



**HAL**  
open science

# Quelques applications des techniques robotiques d'identification à des problèmes du Génie Civil

Pierre Olivier Vandanjon

► **To cite this version:**

Pierre Olivier Vandanjon. Quelques applications des techniques robotiques d'identification à des problèmes du Génie Civil. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Nantes, 2016. tel-01518299

**HAL Id: tel-01518299**

**<https://hal.science/tel-01518299>**

Submitted on 4 May 2017

**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.



# IFSTTAR

INSTITUT FRANÇAIS  
DES SCIENCES  
ET TECHNOLOGIES  
DES TRANSPORTS,  
DE L'AMÉNAGEMENT  
ET DES RÉSEAUX

## Synthèse scientifique présentée pour l'obtention du grade d'Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université de Nantes

### Quelques applications des techniques robotiques d'identification à des problèmes du Génie Civil

---

Vandanjon Pierre-Olivier  
Ifsttar / Ame / Ease  
[pierre-olivier.vandanjon@ifsttar.fr](mailto:pierre-olivier.vandanjon@ifsttar.fr)

date : 3 mai 2017  
Version : 2  
Confidentialité : Non

Soutenue le 29 avril 2016 devant le jury :

Président :	Maxime Gautier	Professeur des universités	Université de Nantes
Rapporteurs :	Michel Basset	Professeur des universités	Université de Haute Alsace
	Alain Micaelli	Directeur de recherche	CEA-LIST
	Joaquin Rodriguez	Directeur de recherche	Ifsttar-Cosys
Membres :	Yannick Aoustin	Professeur des universités	Université de Nantes
	Philippe Chevrel	Professeur des universités	Ecole des mines de Nantes

# Sommaire

<b>Notice scientifique</b>	<b>1</b>
Résumé de l'activité de recherche en 1 page . . . . .	2
Parcours . . . . .	3
Recherche . . . . .	6
Coencadrement de thèses et de post-doc . . . . .	10
Publications . . . . .	14
<b>Avant propos</b>	<b>23</b>
<b>1 Méthodologies</b>	<b>25</b>
1.1 Problèmes inverses . . . . .	25
1.1.1 Identification des systèmes mécaniques articulés . . . . .	26
1.1.2 Outils issus de l'économétrie . . . . .	42
1.2 Automatique . . . . .	49
1.2.1 Stabilité du freinage . . . . .	50
1.2.2 Théorie de la viabilité . . . . .	54
<b>2 Applications</b>	<b>69</b>
2.1 Construction . . . . .	70
2.1.1 Compactage . . . . .	70
2.1.2 Elaboration des matériaux . . . . .	75
2.2 Usage . . . . .	82
2.2.1 Estimation de l'adhérence routière . . . . .	82
2.2.2 Consommation des trains à grande vitesse . . . . .	88
<b>3 Projet de recherche</b>	<b>93</b>
3.1 Méthodologies . . . . .	93
3.2 Ecoconception . . . . .	94
<b>Conclusion</b>	<b>99</b>
<b>Liste des figures et des tableaux</b>	<b>101</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>107</b>



# Pierre-Olivier Vandanjon

Ifsttar

Route de Bouaye

44344 Bouguenais France

Téléphone : 33 (0)240845634

Courriel : [pierre-olivier.vandanjon@ifsttar.fr](mailto:pierre-olivier.vandanjon@ifsttar.fr)

URL : <http://www.zotero.org/vandanjon/cv>

4 novembre 1969, France

Français

## *Poste*

*Chargé de Recherche*, Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux.

Responsable de l'équipe éco-conception du laboratoire Ease au sein du département Aménagement, Mobilité, Environnement.

## *Spécialités*

Robotique, Transport

## *Résumé de l'activité de recherche*

Le fil conducteur de ma recherche est l'application des techniques robotiques en identification des modèles inverses aux systèmes de transport routier et ferroviaire. Mes compétences scientifiques sont dans le domaine des mathématiques appliquées : statistiques, analyse numérique matricielle, théorie de la viabilité. Travaillant dans un organisme de recherches finalisées, ces compétences ont été mises en œuvre pour résoudre des questions pratiques

- soulevées par les chantiers du génie civil : estimation du torseur des efforts de contact lors du compactage des enrobés, évaluation de différents systèmes de malaxage des bétons [10] ;
- provenant de la sécurité routière : mesures de la courbe reliant le taux de glissement au frottement pneumatique/chaussée d'un véhicule routier en freinage [1], évaluation de l'état d'un véhicule en conduite apaisée [9],
- en écoconception : évaluation de la consommation des trains circulant sur une ligne à grande vitesse [2], établissement des fiches horaires pour les conducteurs (article accepté).

Ces problèmes pratiques

- ont nécessité des expérimentations de grandes ampleurs : 50 % de mes publications sont liés à des expérimentations que j'ai souvent organisées ;
- ont dépassé mon champ disciplinaire : tous mes travaux sont effectués en collaboration avec d'autres laboratoires et avec des industriels.

D'un point de vue théorique, j'ai contribué à l'établissement des méthodes d'identifications : IDIM-LS, IDIM-IV, DIDIM. ([3, 5, 6, 7, 4, 8]). Une contribution théorique complètement différente et fortuite est l'introduction des concepts issus de la théorie de la viabilité en sécurité routière [9].

Mon activité de recherche en terme d'encadrement et de publications.

**Publications :** 10 revues, 1 brevet (français et mondial), 29 congrès internationaux sur article dont 22 Ifac-Ieee, 11 congrès internationaux sur résumé, 5 revues techniques francophones, 7 congrès francophones.

**Encadrement de thèses et de post-doctorant :** 1,88 sur 4 thèses (3 Bourses Cifre, 1/2 Bourse Région, 1/2 Bourse Ifsttar), 1 post-doctorant (financé sur projet Européen).

## *Parcours*

### **Résumé du parcours professionnel**

2016-2010 Écoconception des infrastructures

Responsable scientifique du partenariat de recherche entre Réseau Ferré de France (RFF) et l'Ifsttar : Améliorer l'efficacité énergie-carbone des investissements.

Dans ce partenariat, encadrement d'une thèse Cifre avec RFF. ( [Cette vidéo de 5 minutes de la fête de la science 2012 présente ce travail](#) ).

Participation à une expertise sur le métro de Toulouse.

Membre du comité scientifique du congrès VSDIA 2014 (Budapest).

Participation au groupe de travail Novabuild sur les pistes cyclables.

Animateur du Groupe d'Echange et de Recherche Interdisciplinaire "Dynamique du Véhicule" de l'Ifsttar (terminé en 2014).

2010-2004 Sécurité routière

Chef du projet "Infrasure" : développement de nouveaux équipements pour les recherches en sécurité routière.

Encadrement d'une thèse Cifre avec Renault sur l'estimation de l'adhérence.

Création d'une entreprise sur l'écoconduite (2 postes créés sur 2 ans).

Participation au projet européen "Intro" (Intelligent Road).

2004-1997 Robotique de Chantier

Animateur de l'opération de recherche "Modernisation de l'exécution des chantiers routiers" (50 h.mois/an sur 4 ans).

Responsable de la centrale de malaxage du centre de Nantes.

Encadrement d'une thèse région-LCPC sur l'estimation des efforts de contact cylindre/matériau d'un compacteur vibrant

Encadrement d'une thèse Cifre avec Ermont sur la Distribution des temps de Séjour et Réseaux de Neurones Formels pour la caractérisation des Tambours-Sécheurs-Enrobeurs en vue de leur commande

Responsable des études de faisabilité du projet européen "OSYRIS" (Open System for Road Information Support), encadrement d'un post doc.

Responsable des expérimentations finales du projet européen "CIRC" (Computer Integrated Road Construction). Séjour de 4 mois au Public Works Research Institute (Japon)

Lauréat du concours ANVAR pour lancer les études de création d'entreprise dans le domaine de l'internet pour le chantier routier

## Trajectoire professionnelle détaillée

Après ma thèse au Commissariat à l'Énergie Atomique en robotique, je souhaitais continuer dans le domaine de la recherche technologique. C'est pourquoi, j'ai rejoint le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), dans une section travaillant sur le matériel de chantier. Pour comprendre mon parcours dans cet EPST, il faut noter que celui-ci ne possédait pas d'ingénieur de recherche ou d'étude, le travail des chargés de recherche comprend donc une part plus ou moins variable de montage d'expérimentation.

Initialement, j'apportais la composante "recherche" dans une équipe composée de 10 techniciens, dirigée par une ingénieure titularisée comme chargée de recherche. Très rapidement, il a fallu encadrer l'équipe Malaxage et s'occuper de la centrale de Malaxage du centre de Nantes. Le travail consistait à terminer les travaux existants en mettant en œuvre des expérimentations importantes. 3 publications ont ainsi pu être produites dont une dans une revue internationale [10], alors que les précédentes publications dataient de plus de 5 ans et étaient toutes en Français.

Je participais à faire évoluer cette équipe vers plus de recherche en passant de recherches expérimentales à des recherches plus théoriques. Cette recherche s'éloignait petit à petit de mes compétences de base. J'ai donc rejoint l'équipe "robotique de chantier et localisation".

En robotique de chantier, j'ai commencé par mettre en œuvre mes compétences expérimentales acquises dans le précédent poste en montant les expérimentations finales du projet européen CIRC (Computer Integrated Road Construction). Dans ce domaine de la robotique de chantier, le Japon est très en avance, j'ai donc candidaté sur une bourse de gouvernement japonais afin d'aller au Public Works Research Institute à Tsukuba. La découverte des recherches menées au Japon m'a permis d'orienter mes futures recherches en participant au montage du projet européen OSYRIS (Open System for Road Information Support) et en montant une opération de recherche au sein du ministère de l'équipement. Il s'agissait d'enrichir progressivement la thématique initiale de robotique du type asservissement de système mécanique par des thématiques plus systémiques s'intéressant à la circulation de l'information entre les différents engins intervenant lors d'un chantier routier. Ceci permettant d'optimiser le procédé mais aussi de construire un double numérique de la route utile pour les étapes d'entretien et de recyclage. Ainsi s'esquissaient, inconsciemment, mes thématiques actuelles sur l'écoconception. Grâce à ces projets, j'ai pu obtenir les budgets pour faire travailler un post doc puis un doctorant sur les aspects modélisation du compactage en s'inspirant des techniques robotiques apprises en thèse.

C'est à ce moment que le LCPC a reçu comme consigne de mobiliser 25 % de son potentiel de recherche sur la sécurité routière. Une des conséquences a été l'ar-

rêt des thématiques sur la robotique de chantier pour aller vers la dynamique des véhicules. Pour moi, il s'agissait de changer de domaine d'application. Compte tenu de mon expérience en suivi de projet, je suis devenu chef du projet INFRA-SURE qui avait pour objectif de construire des équipements pour la recherche en sécurité routière. Ce projet a mobilisé tout le LCPC afin de répondre à l'objectif gouvernemental en sécurité routière. Lorsque j'ai pris la tête du projet, le cahier des charges était terminé mais il fallait le mettre en œuvre. Ceci a abouti à la réfection de la piste de référence routière du Centre de Nantes, à la création d'un virage "contrôlabilité" et à l'équipement d'un véhicule, notamment, avec une roue dynamométrique. Bien que secondé par une équipe très efficace, ce projet m'a pris un temps considérable, temps non valorisé dans des publications. A coté de cette activité de chef de projet, j'ai eu une activité de recherche avec Renault sur l'estimation de l'adhérence. J'ai, ainsi, coencadré, une thèse CIFRE sur ce sujet qui a été valorisée par une publication en revue et un brevet français et mondial ([1], [12]). Ce travail de recherche faisait appel à mes compétences en expérimentations mais aussi dans les méthodes robotiques. J'ai alors participé à des congrès en robotique qui m'ont permis de faire passer certaines idées que j'avais eues au contact des expérimentations. Ces idées ont été reprises, approfondies par l'équipe robotique de l'IRCCyN ce qui a permis de revivifier les techniques robotiques dans le domaine de l'identification. Ceci a été reconnu par la communauté, notamment, à travers six publications dans des revues de robotique [3, 4, 5, 6, 7, 8] et une vingtaine de présentations dans les conférences Ifac-Ieee. Les contacts avec les chercheurs en sécurité routière et les nouveaux contacts universitaires avec Renault (laboratoire LM2S de l'université de technologie de Troyes) m'ont aussi amené appliquer la théorie de la viabilité en sécurité routière [9] ce qui apporte un nouvel éclairage dans ce domaine. Les compétences développées pendant cette période m'ont permis de proposer un cours de dynamique de véhicule à l'Ecole Centrale de Nantes au niveau master.

Il y a cinq ans, le LCPC a décidé de sensibiliser ses agents aux thématiques environnementales, notamment, au dérèglement climatique et à l'épuisement des énergies fossiles. Par ailleurs, les chargés de recherche sont incités à passer une habilitation à diriger des recherches ce qui implique de se positionner différemment par rapport à des projets comme Infrasure. J'ai donc décidé d'arrêter mon investissement dans ce projet et j'ai commencé à réfléchir à mes savoir faire en modélisation et analyse afin de voir comment répondre aux nouveaux défis environnementaux. Nous avons remarqué que nos modèles pouvaient aussi apporter des éléments intéressants concernant la consommation énergétique. J'ai alors décidé de rejoindre l'équipe EASE (Environnement, Aménagement, Sécurité, Eco-conception), afin de participer au montage d'un thème sur l'écoconception.

Nous avons monté un partenariat de recherche avec Réseau Ferré de France

(RFF) sur l'efficacité énergie-carbone des investissements. J'étais le responsable scientifique de ce partenariat coté Ifsttar. Profitant de la fusion entre le LCPC et l'Inrets pour créer l'Ifsttar, je me suis rapproché des spécialistes du ferroviaire de l'ex Inrets pour acquérir une culture ferroviaire. Grâce à ce partenariat, j'ai coencadré une thèse CIFRE sur l'établissement d'un modèle de consommation pour les trains à grande vitesse tenant compte des paramètres de l'infrastructure. Ici encore, j'utilise mes compétences en montage d'expérimentation et en robotique pour construire des modèles de consommation qui sont validés sur des essais réels conduits lors de la réception de la ligne à grande vitesse Rhin Rhone, branche est. Avec l'équipe " Analyse du Cycle de Vie (ACV) ", nous avons pu évaluer la consommation énergétique des phases de construction, d'usage et d'entretien de variantes de ligne à grandes vitesses [2]. Nous sommes maintenant dans une phase de valorisation de ce travail.

En 2013, j'ai pris la direction d'une équipe de EASE (actuellement, composé de 3 chargés de recherches et 1 technicien supérieur) rassemblée autour du thème de l'écoconception des infrastructures de transport. Nous appréhendons celle-ci à travers la méthodologie de l'analyse du cycle de vie. Nous travaillons sur l'usage. Nous collaborons avec nos collègues de EASE spécialistes en ACV pour les phases de construction et de maintenance. Cette méthodologie nécessite de faire travailler ensemble des spécialistes de différents domaines : génie civil, statistiques, connaissances des chantiers. Mon parcours professionnel me permet d'interagir avec chacun autour d'une vision partagée sur l'avenir du système de transport.

## *Recherche*

### **Socle : technique robotique d'identification**

Mon activité de recherche se déroule au sein de l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar) dans le centre de Nantes. J'ai rejoint cet Institut après une thèse au Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) sur l'identification des paramètres dynamiques des bras manipulateurs. C'est durant cette thèse que j'ai acquis un socle de compétence sur lequel mes recherches se sont construites. Il s'agissait d'identifier les masses, les premiers moments, les seconds moments, les paramètres de frottement du modèle dynamique du robot à partir de mesures effectuées sur des trajectoires du robot. C'est un domaine d'excellence de l'IRRCyN (Institut de Recherche en Communications et en Cybernétique de Nantes). Je travaille donc en collaboration avec les chercheurs de cet institut depuis cette thèse, notamment avec Maxime Gautier. D'un point de vue théorique, les méthodes mises en œuvre sont relativement simples car le modèle dépend linéairement des paramètres. Il s'agit d'utiliser les moindres carrés. Une utilisation naïve de cette méthode mène à une catastrophe en terme d'identification comme, par exemple, trouver des

masses négatives. Différents problèmes pratiques sont rencontrés : la matrice d'observation est mal conditionnée, elle est fortement bruitée, les bruits sont corrélés car l'identification est effectuée en boucle fermée, les erreurs de modèles peuvent être importantes lorsque les vitesses sont faibles. Pour résoudre ces problèmes, une démarche en trois étapes est nécessaire : planification, prétraitement, identification. Si les résultats de l'identification ne sont pas satisfaisants, le processus boucle sur la première étape de planification. Il s'agit de planifier les trajectoires pour exciter tous les paramètres et regrouper ceux qui ne peuvent pas être excités. Une fois les trajectoires effectuées, les mesures faites, les données doivent être filtrées pour pouvoir estimer les accélérations en fonction des positions, sélectionnées pour concentrer l'identification sur les parties des signaux où le modèle est valide. C'est l'étape de prétraitement. Ensuite, la troisième étape est l'identification des paramètres. Celle-ci comprend des tests statistiques afin de vérifier que les hypothèses de l'identification sont vérifiées : bruit gaussien, indépendance des bruits, paramètre significatif, ... Du point de vue numérique, le conditionnement de la matrice d'observation est aussi analysé. Ces tests permettent de proposer une nouvelle planification le cas échéant. Tout au long de mes recherches, j'ai suivi cette démarche dans différents secteurs du génie civil : les chantiers routiers, la sécurité routière et l'écoconception des infrastructures de transport routier et ferroviaire.

