n) = \frac{-1}{n-2} - \gamma - (n-2) \left( \frac{\pi^2}{12} + \frac{\gamma^2}{2} \right) + O((n-2)^2), \quad (2.40)$$

où  $\gamma$  désigne la constante d'Euler (0.5772156649...) et  $O((n-2)^2)$  une fonction infiniment petite d'ordre 2 au voisinage de  $n=2$  (notation de Landau (Lelong-Ferrand 1992)).

La notation de Landau est usuellement employée dans les développements limités pour indiquer l'ordre de développement ; elle s'appuie sur la notion de *dominance d'une fonction*. Celle-ci est définie par le théorème qui suit :

**Théorème** : soient  $f$  et  $g$  deux fonctions définies au voisinage de  $x_0$ . La fonction  $f$  est dite dominée par  $g$  au voisinage de  $x_0$ , se notant ainsi :

$$f = O(g), \quad (2.41)$$

si et seulement si, il existe une fonction  $h$  définie et bornée au voisinage de  $x_0$  telle que :

$$f(x) = g(x)h(x). \quad (2.42)$$

En reportant les relations (2.39) et (2.40) des développements limités dans la relation (2.38), le potentiel généralisé s'écrit :

$$\forall r >, V_n(r) = \frac{-q}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{1}{n-2} + (\gamma + \ln(r)) + O(n-2) \right]. \quad (2.43)$$

La différence de potentiel généralisé  $V_{n,AB}$  entre le point  $A$  situé à une distance  $d_A$  et un point  $B$  situé à une distance  $d_B$ , est :

$$V_{n,AB} = V_{n,B}(d_B) - V_{n,A}(d_A), \quad (2.44)$$

soit :

$$V_{n,AB} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} [\ln(d_A) - \ln(d_B) + O(n-2)], \quad (2.45)$$

d'où :

$$\lim_{n \rightarrow 2} V_{n,AB} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{d_A}{d_B}\right). \quad (2.46)$$

Ainsi, le potentiel généralisé fondé sur la définition de Weyl obtenu lorsque  $n$  tend vers 2 (relation (2.46)) est proportionnel à la charge ponctuelle  $q$ , alors que le potentiel créé par une charge distribuée uniformément le long d'un segment de droite de longueur infinie est proportionnel à la densité linéique de charge  $\lambda$ .

Les deux expressions ne sont pas strictement identiques, mais la normalisation du potentiel généralisé va permettre d'obtenir une expression indépendante de la charge ou densité de charge, et par conséquent d'assurer l'égalité entre ces deux potentiels.

#### 2.3.4.4. Normalisation du potentiel généralisé

Afin que, d'une part, les valeurs du potentiel généralisé  $V_n(r)$  correspondent directement à un pourcentage, c'est-à-dire à un niveau de danger relatif (figure 2.21), et que, d'autre part, l'expression du potentiel généralisé soit indépendante de la charge, le potentiel généralisé est maintenant normalisé sur l'intervalle  $[0;1]$ .

Le potentiel généralisé normalisé  $U_n(r)$  est défini de la façon suivante :

- $U_n(r)$  est pris unitaire (100% de danger) sur les obstacles et jusqu'à la distance minimale  $r_{min}$  d'évaluation, permettant d'avoir une valeur finie pour le potentiel,
- et  $U_n(r)$  est nul (0% de danger) pour et au-delà d'une distance finie  $r_{max}$ , qui est la distance maximale d'influence du potentiel généralisé.

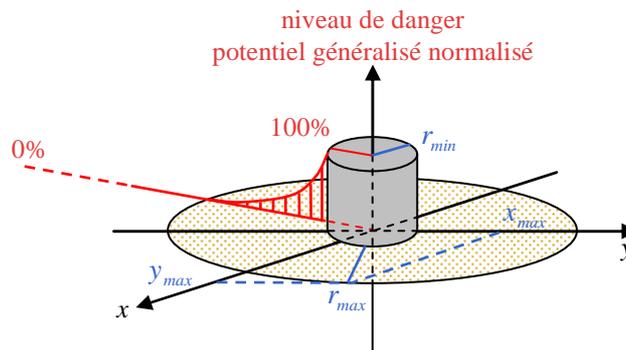


Figure 2.21 - Normalisation du potentiel généralisé sur l'intervalle  $[0;1]$

Sachant que  $V_n(r)$  est nul par définition lorsque  $r \rightarrow +\infty$ , la définition du potentiel généralisé normalisé  $U_n(r)$  est :

$$\begin{cases} \forall n \in ]0;2[, \forall r \in [r_{\min}; r_{\max}], U_n(r) = \frac{V_n(r) - V_n(r_{\max})}{V_n(r_{\min}) - V_n(r_{\max})} \\ \forall r > r_{\max}, U_n(r) = 0 \end{cases} \quad (2.47)$$

L'introduction de l'expression analytique du potentiel généralisé (relation (2.38)) dans la relation (2.47) conduit à :

$$\begin{cases} \forall n \in ]0;2[, \forall r \in [r_{\min}; r_{\max}], U_n(r) = \frac{r^{n-2} - r_{\max}^{n-2}}{r_{\min}^{n-2} - r_{\max}^{n-2}} \\ \forall r > r_{\max}, U_n(r) = 0 \end{cases} \quad (2.48)$$

La normalisation du potentiel généralisé  $V_{n \rightarrow 2}(r)$  obtenue lorsque  $n$  tend vers 2 (relation (2.46)) et celle du potentiel  $V_{segment}$  créé par une charge distribuée uniformément le long d'un segment de droite de longueur infinie s'écrivent respectivement :

$$\forall r \in [r_{\min}, r_{\max}], \lim_{n \rightarrow 2} U_n(r) = \frac{\ln(r_{\max}) - \ln(r)}{\ln(r_{\max}) - \ln(r_{\min})}, \quad (2.49)$$

et

$$\forall r \in [r_{\min}, r_{\max}], U_{segment}(r) = \frac{\ln(r_{\max}) - \ln(r)}{\ln(r_{\max}) - \ln(r_{\min})}. \quad (2.50)$$

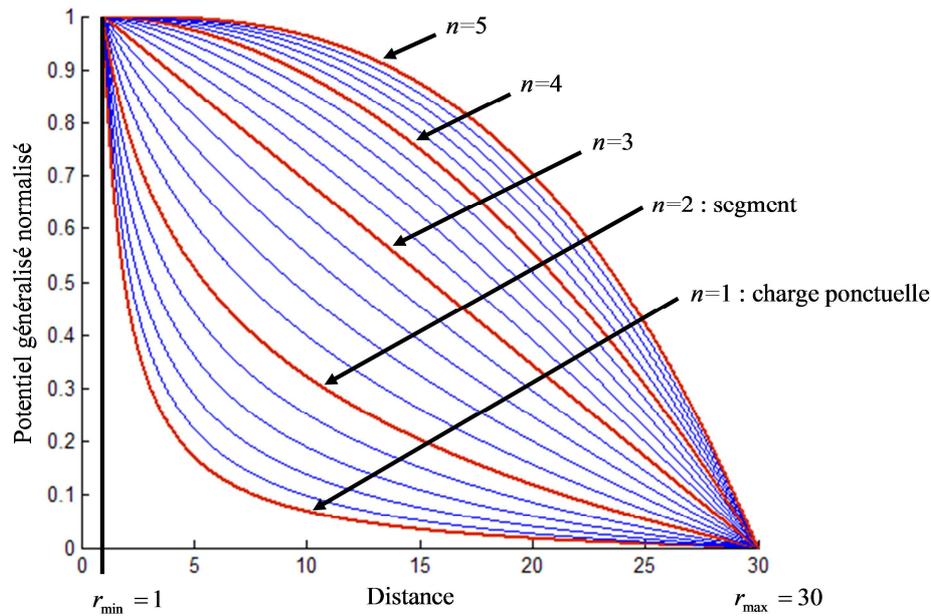
La normalisation ne faisant intervenir ni la charge  $q$  ni la charge linéique  $\lambda$ , la propriété suivante est vérifiée : lorsque  $n$  tend vers 2, le potentiel généralisé fondé sur la définition de Weyl obtenu après normalisation est le potentiel normalisé créé par une charge distribuée uniformément le long d'un segment de droite de longueur infinie. L'extension à  $n = 2$  du potentiel généralisé normalisé est donc donnée par la relation (2.49).

Les relations (2.48) et (2.49) permettent de caractériser le potentiel généralisé normalisé pour  $n \in ]0;2[$  et  $n \rightarrow 2$ . Le prolongement par continuité au voisinage de  $n = 2$  avec  $n > 2$  est aussi permis. Bien que le potentiel généralisé fondé sur la définition de Weyl n'a de sens que pour  $n < 2$ , il n'en reste pas moins que les relations (2.47) et (2.48) peuvent être étendues à un ordre  $n > 2$ .

Le prolongement par continuité du potentiel généralisé normalisé fondé sur la définition de Weyl devient alors :

$$\begin{cases} \forall n \in [0;2[ \cup ]2; +\infty[, \forall r \in [r_{\min}; r_{\max}], U_n(r) = \frac{r^{n-2} - r_{\max}^{n-2}}{r_{\min}^{n-2} - r_{\max}^{n-2}} \\ n = 2, \forall r \in [r_{\min}; r_{\max}], U_2(r) = \frac{\ln(r_{\max}) - \ln(r)}{\ln(r_{\max}) - \ln(r_{\min})} \\ \forall r > r_{\max}, U_n(r) = 0 \end{cases} \quad (2.51)$$

Le potentiel généralisé normalisé fondé sur la définition de Weyl est maintenant défini pour tout ordre réel positif d'intégration comme l'illustre la figure 2.22. Il admet une expression analytique compacte, simple à utiliser et qui ne requiert aucun calcul intégral. La forme des courbes de ce potentiel généralisé normalisé, et donc de son influence à distance, dépend uniquement de l'ordre d'intégration généralisé  $n$ , permettant ainsi une variation continue et progressive de la courbure du potentiel.



**Figure 2.22** - Influence à distance du potentiel généralisé normalisé fondé sur la définition de Weyl pour différents ordres d'intégration généralisée ( $1 \leq n \leq 5$ )  
 $n=1$  : potentiel coulombien créé par une charge ponctuelle  
 $n=2$  : potentiel coulombien créé par une charge uniformément répartie sur un segment de droite

### 2.3.5. Commande CRONE

La commande CRONE (Commande Robuste d'Ordre Non Entier) est une méthodologie pour la synthèse de régulateur dans le domaine fréquentiel pour les processus incertains ou perturbés à retour unitaire. Depuis les années 1980, trois générations de commandes (Lanusse et al. 2005; Oustaloup et al. 1993; Oustaloup et al. 2000; Malti et al. 2011) ont été développées utilisant toujours le même principe qui consiste à définir la fonction de transfert de la boucle ouverte grâce à des dérivées ou intégrations d'ordre non entier.

L'avantage par rapport à la synthèse  $H^\infty$  (Landau et al. 1995) est que les incertitudes (ou perturbations) du processus sont prises en compte sans distinction de nature, qu'elles soient de structure ou extérieures.

#### 2.3.5.1. Première génération de commande CRONE

La première génération de commande CRONE est basée sur un régulateur à phase constante (au voisinage de la fréquence au gain unité en boucle ouverte  $\omega_u$ ) obtenu pour une plage de fréquences limitées  $[\omega_w, \omega_b]$  à partir de dérivées non entières réelles.

$$C(s) = C_0 \left( \frac{1+s/\omega_l}{1+s/\omega_h} \right)^n, \quad (2.52)$$

avec  $C_0, \omega_l, \omega_h$  et  $n \in \mathbb{R}$ .