## **Chantier routier**

Sur les chantiers routiers, la méthode complète a été appliquée sur un compacteur. Il s'agissait de concevoir un capteur logiciel des efforts de contact entre le compacteur et l'enrobé à partir des informations sur les moteurs hydrauliques de l'engin de chantier et des positions des différents corps le composant. L'approche a consisté à isoler le compacteur afin d'identifier son modèle dynamique. Une fois celui-ci connu, nous connaissions les efforts de contact en retirant du signal du moteur les informations issues du modèle dynamique. Du point de vue théorique, la méthode de modélisation élaborée à l'Ircsyn s'appliquait sur ce type d'engin. En revanche du point de vue pratique, nous avons dû résoudre des problèmes liés à des spécificités du compacteur comme le fait qu'il est propulsé à l'aide d'un moteur hydraulique, et à une instrumentation différente de celle des bras manipulateurs : les capteurs de position sont à base de roues dentées, le système de mesure combine des variables Eulériennes et Lagrangiennes. Cette étude a demandé un travail théorique et expérimental. Du point de vue théorique, nous avons utilisé des splines pour calculer les vitesses et accélération à partir des positions fournies par les roues dentées et la modélisation de l'Ircsyn a été adaptée à l'utilisation de variables eulériennes.

À côté de cette application de la méthode complète, une partie de la méthode concernant les tests statistiques a été appliquée aux procédés de fabrication de

matériaux pour le génie civil. Il s'agit de caractériser l'hétérogénéité d'un mélange granulaire de façon suffisamment précise pour pouvoir comparer deux procédés d'élaborations du même matériaux. Ceci requiert de bien distinguer la variance due aux erreurs d'échantillonnages (dans le cas présent, ce sont des échantillonnages manuels) de la variance intrinsèque du matériaux. Nous nous sommes rapprochés des méthodes utilisées par l'industrie des mines. Pour cela, j'ai qualifié un appareil, appelé, le banc d'analyse granulométrique (BAG) qui avait été conçu au LCPC avant mon arrivée.

En travaillant sur les processus d'élaboration des matériaux, j'ai utilisé les méthodes de modélisation issues du génie chimique (la méthode de la distribution des temps de séjour). Cette modélisation fonctionnait correctement en régime stabilisé mais la gestion des transitions est problématique. L'université d'Evry a proposé une méthode à base de réseaux de Neurones afin d'étendre la modélisation à la gestion des transitions. J'apportai ma connaissance du procédé ainsi que les méthodes classiques et je m'enrichissais de ces nouvelles méthodes (enfin nouvelles dans le domaine du génie civil mais bien connues par ailleurs). Ici aussi, les expérimentations étaient difficiles à mettre en œuvre car elles passaient par l'utilisation de traceurs radioactifs.

## **Sécurité routière**

La question posée est la prédiction du coefficient de frottement maximal lors d'un freinage alors que le véhicule est en situation normale de conduite. En effet, différents modèles reliant le taux de glissement des roues et la coefficient de frottement ainsi qu'un brevet (le brevet Michelin) laissaient penser que cette prédiction était possible. De nombreuses équipes travaillaient sur ce sujet. Nous avons travaillé avec Renault sur des expérimentations réelles permettant de tracer point par point la courbe entre taux de glissement et coefficient de frottement. Nous avons montré que cette prédiction n'était pas possible en se basant uniquement sur des mesures proprioceptives en situation de conduite normale. Le traitement des données expérimentales a fait appel aux méthodes de filtrage utilisées dans l'identification des modèles dynamiques. Cette démonstration expérimentale s'appuie sur une propriété de stabilité du système que j'ai établie à partir d'un théorème d'automatique non linéaire. C'était une première contribution théorique à un domaine différent des techniques robotique d'identification. Lors de cette étude, j'ai travaillé avec une équipe de l'université de technologie de Troyes (UTT) qui était spécialisée dans les méthodes de classification de type SVM (Support Vector Machines), outil que j'utiliserai par la suite pour appliquer la théorie de la viabilité.

J'ai appliqué la théorie de la viabilité à la problématique de trouver une trajectoire viable connaissant l'état, au sens automatique, d'un véhicule en virage. Classiquement, une trajectoire est calculée à partir de l'état courant du véhicule

pour atteindre la fin du virage qui est considérée comme une cible. La théorie de la viabilité raisonne sur des ensembles. Le noyau de viabilité est l'ensemble des états à partir desquels la fin du virage est atteinte. La démarche classique de trouver une trajectoire permettant d'atteindre la cible revient, en théorie de la viabilité, à vérifier si l'état courant du véhicule appartient au noyau de viabilité. La théorie de la viabilité propose un changement de paradigme : au lieu de résoudre les équations différentielles ordinaires, il s'agit de classer un état. Pour cela, j'ai utilisé les méthodes SVM. En soi, ceci n'était pas novateur, en écologie, cette combinaison théorie de la viabilité/SVM avait déjà été appliquée. Mais c'était la première fois qu'elle était appliquée à une question issue de la sécurité routière.

## **Ecoconception**

Les techniques robotiques d'identification ont été appliquées à un train à grande vitesse. Il s'agissait de construire un modèle de consommation électrique pour pouvoir différencier différentes variantes d'un projet de ligne à grande vitesse. Ce modèle de consommation dépend linéairement de paramètres mécaniques et électriques. Il a été identifié sur des essais réels lors des essais de réception de la ligne à grande vitesse Rhin-Rhône.

Par rapport aux robots classiques, les rails induisent une contrainte cinématique différente. Par ailleurs, le vent est un facteur dont il faut tenir compte. Comme cela peut arriver aussi en robotique industrielle, une partie des mesures n'est pas clairement documentée. Ceci introduit des difficultés dans la localisation. Nous avons contourné cette difficulté par une identification très basse fréquence mais suffisante pour l'application visée.

Actuellement, j'applique cette méthode sur des données routières pour évaluer l'influence des paramètres géométriques de l'infrastructure sur la consommation des véhicules.

La simulation d'un train m'a amené à étudier la problématique de l'établissement des fiches horaires pour les conducteurs. J'ai travaillé avec des chercheurs de l'Ifsttar spécialistes de ce domaine. A leurs contacts, je me suis enrichi de méthodes nouvelles basées sur des algorithmes évolutionnistes pour l'optimisation multicritère afin de proposer des fiches horaires qui soient des optima de Pareto. De mon côté, j'apportai ma connaissance du modèle de consommation ainsi que mes connaissances en commande optimale. En effet, ces algorithmes exploitent des conditions d'optimalité issues du principe de Pontryagin.

## *Coencadrement de thèses et de post-doc*

### **Coencadrement de doctorants**

#### **Thèses soutenues**

- 2012-2015 thèse CIFRE de Romain Bosquet avec RFF sur la Modélisation énergétique de l'usage des infrastructures ferroviaires selon leurs caractéristiques, tracé et vitesses d'exploitation sous la direction de Maxime Gautier, professeur à l'Université de Nantes, j'ai encadré cette thèse à 25 % , Alex Coiret, chargé de recherche à l'Ifsttar, a encadré à 25 %. Le jury était composé des encadrants Ifsttar, de Dominique Meizel (Professeur à l'Ensil), de Michel Basset (Professeur à l'Ensis), de Patrice Aknin (Directeur de Recherche, directeur scientifique de la SNCF), de Yannick Aoustin (professeur à l'université de Nantes), Olivier Cazier (Ingénieur Sncf). [La soutenance est visible sur ce lien](#).  
La principale publication est l'article en revue [2].  
Romain Bosquet est ingénieur d'étude dans le domaine de la signalisation à la SNCF.
- 2006-2009 thèse CIFRE d'Arnaud Andrieux avec Renault sur l'estimation de l'adhérence sous la direction de Régis Lengellé, professeur à l'Université de Technologie de Troyes et Pierre Beuseroy, maître de conférence HDR à l'Université de Technologie de Troyes. J'ai encadré cette thèse à 33 % avec Pierre Beuseroy, le jury était composé des encadrants, de Christian Chabanon (ingénieur Renault), Michel Basset (Professeur à l'Ensis), David Brie (professeur à l'université de Nancy), Claude Jauffret (professeur des universités du Sud Toulon Var), Jean-Michel Nidiot (Ingénieur Renault sport), Minh-Tan do (Ingénieur divisionnaire des travaux publics de l'état, HDR), Sébastien Cornou (Ingénieur Renault). Soutenance à huis clos.  
La principale publication est l'article en revue [1]. Un brevet français et mondial ([12]) est aussi un produit de ce travail.  
Arnaud Andrieux est ingénieur d'étude au centre d'ingénierie du matériel de la SNCF, dans le pôle équipement de sécurité et frein.
- 2002-2005 thèse Région-LCPC de Charles-Eric Lemaire sur l'estimation des efforts de contact cylindre/matériau d'un compacteur vibrant sous la direction de Maxime Gautier, professeur à l'université de Nantes, j'ai encadré cette thèse à 50 %. Le jury comprenait les encadrants, S. Mammari (professeur à l'université de Versailles saint Quentin), J-C. Cadiou (professeur à l'université d'Evry), F. Peyret (directeur de recherche LCPC, Nantes), A. Charara (professeur à l'UTC).  
Une des publications est un article dans un congrès IFAC [31].  
Charles-Eric Lemaire est ingénieur de recherche à la DGA/maitrise de l'information (anciennement laboratoire de recherche balistique et aérodynamique).
- 2002-2005 thèse CIFRE de Tarek Madani sur la Distribution des temps de Séjour et Réseaux de Neurones Formels pour la caractérisation des Tambours-Sécheurs-Enrobeurs

en vue de leur commande sous la direction de Nacer K. M'Sirdi, professeur à l'Ecole Polytechnique Universitaire de Marseille, et A. Benallegue, professeur à l'université de Versailles, j'ai encadré cette thèse à 50 % . Le jury était composé des encadrants, de M. Ouladsine, professeur à l'université Aix-Marseille, F. Peyret (directeur de recherche au LCPC de Nantes), M. Bayard (professeur à l'Ecole polytechnique de Lille), J. Oudin (directeur de la SEMR de BLois, T. de Sars (Directeur technique de la société Ermont), M. Ducasse (directeur matériel et investissement Eurovia). Soutenance à huis Clos.

Pas de publications associées à ce travail pour des raisons de confidentialité.

Tarek Madani est maitre de conférence à l'université de Créteil.

### **Thèse non soutenue**

2011-2013 thèse Ifsttar d'Aurélien Lejeune sur l'Optimisation multicritère de la gestion opérationnelle du trafic ferroviaire sous la direction de Joaquin Rodriguez, Directeur de Recherche Ifsttar/Villeneuve d'Ascq, j'ai encadré cette thèse à 10 %, le docteur a fait ces deux premières années à Villeneuve d'Ascq, il a souhaité démissionner car il voulait rejoindre Nantes. Nous l'avons accueilli au centre Ifsttar de Nantes pour sa troisième année mais il n'a pas réussi à aller au bout de la rédaction de son manuscrit pour des raisons personnelles.

Ce travail est valorisé par une publication en revue acceptée mais non publiée.

### **Encadrement de postdoc**

2001 post-doctorat d'Arnaud Delclos sur les étude de faisabilité du projet européen OSYRIS concernant l'estimation de la compacité en mesurant la résistance à l'avancement de janvier 2001 au 1er septembre 2001.

### **Participation à des jurys de thèse**

Thèse de Lama Mourad : Contrôle actif de l'accélération latérale perçue d'un véhicule automobile étroit et inclinable, soutenue le 19 décembre 2012 à l'Ecole des Mines de Nantes.

Thèse de Salim Maakaroun : Modélisation et simulation dynamique d'un véhicule urbain innovant en utilisant le formalisme de la robotique, soutenue le 20 décembre 2011 à l'Ecole des Mines de Nantes.

Thèse de Wissam El Messoussi : Contrôle robuste avec observateur dans le véhicule automobile, soutenue le 15 octobre 2009 à l'Université de Picardie.

Thèse d'Alexandre Janot : Contribution à la modélisation et à l'identification des interfaces haptiques, soutenue le 17 décembre 2007, à l'Ecole Centrale de Nantes.

Thèse de Eric Guillo : Modélisation et Identification dynamique des engins mobiles de construction de routes, soutenue le 18 janvier 2000 à l'Ecole Centrale de Nantes.

### **Coencadrement de stagiaires**

1. Stage Dut génie électrique et informatique industrielle de Etienne Poupin, Asservissement en simulation via Matlab et Fortran sur le positionnement d'un point de pivot, 2015
2. Master 2 (ARIAS) de Anas Chadil, Simulation d'une suspension pneumatique secondaire d'un matériel roulant ferroviaire, 2014
3. Master 2 de Freddy Toynan, Etude de l'impact de la géométrie routière sur la consommation d'énergie des véhicules, 2013
4. Stage ingénieur de Kun Yang, Identification de tronçons homogènes sur un parcours acquis par GPS et centrale inertielle, 2013
5. Stage ingénieur en statistique de Amira Tjila, Modélisation de l'énergie liée à la phase d'usage des infrastructures routières et de leur trafic, 2012
6. Master 2 de Arnaud Andrieux, Estimation de l'adhérence des chaussées, 2006
7. Stage ingénieur de Khaled Dahama, influence de la température sur le compactage des enrobés, 2004
8. Master 2 de Jean-Christophe Fline, Conception, Spécification, Développement d'un prototype pour le projet chantier-routier.fr, 2003
9. Stage IAE de François Lissilour, Plan d'affaire du projet chantier-routier.fr, 2003
10. Stage ingénieur d'Amandine Clapisson, influence de la température sur le compactage des enrobés, 2002
11. Projet Cnam de Mathilde Hillairet, Sylvain Quelo, Jérôme Renaudeau, gestion des ontologies pour le projet chantier-routier.fr, 2002
12. Stage ingénieur de Pascal Guilbert, Instrumentation du compacteur pour la mesure de la résistance à l'avancement, 2002
13. Master 1 de Yves Blondelot, Etude de faisabilité sur la mesure de la pré-compacité, 2001

14. Master 2 de Charles-Eric Lemaire, Estimation des efforts de contact entre un compacteur et le matériau compacté, 2001
15. Stage ingénieur de Charles-Eric Lemaire, Analyse et Correction des mouvements parasites du chariot de Sessyl, 1999.
16. Master 2 de Vincent Frémont, Modélisation dynamique d'un compacteur avec balourd, 2000.
17. Stage ingénieur de Yann Guillemot, Temps de malaxage et introduction des additions dans le béton, 1998
18. Stage Master 1 de Karine Gaudin, Temps de malaxage et introduction des additions dans le béton : approche statistique, 1998
19. Stage ingénieur de Guillaume Mocquet, Capacités prédictives du modèle d'un malaxeur construit par la distribution des temps de séjour, 1998
20. Stage ingénieur de Frédéric Basset, Modélisation d'un malaxeur construit par la méthode de distribution des temps de séjour, 1997
21. Stage ingénieur de Nathanaël Richard, Evaluation et utilisation du banc d'analyse granulométrique, 1997

## *Cours*

- 2014-2008 Responsable du module " dynamique des véhicules " à l'Ecole Centrale de Nantes, 27h00/an
- 2015-2006 Chargé du cours " Problèmes inverses ", module " Modèles " commun aux écoles doctorales SPIGA et STIM, 3h00 par an
- 2014-2013 Responsable du module professionnel " Expérimentation en maternelle ", module commun aux écoles doctorales SPIGA et STIM. Il s'agit pour les doctorants de proposer des expérimentations scientifiques sur une thématique liée à leur thèse en grande section de maternelle donc à destination d'un public qui ne sait pas lire! ( [cette émission de radio " le labo des savoirs "](#) relate cette initiative).
- 1998-1997 Chargé des cours " automatique " et " automatique avancée " à l'Ecole Centrale d'Electronique 30h/an

## *Service collectif*

- 2016-2015 Représentant des agents au conseil scientifique de l'Ifsttar.
- 2016-2014 Représentant des agents au conseil du département Ame.
- 2010-2000 Représentant des agents au comité technique paritaire, au comité Hygiène et Sécurité et au conseil d'administration du LCPC.

- 2006-2003 Représentant du LCPC au sein de l'Ecole Doctorale STIM.  
2003-2000 Représentant des agents au comité d'évaluation des chercheurs du Ministère de l'Équipement.

## *Prix*

- 2001 Lauréat avec Jean-Marie Prual du concours ANVAR pour lancer les études de création d'entreprise dans le domaine de l'internet pour le chantier routier.

## *Diplômes*

- 1996 DOCTEUR DU COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Fontenay-aux-Roses  
1992 INGÉNIEUR CIVIL DES MINES, Paris  
1990 MAÎTRISE D'INGÉNIERIES MATHÉMATIQUES, OPTION AUTOMATIQUE, Paris-Dauphine  
1988 DEUG MATHÉMATIQUES APPLIQUÉES ET SCIENCES SOCIALES, Paris-Dauphine

## *Publications*

### **Articles répertoriés avec comité de lecture - ACL**

- [1] A. ANDRIEUX, P. O. VANDANJON, R. LENGELLE, AND C. CHABANON, *New results on the relation between tyre-road longitudinal stiffness and maximum available grip for motor car*, *Vehicle System Dynamics*, 48 (2010), pp. 1511–1533.
- [2] R. BOSQUET, A. JULLIEN, P.-O. VANDANJON, M. DAUVERGNE, AND F. SANCHEZ, *Eco-design model of a railway : A method for comparing the energy consumption of two project variants*, *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 33 (2014), pp. 111–124.
- [3] M. GAUTIER, A. JANOT, AND P.-O. VANDANJON, *A new closed-loop output error method for parameter identification of robot dynamics*, *Control Systems Technology*, IEEE Transactions on, 21 (2013), pp. 428–444.
- [4] A. JANOT, M. GAUTIER, A. JUBIEN, AND P. VANDANJON, *Comparison between the CLOE method and the DIDIM method for robots identification*, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 22 (2014), pp. 1935–1941.
- [5] A. JANOT, P.-O. VANDANJON, AND M. GAUTIER, *Identification of physical parameters and instrumental variables validation with two-stage least squares estimator*, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 21 (2013), pp. 1386–1393.

- [6] —, *A generic instrumental variable approach for industrial robot identification*, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 22 (2014), pp. 132–145.
- [7] A. JANOT, P.-O. VANDANJON, AND M. GAUTIER, *An instrumental variable approach for rigid industrial robots identification*, Control Engineering Practice, 25 (2014), pp. 85–101.
- [8] —, *A revised Durbin-Wu-Hausman test for industrial robot identification*, Control Engineering Practice, 48 (2016), pp. 52–62.
- [9] P.-O. VANDANJON, A. COIRET, AND T. LORINO, *Application of viability theory for road vehicle active safety during cornering manoeuvres*, Vehicle System Dynamics, 52 (2014), pp. 244–260.
- [10] P.-O. VANDANJON, F. DE LARRARD, B. DEHOUSSE, G. VILLAIN, R. MAILLOT, AND R. LAPLANTE, *Homogenisation of concrete in a batch plant : the influence of mixing time and method on the introduction of mineral admixtures*, magazine of concrete research, 55 (2003), pp. 105–116.

### **Brevets**

- [11] A. ANDRIEUX, C. CHABANON, AND P.-O. VANDANJON, *Procédé et dispositif d'évaluation de l'usure d'un pneu*, Nov. 2010.
- [12] A. ANDRIEUX, C. CHABANON, AND P.-O. VANDANJON, *Method and device for assessing the wear of a tyre*, Apr. 2010.

### **Chapitres de livre**

- [13] N. MARCASSUS, A. JANOT, P.-O. VANDANJON, AND M. GAUTIER, *Experimental identification of the inverse dynamic model : Minimal encoder resolution needed application to an industrial robot arm and a haptic interface.*, in Robot manipulators, Marco Ceccarelli, Sept. 2008.

## **Communications avec actes dans un congrès international - ACTI**

### **Conférences IEEE-IFAC**

- [14] M. BRUNOT, A. JANOT, F. CARILLO, H. GARNIER, P.-O. VANDANJON, AND M. GAUTIER, *Physical parameter identification of a one-degree-of-freedom electromechanical system operating in closed loop*, in Proc. of the 17th IFAC Symposium on System Identification (SYSID 2015), Beijing, China, Oct. 2015, pp. 817–822.
- [15] M. GAUTIER, A. JANOT, A. JUBIEN, AND P.-O. VANDANJON, *Joint stiffness identification from only motor force/torque data*, in Proceedings of the 50th

- IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, Orlando, Florida, USA, Dec. 2011, pp. 5088–5093.
- [16] M. GAUTIER, A. JANOT, A. JUBIEN, AND P.-O. VANDANJON, *New closed-loop output error method for robot joint stiffness identification*, in Proc. of 16th IFAC Symposium on System Identification, Brussels (Belgium), July 2012, pp. 852–857.
- [17] M. GAUTIER, A. JANOT, AND P. VANDANJON, *DIDIM : A new method for the dynamic identification of robots from only torque data*, in Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Pasadena, California, USA, May 2008, pp. 2122–2127.
- [18] M. GAUTIER, A. JANOT, AND P.-O. VANDANJON, *Dynamic identification of a 6 dof industrial robot with a closed-loop output error method*, in Proceedings of the 18th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC), Milano, Italy, Sept. 2011, pp. 6892–6897.
- [19] M. GAUTIER, P.-O. VANDANJON, AND A. JANOT, *Dynamic identification of a 6 dof robot without joint position data*, in Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2011), Shanghai, China, May 2011, pp. 234–239.
- [20] M. GAUTIER, P. VANDANJON, AND C. PRESSE, *Identification of inertial and drive gain parameters of robots*, in Decision and Control, 1994., Proceedings of the 33rd IEEE Conference on, vol. 4, 1994, pp. 3764–3769 vol.4.
- [21] A. JANOT, M. ANASTASSOVA, P. VANDANJON, AND M. GAUTIER, *Identification process dedicated to haptic devices*, in Proceedings of International Conference on Intelligent Robot and System (IROS 2007), San Diego, USA, Nov. 2007, pp. 2467–2473.
- [22] A. JANOT, M. GAUTIER, A. JUBIEN, AND P.-O. VANDANJON, *Experimental joint stiffness identification depending on measurements availability*, in Proceedings of the 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, Orlando, Florida, USA, Dec. 2011, pp. 5112–5117.
- [23] A. JANOT, P. VANDANJON, AND M. GAUTIER, *Identification of robots dynamics with the instrumental variable method*, in Robotics and Automation, 2009. ICRA '09. IEEE International Conference on, Kobe, Japan, May 2009, pp. 1762–1767.
- [24] ———, *Using robust regressions and residual analysis to verify the reliability of LS estimation : Application in robotics*, in Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on, Saint-Louis (USA), 2009, pp. 1962–1967.
- [25] A. JANOT, P. VANDANJON, M. GAUTIER, AND F. KHATOUNIAN, *Analysis and application of a robust identification method*, in CIRA 2007, 7th IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, Jacksonville, USA, June 2007, pp. 89–94.

- [26] A. JANOT, P.-O. VANDANJON, AND M. GAUTIER, *Using the instrumental variable method for robots identification*, in Proc. of 15th IFAC Symposium on System Identification, E. Walter, ed., Saint-Malo (France), July 2009, pp. 480–485.
- [27] A. JANOT, P.-O. VANDANJON, AND M. GAUTIER, *Identification of 6 DOF rigid industrial robots with the instrumental variable method*, in Proc. of 16th IFAC Symposium on System Identification, Brussels (Belgium), July 2012, pp. 1659–1664.
- [28] ———, *A durbin-wu-hausman test for industrial robots identification*, in Proc. of 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Karlsruhe, Germany, May 2013, IEEE, pp. 2941–2946.
- [29] C.-E. LEMAIRE, P.-O. VANDANJON, AND M. GAUTIER, *Dynamic identification of a compactor using splines data processing*, in Proc. of the 13th IFAC Symposium on System Identification, Rotterdam, The Netherlands, Aug. 2003, pp. 927–932.
- [30] C.-E. LEMAIRE, P.-O. VANDANJON, AND M. GAUTIER, *Dynamic modelling of a vibratory asphalt compactor and estimation of contact forces wrench*, in Proceedings of the 16th International Federation Of Automatic Control World Congress, P. Zítek, ed., Prague, Czech Republic, July 2005, pp. 2056–2062.
- [31] C.-E. LEMAIRE, P.-O. VANDANJON, M. GAUTIER, AND C. LEMAIRE, *Dynamic identification of a vibratory asphalt compactor for contact efforts estimation*, in Proceedings of the 14th IFAC Symposium on System Identification (SYSID), B. Ninness, ed., Newcastle, Australia, Mar. 2006, pp. 973–978.
- [32] N. MARCASSUS, P. VANDANJON, A. JANOT, AND M. GAUTIER, *Validation of a parametric identification technique through a derivative CESTAC method*, in Computational Intelligence in Robotics and Automation, 2007. CIRA 2007. International Symposium on, Jacksonville, USA, June 2007, pp. 303–308.
- [33] N. MARCASSUS, P.-O. VANDANJON, A. JANOT, AND M. GAUTIER, *Minimal resolution needed for an accurate parametric identification - application to an industrial robot arm*, in Proc. IEEE on Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, San Diego, California, USA, Oct. 2007, pp. 2461–2466.
- [34] G. MAXIME, A. JANOT, AND P.-O. VANDANJON, *A new identification method for mechatronic systems in closed-loop from only control data*, in Proceedings of the 17th IFAC World Congress, C. Myung, ed., vol. 17, Coex, South Korea, July 2008, pp. 10498–10503.
- [35] P. VANDANJON, M. GAUTIER, AND P. DESBATS, *Identification of robots inertial parameters by means of spectrum analysis*, in Robotics and Automation, 1995. Proceedings., 1995 IEEE International Conference on, vol. 3, 1995, pp. 3033–3038.

- [36] P. VANDANJON, A. JANOT, M. GAUTIER, AND F. KHATOUNIAN, *Comparison of two identification techniques : Theory and application*, in Proceedings of the fourth international conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2007), Angers, France, May 2007, pp. 341–347.

#### Autres Conférences sur article

- [37] A. DELCLOS, P.-O. VANDANJON, F. PEYRET, M. GAUTIER, AND M. FROUMENTIN, *Estimating the degree of compaction of asphalt using proprioceptive sensor and dynamic model*, in Proceedings of the 18th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Krakow, Poland, 2001, IAARC, pp. 1–6.
- [38] E. GUILLO, M. GAUTIER, AND P.-O. VANDANJON, *Observer for vehicle-terrain interaction using the dynamic model of vehicles : application to the compactor*, in Proceedings of International Advanced Robotics Programme, 2000.
- [39] C. LEMAIRE, P. VANDANJON, M. GAUTIER, AND F. PEYRET, *Motion planning taking into account the dynamic model of vehicles : Application to the compactor*, in Proceedings of the 19th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Washington, U.S.A, 2002, IAARC, pp. 223–228.
- [40] P.-. VANDANJON AND P. DESBATS, *Calibration of robot control model by means of identification software tool*, in Proceedings of the 26th International Symposium on Industrial Robots, Milano, Italy, Oct. 1996.
- [41] P.-. VANDANJON, S. GUILLOU, AND R. CAMMOUN, *On-line robot workcell calibration by means of 3d displacement estimation*, in Proceedings of the 26th International Symposium on Industrial Robots, Milano, Italy, Oct. 1996.
- [42] P.-O. VANDANJON, A. COIRET, B. MURESAN PASLARU, A. FARGIER, R. BOSQUET, M. DAUVERGNE, A. JULLIEN, D. FRANÇOIS, AND F. LABARTHE, *Practical guidelines for life cycle assessment applied to railways project*, in International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction – Civil engineering and buildings, Nantes, France, July 2012, A. Ventura and C. de la Roche, pp. 144–152.

#### Conférences sur résumé

- [43] R. BOSQUET, P.-O. VANDANJON, A. COIRET, AND T. LORINO, *Model of high-speed train energy consumption*, in International Conference on Railway Engineering and Management, World Academy of Science, Engineering and Technology (Vol 7 Nr 6), Copenhagen, Denmark, June 2013, pp. 1915 – 1919.
- [44] R. BOSQUET, P.-O. VANDANJON, M. GAUTIER, A. COIRET, AND O. CAZIER, *Influence of railway gradient on energy efficiency of high speed train*, in Proc. Transport Research Arena 5th conference, Paris, France, Apr. 2014, p. 8 p.

- [45] A. COIRET, G. BLANCHARD, G. LE DENMAT, AND P. O. VANDANJON, *Transposability of road management devices to the evaluation of comfort and safety of cycling lanes*, in VELOCITY 2015, 2015, p. 1p.
- [46] A. COIRET, PIERRE-OLIVIER VANDANJON, R. BOSQUET, AND A. JULLIEN, *Comparative wind influence on use phase energy consumptions of roads and railways*, in Road and Rail Infrastructure III, Proceedings of 3rd International Conference on Road and Rail Infrastructure-CETRA 2014, Split, Croatia, Apr. 2014, Stjepan Lakušić, pp. 817–823.
- [47] A. COIRET, P.-O. VANDANJON, R. BOSQUET, AND A. JULLIEN, *Energy consumption induced by operation phase of railways and road infrastructures*, in Road and Rail Infrastructure I I, Proceedings of 2nd International Conference on Road and Rail Infrastructure-CETRA 2012, Dubrovnik, Croatia, May 2012, Stjepan Lakušić, pp. 693–699.
- [48] A. COIRET, P.-O. VANDANJON, R. BOSQUET, T. SOUBRIÉ, AND G. BATY, *Experimental assessment of wind influence on high-speed train energy consumptions*, in Proc. Transport Research Arena 5th conference, Paris, France, Apr. 2014, p. 6 p.
- [49] Y. DELANNE AND P.-O. VANDANJON, *Tire/road friction estimation*, in Proceedings of the FISITA 2006, World Automotive Congress, Yokohama, Japan, Oct. 2006, JSAE, pp. 1120–1127.
- [50] C. FREITAS SALGUEIREDO, O. ORFILA, G. SAINT-PIERRE, A. COIRET, P.-O. VANDANJON, P. DOUBLET, S. DONCIEUX, AND S. GLASER, *Overview of strategies for reducing CO2 emissions during the use phase of passenger cars*, in Proc. Transport Research Arena 5th conference, Paris, France, Apr. 2014, p. 10 p.
- [51] O. ORFILA, A. COIRET, AND P.-O. VANDANJON, *Road safety contribution by evaluation of tire crushing using a measuring hub*, in Proceedings of the Transport Research Arena Europe, Ljubljana, Slovenia, Apr. 2008, p. 6p.
- [52] O. ORFILA, P.-O. VANDANJON, AND A. COIRET, *Contribution of simplified vehicle dynamic models to road safety analysis*, in Proceedings of the Transport Research Arena Europe, Ljubljana, Slovenia, Apr. 2008, p. 6p.
- [53] P.-O. VANDANJON, Y. DELANNE, M. HJORT, M. DO, AND S. DEIX, *Drivers warning : Locally estimated stopping distance*, in Proceedings of the 13th ITS World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, London, United Kingdom, Oct. 2006, pp. 878–884.
- [54] P.-O. VANDANJON, M. DO, Y. DELANNE, A. ANDRIEUX, AND P. DABURON, *Comparison of different systems of measurement of skid resistance*, in Proceedings of the FISITA 2006, World Automotive Congress, Yokohama, Japan, Oct. 2006, JSAE, pp. 1020–1032.

## Publications en français

### journaux

- [55] T. MADANI, T. DE SARS, M. DUCASSE, J. OUDIN, AND P.-O. VANDANJON, *Fonctionnement des tambours sécheurs enrobeurs (TSE) : phases transitoires*, Revue générale des routes, (2006), pp. 55–61.
- [56] M. T. PHAM, C. ROUBY, J. LIZANDIER, D. RÉMOND, A. JANOT, P.-O. VANDANJON, AND M. GAUTIER, *Utilisation de polynômes de tchebychev pour l'identification de modèles à temps continu de robots*, Journal Européen des Systèmes Automatisés, 45 (2012), pp. 779–798.
- [57] P.-O. VANDANJON, *Evaluation et utilisation du banc d'analyse granulométrique : Un appareil de mesure de l'homogénéité des mélanges*, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées,, (1999), pp. 3–11.
- [58] P.-O. VANDANJON, F. DE LARRARD, B. DEHOUSSE, G. VILLAIN, R. MAILLOT, AND R. LAPLANTE, *Homogénéisation des bétons en centrale de fabrication discontinue : influence du temps de malaxage et du mode d'introduction des additifs minérales*, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, (2000).
- [59] P.-O. VANDANJON, M.-L. GALLENNE, AND J. TERRIERE, *Modélisation de l'écoulement des constituants dans un malaxeur industriel : Interprétation physique et capacités prédictives*, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées,, (2000), pp. 23–34.

### Chapitres de livre

- [60] P.-O. VANDANJON AND M. GAUTIER, *Téléopération pour le chantier*, in Téléopération et Robotique, Traité IC2, série Systèmes Automatisés, Hermes Science Publications, 2002.
- [61] P.-O. VANDANJON, C.-E. LEMAIRE, AND M. GAUTIER, *Pratique de l'identification des systèmes mécaniques articulés*, in Problèmes inverses en génie civil, Etudes et recherches - Série Sciences pour le génie civil SI 15, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Jan. 2009.

### Conférences

- [62] M. GAUTIER, A. JANOT, AND P.-O. VANDANJON, *Dynamic identification of a 6 dof industrial robot with a closed-loop output error method needing only input data*, in 3ème Journées Identification Modélisation Expérimentale, Douai, France, Apr. 2011.
- [63] A. JANOT, M. GAUTIER, AND P.-O. VANDANJON, *Comparaison des méthodes DIDIM et IV avec les doubles moindres carrés : Application à la robotique*, in 3ème Journées Identification Modélisation Expérimentale, Douai, France, Apr. 2011.

- [64] A. JANOT, P.-O. VANDANJON, AND M. GAUTIER, *Identification des paramètres dynamiques des robots avec la méthode de la variable instrumentale*, in Actes de la Sixième Conférence Internationale Francophone d'Automatique, Nancy, France, June 2010.
- [65] A. JUBIEN, M. GAUTIER, A. JANOT, AND P.-O. VANDANJON, *Méthode à erreur de sortie pour l'identification en boucle fermée des paramètres dynamiques d'un robot à flexibilité localisée, sans mesure de flexibilité*, in Actes de la Septième Conférence Internationale Francophone d'Automatique, Grenoble, France, July 2012.
- [66] C.-E. LEMAIRE AND P.-O. VANDANJON, *Modélisation dynamique d'un compacteur vibrant pour l'estimation des efforts de contact*, in Recueil des 18ème Journée des Jeunes Chercheurs en Robotique, Douai, France, Sept. 2004, pp. 43–46.
- [67] M. NEDONCHELLE, F. GERAIN, G. LE DENMAT, A. COIRET, P. O. VANDANJON, J. M. PRUAL, L. VIDAL, AND G. BLANCHARD, *Pistes cyclables et innovation dans les marchés publics*, in VELOCITY 2015, 2015, p. 11p.
- [68] P. VANDANJON, C.-E. LEMAIRE, AND M. GAUTIER, *Méthodologie pour l'identification des systèmes mécaniques articulés : Application au compacteur*, in Recueil des Journées des Sciences de l'Ingénieur 2006, Marne la Vallée, France, Dec. 2006, pp. 362–367.
- [69] P.-O. VANDANJON, Y. DELANNE, M. DO, A. ANDRIEUX, AND S. DEIX, *Alertes aux conducteurs : Estimation des distances de freinage*, in Actes du 21ème colloque GRETSI, Traitement du signal et des images, Troyes, France, Sept. 2007, pp. 637–640.