Lorsque la phase du processus est constante autour de la fréquence  $\omega_u$  et que les perturbations n'engendrent que des variations de gain (autour de  $\omega_u$ ), le régulateur à phase

constante assure la robustesse de la marge de phase. Pour que le régulateur CRONE assure le niveau du signal de commande et l'erreur à l'état stationnaire, il faut ajouter un intégrateur d'ordre  $n_I$  sur une plage de fréquences limitée et un filtre passe-bas d'ordre  $n_F$ . Ainsi, le régulateur CRONE de première génération est définie par :

$$C_F(s) = C_0 \left( \frac{\omega_I}{s} + 1 \right)^{n_I} \left( \frac{1 + s/\omega_l}{1 + s/\omega_h} \right)^n \frac{1}{(1 + s/\omega_F)^{n_F}}, \quad (2.53)$$

avec  $n_I, n_F \in \mathbb{N}$  et  $\omega_l, \omega_F \in \mathbb{R}$ .

Cette forme peut être considérée comme un régulateur  $PI^{n_I}D^{n_F}$  avec  $C_R(s)$  sa forme rationnelle définie à l'aide d'une approximation pour la partie non entière obtenue par une distribution récursive de pôles zéros à valeur réelle :

$$C_R(s) = C_0 \left( \frac{\omega_I}{s} + 1 \right)^{n_I} \prod_{i=1}^N \frac{1 + s/\omega'_i}{1 + s/\omega_i} \frac{1}{(1 + s/\omega_F)^{n_F}}, \quad (2.54)$$

avec  $N \in \mathbb{N}$  et  $\omega_i, \omega'_i \in \mathbb{R}$ .

La figure 2.23 présente les diagrammes asymptotiques de Bode pour la partie non entière où :

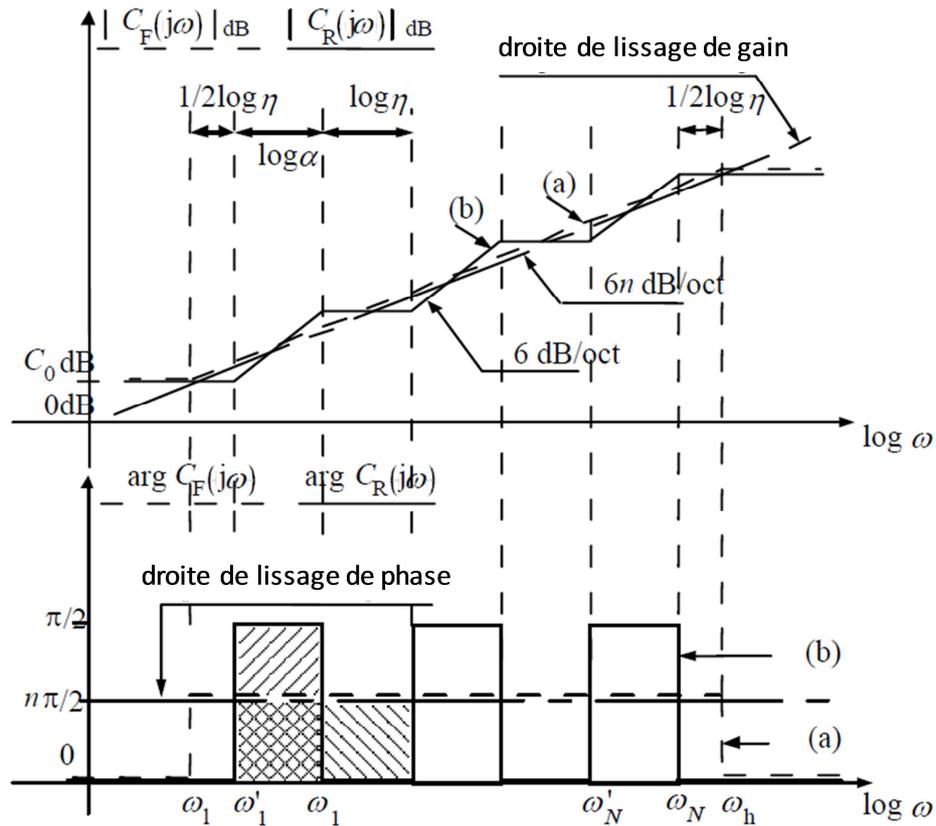
$$\frac{\omega'_{i+1}}{\omega'_i} = \frac{\omega_{i+1}}{\omega_i} = \alpha\eta > 1, \quad (2.55)$$

$$\frac{\omega_i}{\omega'_i} = \alpha \quad \text{et} \quad \frac{\omega'_{i+1}}{\omega_i} = \eta, \quad (2.56)$$

$$\alpha\eta = \left( \frac{\omega_h}{\omega_l} \right)^{1/N}, \quad (2.57)$$

$$\alpha = (\alpha\eta)^n \quad \text{et} \quad \eta = (\alpha\eta)^{1-n}, \quad (2.58)$$

$$\omega'_1 = \omega_1\eta^{1/2} \quad \text{et} \quad \omega_N = \omega_h\eta^{-1/2}, \quad (2.59)$$



**Figure 2.23** - Diagrammes asymptotiques de Bode du régulateur CRONE idéal (a) et rationnel (b) pour  $n \in [0,1]$

Généralement, les paramètres  $\omega_i$  et  $\omega'_i$  peuvent être calculés en fixant une valeur pour  $N$  qui assure  $\alpha\eta \approx 5$ .

La robustesse de la marge de phase est assurée seulement si  $\omega_u$  se situe dans la plage de fréquence où la phase du système est constante. Lorsque cette condition n'est pas respectée, il faut utiliser la commande CRONE de deuxième génération.

### 2.3.5.2. Deuxième génération de commande CRONE

Il est parfois impossible de choisir une fréquence de boucle ouverte dans une plage de fréquence où le processus a un comportement asymptotique. Ainsi, lorsque la fréquence  $\omega_u$  désirée n'est pas comprise dans le comportement asymptotique, le régulateur CRONE précédent défini par (2.52) ne peut pas assurer la robustesse du degré de stabilité du système en boucle fermée. Cependant, comme Bode l'a établi (Bode 1945) pour la conception d'un amplificateur de simple boucle parfaitement stable avec des gains de tube qui varient, seul un régulateur robuste permet d'obtenir une fonction de transfert à phase constante pour une certaine plage fréquentielle. Ainsi, pour une fréquence  $\omega_u$  comprise dans une plage de fréquence où les incertitudes du système ne donnent que des variations de gain, l'approche CRONE définit la fonction de transfert de boucle ouverte (sur la plage fréquentielle  $[\omega_A, \omega_B]$ ) par un intégrateur non entier :

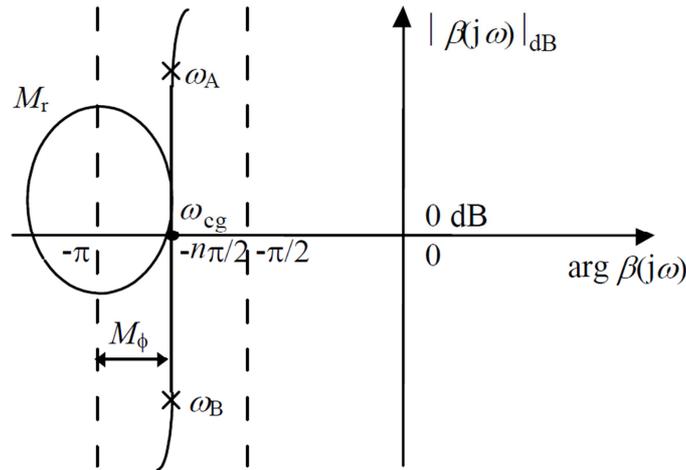
$$\beta(s) = \left( \frac{\omega_u}{s} \right)^n, \quad (2.60)$$

avec  $n \in \mathbb{R}$  et  $n \in [1, 2]$ .

La fonction de sensibilité complémentaire  $T(s)$  et la fonction de sensibilité  $S(s)$  s'expriment par :

$$T(s) = \frac{\beta(s)}{1 + \beta(s)} = \frac{1}{1 + \left(\frac{s}{\omega_u}\right)^n} \quad \text{et} \quad S(s) = \frac{1}{1 + \beta(s)} = \frac{\left(\frac{s}{\omega_u}\right)^n}{1 + \left(\frac{s}{\omega_u}\right)^n}. \quad (2.61)$$

Autour de la fréquence  $\omega_u$ , le lieu de Black-Nichols de  $\beta$  est une droite verticale dont la phase est déterminée seulement par l'ordre  $n$  (figure 2.24). Cette droite est la réponse fréquentielle désirée pour la boucle ouverte dans le plan de Black.



**Figure 2.24** – Forme et droite verticale du gabarit fréquentiel assurant la robustesse de la marge de phase  $M_\phi$  et du pic de résonance  $M_r$

Le gabarit vertical ainsi défini peut glisser le long de son propre axe selon la variation des paramètres. Le déplacement vertical assure :

- que la marge de phase  $M_\phi$  reste égale à  $(2-n)\pi/2$  ;
- un pic de résonance robuste  $M_r$  exprimé par :

$$M_r = \frac{\sup_{\omega} |T(j\omega)|}{|T(j0)|} = \frac{1}{\sin(n\pi/2)}; \quad (2.62)$$

- une marge de module robuste exprimé par :

$$M_m = \inf_{\omega} |\beta(j\omega) + 1| = \left( \sup_{\omega} |S(j\omega)| \right)^{-1} = \sin(n\pi/2); \quad (2.63)$$

- un amortissement  $\zeta$  robuste directement déduit de l'angle  $\theta$  formé par les deux pôles complexes de la boucle fermée :

$$\zeta = \cos\theta = \cos\left(\pi - \frac{\pi}{n}\right) = -\cos(\pi/n). \quad (2.64)$$

Afin que le régulateur gère le niveau du signal de commande et l'erreur à l'état stationnaire, l'équation (2.60) est limitée en fréquence et un filtre passe-bas ainsi qu'un intégrateur sont ajoutés. L'expression de la fonction de transfert en boucle ouverte  $\beta(s)$  devient :

$$\beta(s) = \beta_0 \left( \frac{1+s/\omega_l}{s/\omega_l} \right)^{n_l} \left( \frac{1+s/\omega_h}{1+s/\omega_l} \right)^n (1+s/\omega_h)^{-n_h}, \quad (2.65)$$

où  $\omega_l$  et  $\omega_h$  représentent les fréquences transitionnelles basse et haute,  $n$  l'ordre non entier compris entre 1 et 2 au voisinage la fréquence  $\omega_u$ ,  $n_l$  et  $n_h$  sont les ordres des comportements asymptotiques aux basses et hautes fréquences (figure 2.25) et  $\beta_0$  une constante qui assure un gain unité à la fréquence  $\omega_u$ .  $\beta_0$  est donnée par :

$$\beta_0 = (\omega_u/\omega_l)^{n_l} \left( 1 + (\omega_u/\omega_l)^2 \right)^{(n-n_l)/2} \left( 1 + (\omega_u/\omega_h)^2 \right)^{(n_h-n)/2}. \quad (2.66)$$

Le comportement asymptotique non entier (figure 2.25) est défini sur un intervalle fréquentiel  $[\omega_A, \omega_B]$  autour de la fréquence nominale  $\omega_{unom}$ . Pour respecter la robustesse du degré de stabilité, il est nécessaire d'imposer :

$$\forall \omega_u \in [\omega_{u\min}; \omega_{u\max}], \omega_A \leq \omega_u \leq \omega_B \Rightarrow \begin{cases} \omega_A \leq \omega_{u\min} \\ \omega_B \geq \omega_{u\max} \end{cases}. \quad (2.67)$$

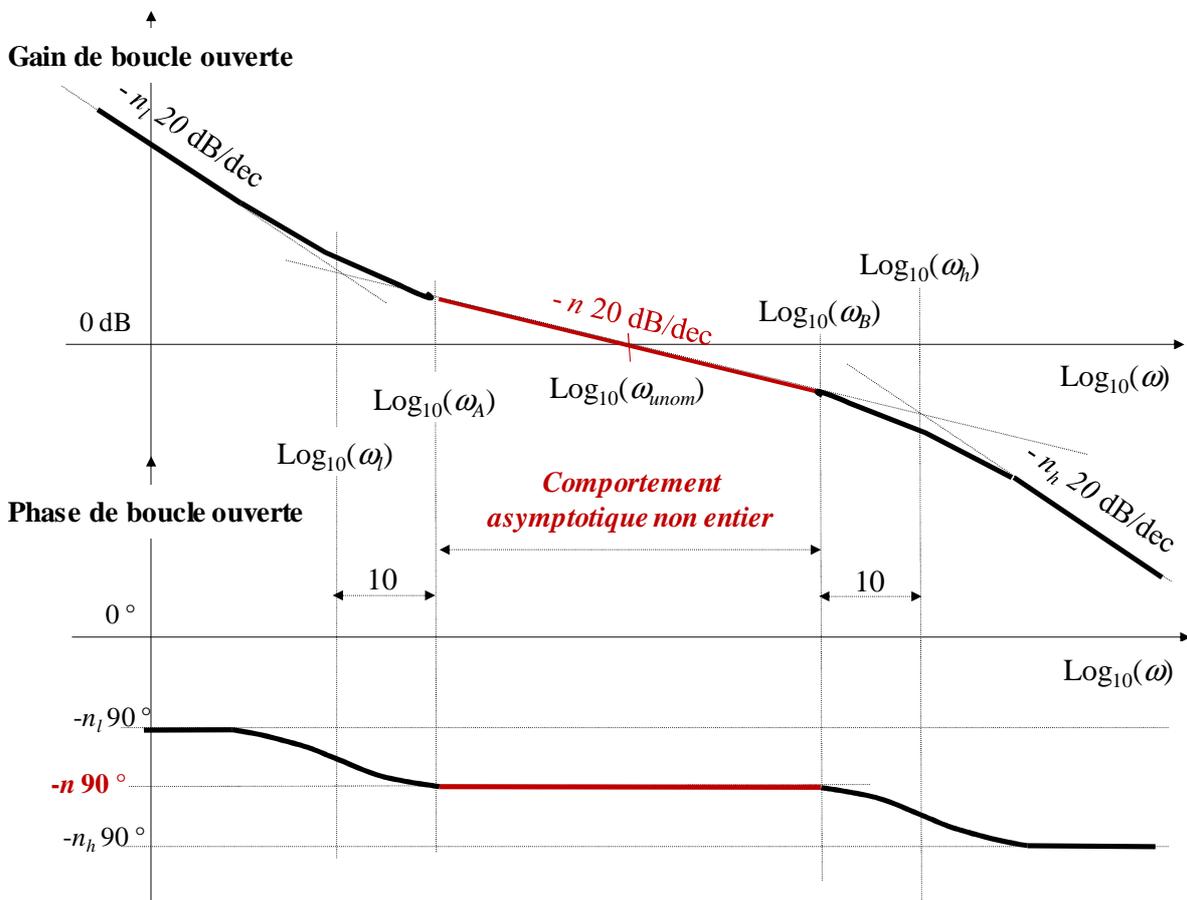


Figure 2.25 – Diagrammes asymptotiques de Bode de  $\beta(j\omega)$

De plus, pour obtenir un comportement asymptotique non entier sur l'intervalle  $[\omega_A, \omega_B]$  (figure 2.25), une règle pratique conduit à choisir (Oustaloup 1991) :

$$\begin{cases} \omega_l = \omega_A / 10 \\ \omega_h = 10 \omega_B \end{cases}. \quad (2.68)$$

En prenant  $\omega_l$  et  $\omega_h$  distribuées géométriquement autour de  $\omega_{unom}$  et en introduisant  $a = \omega_B/\omega_A$ , soit :

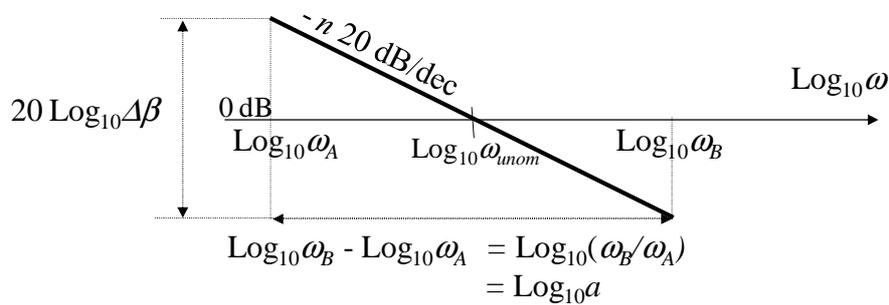
$$\begin{cases} \sqrt{\omega_l \omega_h} = \omega_{unom} \\ a = \frac{\omega_B}{\omega_A} \end{cases}, \quad (2.69)$$

$\omega_l$  et  $\omega_h$  sont données par :

$$\begin{cases} \sqrt{\omega_l \omega_h} = \omega_{unom} \\ \frac{\omega_h}{\omega_l} = 100 a \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \omega_l = \omega_{unom} / (10 \sqrt{a}) \\ \omega_h = \omega_{unom} 10 \sqrt{a} \end{cases}. \quad (2.70)$$

Quant au calcul du rapport  $a$ , il est déduit de la pente de  $-n20\text{dB/dec}$  au voisinage de  $\omega_{unom}$  et de la variation  $\Delta\beta$  de gain en boucle ouverte due aux incertitudes paramétriques (figure 2.26). Ainsi, on trouve :

$$a = \Delta\beta^{1/n}. \quad (2.71)$$



**Figure 2.26** – Illustration du calcul de  $a$

Enfin, sachant que

$$\beta(s) = C_{crone}(s) G(s), \quad (2.72)$$

la forme non entière  $C_F(s)$  de la fonction de transfert du régulateur CRONE  $C_{crone}(s)$  est alors déduite à partir de la fonction de transfert  $G_{nom}(s)$  du procédé nominal, soit :

$$C_F(s) = \beta(s) / G_{nom}(s). \quad (2.73)$$

Finalement, une dernière étape est nécessaire pour déterminer la forme rationnelle  $C_R(s)$  de la fonction de transfert non entière  $C_F(s)$  qui, selon le cas, est obtenue soit analytiquement à l'aide d'une distribution récursive de pôles et de zéros (voir (Oustaloup 1991)), soit numériquement à partir de la réponse fréquentielle de  $C_F(j\omega)$  et d'un module spécifique de la Toolbox CRONE (voir (Oustaloup et al. 2005), (Lanusse et al. 2013)).

### 2.3.5.3. Troisième génération de commande CRONE

Pour des cas plus généraux que des variations de gains du système, le gabarit vertical du lieu de Black ne suffit pas. Cependant, il est toujours plus pratique de définir un gabarit en ligne droite (autour de la fréquence  $\omega_u$ ) peu importe la direction pour l'état paramétrique nominal du processus. La fonction de transfert de la boucle ouverte est maintenant définie comme la partie réelle d'un intégrateur d'ordre non entier complexe :

$$\beta(s) = \text{Re}_{/i} \left( \frac{\omega_u}{s} \right)^n, \quad (2.74)$$

avec  $n=a + ib \in \mathbb{C}_i$  and  $s = \sigma + j\omega \in \mathbb{C}_j$ . L'ordre réel  $a$  détermine le placement en phase du lieu de Black et la partie imaginaire  $b$  détermine son angle par rapport à la verticale comme l'illustre la figure 2.27.

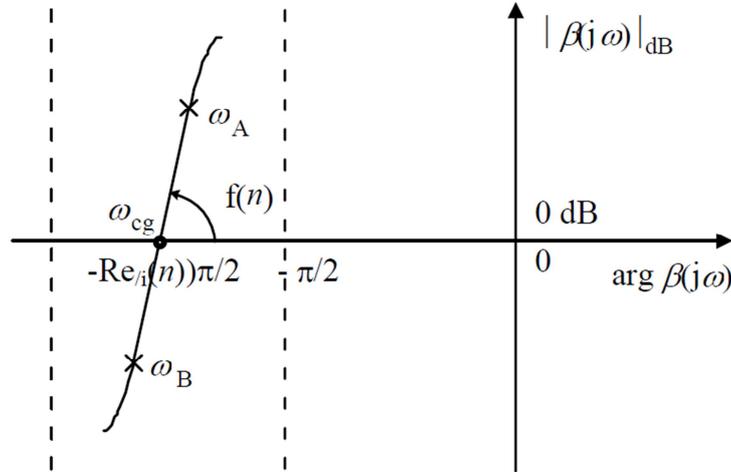


Figure 2.27 – Gabarit généralisé dans le plan de Black-Nichols

Parmi le nombre infini de gabarits possibles, c'est-à-dire parmi ceux qui tangent le contour avec la valeur requise de  $M_{r0}$  pour l'état paramétrique nominal du processus, le gabarit optimal peut être défini comme celui permettant de minimiser les variations de  $M_r$  provenant du domaine fréquentiel incertain, lui-même découlant des diverses réponses fréquentielles obtenues pour le système perturbé. Le principe de la commande CRONE de troisième génération consiste à optimiser les paramètres de la fonction de transfert en boucle ouverte nominale  $\beta_0(s)$  de façon à inclure une intégration d'ordre non entier complexe sur une plage de fréquences.

$$\beta_0(s) = \beta_l(s)\beta_m(s)\beta_h(s) , \quad (2.75)$$

où  $\beta_m(s)$  est un ensemble de modèles généralisés sur une plage de fréquence :

$$\beta_m(s) = \prod_{k=-N^-}^{N^+} C_k^{\text{sign}(b_k)} \left( \alpha_k \frac{1+s/\omega_{k+1}}{1+s/\omega_k} \right)^{a_k} \left( \text{Re}_i \left\{ \left( \alpha_k \frac{1+s/\omega_{k+1}}{1+s/\omega_k} \right)^{ib_k} \right\} \right)^{-q_k \text{sign}(b_k)} , \quad (2.76)$$

avec

$$\alpha_k = \left( \frac{\omega_{k+1}}{\omega_k} \right)^{1/2} \text{ pour } k \neq 0 \quad \text{et} \quad \alpha_0 = \left( \frac{1 + (\omega_r/\omega_0)^2}{1 + (\omega_r/\omega_1)^2} \right)^{1/2} , \quad (2.77)$$

et où :

$$\beta_l(s) = C_l \left( \frac{\omega_{-N^-}}{s} + 1 \right)^{n_l} \quad \text{et} \quad \beta_h(s) = C_h \left( \frac{s}{\omega_{N^+}} + 1 \right)^{-n_h} , \quad (2.78)$$

avec  $N^+$ ,  $N^-$  et  $q_k \in \mathbb{N}^+$ ;  $\omega_r$ ,  $\omega_k$ ,  $\omega_{k+1}$ ,  $\alpha_k$ ,  $C_k$ ,  $C_l$ ,  $C_h$ ,  $a_k$  et  $b_k \in \mathbb{R}$ .

Les gains  $C_x$  sont choisis de telle sorte que  $\omega_r$  soit la fréquence nominale de résonance en boucle fermée. Lorsque cela est nécessaire,  $N^+$  et  $N^-$  sont différents de 0 pour augmenter le nombre de paramètres réglables.