## *CONFÉRENCES*

# Avant propos

Mon activité de recherche s'est effectuée au sein de contrats avec des partenaires industriels qui apportent des problématiques concrètes liées à leurs activités. C'est une recherche sur contrat. Les réponses à ces problèmes sont un amalgame de théorie et de pratique. Dans mon quotidien, c'est un dialogue entre ces deux pôles. Cette synthèse pour la HdR a été l'occasion de séparer théorie et pratique. Cette séparation constitue le plan de ce document en y ajoutant la partie sur les perspectives de mes recherches.

Mes apports théoriques ne sont pas des créations de nouveaux concepts. Mes contributions sont l'établissement de nouvelles perspectives sur des thématiques particulières. Il s'agit d'utiliser les outils de l'économétrie dans l'identification des systèmes mécaniques articulés, d'étudier la stabilité du freinage avec les outils de l'automatique non linéaire ou d'apporter le point de vue de la théorie de la viabilité dans l'analyse de la sécurité d'un véhicule routier en virage.

Pour un mécanicien, ces contributions font partie du champ des mathématiques appliqués. Pour un mathématicien, elles font partie des applications à la mécanique. Ces travaux se situent à l'interface entre différentes disciplines. Elles médient des concepts existants dans certaines disciplines dans d'autres disciplines en les incarnant dans des méthodes applicables. Ces apports contribuent à enrichir ou à créer des méthodologies.

Mes apports pratiques sont des contributions à des réponses aux problèmes posés par les industriels. Ces problèmes sont divers. Une idée répandue dans l'opinion publique est que l'industriel viendrait avec ses problèmes clairement définis pour voir le chercheur. Le chercheur rejoindrait sa tour d'ivoire pendant quelques années puis redescendrait pour répondre à l'attente de l'industriel. Évidemment, ce n'est pas toujours comme cela que le processus se déroule. Par nature, l'industriel n'a pas de problème car, simplement, évoquer des difficultés techniques est perçu comme une faiblesse. Comment vont réagir les clients ? Comment ceci peut être exploité par les concurrents ? Dans ma pratique, les partenariats se nouent au hasard des rencontres. L'industriel présente sa stratégie d'entreprise concernant des nouveaux produits ou de nouveaux services. Le chercheur présente sa stratégie de recherche. Et de temps en temps, des points d'accroche apparaissent. Les sujets sont alors coconstruits puis un travail commun est lancé. Les contributions sont mélangées mais différentes : le chercheur a plus de temps pour faire le tour de la littérature sur le domaine et proposer des méthodologies, l'industriel apporte son expertise technique sur le sujet. En général, le manque de moyen réunit les deux pour monter les expérimentations nécessaires à la réponse à la question posée. Dans ce manuscrit, l'échafaudage, témoin de la coconstruction, a été retiré pour une meilleure lisibilité du travail effectué. Les travaux concernant les applications sont présentés selon le même plan sous la forme d'une question posée, d'une démarche adoptée et de la réponse.

J'ai, ainsi, participé à l'estimation des efforts de contact entre un compacteur et l'enrobé, à la modélisation des centrales continues, à l'évaluation de l'hétérogénéité des bétons, à l'estimation

en ligne de l'adhérence routière et à la modélisation de la consommation énergétique des trains à grande vitesse. Cela semble très disparate mais toutes ces applications sont reliées par les points suivants.

- Elles concernent le système de transport.
- Elles ont nécessité des expérimentations importantes jamais mises en œuvre auparavant.
- Elles ont utilisé les méthodologies décrites dans la partie théorique.

L'intérêt de ce travail sur contrat est qu'il permet de rester en contact avec les attentes sociales et de bénéficier des moyens nécessaires à la résolution des problèmes posés. La contrepartie est que l'industriel demande une protection intellectuelle du travail fourni. C'est pourquoi, certaines parties de cette synthèse sont particulièrement elliptiques et certains points ne sont pas évoqués.

Enfin, le lecteur qui a parcouru mon curriculum vitæ, ne retrouvera pas tous les points de ma carrière dans cette synthèse. En effet, une partie de mon temps a été consacrée à un travail d'ingénieur de recherche. Ce métier n'était pas identifié comme tel dans mon laboratoire quand j'ai commencé ma carrière. Ce sont les chercheurs et les techniciens qui suppléaient à ce manque. Ce travail consistait à créer et à maintenir des moyens expérimentaux et à animer les équipes de techniciens. Par exemple, j'ai participé à la rénovation de la piste d'expérimentation routière du centre de Nantes de l'Ifsttar. Cette rénovation a abouti à la création d'un virage, appelé, le virage "contrôlabilité" et à mettre en place des revêtements routiers de test pour les véhicules. De même, j'ai participé à la rénovation de la centrale de malaxage. Ces travaux ne sont pas de la recherche et donc ne font pas partie de ce mémoire même si ils sont nécessaires aux travaux de recherche.

# Chapitre 1

## Méthodologies

Mes apports méthodologiques concernent des points particuliers du champ des problèmes inverses d'une part et de l'automatique d'autre part.

Dans les problèmes inverses, ma contribution au travail collectif est la perspective offerte par les outils économétriques, notamment l'utilisation de la méthode des variables instrumentales, dans l'identification du modèle dynamique des systèmes mécaniques articulés. Ainsi, nous sommes passés d'une méthode basée sur les moindres carrés : méthode IDIM-LS (Inverse Dynamic Identification Model - Least Squares) utilisant les informations de position et d'effort pour identifier les paramètres du modèle dynamique, à la méthode IDIM-IV (IV pour Instrumental Variable), utilisant les mêmes signaux en y ajoutant une simulation du modèle dynamique direct. L'article le plus récent sur ce passage est [JVG14b]. Ceci a permis d'utiliser des outils statistiques nouveaux, notamment pour détecter les biais dans les moindres carrés [JVG13, JVG16]. Cela a, aussi, ouvert la voie à une méthode radicalement nouvelle basée uniquement sur les mesures d'efforts [GJV13].

En automatique, j'ai apporté les concepts de la théorie de la viabilité en sécurité routière en appliquant cette théorie à l'analyse en virage du système véhicule-infrastructure-conducteur. Traditionnellement, ce système est étudié à travers les équations différentielles ordinaires qui le modélisent. Du point de vue de la théorie de la viabilité, nous nous intéressons à l'ensemble qui contient les états correspondant à une conduite apaisée. Dans l'article [VCL14], il est montré comment construire cet ensemble appelé noyau de viabilité. C'est un changement de paradigme qui a été, ainsi, proposé.

Une autre de mes contributions en automatique, a été de démontrer la stabilité du système roue-chaussée lors d'un freinage frontal longitudinal. Cette démonstration est à la base de l'expérimentation décrite dans l'article [AVLC10], qui traite de la relation empirique entre coefficient de frottement et taux de glissement.

Chacune de mes contributions théoriques se termine par un paragraphe sur l'analyse du positionnement du résultat dans le domaine scientifique concerné.

### *1.1 Problèmes inverses*

Ma compétence de base est l'identification des systèmes mécaniques articulés. Celui-ci s'inscrit dans le domaine des problèmes inverses. Ce qui caractérise ce problème est sa simplicité théorique (en effet, le cœur de la méthode est l'utilisation des moindres carrés linéaires dont la résolution est connue depuis plus de 200 ans !) et sa difficulté pratique : il y a, en général, une centaine

de paramètres à identifier. Pour réussir à identifier ces paramètres, une méthodologie précise, qui est le fruit d'une recherche menée à l'Ircyn doit être suivie. Cette section commence par la présentation de cette méthodologie. Dans un deuxième temps, une approche complémentaire, dont je suis un des contributeurs, sera précisée.

Cet apport théorique est le fruit d'une interaction avec d'autres chercheurs. Il est délicat de cerner les contributions de chacun. Cependant, les faits suivants sont bien établis. Maxime Gautier, professeur à l'université de Nantes, a été mon maître dans ce domaine. Cette contribution n'aurait pas été valorisée à sa juste valeur sans le travail obstiné et créatif d'Alexandre Janot, chercheur à l'Onera.

### 1.1.1 Position du problème de l'identification des systèmes mécaniques articulés

Cette présentation de l'identification des systèmes mécaniques articulés est issue du livre, auquel j'ai contribué, sur les problèmes inverses en génie civil ([VLG09]).

Afin de soutenir le raisonnement théorique, une application pédagogique est proposée sur un modèle simplifié de compacteur d'enrobé. Le modèle complet est présenté dans le chapitre sur les applications.

L'identification est une étape de la modélisation, elle est liée à celle-ci. La méthodologie que nous proposons ici est liée à une modélisation usuelle en robotique qui est exposée dans le livre de référence : [KD99]. Elle considère le robot comme un système multicorps articulé c'est-à-dire des corps rigides reliés entre eux par des articulations rotoïdes ou prismatiques éventuellement élastiques. Pour des raisons de fluidité de la présentation, nous considérons  $n$  corps en mouvements reliés entre eux par  $n$  articulations actives, c'est à dire motorisées. En pratique, il peut exister des robots à chaînes fermées avec des articulations passives (cas des robots avec des boucles fermées). Il est montré dans le livre de référence que ceci ne change pas significativement la méthode d'identification. Tout ce qui est présenté, ici, peut être étendu aux cas des robots à chaîne cinématique fermées.

La méthodologie construit d'abord un modèle géométrique puis un modèle cinématique et enfin un modèle dynamique du robot. Le modèle géométrique est basé sur la notation de Denavit Hartenberg modifié (DHM) qui détermine le placement des repères sur chacun des corps. L'inconvénient de cette approche est que, contrairement à l'usage courant, les repères ne sont pas placés au centre de gravité des corps mais l'intérêt majeur de cette modélisation pour l'identification est qu'elle permet de construire des modèles dynamiques qui sont *linéaires par rapport aux paramètres*. L'objet de l'identification est de connaître ces paramètres et d'évaluer l'incertitude sur cette connaissance.

Les paramètres à identifier sont appelés les paramètres standards. Pour chaque corps  $j$  du robot,  $j$  allant de 1 à  $n$ , le nombre de corps en mouvement du robot, ils sont composés

- des 10 paramètres inertiels du corps  $j$ , regroupés dans le vecteur  $\beta_s$ , composés
- de 6 paramètres :  $XX_j \dots ZZ_j$  permettant de construire le second moment du corps  $j$  :

$$J_j = \begin{pmatrix} XX_j & XY_j & XZ_j \\ XY_j & YY_j & YZ_j \\ XZ_j & YZ_j & ZZ_j \end{pmatrix}$$

cette matrice n'est pas diagonale car les repères géométriques de Denavit Hartenberg modifié ne sont pas placés au centre de gravité suivant les axes principaux d'inertie.

- des 3 paramètres :  $MX_j$ ,  $MY_j$ ,  $MZ_j$  permettant de construire le premier moment du corps  $j$  :

$$MS_j = \begin{pmatrix} MX_j \\ MY_j \\ MZ_j \end{pmatrix}$$

- de la masse du corps  $j$  :  $m_j$ .
- les paramètres de la chaîne d'actionnement qui sont :
  - les inerties principales de l'actionneur et du réducteur ramenées sur l'axe  $z$  du repère du corps  $j$ ,  $Ia_j$
  - les paramètres des articulations élastiques le cas échéant :  $k_j$  pour la raideur et  $c_j$  pour l'amortissement,
  - les paramètres de frottement  $FV_j$  pour le frottement visqueux et  $FS_j$  pour le frottement sec.

Dans la suite, nous nous plaçons dans le cas rigide. Dans ce cadre, le vecteur des paramètres standards du corps  $j$  notés  $Xs_j$  comprend treize éléments.

$$Xs_j = (\beta s_j \quad Ia_j \quad FV_j \quad FS_j)^t = (XX_j \quad XY_j \quad \dots \quad FV_j \quad FS_j)^t$$

La linéarité du modèle dynamique s'exprime mathématiquement pour l'articulation  $j$  en dérivant par rapport aux paramètres standards, l'équation (1.1) du modèle dynamique inverse du robot.

$$\Gamma_j + \mathbb{Q}_j = M_j(q)\ddot{q} + C_j(q, \dot{q}) + \Gamma_j^f \quad (1.1)$$

avec :

- $\Gamma_j$  l'effort d'actionnement de l'articulation  $j$ ,
- $\mathbb{Q}_j$  la projection des efforts extérieurs sur l'articulation  $j$ ,
- $M_j(q)$  la ligne  $j$  de la matrice d'inertie du robot,
- $C_j(q, \dot{q})$  la composante  $j$  du vecteur des efforts de Coriolis, centrifuges, de gravité,
- $\Gamma_j^f$  la composante  $j$  vecteur des efforts de frottement.

On obtient alors l'équation (1.2).

$$\Gamma_j + \mathbb{Q}_j = \frac{\partial(M_j(q)\ddot{q} + C_j(q, \dot{q}) + \Gamma_j^f)}{\partial Xs} Xs \quad (1.2)$$

où  $Xs$  est le vecteur des paramètres standards du robot regroupant les paramètres standards de chacun des corps.

$$Xs = (Xs_1^t \quad \dots \quad Xs_n^t)^t$$

L'équation (1.2) peut se mettre sous la forme :

$$\Gamma_j + \mathbb{Q}_j = IDMs_j(q, \dot{q}, \ddot{q}) Xs \quad (1.3)$$

$IDMs_j$  est le gradient du modèle dynamique inverse de l'articulation  $j$  par rapport aux paramètres standards.

$$IDMs_j = \frac{\partial(M_j(q)\ddot{q} + C_j(q, \dot{q}) + \Gamma_j^f)}{\partial Xs}$$

$IDMs_j$  prend la forme d'un vecteur ligne.

## 1.1. PROBLÈMES INVERSESES

L'identification consiste à échantillonner l'équation (1.3) le long de mouvements effectués par le robot. En concaténant ces mesures et en les triant selon les articulations actionnées, il est obtenu un système de  $m$  équations à  $13n$  inconnues avec  $m \gg 13n$ .

$$Y = Ws(q, \dot{q}, \ddot{q}) Xs + r \quad (1.4)$$

avec :

$$Y = \begin{bmatrix} \Gamma_1(1 \dots e) + \mathbb{Q}_1(1 \dots e) \\ \vdots \\ \Gamma_n(1 \dots e) + \mathbb{Q}_n(1 \dots e) \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

$$Ws = \begin{bmatrix} \text{IDMs}_1(1 \dots e) \\ \vdots \\ \text{IDMs}_n(1 \dots e) \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

où :

- $e$  est le nombre d'échantillons,
- $n$  est le nombre d'articulations,
- $m$  le nombre d'équation est égal à  $n \cdot e$ ,
- $\Gamma_j(1 \dots e)$  est le vecteur ( $e \times 1$ ) des efforts de l'articulation  $j$ ,  $\Gamma$  est la concaténation des  $\Gamma_j$ ,
- $\mathbb{Q}_j(1 \dots e)$  est le vecteur ( $e \times 1$ ) des efforts généralisés projetés sur l'articulation  $j$ ,  $\mathbb{Q}$  est la concaténation des  $\mathbb{Q}_j$ ,
- $\text{IDMs}_j(1 \dots e)$  est la matrice ( $e \times n$ ) construite en échantillonnant la matrice ligne d'identification de l'articulation  $j$ ,  $\text{IDMs}_j(q, \dot{q}, \ddot{q})$ ,  $Ws$  peut être interprété comme un échantillonnage de IDMs qui est la concaténation des matrices lignes  $\text{IDMs}_j$  :

$$\text{IDMs} = (\text{IDMs}_1^t \dots \text{IDMs}_n^t)^t$$

- $r$  est le vecteur des résidus dus aux bruits de mesure et aux erreurs de modèle, il traduit l'incompatibilité du système.

### IDIM-LS

L'approche la plus répandue en robotique est fondée sur la résolution au sens des moindres carrés (MC) du système linéaire surdéterminé (1.4) ([Gau90]). Elle est appelée IDIM-LS : Inverse Dynamic Identification Method - Least Squares car elle se base sur le modèle dynamique inverse en utilisant les moindres carrés. Dans le vocabulaire de l'identification, c'est une méthode des moindres carrés d'erreur d'entrée avec modèle inverse. Cette dernière catégorie permet de faire remarquer qu'elle minimise l'erreur sur les efforts. En effet, les forces et les couples, constituants  $Y$ , sont considérés comme les "entrées" du système, les sorties sont les trajectoires : positions, vitesses et accélérations ( $q, \dot{q}, \ddot{q}$ ). L'équation (1.1) est le modèle dynamique inverse car il permet le calcul des entrées à partir des sorties.

L'estimation de  $Xs$  est la solution au sens des moindres carrés du système surdéterminé (1.4) :

$$\widehat{Xs} = \underset{Xs}{\operatorname{argmin}} \|r\|^2 = Ws^+ Y \quad (1.7)$$

où :

- $Ws^+ = (Ws^t Ws)^{-1} Ws^t$  est la matrice pseudo-inverse de  $Ws$ ,
- $\widehat{Xs}$  est la solution des moindres carrés.