Les paramètres de boucle ouverte étant optimisés pour réduire les variations du pic de résonance  $M_r$  de la fonction de sensibilité complémentaire  $T(s)$ , la fonction coût de la robustesse à minimiser peut être :

$$J = \left( M_{r0} - \min_G |M_r| \right)^2 + \left( \max_G |M_r| - M_{r0} \right)^2, \quad (2.79)$$

où  $M_{r0}$  est la valeur nominale désirée du pic de résonance en boucle fermée (pour le processus nominal  $G_0$ ) et tant que l'ensemble des inégalités suivantes sont respectées pour tout processus  $G$  et pour  $\omega \in \mathbb{R}^+$  :

$$\left. \begin{array}{l} \min_G |T(j\omega)| \geq T_l(\omega), \quad \max_G |T(j\omega)| \leq T_u(\omega), \quad \max_G |S(j\omega)| \leq S_u(\omega) \\ \max_G |CS(j\omega)| \leq CS_u(\omega) \quad \text{et} \quad \max_G |GS(j\omega)| \leq GS_u(\omega) \end{array} \right\}, \quad (2.80)$$

avec

$$\left. \begin{array}{l} T(s) = \frac{G(s)C(s)}{1+G(s)C(s)}, \quad S(s) = \frac{1}{1+G(s)C(s)}, \\ CS(s) = \frac{C(s)}{1+G(s)C(s)}, \quad GS(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)C(s)} \end{array} \right\}. \quad (2.81)$$

Il est simple de mettre en évidence que l'incertitude multiplicative  $\Delta_m \beta(s)$  de la réponse fréquentielle en boucle ouverte, qui définit l'incertitude du domaine fréquentiel dans le plan de Black, est invariante et égale à celle du processus :

$$\beta(s) = G(s)C(s) = G_0(s)\Delta_m G(s)C(s) = \beta_0(s)\Delta_m G(s), \quad (2.82)$$

avec  $G_0(s)$  le processus nominal et  $\beta_0(s)$  la fonction de transfert en boucle ouverte et où  $\Delta_m G(s)$  (ou  $\Delta_m \beta(s)$ ) est l'incertitude multiplicative du modèle. Ainsi, les incertitudes sur le domaine fréquentiel lié au lieu de Black de  $\beta_0(s)$  sont définies par l'ensemble des valeurs possibles des paires ordonnées  $(\arg \Delta_m G(j\omega), |\Delta_m G(j\omega)|_{\text{dB}})$ . En minimisant  $J$  (2.79), les paramètres optimaux pour la boucle ouverte positionnent les incertitudes du domaine fréquentiel de manière à ce qu'elles chevauchent le moins possible la zone de faible stabilité du plan de Black-Nichols. Etant donné que les incertitudes sont prises en compte par la méthode la moins conservatrice, seule une méthode d'optimisation non-linéaire peut être utilisée. Pour  $N=N^+=0$ , seuls quatre paramètres indépendants de boucle ouverte doivent être optimisés. Le paramétrage de la fonction de transfert en boucle ouverte par des ordres non entiers complexes simplifie considérablement l'optimisation. Lors de l'optimisation, un ordre complexe joue le rôle d'un grand ensemble de paramètres utilisés pour un régulateur rationnel. Finalement, le régulateur non entier  $C_F(s)$  est défini par sa réponse fréquentielle :

$$C_F(j\omega) = \frac{\beta_0(j\omega)}{G_0(j\omega)}. \quad (2.83)$$

Comme pour la commande de deuxième génération, les paramètres de la fonction de transfert rationnelle  $C_R(s)$  sont réglés pour s'adapter à la réponse fréquentielle idéale  $C_F(j\omega)$ . Ils sont obtenus soit analytiquement, soit numériquement à l'aide de la Toolbox CRONE. L'avantage de cette méthodologie de conception est que, quelle que soit la complexité du problème de commande, une valeur réduite de l'ordre du régulateur (généralement autour de 6) peut être utilisée.

## **2.4. Conclusion**

L'idée d'émergence d'un comportement collectif est à la base de la conception du système d'aide à la conduite qui est réalisé dans cette thèse. L'exemple le plus représentatif est le banc de poissons pour lequel tous les membres du groupe adoptent un mouvement fluide et sans collisions. Pour cela, les modèles mathématiques déjà élaborés permettent de mieux comprendre les interactions entre les poissons.

Le deuxième outil présenté dans ce chapitre est l'intégration non entière qui est largement répandue dans des domaines aussi variés que la mécanique, la thermique, l'électrochimie et l'automatique. Dans cette thèse, l'intégration non entière est utilisée pour la génération de trajectoire à travers le potentiel généralisé dans le chapitre 3 et pour la conception de régulateur via la commande CRONE dans le chapitre 4.



# Chapitre 3

## Approche « Banc de poissons » pour la génération de trajectoire

---

3.1.Introduction .....	79
3.2.Règles de circulation et mode de conduite en trafic autoroutier .....	79
3.3.Suivi de voie .....	82
3.3.1. Méthode 1 : basée sur le modèle de Reynolds.....	82
3.3.2. Méthode 2 : basée sur le potentiel attractif de Ge et Cui .....	84
3.3.3. Méthode 3 : basée sur le potentiel attractif fractionnaire .....	86
3.3.4. Comparaison des trois méthodes .....	86
3.4.Intégration dans le trafic routier.....	89
3.4.1. De la distance de cohésion à la distance de sécurité.....	90
3.4.2. Interaction entre les véhicules : force de répulsion.....	91
3.5.Synthèse sur les méthodes de déplacement des véhicules en « banc de poissons » .....	97
3.5.1. Simulations avec un seul véhicule équipé.....	98
3.5.2. Simulations avec plusieurs véhicules équipés .....	102
3.6.Conclusion .....	105

---



# Chapitre 4

## Prise en compte de la dynamique du véhicule pour le suivi de la trajectoire

4.1.Introduction .....	109
4.2.Eléments de dynamique du véhicule .....	109
4.2.1. Généralités .....	109
4.2.2. Modélisation .....	110
4.2.3. Modélisation des pneumatiques.....	113
4.3.Modèle véhicule utilisé .....	117
4.3.1. Schéma global, normes d'écriture .....	117
4.3.2. Dynamique longitudinale.....	119
4.3.3. Dynamique de lacet.....	119
4.3.4. Dynamique transversale .....	120
4.3.5. Dynamique de rotation des roues.....	120
4.3.6. Transferts de charge.....	120
4.3.7. Trajectoire .....	121
4.3.8. Modèle de validation .....	122
4.4.Régulation de vitesse longitudinale .....	122
4.4.1. Modèle d'analyse .....	122
4.4.2. Incertitudes du système .....	126
4.4.3. Analyse de la sensibilité .....	127
4.4.4. Synthèse des régulateurs dans le domaine fréquentiel .....	128
4.4.5. Analyse des performances .....	133
4.5.Régulation du déplacement transversal .....	139
4.5.1. Modèle lacet-dérive linéarisé.....	139
4.5.2. Modèle simplifié pour la synthèse .....	142
4.5.3. Synthèse des régulateurs dans le domaine fréquentiel .....	143
4.5.4. Analyse des performances temporelles en simulation.....	150
4.6.Conclusion .....	154



# Chapitre 5

## Mise en œuvre et évaluation du système d'aide à la conduite sur simulateurs de conduite et de trafic

---

5.1.Introduction .....	159
5.2.Validation des systèmes ADAS .....	159
5.2.1. Test de l'élan .....	159
5.2.2. Norme ISO 26262 .....	160
5.3.Essais sur simulateur de conduite .....	162
5.3.1. Description du simulateur de conduite.....	162
5.3.2. Mise en œuvre du système .....	163
5.3.3. Protocole expérimental.....	165
5.3.4. Analyse des résultats.....	166
5.4.Simulation du trafic routier .....	176
5.4.1. Différents modèles .....	177
5.4.2. Variables du trafic routier .....	178
5.4.3. Modèle de Gipps .....	180
5.5.Essais avec un logiciel de simulation de trafic .....	183
5.5.1. Présentation du logiciel Aimsun.....	183
5.5.2. Protocole d'essai .....	183
5.5.3. Analyse des résultats.....	184
5.6.Conclusion .....	187

---



# Conclusion générale et perspectives

Cette thèse traite de la commande assistée au conducteur basée sur la conduite en formation de type « banc de poissons », pour laquelle les principaux résultats obtenus font l'objet de la conclusion.

Le **chapitre 1** présente l'état de l'art de l'assistance à la conduite. Depuis le milieu des années 90, la recherche se tourne vers la sécurité primaire et des systèmes de sécurité tels que l'antiblocage des roues (ABS) sont apparus. Les différents programmes de recherche se focalisent sur des systèmes très avancés vers la délégation de conduite et intégrant les problématiques de communication inter-véhicule. Aujourd'hui, plusieurs niveaux d'automatisation du véhicule ont été définis et sont communément admis, allant jusqu'à cinq pour le véhicule autonome. Les constructeurs et les équipementiers préfèrent cette approche progressive misant sur une collaboration entre l'homme et le système. Les systèmes actuellement sur le marché correspondent aux deux premiers niveaux. Le système proposé dans le cadre de cette thèse tend vers le niveau 3.

Ce premier chapitre présente également la stratégie adoptée pour la conception du système d'aide à la conduite qui repose sur une architecture hiérarchisée en quatre niveaux. Premièrement, il s'agit de traiter la situation globale c'est-à-dire réaliser le suivi de voie du véhicule. Deuxièmement, l'environnement proche est pris en compte à travers les autres véhicules et les obstacles présents. Puis, à partir de la consigne obtenue grâce aux niveaux précédents, les commandes véhicule sont calculées en respectant les contraintes de la dynamique du véhicule. Enfin, le dernier niveau concerne l'interaction avec le conducteur afin de lui transmettre les meilleures actions à réaliser.

Le **chapitre 2** présente l'idée d'émergence d'un comportement collectif qui est à la base de la conception du système d'aide à la conduite réalisé dans cette thèse. L'exemple le plus représentatif est le banc de poissons où tous les membres du groupe adoptent un mouvement fluide et sans collisions. Trois modèles mathématiques capables de reproduire ce type de phénomène sont exposés et permettent de mieux comprendre les interactions entre les poissons.

Le deuxième outil présenté dans ce chapitre est l'intégration non entière qui est un outil fort de la physique. Les principales propriétés mathématiques et l'approximation de l'opérateur non entier sont présentées, ainsi que les outils applicatifs comme le potentiel généralisé utilisé en planification de trajectoire et la commande CRONE (Commande Robuste d'Ordre Non Entier) permettant de synthétiser des régulateurs dans le domaine fréquentiel.

Dans le **chapitre 3**, plusieurs lois de guidage pour le véhicule sont présentées et testées. Celles-ci s'inspirent des modèles de déplacement « bancs de poissons » détaillés au chapitre précédent tout en intégrant les différentes règles de la circulation routière. L'approche de Reynolds est ainsi reprise en associant le guidage du véhicule sur la route aux comportements d'attraction pour la position et d'imitation pour la vitesse. Le comportement de répulsion permet à l'égo-véhicule de respecter ses distances de sécurité vis-à-vis des autres véhicules. Après plusieurs simulations et l'analyse de différents critères comme les TIV, la loi à base de potentiel de Ge et Cui est choisie. Ce chapitre permet d'obtenir la trajectoire à la fois pour le suivi de voie et l'intégration dans le trafic, ce qui correspond aux niveaux 1 et 2 du système d'aide à la conduite.

Au **chapitre 4**, le modèle de la dynamique du véhicule utilisé pour calculer et synthétiser les régulateurs les mieux adaptés afin de suivre la trajectoire établie au chapitre précédent est défini. Au terme d'une comparaison entre une commande CRONE et un régulateur PI, et au regard des caractéristiques du système (phase quasi constante autour de la fréquence au gain unité) et des spécifications du cahier des charges, la commande CRONE de deuxième génération s'est avérée être la plus adéquate pour la régulation de vitesse. Les simulations obtenues avec le modèle non linéaire ont confirmé les meilleurs résultats en matière de robustesse de l'approche CRONE par la mise en défaut de l'interdépendance masse-amortissement. La seconde étude concernant la régulation de la position latérale du véhicule est réalisée après avoir adopté une stratégie en ligne avec deux boucles imbriquées sur l'angle de lacet et le déplacement latéral. La synthèse aboutit à un régulateur proportionnel pour la boucle interne et une commande CRONE de deuxième génération pour la boucle externe. Les simulations obtenues avec le modèle de validation confirment les bons résultats du modèle lacet-dérive. Ces études menées pour le véhicule léger ont été répétées pour la Peugeot 208. Les résultats révèlent que les simplifications de modèle effectuées pour le véhicule léger sont également valables pour la 208. Ceci laisse penser que cette méthode est valable pour tout type de véhicule.

Le **chapitre 5** présente la mise en œuvre et l'évaluation du système d'aide à la conduite conçu au cours de cette thèse. Ainsi, ce chapitre montre que l'évaluation des systèmes d'aide à la conduite reste un domaine de recherche nouveau et complexe. La norme ISO 26262 de 2011 constitue un premier pas vers une phase de validation de systèmes ADAS entièrement normalisés. De plus, pour progresser sur quelques-uns des principaux objectifs recherchés par les systèmes d'aide à la conduite, et notamment en termes de gains sur la fluidité du trafic, une évaluation à grande échelle devra être conduite. Le système conçu dans le cadre de cette thèse a été évalué sur simulateur de conduite. Cette phase a permis de recueillir les avis d'utilisateurs potentiels. Malgré un échantillon réduit (24 personnes), de premières observations peuvent être établies. Si le couple ajouté au volant se révèle être trop fort pour une majorité de participants, en particulier lors de l'incitation au dépassement, le ressenti du système en matière de sécurité et de confort reste en revanche très hétérogène, bien que la plupart des participants se disent intéressés par une telle fonction. D'une manière générale, un temps d'apprentissage apparaît nécessaire aux utilisateurs pour s'adapter à un système où l'ajout d'un couple au volant crée un mécanisme inédit de conduite partagée. Le simulateur de conduite a aussi permis de comparer certaines variables telles que les vitesses moyennes, les TIV ... obtenues entre la première phase de conduite et la seconde, au cours de laquelle le système ADAS était actif. Au final, un gain en sécurité est enregistré car les TIV et TTC sont globalement augmentés et les vitesses

maximales diminuées. De plus, le système tend à homogénéiser la conduite, ce qui est précisément l'objectif recherché dans le but de fluidifier le trafic.

Ce chapitre présente également les outils, issus de la théorie du trafic, qui peuvent être utilisés pour comprendre et quantifier l'écoulement de la circulation routière. Il contient en outre une évaluation du système d'aide à la conduite réalisée avec le logiciel de simulation de trafic (AIMSUN). Les résultats des simulations montrent que l'aspect sécurité est mieux garanti par le système d'aide à la conduite conçu dans cette thèse : cela se traduit par un TIV augmenté. Cependant, ces essais n'ont pas réussi à démontrer un gain substantiel en confort, c'est-à-dire un meilleur écoulement du trafic, qui se traduit par une vitesse moyenne augmentée. En effet, contrairement au modèle par défaut, l'intégration dans le logiciel de simulation de trafic des lois de guidage établies dans cette thèse ne fonctionne pas de manière optimale lorsque le véhicule doit quitter l'autoroute pour suivre sa destination. Néanmoins, la deuxième série d'essais réalisée sur route fermée révèle que la vitesse moyenne augmente à mesure que le pourcentage de véhicules équipés par le système ADAS augmente lui-même.

Les *perspectives* de recherche s'inscrivent directement dans la continuité des travaux menés notamment sur l'évaluation du système d'aide à la conduite. A court terme, à partir des remarques précédentes, une nouvelle campagne d'essais sur simulateur de conduite pourrait permettre d'améliorer sensiblement la calibration du retour haptique au volant. Il en va de même pour toute la partie IHM qui reste à approfondir.

Concernant l'utilisation de la simulation de trafic, de nouveaux essais sont envisagés afin d'obtenir un plus grand nombre de résultats et d'analyser également les gains énergétiques possibles. De plus, la possibilité de réduire la zone de sécurité des véhicules en autorisant un TIV allant jusqu'à une seconde pourrait être testée afin de quantifier les gains supplémentaires sur la fluidité du trafic.

Une autre étude envisageable serait de comparer l'architecture de commande proposée au chapitre 4 pour la régulation du déplacement transversal aux autres approches de la littérature. De plus, il serait intéressant d'intégrer à cette étude la dynamique de la direction afin d'identifier quel est son impact.

Enfin, cette thèse soulève plusieurs pistes de recherche qui pourront être développées à plus long terme, notamment sur l'étude et la modélisation du conducteur pour la conception de système d'aide à la conduite et sur la conduite coopérative en milieu urbain.



# Annexe

## Adaptation des régulateurs pour la Peugeot 208

$M_t$	$g$	$\rho$	$S_x$	$r_0$	$C_{xx}$	$b_r$	$J_r$
1253 à 1800 Kg	10 m/s <sup>2</sup>	1.225 Kg/m <sup>3</sup>	2.27 m <sup>2</sup>	0.3 m	0.29	10 <sup>-3</sup> Nm.s/rad	1.2 Kg.m <sup>2</sup>

**Table A.1** -Paramètres de la Peugeot 208

### 1. Régulation de vitesse longitudinale

Modèle complet :

$$H_{13}(s) = \left. \frac{\tilde{V}_x(s)}{\tilde{U}_c(s)} \right|_{\substack{\alpha_r=0 \\ f_{0x}=0}} = \frac{G_0}{\left( \frac{s}{\omega_1} + 1 \right) \left( \frac{s}{\omega_2} + 1 \right)}, \quad (0.1)$$

avec

$$G_0 = h(V_x^e) \approx \frac{2 K_A K_T}{r_0 b_a}. \quad (0.2)$$

Modèle réduit :

$$G(s) = \left. \frac{\tilde{V}_x(s)}{\tilde{U}_c(s)} \right|_{\substack{\alpha_r=0 \\ f_{0x}=0}} \approx \frac{G_0}{\frac{s}{\omega_1} + 1}. \quad (0.3)$$

	Véhicule léger	208
$G_0$ (sN <sup>-1</sup> )	5,598 10 <sup>-1</sup>	4,239 10 <sup>-1</sup>
$\omega_1$ (rad/s)	1,98 10 <sup>-2</sup>	1,25 10 <sup>-2</sup>

**Table A.2** -Paramètres du modèle réduit

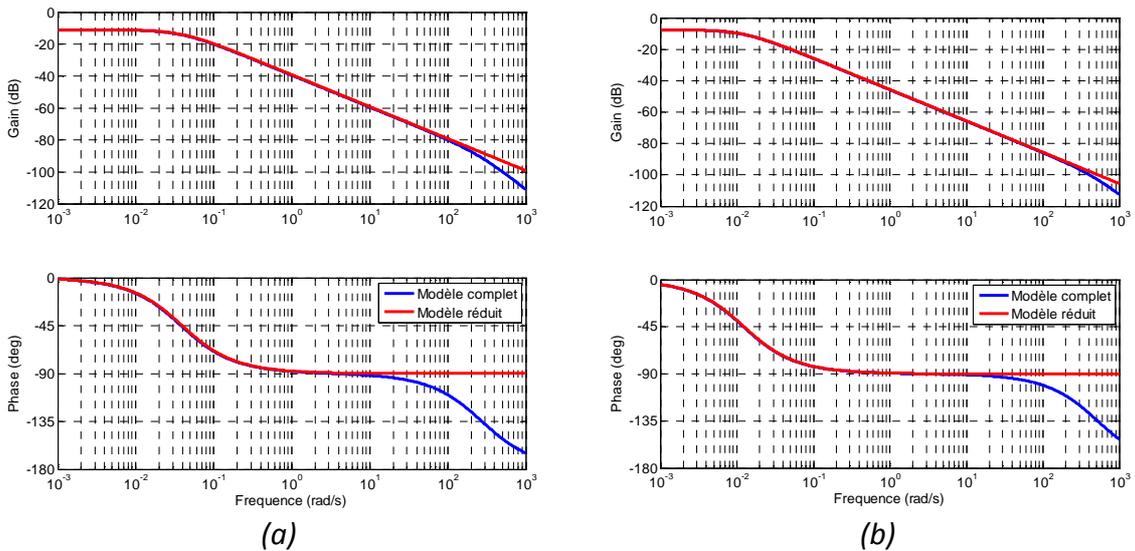


Figure A.1 – Diagrammes de Bode des réponses fréquentielles des modèles complets et réduits pour le véhicule léger (a) et la Peugeot 208 (b)

### 1.1 Régulateur Proportionnel Intégral (PI)

$$C_{PI}(s) = C_{0PI} \left( \left( 1 + \frac{s}{\omega_i} \right) / \left( \frac{s}{\omega_i} \right) \right) \quad (0.4)$$

PI	Véhicule léger	208
$C_{0PI}$ (Ns)	78,285	19,778
$\omega_i$ (rad/s)	1,0323	1,0253

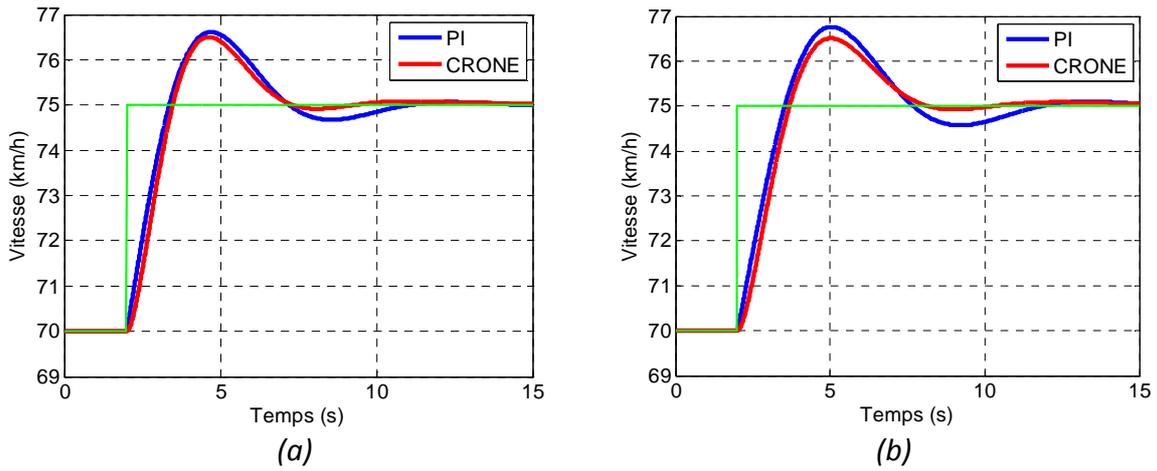
Table A.3 -Paramètres des régulateurs PI

### 1.2 Régulateur CRONE

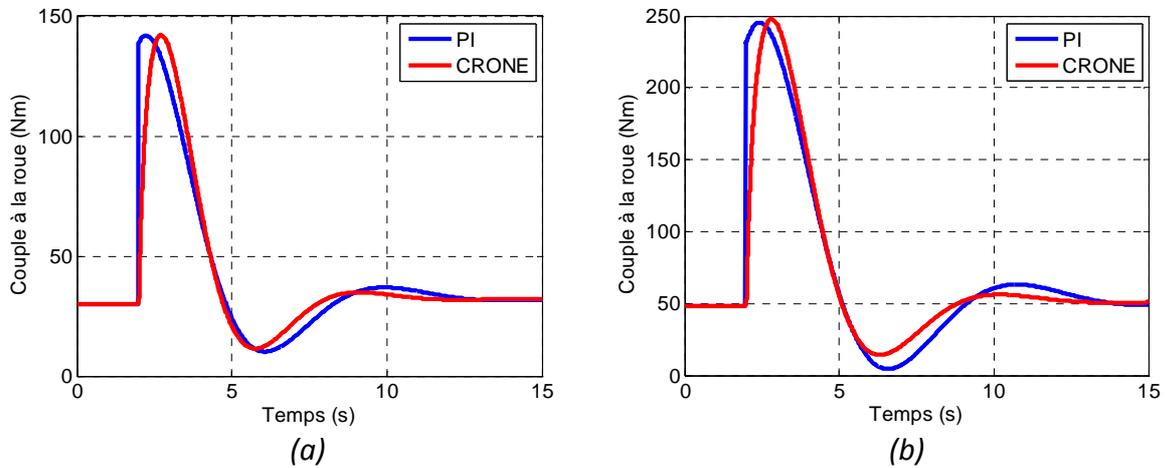
$$C_{rat}(j\omega) = C_0 \left( \frac{\omega_l}{j\omega} \right)^2 \left( 1 + j \frac{\omega}{\omega_{0\_nom}} \right) \prod_{i=1}^N \left( \frac{1 + j \frac{\omega}{\omega_i}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_i}} \right) \quad (0.5)$$