L'unicité de la solution  $\widehat{Xs}$  dépend du rang de la matrice  $Ws$ . La perte de rang de  $Ws$  peut avoir deux origines :

- une perte de rang structurelle, qui apparaît quel que soit l'échantillonnage de IDMs. C'est le problème de l'identifiabilité structurelle des paramètres qui est résolu avec le calcul des paramètres minimaux du modèle et qui aboutit à une sélection des colonnes linéairement indépendantes de IDMs que nous appellerons IDM.
- une perte de rang liée au mauvais choix des échantillons des IDM. C'est le problème de la stratégie optimale des mesures qui est résolu en réalisant une identification à partir de mouvements excitants pour les paramètres.

**Identifiabilité structurelle : les paramètres inertiels de base** Les paramètres inertiels standards,  $\beta s$  ne sont pas identifiables. En effet, ils sont nécessaires pour décrire des solides évoluant dans un espace à 6 degrés de liberté (3 pour la translation et 3 pour la rotation). Dans le cas des robots, ces solides sont reliés les uns aux autres par des articulations avec un degré de liberté. Leurs évolutions sont contraintes. Il est donc naturel que tous les paramètres standards ne puissent pas être identifiables. C'est une perte de rang structurelle du modèle.

Cette perte de rang est liée à la structure même du modèle. Elle apparaît quelque soit le mouvement  $q, \dot{q}, \ddot{q}$  échantillonné dans  $Ws$ . Elle traduit le caractère non identifiable des paramètres  $Xs$  par le fait que le paramétrage est surabondant. Ce problème est résolu en calculant un jeu de paramètres identifiables  $X$ , appelés paramètres de base ou encore paramètres minimaux car c'est le nombre minimal des paramètres dynamiques qui permet de calculer les effort moteurs  $\Gamma$ .

Les paramètres inertiels de base, noté  $\beta b$ , sont obtenus en éliminant les paramètres inertiels standards qui n'interviennent pas dans le modèle dynamique (1.3) et en regroupant d'autres paramètres inertiels sous forme de relations linéaires. Une méthode symbolique et des méthodes numériques, basées sur la factorisation QR ou SVD d'une matrice  $Ws$  calculée avec un échantillonnage aléatoire de IDMs, ont été proposées dans [Gau90], [GK90], [Gau91] et implantées dans un logiciel de calcul automatique des modèles de robots SYMORO+ ([KC97]). A l'issue de cette étape de simplification, le jeu minimal de paramètres constituant les paramètres identifiables du modèle dynamique est obtenu :

$$X = [X_1^t \quad \cdots \quad X_n^t]^t \quad X_i = [\beta b_i^t \quad X_i^f]^t \quad (1.8)$$

Le vecteur des paramètres inertiels de base s'écrit :

$$\beta b = [\beta b_1^t \quad \cdots \quad \beta b_n^t]^t$$

$X$  est le vecteur des paramètres dynamiques identifiables, constitués des paramètres inertiels de base et des paramètres de frottement. Le modèle dynamique (1.3) s'exprime alors sous une forme simplifiée et minimale en nombre de paramètres par :

$$\Gamma + \mathbb{Q} = \text{IDM}(q, \dot{q}, \ddot{q}) X \quad (1.9)$$

où  $\text{IDM}(q, \dot{q}, \ddot{q})$  est le régresseur minimal associé au vecteur  $X$  des paramètres minimaux.

La méthode numérique est présentée car elle est directement liée avec la logique du manuscrit.

## 1.1. PROBLÈMES INVERSESES

Dans le cas de cette modélisation où le modèle est linéaire par rapport aux paramètres, le problème de l'identifiabilité des paramètres revient à sélectionner dans IDMs une matrice de rang plein. En effet, les paramètres ne sont pas identifiables si et seulement si la matrice IDMs n'est pas de rang plein ce qui implique que certaines colonnes de IDMs sont colinéaires avec d'autres colonnes. Pour détecter ces colonnes, IDMs est échantillonné sur  $e$  points aléatoires  $q, \dot{q}, \ddot{q}$  pour construire une matrice d'observation  $Ws$  dont nous allons extraire les colonnes indépendantes.

La décomposition QR permet de détecter ces colonnes. C'est une méthode classique d'analyse numérique matricielle permettant de décomposer une matrice rectangle en une matrice de vecteurs orthonormaux et une matrice triangulaire supérieure.

$$Ws = Q \cdot R \quad (1.10)$$

—  $Q$  est une matrice orthonormale de dimension  $m \times 13n$  ( $m = e \times p$ )

—  $R$  est une matrice triangulaire supérieur de dimension  $13n \times 13n$ .

L'égalité 1.10 implique que si un élément diagonal de  $R$  est nul, par exemple  $R_{jj} = 0$ , ceci implique que la colonne correspondante dans IDMs :  $IDMs_{:,j}$  peut être construite comme une combinaison linéaire des colonnes situées avant  $j$ . Nous notons  $p$  le nombre d'éléments diagonaux non nuls.  $Ws$  est alors réorganisée en une partie  $Ws_{id}$  qui comprend les  $p$  colonnes dont l'élément diagonal correspondant dans  $R$  est non nul et une autre partie  $Ws_{nid}$  dont l'élément diagonal correspondant  $R$  est nul. Nous réorganisons  $Q$ ,  $R$  et  $Xs$  dans la même logique. Nous obtenons :

$$(Ws_{id} \quad Ws_{nid}) \cdot \begin{pmatrix} Xs_{id} \\ Xs_{nid} \end{pmatrix} = (Q_{id} \quad Q_{nid}) \cdot \begin{pmatrix} R_{id} & R_{nid} \\ \emptyset_{id} & \emptyset_{nid} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Xs_{id} \\ Xs_{nid} \end{pmatrix} \quad (1.11)$$

—  $R_{id}$  est de dimension  $p \times p$  et est de rang plein car c'est une matrice triangulaire supérieur dont aucun élément diagonal n'est nul et  $R_{nid}$  est de dimension  $p \times (13n - p)$

—  $\emptyset_{id}$  est une matrice de zéro de dimension  $(13n - p) \times p$  et  $\emptyset_{nid}$  est une matrice de zéro de dimension  $(13n - p) \times (13n - p)$

Tout calcul fait :

$$(Ws_{id} \quad Ws_{nid}) \cdot \begin{pmatrix} Xs_{id} \\ Xs_{nid} \end{pmatrix} = Q_{id} R_{id} (Xs_{id} + R_{id}^{-1} \cdot R_{nid} Xs_{nid}) \quad (1.12)$$

La matrice d'observation par rapport aux paramètres de base est  $W = Ws_{id}$  et les paramètres de base sont  $X = Xs_{id} + R_{id}^{-1} \cdot R_{nid} Xs_{nid}$ .

Ce résultat nous permet de calculer le gradient du modèle dynamique inverse par rapport aux paramètres de base, IDM, comme la sélection des colonnes du gradient par rapport aux paramètres standards.

$$IDM(q, \dot{q}, \ddot{q}) = IDMs(q, \dot{q}, \ddot{q})_{id} \quad (1.13)$$

avec IDM de plein rang.

**Biais des moindres carrés** Avec le résultat précédent, l'échantillonnage du modèle minimal (1.9) sur une trajectoire réelle permet d'obtenir un système linéaire minimal surdéterminé de plein rang structurel :

$$Y = WX + r \quad (1.14)$$

où  $W$  est la matrice ( $m \times p$ ) d'observation minimale, de plein rang structurel. Les paramètres sont la solution des moindres carrés ordinaires de (1.14) :

$$\hat{X} = \underset{X}{\operatorname{argmin}} \|r\|^2 = W^+ Y \quad (1.15)$$

Lors de la mise en œuvre pratique de cette méthode, les mesures expérimentales ou les estimations de  $\Gamma(t_i)$ ,  $Q(t_i)$ ,  $q(t_i)$ ,  $\dot{q}(t_i)$ ,  $\ddot{q}(t_i)$  sont bruitées.  $t_i$ ,  $i = 1 \dots e$ , sont les instants d'échantillonnage des mesures. Il en résulte que les matrices  $Y$  et  $W$  sont perturbées et que l'estimation des moindres carrés peut présenter un biais lorsque ces matrices aléatoires ne sont pas indépendantes. Or, les essais s'effectuent en boucle fermée, il y a donc nécessairement une dépendance entre le bruit sur le couple et le bruit sur la position.

Les coefficients du régresseur  $\operatorname{IDM}(q, \dot{q}, \ddot{q})$ , sont des fonctions non linéaires de  $q, \dot{q}, \ddot{q}$  et il est pratiquement impossible de calculer l'effet théorique de ces perturbations sur le biais de l'estimation. On adopte donc une stratégie qui vise à minimiser leurs effets en agissant sur deux points :

- filtrage des données pour calculer un système filtré équivalent à (1.14), mais peu perturbé,
- identification à partir d'un mouvement riche en informations qui excite les paramètres, appelé mouvement excitant.

**Planification** Dans le paragraphe précédent, il est question de procéder à l'identification à partir d'un " mouvement riche en informations ". Il s'agit maintenant de trouver un critère quantitatif permettant de représenter ce concept qualitatif. Ainsi, nous pourrions comparer plusieurs mouvements entre eux, *avant leurs réalisations*, et déterminer ceux qui sont les meilleurs vis à vis de ce critère. Deux représentations d'un " mouvement riche en informations " sont classiquement utilisées :

- un critère sur la précision moyenne de l'estimation : il s'agit d'améliorer globalement le vecteur des paramètres identifiés par rapport à une perturbation.
- un critère sur la précision absolue de l'estimation : il s'agit d'améliorer l'écart-type sur chacun des paramètres.

Nous modifions légèrement ces critères pour prendre en compte la précision relative de l'estimation. Nous montrons que ceci rejoint une interprétation physique du concept d'un "mouvement riche en informations". Dans la suite, nous présentons ces différents critères. Une application au compacteur illustre le choix de mouvements excitants.

**Précision moyenne de l'estimation : conditionnement et perturbations** Considérons le système (1.4) avec  $m = p$  (par simplicité, l'étude s'effectue sur un système carré), de solution  $X$  tel que :

$$Y = WX \quad (1.16)$$

Soit  $X_{\delta Y}$  la solution du système perturbé sur  $Y$  :

$$Y + \delta Y = WX_{\delta Y} \quad (1.17)$$

$X_{\delta Y}$  vérifie la relation suivante ([GvL96]) :

$$\frac{\|X_{\delta Y} - X\|}{\|X\|} \leq \operatorname{cond}(W) \frac{\|\delta Y\|}{\|Y\|} \quad (1.18)$$

## 1.1. PROBLÈMES INVERSESES

$\text{cond}(W)$  est le conditionnement de la matrice  $W$ , relativement à la norme 2. Ce terme est analysé plus loin dans ce paragraphe.

Soit  $X_{\delta W}$  la solution du système perturbé sur  $W$ , dans le cas de petites perturbations  $\delta W$  :

$$Y = (W + \delta W)X_{\delta W} \quad (1.19)$$

$X_{\delta W}$  vérifie la relation suivante :

$$\frac{\|X_{\delta W} - X\|}{\|X\|} \leq \text{cond}(W) \frac{\|\delta W\|}{\|W\|} = \frac{\|\delta W\|}{\Sigma_p(W)} \quad (1.20)$$

$\Sigma_p(W)$  est la plus petite valeur singulière de  $W$ .

Par soucis de simplicité, nous nous sommes limités au cas d'une matrice carrée. Il existe des relations similaires pour un système surdéterminé ( $r \times p$ ) et lorsque  $Y$  et  $W$  sont perturbés simultanément (voir ([GvL96]) pour une présentation détaillée).

Le conditionnement et la plus petite valeur singulière sont calculés numériquement à partir de la décomposition en valeurs singulières (SVD) de  $W$ , sous la forme :

$$W = USV^t \quad (1.21)$$

où  $U$  ( $m \times m$ ) et  $V$  ( $p \times p$ ) sont deux matrices orthogonales en colonnes et en lignes telles que :

$$U^t U = U U^t = I_m, \quad V^t V = V V^t = I_p \quad (1.22)$$

où  $I_m$  (resp.  $I_p$ ) est la matrice  $m \times m$  (resp.  $p \times p$ ) identité.

$$S = \begin{bmatrix} \Sigma(W) & & \\ & \mathbf{0}_{(m-p) \times p} & \end{bmatrix}; \Sigma(W) = \text{diag}(\Sigma_i(W)) = \begin{bmatrix} \Sigma_1(W) & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & \Sigma_p(W) \end{bmatrix} \quad (1.23)$$

$$\Sigma_1 \geq \Sigma_2 \geq \cdots \geq \Sigma_p \geq 0 \quad (1.24)$$

La diagonale de  $\Sigma(W)$  contient les valeurs singulières de  $W$  classées par ordre décroissant. Le conditionnement en norme 2 de  $W$  est le rapport de la plus grande valeur singulière sur la plus petite :

$$\text{cond}(W) = \frac{\Sigma_1(W)}{\Sigma_p(W)} \quad (1.25)$$

Les relations (1.18), (1.20), montrent que le conditionnement de  $W$  doit être proche de un avec des valeurs singulières grandes. Cependant le conditionnement en norme 2 fournit un critère d'incertitude en norme 2, c'est-à-dire une mesure de l'incertitude moyenne sur l'ensemble des composantes de  $\hat{X}$ , qui ne prend pas en compte un éventuel déséquilibre de ces composantes. D'où la nécessité d'estimer les incertitudes sur chaque composante de  $\hat{X}$  ([PG93]).

**Précision absolue de l'estimation** Dans cette partie, nous utilisons des résultats classiques de statistique établis en supposant que dans (1.14),  $W$  est déterministe et  $r$  est un bruit additif indépendant de moyenne nulle et de matrice de variance-covariance :

$$C_{rr} = E(rr^T) = \sigma_r^2 I_m \quad (1.26)$$

où  $E$  est l'espérance mathématique et  $I_m$  est la matrice identité de dimension  $m \times m$ . La matrice de variance-covariance de l'erreur d'estimation et les écarts-types sont alors estimés par les expressions suivantes :

$$C_{\hat{X}\hat{X}} = E[(X - \hat{X})(X - \hat{X})] = \sigma_r^2 (W^T W)^{-1} \quad (1.27)$$

En utilisant la décomposition en valeurs singulières (SVD) ([GvL96]) de  $W$  (1.27), il vient :

$$C_{\hat{X}\hat{X}} = \sigma_r^2 V \Sigma^{-2} V^T \quad (1.28)$$

En notant  $\sigma_{\hat{X}_i}^2 = C_{\hat{X}_i \hat{X}_i}$  les coefficients sur la diagonale de  $C_{\hat{X}\hat{X}}$ , on définit l'écart-type relatif par :

$$\sigma_{\hat{X}_{ri}} = \frac{\sigma_{\hat{X}_i}}{|\hat{X}_i|} \quad (1.29)$$

La variance  $\sigma_r^2$  de l'erreur est estimée *a posteriori* par la relation :

$$\hat{\sigma}_r^2 = \frac{\|Y - W\hat{X}\|^2}{m - p} \quad (1.30)$$

Dans le cas idéal où  $\text{cond}(W) = 1$ , on a  $\Sigma_1(W) = \Sigma_2(W) = \dots = \Sigma_p(W)$ , soit dans (1.28) :

$$C_{\hat{X}\hat{X}} = \left( \frac{\sigma_r}{\Sigma_p(W)} \right)^2 I_p \quad (1.31)$$

On obtient la même incertitude absolue sur toutes les composantes de  $\hat{X}$  :

$$\sigma_{\hat{X}_i} = \frac{\sigma_r}{\Sigma_p(W)}, \quad i = 1 \dots p \quad (1.32)$$

Cette relation suggère un premier critère d'excitation à minimiser proche de (1.25), de la forme :

$$f_1(W) = \text{cond}(W) + \frac{1}{\Sigma_p(W)} = \frac{1 + \Sigma_1(W)}{\Sigma_p(W)} \quad (1.33)$$

Ce critère tend à uniformiser les écarts types absolus  $\sigma_{\hat{X}_i}$ . Il en résulte que les petits paramètres sont mal estimés dans le cas où  $\hat{X}$  est déséquilibré, c'est à dire lorsque certains paramètres ont des valeurs d'un ordre de grandeurs supérieurs à d'autres paramètres, ce qui est usuel. Dans ce cas, l'écart type relatif est très important :

$$\sigma_{\hat{X}_{ri}} \text{ est grand si } |\hat{X}_i| \text{ est petit, à } \sigma_{\hat{X}_i} \text{ constant.}$$

**Précision relative de l'estimation** Un deuxième critère a été proposé dans [PG93], [Pre94] pour calculer des mouvements qui équilibrent les écarts types, relativement à des valeurs a priori  $\bar{X}$  de  $X$ . Les connaissances a priori  $\bar{X}$  peuvent provenir des données constructeur ou d'une première estimation obtenue sur des mouvements optimisés suivant le critère  $f_1(W)$  (issue de l'équation 1.33). En pondérant l'observation  $W$  et le vecteur des paramètres  $X$  dans (1.4), on obtient un nouveau système avec des paramètres  $X_e$  équilibrés :

$$Y = W \text{diag}(\bar{X}) \text{diag}^{-1}(\bar{X}) X + r = \Phi X_e + r \quad (1.34)$$

où  $\text{diag}(\bar{X})$  est une matrice diagonale ( $p \times p$ ) avec les valeurs de  $\bar{X}$  sur sa diagonale.

$$\Phi = W \text{diag}(\bar{X}) = [\Phi_{:,1} \quad \cdots \quad \Phi_{:,p}] = [W_{:,1} \bar{X}_1 \quad \cdots \quad W_{:,p} \bar{X}_p] \quad (1.35)$$

où  $\Phi_{:,i}$  et  $W_{:,i}$  désignent les colonnes  $i$  de  $\Phi$  et  $W$  respectivement.  $\Phi$  représente la matrice d'observation  $W$  dont les colonnes sont pondérées par les valeurs a priori  $\bar{X}$ . Ce système équilibré se résout comme le précédent (1.4). En particulier, dans le cas idéal où  $\text{cond}(\Phi) = 1$ , l'incertitude absolue est la même sur tous les coefficients de  $\hat{X}_e$ , c'est-à-dire la même incertitude relativement aux connaissances *a priori* sur tous les coefficients de  $X$  :

$$\sigma_{\hat{X}_e} = \frac{\sigma_r}{\Sigma_p(\Phi)} = \frac{\sigma_{\hat{X}_i}}{|X_i|} = \text{constante}, \quad i = 1, \dots, p \quad (1.36)$$

Ce résultat suggère d'utiliser le critère  $f_2(\Phi)$  :

$$f_2(\Phi) = \text{cond}(\Phi) + \frac{1}{\Sigma_p(\Phi)} = \frac{1 + \Sigma_1(\Phi)}{\Sigma_p(\Phi)} \quad (1.37)$$

La relation :

$$\text{cond}(\Phi) \geq \frac{\max_i \|\Phi_{:,i}\|}{\min_i \|\Phi_{:,i}\|} \quad (1.38)$$

autorise l'interprétation suivante du critère  $f_2(\Phi)$ . Un mouvement qui minimise  $f_2(\Phi)$  tend à équilibrer les contributions des paramètres *a priori*,  $\Phi_{:,i} = W_{:,i} \bar{X}_i$ , dans le vecteur des mesures *a priori*  $\bar{Y} = W \bar{X}$ . La norme  $\|W_{:,i}\|$  doit être grande pour rendre visible un petit paramètre  $\bar{X}_i$  dans  $\bar{Y}$  et ainsi permettre son identification. Ce critère rejoint une interprétation physique d'un " mouvement riche en informations ". Il faut que chacun des paramètres inertiels ait une contribution égale dans les couples et forces mesurées.