CRONE	V.L.	208		V.L.	208		V.L.	208
$C_0$ (Ns)	169,95	32,20	$\omega'_1$	0,0599	0,0614	$\omega_1$	0,1281	0,1304
$\omega_h$ (rad/s)	11,4453	11,1314	$\omega'_2$	0,2412	0,2435	$\omega_2$	0,5153	0,5174
$\omega_1$	0,0437	0,0449	$\omega'_3$	0,9703	0,9663	$\omega_3$	2,073	2,053
$\omega_{0\_nom}$	0,0159	0,0125	$\omega'_4$	3,904	3,8339	$\omega_4$	8,341	8,1457

Table A.4 -Paramètres des régulateurs CRONE



**Figure A.2** – Réponses en vitesse à un échelon de 5km/h avec chaque régulateur pour le véhicule léger (a) et la Peugeot 208 (b)



**Figure A.3** – Réponses en couple à un échelon de 5km/h avec chaque régulateur pour le véhicule léger (a) et la Peugeot 208 (b)

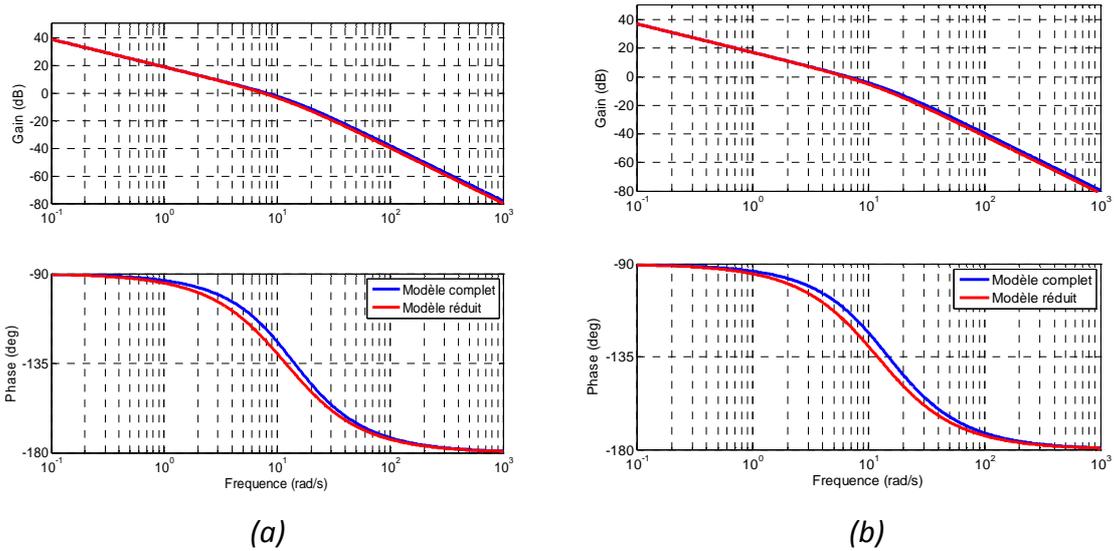
## 2. Régulation du déplacement transversal

Modèle d'analyse :

$$H_{11}(s) = \frac{K_1}{s} \frac{\left(\frac{s}{\omega_1} + 1\right)}{\left(\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2 + 2\zeta \frac{s}{\omega_0} + 1\right)} \quad \text{et} \quad H_{21}(s) = \left(\frac{\omega_2}{s}\right)^2 \frac{\left(\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2 + 2\zeta \frac{s}{\omega_0} + 1\right)}{\left(\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2 + 2\zeta \frac{s}{\omega_0} + 1\right)}, \quad (0.6)$$

Modèle réduit :

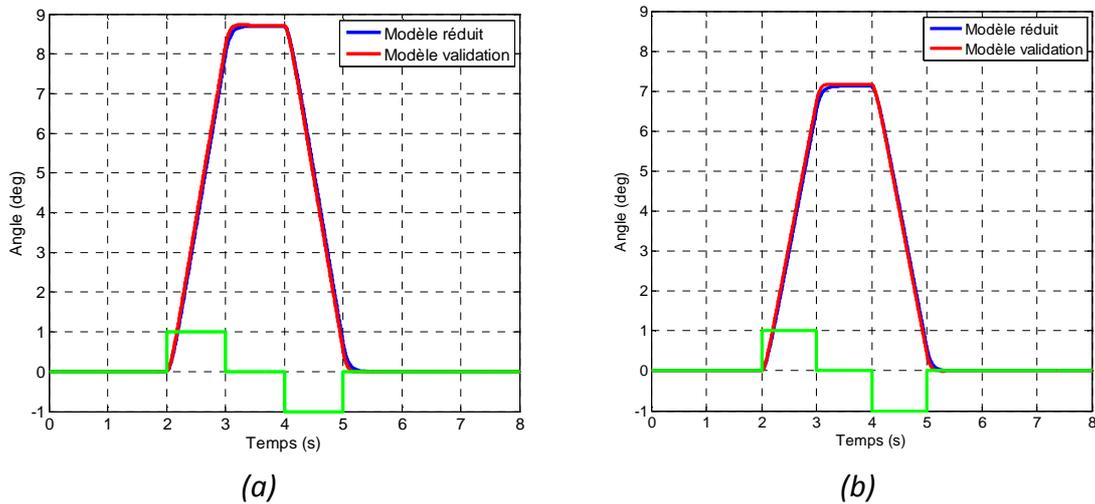
$$\left. \frac{\tilde{\Psi}(s)}{\tilde{B}_v(s)} \right|_{\substack{b_m=0 \\ f_{0y}=0}} \approx \frac{K_1}{s} \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_0} + 1\right)} = G_\Psi(s) \quad \text{et} \quad \left. \frac{\tilde{Y}_G(s)}{\tilde{B}_v(s)} \right|_{\substack{b_m=0 \\ f_{0y}=0}} \approx \left(\frac{\omega_2}{s}\right)^2, \quad (0.7)$$



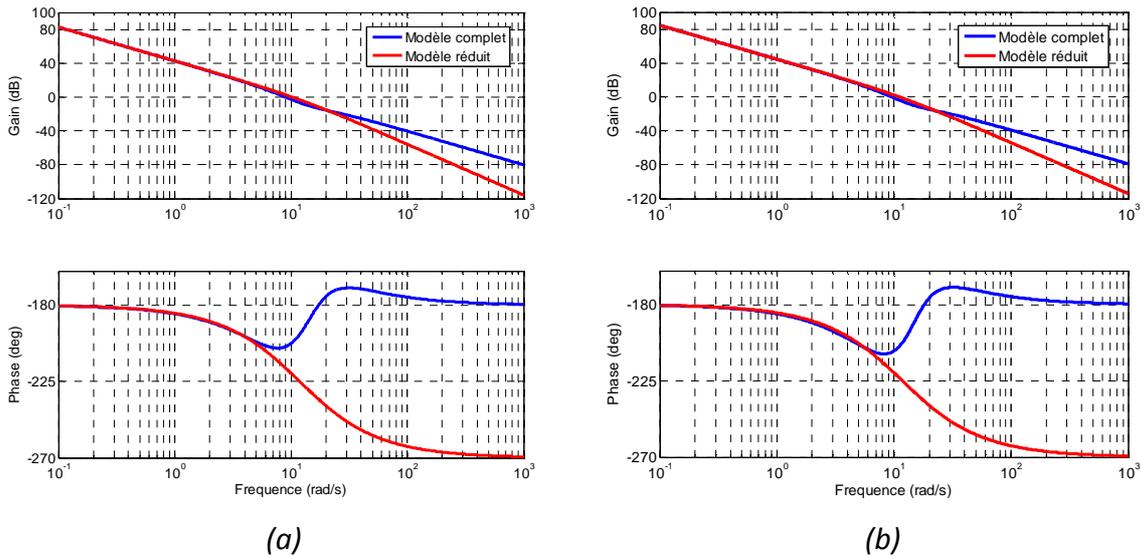
**Figure A.4** – Diagrammes de Bode des réponses fréquentielles des modèles  $H_{11}(s)$  et  $G_{\psi}(s)$  pour le véhicule léger (a) et la Peugeot 208 (b)

	Véhicule léger	208
$K_1$	8,7	7,128
$\omega_0$ (rad/s)	11,87	11,92

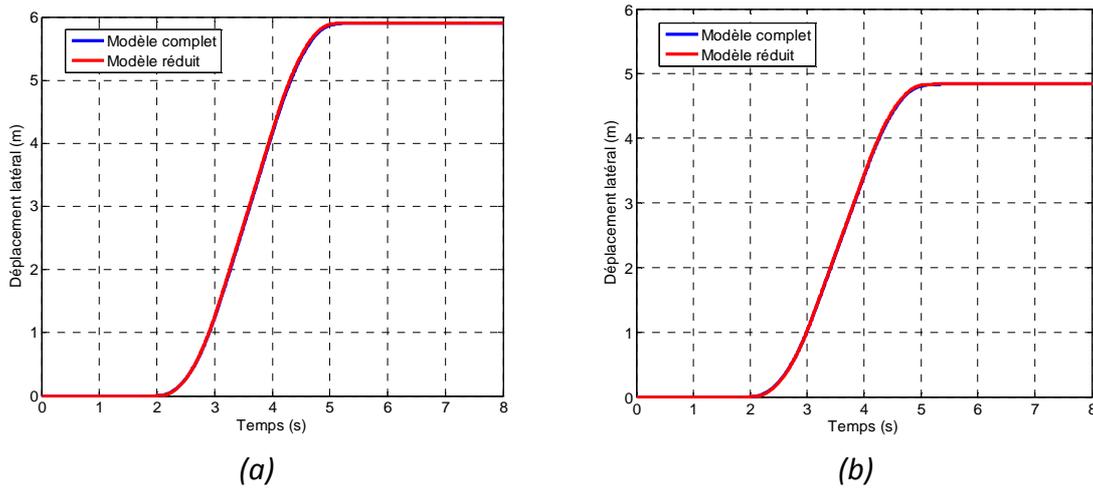
**Table A.5** -Paramètres du modèle  $G_{\psi}(s)$



**Figure A.5** – Réponses de l'angle de lacet pour un braquage de 1°(en vert) avec les modèles  $H_{11}(s)$  et  $G_{\psi}(s)$  pour le véhicule léger (a) et la Peugeot 208 (b)



**Figure A.6** – Diagrammes de Bode des réponses fréquentielles des modèles  $H_{21}(s)$  et  $G_{\psi}(s)^*G_y(s)$  pour le véhicule léger (a) et la Peugeot 208 (b)



**Figure A.7** – Réponses du déplacement latéral pour un braquage de  $1^\circ$  avec les modèles  $H_{21}(s)$  et  $G_{\psi}(s)^*G_y(s)$  pour le véhicule léger (a) et la Peugeot 208 (b)

### 2.1 Régulateur CRONE

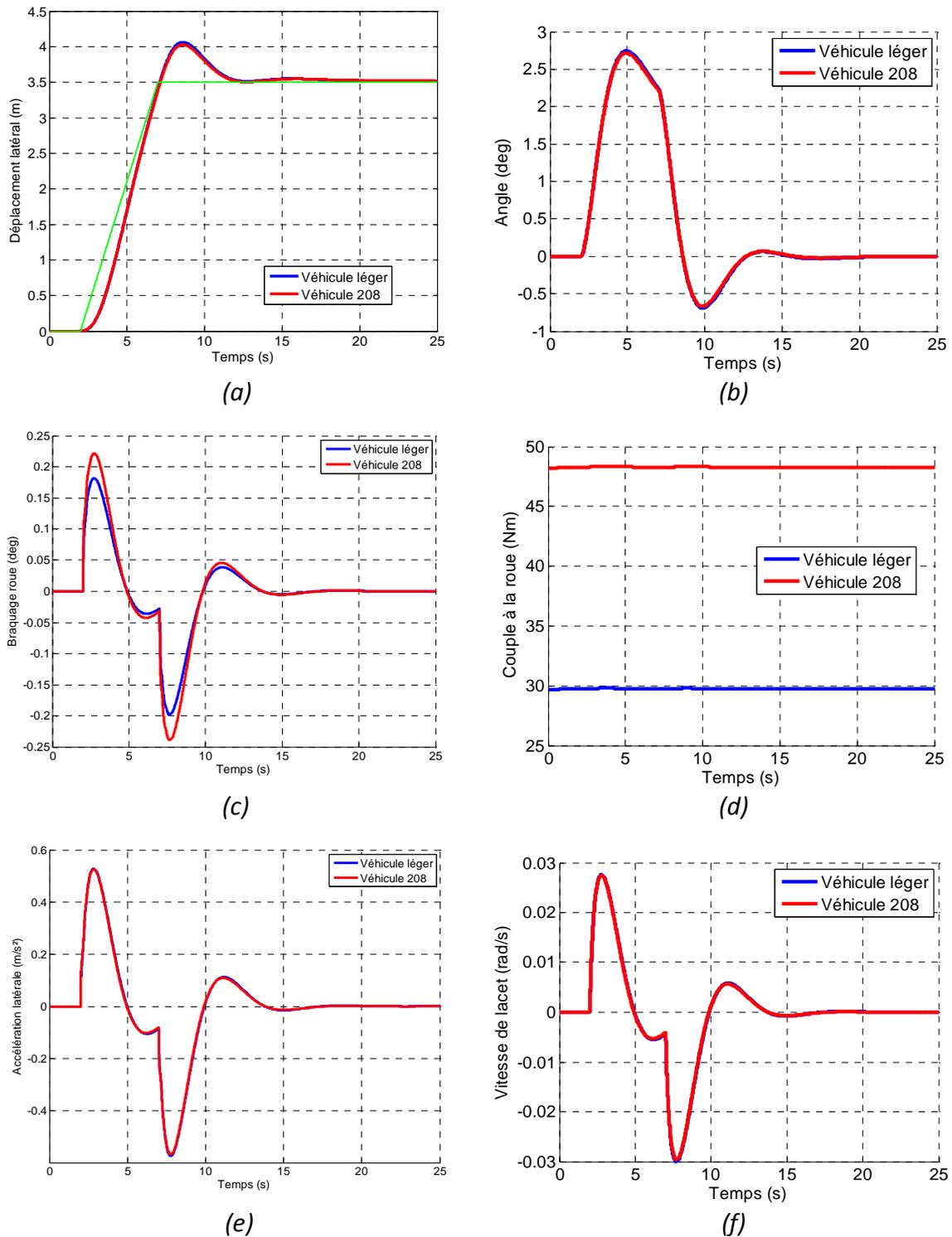
$$C_{rat}(j\omega) = C_0 \left( \frac{\omega_l}{j\omega} \right)^2 \frac{(j\omega(-\omega^2 + j\omega\omega_0 + C_{\psi} K_1 \omega_0))}{\left( 1 + j \frac{\omega}{\omega_h} \right)} \prod_{i=1}^N \left( \frac{1 + j \frac{\omega}{\omega_i}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_i}} \right), \quad (0.8)$$

	V.L.	208		V.L.	208		V.L.	208		V.L.	208
$K_{\psi}$	4,5032	5,4797	$\omega_1$	0,1182	0,063	$\omega_{p1}$	0,4732	0,3027	$\omega_{z1}$	0,1691	0,0981
$K_{y0}$	0,0022	0,0059	$\omega_h$	22,191	26,412	$\omega_{p2}$	2,7095	2,2661	$\omega_{z2}$	0,9682	0,7340
$K_1$	8,6997	7,1285	$\omega_0$	11,874	11,921	$\omega_{p3}$	15,514	16,962	$\omega_{z3}$	5,5436	5,4943

**Table A.6** -Paramètres des régulateurs CRONE

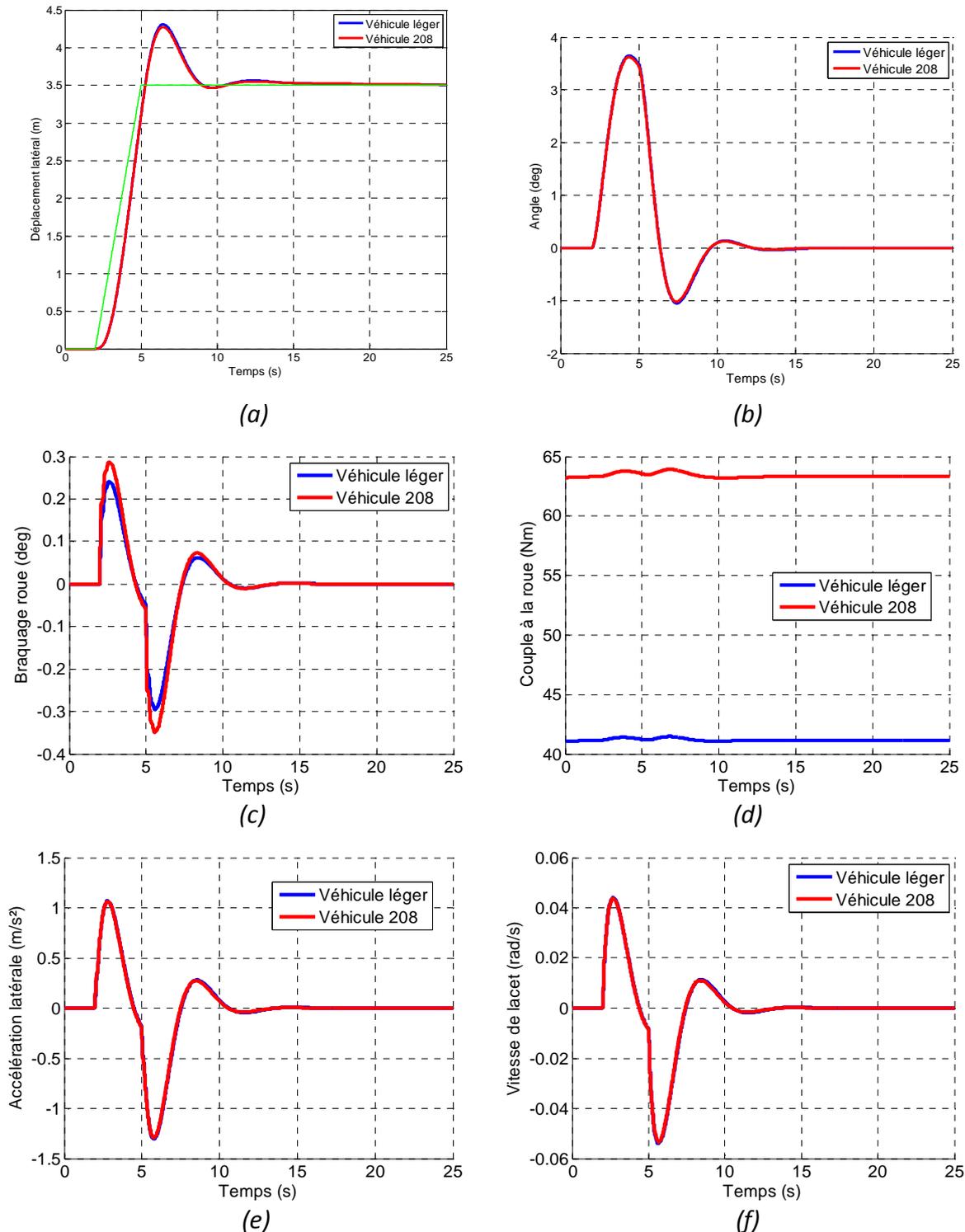
### 3. Tests de validation

#### 3.1 Changement de voie à 70km/h (rampe de 5s)



**Figure A.8** – Réponses du déplacement latéral (a), de l'angle de lacet (b), du braquage des roues (c), du couple à la roue (d), de l'accélération latérale (e) et de la vitesse de lacet (f) pour le véhicule léger et la Peugeot 208

## 3.2 Changement de voie à 90km/h (rampe de 3s)



**Figure A.9** – Réponses du déplacement latéral (a), de l'angle de lacet (b), du braquage des roues (c), du couple à la roue (d), de l'accélération latérale (e) et de la vitesse de lacet (f) pour le véhicule léger et la Peugeot 208



# Bibliographie

- Aw, A. & Rascle, M., 2000. Resurrection of “second order” models of traffic flow. *SIAM journal on applied mathematics*, 60(3), pp.916–938.
- Ben-Akiva, M. et al., 1997. Development of a route guidance generation system for real-time application. In *Proceedings of the IFAC Transportation Systems 97 Conference, Chania*.
- Bode, H.W., 1945. *Network analysis and feedback amplifier design*, van Nostrand New York.
- Bollobás, B., 1998. *Modern graph theory* Springer, ed., Springer.
- Borenstein, J. & Koren, Y., 1989. Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 19(5), pp.1179–1187.
- Brossard, J.-P., 2006. *Dynamique du véhicule: modélisation des systèmes complexes* presses polytechniques, ed., PPUR presses polytechniques.
- CCFA, 2013. *Le parc automobile français en 2013*,
- Chandler, R.E., Herman, R. & Montroll, E.W., 1958. Traffic dynamics: studies in car following. *Operations research*, 6(2), pp.165–184.
- Chaté, H. et al., 2008. Modeling collective motion: variations on the Vicsek model. *The European Physical Journal B*, 64(3-4), pp.451–456. Available at: <http://dx.doi.org/10.1140/epjb/e2008-00275-9>.
- Clark, S.K., 1981. *Mechanics of pneumatic tires* NHTSA, ed., US Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration.
- Collet, R., Madre, J.L. & Hivert, L., 2013. Diffusion de l’automobile en France : vers quels plafonds pour la motorisation et l’usage ? *Economie et statistiques*, 2013(457-458), pp.123–139.
- Dugoff, H., 1969. *Tire performance characteristics affecting vehicle response to steering and braking control inputs. Final report*,
- Dugowson, S., 1994. *Les différentielles métaphysiques: histoire et philosophie de la généralisation de l’ordre de dérivation*. Université Paris Nord.
- Flemisch, F.O. et al., 2003. *The H-Metaphor as a guideline for vehicle automation and interaction*,
- Gasser, T.M., 2012. Legal Issues of Driver Assistance Systems and Autonomous Driving. In A. Eskandarian, ed. *Handbook of Intelligent Vehicles*. Springer London, pp. 1519–1535.
- Gawron, C., 1999. *Simulation-based traffic assignment: Computing user equilibria in large street networks*. University of Cologne.