Ceci peut être effectué par un mouvement excitant tous les paramètres ou par plusieurs mouvements. Chacun des mouvements permettant d'exciter un groupe de paramètres différent. C'est alors l'ensemble de ces mouvements séquentiels excitants qui fournira un système équilibré pour l'identification. Il faut bien noter ici que si les mouvements sont séquentiels, l'identification reste globale. Une identification séquentielle sur des mouvements séquentiels amène à des cumuls d'erreurs préjudiciable pour tous les paramètres identifiés.

**Analyse d'un mouvement** Une fois les mouvements excitants réalisés, il faut les analyser. L'objet de cette section est de fournir les outils permettant de synthétiser les informations pertinentes pour chaque mouvement. Nous présentons deux outils importants : la dérivation numérique et le filtrage parallèle.

**Dérivation** La dérivation procède de deux étapes : une différentiation centrée, et un filtrage passe bas.

**Différence centrée** Pour le calcul de la matrice d'observation  $W$ , il faut mesurer les positions, vitesses et accélérations intervenant dans les équations du modèle dynamique. Très peu de systèmes sont instrumentés de manière à mesurer l'ensemble de ces variables. Pour la majeure partie des articulations rotoïdes, c'est l'angle de rotation qui est mesuré, généralement avec un codeur incrémental. Dans ce cas, les informations de vitesse et accélération de rotation sont obtenues par dérivation numérique. La dérivation des signaux numériques de codeur doit se faire avec certaines précautions, ([Gau97]). On choisit l'approximation de la dérivée continue  $\dot{q}(t_k)$  par la différence centrée pour sa simplicité et l'absence de distorsion de phase.

$$\hat{q}(t_k) = \frac{q(t_{k+1}) - q(t_{k-1}))}{2T} \quad (1.39)$$

D'un point de vue temporel, cette approximation implique une erreur déterministe dans le calcul de la dérivée car ce n'est qu'une approximation de la dérivée continue  $\dot{q}(t_k)$ . Si on suppose que la position est continûment dérivable 2 fois ( $\mathcal{C}_2$ ), alors on peut écrire le développement de TAYLOR :

$$q(t_{k+1}) = q(t_k) + T\dot{q}(t_k) + \frac{T^2}{2}\ddot{q}(t_k + \alpha T) \quad (1.40)$$

avec  $0 \leq \alpha \leq 1$  On obtient la majoration de l'erreur  $\tilde{q}(t_k) = \dot{q}(t_k) - \hat{q}(t_k)$  suivante :

$$\|\tilde{q}(t_k)\| \leq \frac{1}{2}T \max_{t \in [t_{k-1}, t_{k+1}]} \|\ddot{q}(t)\| \quad (1.41)$$

On en déduit que l'estimation de la dérivée d'un signal par la différence centrée tend vers la dérivée continue quand  $T$  tend vers 0.

D'un point de vue fréquentiel, la distorsion d'amplitude du filtre (1.39) par rapport à la dérivée continue est caractérisé par une bande passante à  $f_e/4$  (FIG. 1.1). De ce point de vue, la limite fréquentielle de l'estimation de l'accélération est donc  $f_e/8$ . Or pratiquement, la limite fréquentielle est beaucoup plus faible. Ceci est du au fait que la position est souvent fournie par un codeur, et donc d'après l'équation (1.39), le bruit sur la position est multiplié par environ  $f_e^2$ . Pratiquement, le bruit sur l'accélération est 100 millions de fois plus important que le bruit sur la position lorsque l'échantillonnage est de 10 kHz. Pour réduire ce bruit, nous proposons un filtrage passe bas décrit dans le paragraphe suivant.

**Filtrage passe bas** Une mesure est constituée du signal et du bruit de mesure. D'un point de vue fréquentiel, le signal est concentré dans une bande de fréquence qui dépend de la physique du système alors que le bruit de mesure couvre généralement toutes les fréquences. Dans nos applications, les informations pertinentes sont basses fréquences. Or lorsque nous dérivons, nous multiplions par un gain très important la partie haute fréquence des mesures (ce qui est illustré par la figure (FIG. 1.1)), c'est-à-dire que nous privilégions le bruit au dépend du signal utile. C'est pourquoi, les signaux sont filtrés par un filtre passe bas pour atténuer les bruits hautes fréquences des mesures avant d'être dérivés numériquement. Le choix de la fréquence de coupure est fait à partir d'une analyse fréquentielle des mesures. Du point de vue de l'identification, si l'on choisit une bande de fréquences trop large, l'écart-type sur le bruit de mesure  $\sigma_r$  va être grand et si l'on

choisit une bande de fréquences trop étroite, les critères d'excitation ne seront pas bons. D'un point de vue pratique, le filtre de Butterworth d'ordre  $n_{but}$  est choisi pour sa réponse plate dans la bande passante. Compte tenu de l'identification hors ligne, un filtrage non causal aller et retour (procédure `filtfilt` de Scilab, Python ou Matlab) est utilisé. Le choix de ce type de filtrage garantit l'absence de distorsion de phase des signaux numériques filtrés. Pour obtenir une atténuation suffisante du filtre sur les dérivées dans les hautes fréquences,  $n_{but} = n_{der} + 2$ , où  $n_{der}$  est l'ordre de la dérivée la plus élevée. Généralement  $n_{der} = 2$ , ce qui correspond au calcul d'une accélération à partir d'une position, donc  $n_{but} = 4$ . Il existe une méthode de calcul de la fréquence de coupure du filtre passe bas utilisé en fonction de la distorsion à une fréquence donnée du filtre passe bande dérivateur-filtre passe bas ([Pha02]). Cette méthode sert à initialiser les paramètres des filtres passe bande pour des dérivées d'ordre élevé. Ces réglages sont ensuite affinés avec une approche par une suite d'essais pour obtenir des réglages satisfaisant du point de vue des indicateurs statistiques de la qualité de l'identification. La figure FIG. 1.1 résume le principe de la dérivation et du filtrage des signaux numériques, où il faut que :

- la fréquence d'échantillonnage soit suffisamment grande pour que l'estimation de la dérivée soit bonne dans la bande de fréquences étudiée,
- l'ordre du filtre passe bas soit suffisamment grand pour que le filtre passe bande ait une bonne atténuation dans les hautes fréquences,
- la fréquence de coupure du filtre passe bas doit correspondre à la dynamique du système.

**Application au compacteur** Dans l'exemple de la bille du compacteur travaillant en ligne droite, le stator du moteur hydraulique n'a pas de mouvement de rotation par rapport au repère de l'atelier, on a la relation suivante :

$$\dot{\omega}_j^z = \ddot{q}_j \quad (1.42)$$

Il est alors possible de construire la matrice d'observation  $W$  à partir de  $q_j$ ,  $\dot{q}_j$  et  $\ddot{q}_j$ .  $q_j$  est mesuré à l'aide d'un codeur incrémental au niveau du moteur hydraulique. Les vitesses et accélérations,  $\dot{q}_j$  et  $\ddot{q}_j$ , sont estimées à partir de  $q_j$  par dérivation numérique et filtrage. Les paramètres de réglage du filtre passe-bas de Butterworth sont les suivants :

- $n_{but} = 4$ , car il y a une double dérivation numérique,
- $F_c = 1$  Hz, car la dynamique des essais réalisées se situe entre 0 et 1 Hz.

**Filtrage parallèle** L'analyse fréquentielle effectuée pour le calcul des dérivées numérique peut être appliquée au modèle d'identification dans son ensemble. Il faut déterminer la bande fréquentielle dans laquelle le modèle du système mécanique est pertinent. Pour cela, une analyse fréquentielle des signaux est réalisée. Ensuite, pour concentrer l'identification dans la bande de fréquences déterminée, nous effectuons un filtrage parallèle passe bas de  $Y$  et de  $W$ . La distorsion de ce procédé de filtrage parallèle de  $Y$  et de chaque colonne de  $W$  n'affecte pas la solution du système linéaire (1.4) ([Ric91]). C'est pourquoi, nous choisissons un filtre de Tchebychev pour ses propriétés de coupure. Avec le filtrage parallèle de  $Y$  et de  $W$ , nous obtenons un système dont la représentation temporelle est redondante par rapport à la représentation fréquentielle : une ligne du système peut être calculée en interpolant d'autres lignes. Nous devons donc décimer notre système et sélectionner une ligne sur  $F_{ech}/2F_c$  où  $F_{ech}$  est la fréquence d'échantillonnage. Nous obtenons alors l'équation suivant que nous suffixons par  $d$  pour décimé :

$$Y^d = W^d X \quad (1.43)$$

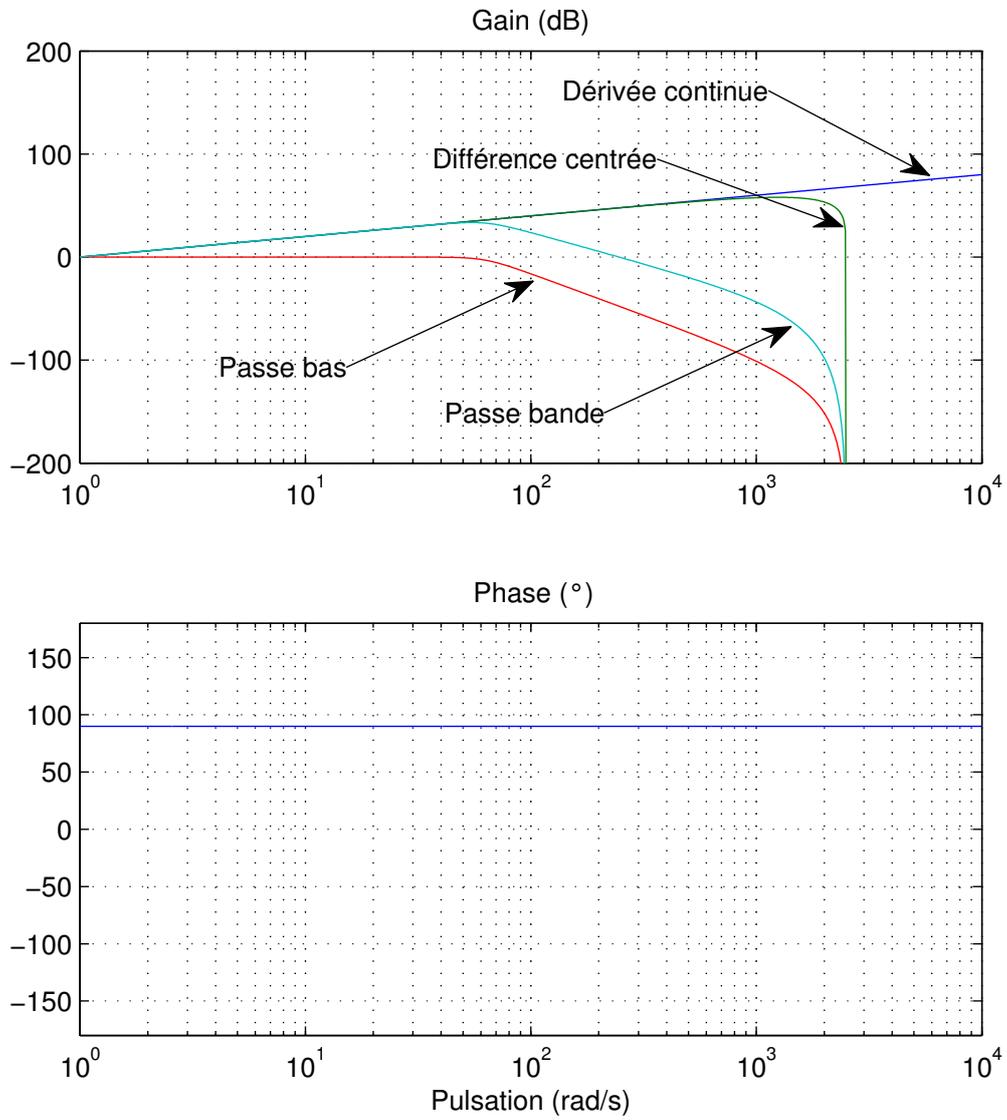


FIG. 1.1 – Estimation de la dérivée d'un signal

**Application au compacteur** Dans le cas de la bille du compacteur, l'acquisition des signaux a été faite à la fréquence de 10kHz pour des raisons de traitement du signal spécifique ([LVG03a]). Il est donc nécessaire de filtrer et décimer les colonnes de la matrice d'observation  $W$  ainsi que le vecteur des mesures  $Y$ . La fréquence de coupure du filtre passe-bas est réglée à 1Hz (pour ne retenir que la bande de fréquence où se situe la dynamique de la bille), il a donc fallu retenir une ligne sur 5000. Sur une acquisition de 30 secondes, la taille de la matrice d'observation initialement de 300000 lignes et 5 colonnes s'est réduite à une matrice  $60 \times 5$ .

**Résolution** Lorsque tous les mouvements planifiés ont été réalisés, nous obtenons un ensemble de systèmes d'équations. Chaque système correspond à une expérimentation. Tous ces systèmes doivent être assemblés de façon cohérente. C'est pourquoi, ils sont pondérés avant d'être assemblés : il s'agit de pondérer chaque essai par la confiance que nous lui attribuons. Pour mettre en œuvre cette pondération, nous utilisons une décomposition QR du système (1.4). L'assemblage harmonieux des équations issues de la phase expérimentale est décrit dans la deuxième partie de cette section. L'étape suivante est la résolution de ces équations. Le point important de ce processus est l'estimation de l'incertitude sur les paramètres identifiés. Cette estimation est un critère important de qualité de l'identification. L'étape finale est la validation des résultats obtenus.

**Réduction sous forme QR** Une transformation QR du système précédent (équation 1.43) donne :

$$W^d = Q^d \cdot R^d \quad (1.44)$$

avec  $Q$  matrice orthonormale et  $R$  matrice triangulaire supérieure.

Il suffit dans la suite de ne sauvegarder que  $R^d$ ,  $Q^{dT} Y^d$ ,  $(r^d)^2$  et le nombre d'équations du système décimé que nous noterons  $m^d$ . Ce dernier paramètre permettant de calculer la variance du système. Pour continuer l'exemple précédent, nous avons après filtrage parallèle une matrice d'observation comprenant 60 lignes et 5 colonnes. Après la réduction sous forme QR, nous retenons une matrice triangulaire  $5 \times 5$ . Nous voyons ici l'intérêt du filtrage, des moindres carrés et de l'utilisation du QR pour synthétiser l'information : d'une matrice d'observation initiale  $300000 \times 5$  et un vecteur de mesure de couple de dimension 300000, nous aboutissons à une matrice  $5 \times 5$ , un vecteur  $5 \times 1$ , un terme d'erreur au carré  $r^2$  et un nombre d'équations  $m^d$  beaucoup plus facile à stocker, manipuler, interpréter.