- Ge, S.S. & Cui, Y.J., 2002. Dynamic Motion Planning for Mobile Robots Using Potential Field Method. *Autonomous Robots*, 13(3), pp.207–222.
- Ge, S.S. & Cui, Y.J., 2000. New potential functions for mobile robot path planning. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 16(5), pp.615–620.
- Gipps, P.G., 1981. A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 15(2), pp.105–111.
- Gipps, P.G., 1986. A model for the structure of lane-changing decisions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 20(5), pp.403–414.
- Greenshields, B.D. et al., 1935. A study of traffic capacity. In *Highway research board proceedings*.
- Grundel, D. et al., 2007. *Cooperative Systems: Control and Optimization* Springer, ed., Springer.
- Helbing, D., Farkas, I. & Vicsek, T., 2000. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 407(6803), pp.487–490.
- Hirst, S.J. & Graham, R., 1997. THE FORMAT AND PRESENTATION OF COLLISION WARNINGS. *Ergonomics and safety of intelligent driver interfaces*.
- Hogema, J.H. & Janssen, W.H., 1996. Effects of intelligent cruise control on driving behaviour: a simulator study. *TNO Human Factors, Soesterberg, The Netherlands, Report TM-1996-C-12*.
- Inarn, C., 2013. *Robust path planning for 3D dynamic environment and MIMO path tracking design by fractional approach: application for Unmanned Aerial System*. Université Bordeaux I.
- INRIX, 2013. *Traffic Scorecard 2013*, [www.inrix.com/scorecard](http://www.inrix.com/scorecard).
- Jayakrishnan, R., Mahmassani, H.S. & Hu, T.-Y., 1994. An evaluation tool for advanced traffic information and management systems in urban networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2(3), pp.129–147.
- Kachroo, P. & Krishen, K., 2000. System dynamics and feedback control design problem formulations for real time ramp metering. *Journal of Integrated Design and Process Science*, 4(1), pp.37–54.
- Khatib, O., 1980. *Commande dynamique dans l'espace opérationnel des robots manipulateurs en présence d'obstacles*. ENSAE, Toulouse.
- Kiencke, U. & Daiß, A., 1997. Observation of lateral vehicle dynamics. *Control Engineering Practice*, 5(8), pp.1145–1150.
- Landau, I.D. et al., 1995. A flexible transmission system as a benchmark for digital control. *European Journal of Control*.

- Lanusse, P., Malti, R. & Melchior, P., 2013. CRONE control system design toolbox for the control engineering community: tutorial and case study. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371(1990).
- Lanusse, P., Oustaloup, A. & Sabatier, J., 2005. Step-by-step presentation of a 3rd generation CRONE controller design with an anti-windup system. In *ENOC-2005, EUROMECH Nonlinear Oscillations Conference, Eindhoven, Netherlands*. pp. 7–12.
- Latombe, J.C., 1996. *Robot motion planning* K. A. Publishers, ed., Kluwer Academic Publishers.
- Lelong-Ferrand, J., 1992. *Cours de mathématique - Tome 2- Analyse* Dunod, ed., Dunod.
- Leonard, D.R., Gower, P. & Taylor, N.B., 1989. CONTRAM: structure of the model. *Research report-Transport and Road Research Laboratory*, (178).
- Letnikov, A. V, 1868. Theory of differentiation with an arbitrary index. *Mat. Sb*, 3, pp.1–66.
- Lighthill, M.J. & Whitham, G.B., 1955. On kinematic waves. II. A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 229(1178), pp.317–345.
- Linarès, H., 1996. *Modélisation d'environnement par dérivation non entière et commande robuste d'un robot mobile*. Université Bordeaux I.
- Liouville, J., 1832. Mémoire sur le calcul des différentielles à indices quelconques. *Journal de l'école Polytechnique*.
- M'Sirdi, K., 2001. Synthèse d'observateurs robustes : application à l'automobile. In *Proc. 3ème Journées Nationales de la Recherche en Robotique*.
- Maffeo, C., 2008. What the flock is: emergent collective motion.
- Malti, R. et al., 2011. Towards an object oriented CRONE toolbox for fractional differential systems. In *Proceedings of 18th IFAC World Congress*.
- Melchior, P. et al., 2009. Robust path planning for mobile robot based on fractional attractive force. In *American Control Conference, 2009. ACC '09*. pp. 1424–1429.
- Michon, J., 1985. A Critical View of Driver Behavior Models: What Do We Know, What Should We Do? In L. Evans & R. Schwing, eds. *Human Behavior and Traffic Safety*. Springer US, pp. 485–524.
- Miller, A. et al., 2013. *Euro NCAP Rating Review*,
- Miller, K.S. & Ross, B., 1993. An introduction to the fractional calculus and fractional differential equations.
- Minderhoud, M.M. & Bovy, P.H.L., 2001. Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment. *Accident Analysis & Prevention*, 33(1), pp.89–97.

- Ministère de l'intérieur français, 2012. *L'essentiel de la sécurité routière*,
- Nagel, K. & Schreckenberg, M., 1992. A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de physique I*, 2(12), pp.2221–2229.
- NHTSA, 2013. *Preliminary statement of policy concerning automated vehicles*,
- Oldham, K.B. & Spanier, J., 1974. *The fractional calculus* Elsevier, ed., Academic Press, New York.
- Olfati-Saber, R., 2006. Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithms and theory. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 51(3), pp.401–420.
- ONISR, 2013. *La sécurité routière en France : Bilan de l'accidentalité de l'année 2012*,
- Orsoni, B., 2002. *Dérivée généralisée en planification de trajectoire et génération de mouvement*. Université de Bordeaux.
- Oustaloup, A., 2014. *Diversity and Non-integer Differentiation for System Dynamics*, John Wiley & Sons.
- Oustaloup, A., 1991. *La commande CRONE: commande robuste d'ordre non entier*, Hermes.
- Oustaloup, A. et al., 2000. The CRONE toolbox for Matlab. In *Computer-Aided Control System Design, 2000. CACSD 2000. IEEE International Symposium on*. pp. 190–195.
- Oustaloup, A., Cois, O. & Le Lay, L., 2005. *Représentation et identification par modèle non entier* Hermès, ed., Hermès.
- Oustaloup, A., Mathieu, B. & Lanusse, P., 1993. Second generation CRONE control. In *Systems, Man and Cybernetics, 1993. "Systems Engineering in the Service of Humans", Conference Proceedings., International Conference on*. pp. 136–142 vol.2.
- Oustaloup, A., Moreau, X. & Nouillant, M., 1997. From fractal robustness to non-integer approach in vibration insulation: the CRONE suspension. In *Decision and Control, 1997., Proceedings of the 36th IEEE Conference on*. pp. 4979–4984 vol.5.
- Pacejka, H.B. & Bakker, E., 1992. THE MAGIC FORMULA TYRE MODEL. *Vehicle System Dynamics*, 21(sup001), pp.1–18. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00423119208969994>.
- Page, Y., Hermitte, T. & Cuny, S., 2011. How safe is vehicle safety? The contribution of vehicle technologies to the reduction in road casualties in France from 2000 to 2010. In *Annals of Advances in Automotive Medicine/Annual Scientific Conference*. p. 101.
- Partridge, B.L., 1982. The structure and function of fish schools. *Scientific american*, 246(6), pp.114–123.
- Perrin, B., 2013. Comprendre : La voiture sans accident. *Auto Journal*, 895, pp.32–34.

- Pipes, L.A., 1953. An operational analysis of traffic dynamics. *Journal of applied physics*, 24(3), pp.274–281.
- Poty, A., 2006. *Planification de trajectoire dans un environnement dynamique et génération de mouvement d'ordre non entier*. Université Bordeaux I.
- Qu, Z., 2009. *Cooperative control of dynamical systems* Springer, ed., Springer.
- Reynolds, C.W., 1987. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. In *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*. pp. 25–34.
- Richards, P.I., 1956. Shock waves on the highway. *Operations research*, 4(1), pp.42–51.
- Riemann, B., 1876. Versuch einer allgemeinen Auffassung der Integration und Differentiation. *Gesammelte Werke*, 62.
- Rochefort, Y. et al., 2011. Guidance of flocks of vehicles using virtual signposts. In *Soumis {à} l'IFAC World Congress*.
- SAE, 2014. *J3016 :Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems*,
- Samko, S.G., Kilbas, A.A. & Marichev, O.I., 1993. Fractional integrals and derivatives: Theory and Applications. *Gordon and Breach, Sciences*, 1993.
- SETRA, 2006. *Comprendre les principaux paramètres de conception géométrique des routes*,
- Theureau, J., Jeffroy, F. & Bonpays-Le Guilcher, B., 1994. *Ergonomie des situations informatisées: la conception centrée sur le cours d'action des utilisateurs* Octarès, ed., Octarès Editions.
- Toffin, D. et al., 2003. Perception and reproduction of force direction in the horizontal plane. *Journal of neurophysiology*, 90(5), pp.3040–3053.
- Venture, G., 2003. *Identification des paramètres dynamiques d'une voiture*. Ecole centrale de nantes-ECN.
- Vicsek, T. et al., 1995. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles. *Physical Review Letters*, 75(6), pp.1226–1229.
- Weyl, H., 1917. Bemerkungen zum Begriff des Differentialquotienten gebrochener Ordnung. *Vierteljahrresschr. Naturforsch. Ges.*
- Wiedemann, 1974. *Simulation des Strassenverkehrsflusses*,
- Zhang, H.M., 2002. A non-equilibrium traffic model devoid of gas-like behavior. *Transportation Research Part B: Methodological*, 36(3), pp.275–290.

# Commande assistée au conducteur basée sur la conduite en formation de type « banc de poissons »

## Résumé :

Le mouvement en essaim est défini par l'action d'un ensemble d'individus autopropulsés se déplaçant en groupe uniquement à l'aide de la connaissance locale de leur environnement.

L'objectif scientifique de la thèse consiste à mettre en œuvre ce type de modèle de comportement appliqué à un flot de véhicules se déplaçant sur un profil routier, et ce afin d'assister le conducteur dans ses actions à la fois pour son confort et sa sécurité.

A partir de l'analyse d'une synthèse bibliographique, une stratégie de hiérarchisation a été mise en place afin de créer un système d'aide à la conduite ou ADAS (de l'anglais « Advanced Driver Assistance System »). Ainsi, dans un premier temps, il s'agit de générer une trajectoire à partir de ce type de modèle qui respecte les contraintes autoroutières. Ensuite, la dynamique du véhicule est prise en compte afin de transmettre au conducteur via une régulation de vitesse et un retour haptique au volant, les deux étant basés notamment sur la commande CRONE, les manœuvres nécessaires au suivi de cette trajectoire. Enfin, le système d'aide à la conduite est mis en œuvre, non seulement sur un simulateur dynamique de conduite afin de recueillir le ressenti des conducteurs, mais aussi au sein d'un logiciel de simulation de trafic pour évaluer les gains obtenus dans le cas d'un ensemble de véhicules équipés.

**Mots clés :** Assistance à la conduite, Génération de trajectoire, Dynamique du véhicule,

---

## Driver assistance system based on fish schooling behavior

### Abstract :

Swarm behavior refers to individuals travelling in a group and using only local knowledge of their environment.

The scientific objective of the thesis is to implement this type of behavior model to vehicles traveling on road, in order to assist the driver in his actions for both its comfort and security.

From a literature review, a prioritization strategy was set up to create an Advanced Driver Assistance System (ADAS). At first, it is to generate a path from this type of model that respects the motorway constraints. Then, vehicle dynamics is taken into account in order to transmit to the driver through cruise control and haptic feedback steering wheel, both based on the CRONE control, maneuvers needed to follow this trajectory. Finally, the driver assistance system is not only implemented on a dynamic driving simulator to gather driver's feelings but it is also implemented in traffic simulation software to evaluate gains obtained for a set of equipped vehicles.

**Keywords :** Advanced Driver Assistance Systems (ADAS), Path planning, Vehicle dynamics

---

## Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système

[UMR 5218 CNRS – 351 cours de la Libération – 33405 Talence Cedex – France]