### Assemblage des matrices

Lorsque les essais ont été réalisés et que les traitements précédents ont été effectués sur chaque mouvement, nous obtenons  $n$  systèmes  $\{R_k, Q_k^T Y_k, r_k^2, m_k\}$ ,  $k$  allant de 1 à  $n$  (nous avons retiré le suffixe  $d$  pour des raisons de présentation). Ces systèmes sont de nature très différentes, sur certains les bruits de mesure et de modèle sont faibles sur d'autres, ces bruits sont élevés. Il faut donc les normaliser. Nous avons choisi de normaliser chaque système par sa variance. Plus la variance est élevée, moins le système sera pris en compte dans le processus d'identification. Ceci a une interprétation probabiliste, chaque système a un bruit de variance différent, il s'agit de normaliser

ces bruits afin d'obtenir un bruit uniforme sur tous les systèmes.

$$R_k^{pondere} = \frac{R^k}{\sigma_k} \quad (1.45)$$

$$Q_k^T Y_k^{pondere} = \frac{Q_k^T Y_k}{\sigma_k} \quad (1.46)$$

avec :

$$\sigma_k^2 = \frac{r_k^2}{m_k - p} \quad (1.47)$$

Ces matrices sont alors concaténées pour obtenir le système final.

$$R^{final} = \begin{bmatrix} R_1^{pondere} \\ \vdots \\ R_n^{pondere} \end{bmatrix} \quad (1.48)$$

$$Y^{final} = \begin{bmatrix} Q^T Y_1^{pondere} \\ \vdots \\ Q^T Y_n^{pondere} \end{bmatrix} \quad (1.49)$$

$$r^{2final} = \sum_{k=1}^{k=n} r_k^2 \quad (1.50)$$

$$m^{final} = \sum_{k=1}^{k=n} m_k \quad (1.51)$$

Ce système subit lui-même une transformation QR :

$$R^{final} = Q \cdot R \quad (1.52)$$

### Identification des paramètres

Les paramètres sont identifiés par moindres carrés sur ce nouveau système (équation 1.52). Nous calculons un vecteur de paramètres en résolvant le système carré obtenu.

$$\hat{X} = R^{-1} \cdot Q^T Y^{final} \quad (1.53)$$

la variance est estimée en calculant :

$$\widehat{\sigma^2} = \frac{r^{2final} + Y^{finalT} Y^{final} - (Q^T Y^{final})^T Q^T Y^{final}}{m^{final} - p} \quad (1.54)$$

### Paramètres essentiels

Si les valeurs des paramètres sont trop déséquilibrées, il est très difficile de diminuer le critère  $f_2(\Phi)$ . Il est alors préférable de simplifier le modèle en éliminant les paramètres  $X_k$  tels que :

$$\sigma_{\hat{X}_{r_k}} = \frac{\sigma_{\hat{X}_k}}{|\hat{X}_k|} > 0,1 \quad (1.55)$$

L'interprétation de ce critère est double. D'une part, seuls les paramètres dont la valeur identifiée a au moins un chiffre significatif sont conservés. D'autre part, la contribution relative des paramètres éliminés dans le calcul des efforts articulaires est faible sur le mouvement optimisé. Les paramètres retenus sont appelés paramètres essentiels. Ils définissent un modèle dynamique simplifié et précis.

Il reste deux détails technique à prendre en compte :

- retirer des paramètres de base, c'est à dire identifiables structurellement, change le la variance ( $\sigma_r^2$ ) de chaque essai, il faut alors refaire l'étape de pondération et d'assemblage des essais avant d'identifier le nouveau jeu de paramètres essentiel ;
- de la même manière que les paramètres qui ne sont pas de base se regroupent sur les paramètres de base selon la méthodologie décrite dans le paragraphe sur les paramètres identifiables, les paramètres non essentiels, c'est à dire non identifiable conjoncturellement, se regroupent sur les paramètres essentiels selon la même méthodologie.

D'un point de vue pratique, ces deux points ne modifient pas les résultats de l'identification et compliquent le processus. Ils sont souvent omis.

Le fait de qualifier un paramètre comme non essentiel n'est pas anodin, il faut s'assurer qu'il n'existe pas de mouvement qui puisse exciter ce paramètre. C'est l'étape de re planification qui utilise les concepts expliqués dans la section 1.1.1 afin de vérifier que ce type de mouvement excitant est impossible compte tenu des limitations mécaniques et des capacités d'actionnement.

### Application au compacteur

Les différents essais ont été réalisés, les données ont été filtrées et assemblées sous la forme d'une matrice d'observation  $W$  et d'un vecteur de mesure  $Y$  eux aussi filtrés et décimés. Il est alors possible d'appliquer les équations des moindres carrés pondérés. Cette application mène aux résultats exprimés dans (TAB. 1.1). Les paramètres  $MX_j$  et  $MY_j$  sont mal identifiés (leur  $\sigma_{\hat{X}}(\%)$  est

Paramètres	Unités	$\hat{X}$	$\sigma_{\hat{X}}$	$\sigma_{\hat{X}}(\%)$
$ZZ_j$	kg.m <sup>2</sup>	214	0,26	0,12
$MX_j$	m.kg	0,82	0,54	65
$MY_j$	m.kg	0,50	0,52	105
$FV_j$	N.m.s	72,4	0,33	0,45
$FS_j$	N.m	55,7	1,8	3,2
$\sigma_r = 41,6$ N.m		$\text{cond}(W) = 75$	$\text{cond}(\phi) = 571$	

TAB. 1.1 – Résultats de l'identification des paramètres du modèle de la bille

largement supérieur à 10%), de plus les valeurs identifiées ( $\hat{X}$ ) sont faibles. Cette faible influence de ces paramètres se retrouve dans le conditionnement important ( $\text{cond}(\phi) = 571$ ) ce qui indique qu'au moins un des paramètres n'a pas d'influence dans la prédiction du vecteur de mesure. Nous avons réalisé des mouvements qui augmentent l'excitation de ces paramètres grâce au système de vibration du compacteur. Malgré ces nouveaux mouvements, ces paramètres restent mal identifiés. C'est pourquoi une nouvelle identification a été effectuée en enlevant les paramètres  $MX_j$  et  $MY_j$  du modèle, les résultats obtenus sont donnés dans (TAB. 1.2). Dans ce cas, tous les paramètres sont bien identifiés et contribuent au modèle. Le conditionnement a fortement baissé.

Paramètres	Unités	$\hat{X}$	$\sigma_{\hat{x}}$	$\sigma_{\hat{x}}(\%)$
$ZZ_j$	kg.m <sup>2</sup>	214	0,28	0,13
$FV_j$	N.m.s	71,8	0,34	0,47
$FS_j$	N.m	56,5	1,8	3,2
$\sigma_r = 42,4$ N.m	cond(W) = 49	cond( $\phi$ ) = 52		

TAB. 1.2 – Résultats de l'identification des paramètres du modèle de la bille

## Validation

Nous validons le modèle identifié en vérifiant ses capacités prédictives et en comparant des valeurs identifiées avec des informations a priori.

### Validation des capacités prédictives du modèle identifié

Une fois les paramètres identifiés, nous vérifions les capacités prédictives de notre modèle en s'assurant que le couple prédit correspond au couple mesuré dans les conditions suivantes.

- validation directe : comparaison de  $Y$  et de  $W\hat{X}$ , calculés sur les mêmes mouvements que ceux utilisés pour l'identification, visualisation du signal d'erreur  $r$ . Cette première étape nécessaire afin de vérifier nos hypothèses statistiques sur le bruit  $r$  doit être complétée par une validation croisée,
- validation croisée : la comparaison est effectuée sur des mouvements non utilisés pour l'identification.

**Application au compacteur** Pour valider le modèle, il est possible de comparer les couples calculés à partir des pressions mesurées au niveau du moteur hydraulique et ceux prédits par le modèle. La figure (FIG. 1.2) donne un exemple de cette comparaison qui est une validation supplémentaire de la qualité de l'identification.

### Validation par comparaison avec des données connues

Les données identifiées avec les valeurs a priori sont comparés aux données techniques. Dans le cas du compacteur où il existe deux niveaux de vibrations, nous avons bien vérifié que les paramètres liés au système de vibration, c'est à dire les premiers moments du balourd, variaient de manière cohérente suivant les données constructeurs. Un autre type de validation consiste à ajouter une masse connue, à refaire une identification, et à vérifier que les différences trouvées dans les valeurs des paramètres correspondent aux caractéristiques de la masse ajoutée.

Dans le cas du compacteur, nous avons ajouté un passager dans la cabine du conducteur. A l'issue du processus d'identification, nous avons retrouvé la masse du passager. Nous avons donc détecté une variation de 80kg sur une masse de 10t du compacteur sans le peser!

## Conclusion

Les nombreuses applications menées avec succès ont prouvé que l'identification par modèle inverse et moindres carrés est une approche fructueuse pour les systèmes mécatroniques depuis les robots jusqu'aux engins de chantiers et en général pour tout système dont le modèle inverse

## 1.1. PROBLÈMES INVERSES

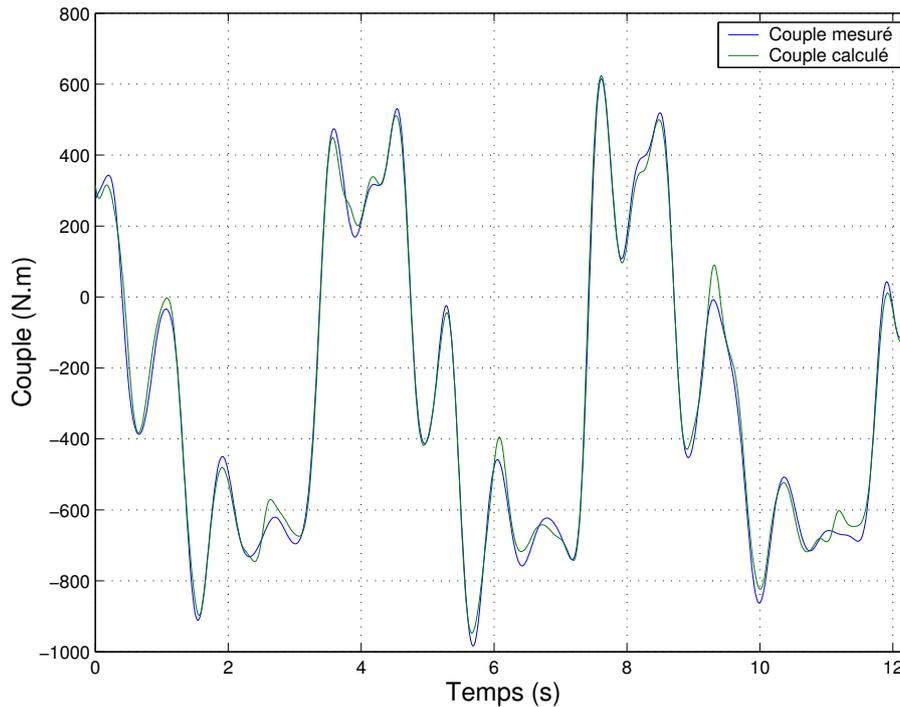


FIG. 1.2 – Comparaison des couples prédits par le modèle dynamique et des couples calculées à partir des pressions mesurées aux bornes du moteur hydraulique

s'exprime linéairement en fonction des paramètres physiques. Voici les étapes principales qui conduisent à la réussite de l'identification :

- exprimer le modèle inverse sous une forme linéaire par rapport aux paramètres physiques,
- calculer les paramètres identifiables,
- utiliser des mouvements riches en information, qui excitent bien les paramètres,
- concevoir un système de mesure adapté aux objectifs de l'identification,
- filtrer les données expérimentales pour obtenir un système linéaire surdéterminé peu perturbé,
- éliminer les paramètres non significatifs pour n'identifier que les paramètres essentiels,
- utiliser les formes factorisées (QR, SVD) pour le calcul numérique des moindres carrés.

En suivant cette méthodologie, il n'a pas été observé de biais détectables avec nos connaissances a priori sur les estimations des paramètres. Cependant, il n'existe pas d'outils statistiques pour détecter un biais en restant dans le cadre des moindres carrés.

### 1.1.2 Outils issus de l'économétrie

Une de mes principales contributions a été de proposer des outils provenant de l'économétrie et notamment la méthode de la variable instrumentale. Une source d'inspiration importante a été le livre d'économétrie préalablement cité ([DM93]). En sortant du cadre des moindres carrés, nous pouvions mettre en place des tests pour détecter des biais.

Nous avons construit un estimateur basé sur des instruments dont nous avons démontré la convergence théorique. Pratiquement, nous avons montré la convergence de cet estimateur sur

un robot industriel 6 axes ([JVG14b]). Le contexte statistique des instruments nous a outillé pour tester nos hypothèses. Ces travaux ont fait l'objet de l'article [JVG13, JVG16]. Ceci a ouvert la voie à d'autres recherches permettant d'identifier en utilisant seulement les mesures d'effort (voir l'article [GJV13]). Ce renouveau a permis de faire le lien avec les méthodes classiques d'identification en boucle fermée, ce qui a été présenté dans l'article [JGJV14].

Dans ce travail collectif, mon apport le plus important concernait les aspects statistiques, notamment, sur la variable instrumentale. C'est cette part de cette recherche que j'ai décidée de présenter dans cette synthèse.

#### IDIM-IV

La méthodologie IDIM-LS a permis l'identification de nombreux robots, mais aussi de systèmes, modélisés comme des robots, tel que le compacteur d'enrobé. Cependant, du point de vue théorique, une des hypothèses de l'utilisation des moindres carrés reste sujette à débat. Il est supposé que la matrice d'observation  $W$  est sans bruit. En effet, si la matrice d'observation est bruitée et si ce bruit est corrélé avec le bruit sur le système, l'estimateur des moindres carrés est biaisé, c'est à dire que si nous refaisons plusieurs fois la même expérimentation et que nous prenons la moyenne des estimateurs des moindres carrés calculés pour chaque expérimentation, cette moyenne sera différente de la vraie valeur des paramètres.

Plus grave, cet estimateur n'est plus convergent. C'est à dire que si nous multiplions les trajectoires différentes, l'estimateur ne convergera pas vers la vraie valeur des paramètres. Par ailleurs, l'écart-type des paramètres est sous évalué car une partie du bruit est considérée comme une information valide par l'estimateur.

Les expérimentations pour l'identification sont effectuées alors que le robot est commandé. Il y a donc une boucle de rétroaction qui corrèle les différentes erreurs. La procédure de filtrage parallèle et de décimation permet de réduire cette corrélation mais il reste toujours un doute car il n'existe pas de test permettant de détecter un éventuel biais en restant dans le cadre des moindres carrés.

Une méthode connue pour pallier à ce problème est la méthode de la variable instrumentale. Nous montrerons que la méthode de filtrage parallèle, qui permet de s'affranchir du biais, n'est qu'un cas particulier de la méthode de la variable instrumentale. Nous proposerons ensuite la construction d'un instrument sans bruit qui engendre un espace vectoriel corrélé avec la matrice d'observation empirique. Ceci permet de construire un estimateur convergent.

**Principes de la IV** L'élément fondamental de toute procédure IV est une matrice de variables instrumentales notée  $F$  de dimension  $n \times l$ . Il est supposé que les colonnes de  $F$  ne sont pas corrélés avec les aléas  $r$ . Il doit y avoir plus d'instruments que de paramètres. C'est à dire  $l \geq p$ .

Au lieu de minimiser la distance entre  $Y$  et  $W$  dans  $\mathbb{R}^n$  qui donne une estimation qui ne converge pas car les aléas  $r$  sont corrélés avec  $W$ , la minimisation s'effectue après avoir projeté  $Y$  dans l'espace vectoriel engendré par  $F$  qui n'est pas corrélé avec les aléas  $r$ . Ceci s'écrit :

$$X_{IV} = \underset{X}{\operatorname{argmin}} \|P_F(Y - WX)\| \quad (1.56)$$

avec

- $P_F$  la matrice de projection orthogonale sur  $F$ .
- $X_{IV}$  est le vecteur des estimations par IV.

## 1.1. PROBLÈMES INVERSESES

Les équations normales deviennent donc :

$$W^t P_F (Y - W \beta_i) = \emptyset \quad (1.57)$$

Nous obtenons :

$$X_{IV} = (W^t P_F W)^{-1} W^t P_F Y \quad (1.58)$$

qui est un estimateur convergent si

- $\lim_{n \rightarrow +\infty} (n^{-1} E(F^t r)) = 0$ ;
- $\lim_{n \rightarrow +\infty} (n^{-1} E(F^t F))$  existe, et est définie positive;
- $\lim_{n \rightarrow +\infty} (n^{-1} E(W^t F))$  est de plein rang  $p$ .

Sous certaines hypothèses d'application du théorème centrale limite, il est démontré que l'estimateur  $X_{IV}$  tend vers une loi normale dont la matrice variance a la forme suivante :

$$V(X_{IV}) = \sigma^2 (W^t P_F W)^{-1} \quad (1.59)$$

— la variance est calculée avec l'équation suivante :

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} (Y - W X_{IV})^t (Y - W X_{IV}) \quad (1.60)$$

**Réinterprétation du filtrage parallèle** Dans ce paragraphe, nous interprétons le filtrage parallèle de la méthode IDIM-LS comme un cas particulier de variable instrumentale. Cette réinterprétation a été effectuée à l'occasion de l'écriture de ce mémoire.

Le filtrage parallèle consiste à appliquer un filtre de bande passante  $[0, f_c]$  sur  $Y$  et sur chaque colonne de  $W$ . En pratique, nous utilisons un filtre de Tchebychev. Du point de vue théorique, c'est équivalent à utiliser la transformée de Fourier discrète (TFD) du vecteur  $Y$  et de la matrice  $W$ , de sélectionner toutes les fréquences inférieures à  $f_c$ , et de faire une TFD inverse pour calculer le vecteur filtré  $Y_f$  et la matrice d'observation dont chacun des colonnes est filtrée  $W_f$ .

Écrivons ceci mathématiquement. Nous notons  $e_n = \exp(-2i\pi/n)$ . Nous définissons la matrice orthonormale  $TF$  dans  $\mathbb{C}^n$  de terme générique  $TF(k+1, l+1) = e_n^{kl} / \sqrt{n}$  avec  $k, l$  allant de 0 à  $n-1$ .

L'inverse de cette matrice orthonormale est la matrice adjointe :

$$TF^{-1} = \overline{TF}^t$$

Effectuer un filtrage parallèle, revient à sélectionner les lignes de  $TF$  qui correspondent à toutes les fréquences inférieures à  $f_c$ . Notons  $TF_{f_c}$  cette matrice. De même, nous notons  $(TF^{-1})_{f_c}$  la matrice issue de la sélection des colonnes correspondant aux fréquences inférieures à  $f_c$  de  $TF^{-1}$ .

La projection dans l'espace vectoriel des signaux dont les fréquences sont inférieures à  $f_c$  est alors réalisée avec l'opérateur :

$$P_{f_c} = (TF^{-1})_{f_c} \cdot TF_{f_c}$$

Le filtrage parallèle revient alors à l'opération suivante :

$$(Y_f, W_f) = P_{f_c} (Y, W)$$

La solution au sens des moindres carrés du système précédent est :

$$X_{mc} = (W_f^t W_f)^{-1} W_f^t Y_f$$

En remplaçant dans la dernière équation,  $Y_f, W_f$  par leur expression en fonction de  $Y, W$ , nous trouvons :

$$X_{mc} = (W^t P_{fc} W)^{-1} W^t P_{fc} Y \quad (1.61)$$

En comparant cette dernière équation avec l'équation du calcul de l'estimateur IV (1.58), nous démontrons que l'utilisation des moindres carrés après un filtrage parallèle mise en œuvre par une transformée de Fourier discrète revient à un estimateur IV dont les instruments sont les colonnes de la matrice  $TF_{fc}$ .

**IDIM-LS comme cas particulier de IV** Précédemment, le filtrage parallèle mis en œuvre dans IDIM-LS a été interprété comme l'utilisation d'une variable instrumentale particulière. Ceci incite à interpréter IDIM-LS comme un cas particulier d'une méthodologie IV. Pour cela, les autres spécificités de IDIM-LS sont analysées sous le prisme de la méthode de la variable instrumentale.

- La décimation. Dans IDIM-LS, le filtrage parallèle s'accompagne d'un sous échantillonnage du système  $(Y_f, W_f)$ . Ce sous échantillonnage a une interprétation très claire dans le cadre de la variable instrumentale. Le sous échantillonnage consiste à ne considérer que les éléments qui sont indépendants. En effet,  $(Y_f, W_f)$  évolue dans l'espace engendré par  $TF_{fc}$ , alors qu'ils ont  $n$  composants car ils sont plongés dans  $\mathbb{R}^n$ . Ces composants sont donc linéairement dépendants entre eux, le sous échantillonnage revient à extraire les éléments indépendants.
- Le calcul de la matrice variance. Le calcul de la matrice variance est exactement la même entre IDIM-LS et la méthodologie IV sauf pour l'estimation de la variance. Celle-ci est estimée par

$$\sigma^2_{iv} = \frac{1}{n} (Y - WX_{IV})^t (Y - WX_{IV})$$

pour la variable instrumentale alors qu'elle est calculée avec la formule suivante :

$$\sigma^2_{ls} = \frac{1}{n_d - p} (Y_f - W_f X_{IV})^t (Y_f - W_f X_{IV})$$

dans le cadre de IDIM-LS ( $n_d$  est le nombre d'équation après sous échantillonnage). Ce ne sont pas les mêmes estimateurs. L'estimateur IV de la variance est toujours plus grand que l'estimateur de IDIM-LS (sous l'hypothèse, réaliste en robotique,  $n_d \gg p$ ).

Ces deux estimateurs correspondent à deux interprétations différentes.

- Dans le cadre de la variable instrumentale, le modèle est considéré comme pertinent pour toutes les fréquences, la variance doit donc prendre tout en compte.
- Dans le cadre de IDIM-LS, l'hypothèse est que le modèle n'est pertinent qu'à basse fréquence, la variance ne doit donc pas être estimée sur les hautes fréquences.
- L'estimation des vitesses et des accélérations.

Dans le cadre de IDIM-LS, un premier filtrage passe-bande permet de calculer la vitesse et l'accélération qui sont ensuite utilisées pour calculer la matrice d'observation.

Dans le cadre de IV, si le filtrage passe bande utilisé dans la méthodologie IV se limite à une différence centrée alors le résultat de l'estimation peut être différent.

En effet, la matrice d'observation contient des termes non linéaires, comme par exemple des vitesses articulaires au carré. Si la position contient un bruit haute fréquence, le calcul de la vitesse par différence centrée va aggraver ce bruit haute fréquence, et lors du passage au carré de la vitesse, ce bruit va se replier, pour partie, dans les basses fréquences. La

## 1.1. PROBLÈMES INVERSES

projection dans l'espace des signaux à basse fréquence ne pourra pas supprimer ce bruit devenu basse fréquence à cause des non linéarités.

En revanche, si le filtrage passe bande utilisé dans la méthode de la variable IV est similaire à celui utilisé dans IDIM-LS, les résultats finaux seront identiques.

Nous avons montré que sous réserve d'un calcul des vitesses et des accélérations supprimant le bruit haute fréquence, IDIM-LS pouvait être vu comme un cas particulier de IV où les instruments sont les colonnes de la matrice de transformée discrète correspondant à la fréquence de coupure du filtre. Seul le calcul de la variance diffère entre les deux méthodes. Cette différence s'explique par la différence des possibilités prédictives du modèle entre les deux méthodes. IDIM-LS limite la prédiction du modèle aux basses fréquences tandis que la méthodologie IV considère que les prédictions du modèle sont valides à toutes les fréquences.

**Modèles Auxiliaires** La principale difficulté de la méthodologie IV est de construire les instruments, c'est à dire un espace vectoriel non corrélé avec le bruit mais corrélé avec la matrice d'observation.

La méthode du modèle auxiliaire dans la méthodologie IV consiste à simuler un modèle à partir d'un premier jeu de paramètres dont les valeurs sont connues a priori ([You11]). L'espace vectoriel construit est considéré comme " sans bruit " (noise free) car complètement construit sans les mesures. Ce seront nos instruments. Si ces instruments sont suffisamment corrélés avec la matrice d'observation, ils permettent, alors, l'identification d'un deuxième jeu de paramètres. Une nouvelle simulation peut être lancée à partir de ces nouveaux paramètres. Ceci va permettre de construire un nouvel espace vectoriel sans bruit qui sera encore mieux corrélé avec la matrice d'observation et donc permettre une deuxième identification en considérant ce nouvel espace vectoriel comme nos nouveaux instruments. Nous pouvons lancer une nouvelle simulation et continuer le processus d'identification des paramètres. C'est un processus itératif.

En robotique, nous avons un modèle auxiliaire " naturel " qui est le modèle dynamique direct. Si nous reprenons la démarche précédente et l'appliquons en robotique. Nous obtenons l'algorithme suivant.

- A partir d'un premier jeu de paramètres standards a priori, simuler le modèle dynamique direct puis calculer le modèle dynamique inverse.
- Construire le modèle dynamique inverse à partir du modèle dynamique inverse simulé, construire la matrice des instruments, identifier les paramètres en projetant la régressande  $Y$  et la matrice d'observation  $W$  sur l'espace vectoriel des instruments. Arrêter l'algorithme si l'écart entre le nouveau jeu de paramètres et celui à l'itération précédente est faible sinon rebrancher sur l'étape précédente.

**Simulation du modèle auxiliaire** Le modèle dynamique direct d'un robot est un double intégrateur. Ce sont des systèmes instable qui sont commandés en boucle fermée pour suivre une trajectoire de référence. La simulation du système robotique doit donc inclure cette boucle fermée.

La simulation du modèle dynamique direct utilise comme entrée la même trajectoire de référence et la même structure de commande que le robot lui-même.

L'asservissement de ces systèmes mécatroniques est spécifié en terme de bande passante et de marge de stabilité. La commande en simulation est réglée afin de respecter les spécifications de la commande du robot réel.

Pour fixer les idées, nous montrons comment cette méthodologie s'applique sur un robot dont chaque articulation motorisée est commandée par un proportionnel dérivé.

le modèle dynamique direct d'une articulation peut se mettre sous la forme suivante :

$$\ddot{q}_j = \frac{1}{M(q)_{j,j}} (p_j + \gamma_j)$$

avec :

- $p_j = -\sum_{i \neq j}^n M(q)_{j,i} \ddot{q}_i - C_j(q, \dot{q})$  est analysée comme une perturbation.
- $\gamma_j$  est le couple articulaire.

Pour régler la commande, l'inertie variable de l'équation précédente est remplacée par une constante égale à l'inertie maximale. C'est une stratégie conservatrice qui garantit une marge de stabilité minimale. Le modèle dynamique direct est simplifié sous la forme d'un double intégrateur :

$$\ddot{q}_j = \frac{1}{J_{j,j}} (p_j + \gamma_j)$$

avec

- $J_{j,j} = \max_q M(q)_{j,i}$

Sur ce modèle, nous pouvons régler un proportionnel dérivé de la forme :

$$v_j = k_{p_j}^a k_{v_j}^a (q_{r_j} - q_j) - k_{v_j}^a \dot{q}_j$$

Les gains  $k_{p_j}^a$  et  $k_{v_j}^a$  sont réglés en fonction de la marge de phase et de la bande passante du système robotique réel.

La difficulté est que nous ne connaissons pas les paramètres du robot qui rentrent dans le calcul des gains.

Notre proposition est d'ajuster ces gains en fonction des paramètres qui ont été identifiés lors de l'itération précédente.

Grâce à cette astuce, le système global simulé avec en entrée la trajectoire de référence et en sortie la trajectoire réelle a toujours les mêmes performances. Ce qui change d'une itération à l'autre, c'est principalement la perturbation qui est rejetée en partie par la commande. C'est pourquoi, nous pouvons écrire que les trajectoires simulées sont similaires quelque soit l'itération à laquelle les paramètres ont été identifiés.

$$q'_S(X_{IV}^k) \approx q'_S(X_{IV}^l) \tag{1.62}$$

- $q'_S(X_{IV}^k)$  est la trajectoire fournie par la simulation du système asservie avec les paramètres standards  $(X_{IV}^k)$  identifiés à l'itération  $k$

Évidemment, plus le modèle sera précis, plus les trajectoires simulées seront proches des trajectoires réelles du robot. Cependant, la boucle fermée maintient fermement la partie basse fréquence de ces trajectoires autour d'un fuseau.

Nous touchons ici du doigt le désavantage de l'utilisation du modèle direct pour l'identification dans les systèmes asservis. La bouclage implique des fonctions de sensibilité faibles. La commande est d'ailleurs conçue pour cela.

Au contraire, le modèle inverse utilise comme régressande la commande qui est directement proportionnelle aux perturbations qui sont, en basse fréquence, les erreurs sur les paramètres. Les fonctions de sensibilités sont donc importantes.

## 1.1. PROBLÈMES INVERSESES

La propriété de stabilité des trajectoires autour de la trajectoire de référence implique que les instruments construits autour ces trajectoires varient peu.

$$W(q_s, \dot{q}_s, \ddot{q}_s, X_{IV}^k) \approx W(q_s, \dot{q}_s, \ddot{q}_s, X_{IV}^l) \quad (1.63)$$

Ils peuvent être considérés comme sans bruit car ils ne sont pas directement construits avec des mesures. Ils sont, en pratique, de pleins rang dès que la trajectoire de référence permet la construction d'une matrice d'observation de référence de plein rang. Ils sont corrélés avec la matrice d'observation. Ils remplissent donc les conditions d'un estimateur convergent selon les propriétés de l'équation 1.58.

**Les valeurs a priori** Une difficulté immédiate de la méthode du modèle auxiliaire est de trouver des paramètres a priori. Grâce à la propriété 1.63, nous avons montré qu'il suffisait de partir d'un modèle dynamique non dégénéré : c'est à dire avec des matrices d'inertie définies positives. En pratique, en partant de valeurs a priori des paramètres standards nulles sauf pour les inerties principales, la convergence de la méthode IV s'effectue en trois itérations. Bref, il n'est pas nécessaire d'avoir des informations a priori précises pour initier l'algorithme.

$$X_{s_{IV}}^0 = 0 \text{ except for } I a_j = 1 \text{ for } j = 1, n$$

### Tests statistiques

L'intérêt de l'approche IV, que nous avons proposée, est de s'appuyer de manière conjointe sur la modèle dynamique inverse et sur une simulation du système robotique construite à partir du modèle dynamique direct. D'un point de vue géométrique, nous avons alors deux espaces vectoriels : l'espace vectoriel engendré par la matrice d'observation  $W$  et celui engendré par les instruments  $F$  construits à partir de la simulation du modèle robotique.

Un avantage majeur de la comparaison de ces deux espaces vectoriels est de pouvoir détecter un biais dans l'estimateur des moindres carrés ce qui est impossible à détecter si nous nous limitons au paradigme des moindres carrés. Cette comparaison permet aussi de détecter d'autres anomalies comme une erreur sur la simulation de la boucle de commande.

Nous allons nous placer dans le cadre des doubles moindres carrés pour montrer comment construire des tests statistiques permettant de détecter ces anomalies.

**Double moindres carrés** Une approche naturelle dans la méthodologie IV est de faire une régression de la matrice d'observation sur la matrice des instruments. Dans le cadre de la robotique, nous pouvons tenir compte de la structure des instrument. En effet, sans bruit, chaque colonne de la matrice instrument devrait être égale à chaque colonne de la matrice d'observation. Dans la suite, nous écrivons les équations qui correspondent à cette idée.

$$Y = W \cdot X + r \quad (1.64)$$

$$W = F \cdot \Pi + V \quad (1.65)$$

avec

- $\Pi$  est la matrice  $b \times b$  des coefficients à identifier reliant la matrice d'observation et la matrice des instruments. Sans bruit, cette matrice est la matrice identité.

La première étape des doubles moindres carrés consiste à calculer un estimateur de  $\Pi$  par les moindres carrés puis à calculer la projection de  $W$  sur les instruments.

$$\Pi_{l_s} = (F^t F)^{-1} F^t W \quad (1.66)$$

$$\widehat{W} = F \Pi_{l_s} \quad (1.67)$$

La comparaison entre la matrice d'observation et la matrice instrument revient à analyser chaque colonne  $k$  de la matrice  $\Pi_{l_s}$ , noté  $\Pi_{l_{sk}}$  et de la comparer avec le  $k$ ème vecteur canonique  $e_k$  (vecteur dont toutes les composantes sont égales à zéro sauf la  $k$ ème). Un test statistique classique : test de Wald peut alors être mis en œuvre pour savoir si l'hypothèse,  $H_0$ , suivante est rejetée.

$$H_0 : \Pi_{l_{sk}} = e_k \quad (1.68)$$

La statistique de Wald est :

$$\eta_k^2 = \frac{(\Pi_{l_{sk}} e_k)^t (F^t F)^{-1} (\Pi_{l_{sk}} e_k)}{b \times \sigma_{v_k}^2} \quad (1.69)$$

qui suit un chi-deux à  $b$  degrés de liberté sous l'hypothèse  $H_0$ .  $\sigma_{v_k}^2$  est un estimateur de l'écart type des aléas sur la matrice d'observation :  $V$ .

Ce test a été mis en pratique sur un robot SCARA, les règles heuristiques suivantes en ont été déduites :

- lorsque le test n'est pas rejeté, il n'y a pas de biais sur les moindres carrés
- lorsque l'hypothèse est rejetée sur les colonnes correspondants à des inerties, un problème de filtrage est probable car les écarts sont dus aux erreurs sur le calcul de l'accélération ;
- lorsque le test est rejeté sur toutes les colonnes, la simulation du système robotique est probablement défectueuse.

De manière paradoxale, ce test est mis en défaut pour toutes les colonnes de la matrice d'observation qui appartiennent à l'espace vectoriel engendré par les instruments car, dans ce cas, le dénominateur est nul. Ce test n'est donc mis en œuvre que pour les colonnes de la matrice d'observation dont une part significative n'appartient pas à l'espace vectoriel engendré par les instruments.

**Analyse du positionnement de cette recherche** Avant ces travaux, l'excellence des techniques d'identification des systèmes mécaniques articulés de l'IRCCyN était reconnue mais relativement isolée des autres méthodes des problèmes inverses. Avec ces travaux, cette méthode s'est enrichie des outils statistiques et exhibe, maintenant, une connexion inattendue avec les méthodes plus classiques d'identification à erreur de sortie. Cette comparaison avec ces méthodes a fait l'objet de la publication [JGJV14].

Les publications en revue associées à ces travaux sont : [GJV13, JVG13, JVG14a, JVG14b, JGJV14, JVG16]).

## 1.2 Automatique

Au cours de ma carrière, j'ai été en prise avec des secteurs très divers de l'automatique.

Au début de ma carrière, j'ai participé à une thèse CIFRE confidentielle qui associait de manière originale des réseaux de neurones, de la distribution des temps de séjours (DTS) et les modes

## 1.2. AUTOMATIQUE

glissants pour la modélisation et la commande des tambours sécheurs enrobeurs (Thèse de Tarek Madani). Dans ce travail d'équipe, mon apport était sur l'application de la DTS à des procédés de fabrication de matériaux pour le génie civil. La partie de mon travail préalable à cette thèse et, donc, non concernée par les clauses de confidentialité est décrite dans le chapitre application de cette synthèse.

Très récemment, les outils de la commande optimale notamment les théorèmes bang-bang et du minimum de Pontryagin m'ont été utiles pour contribuer au travail d'équipe sur l'optimisation multi critère des tables horaires à destination des conducteurs de train. Un article a été accepté sur ce point [LCVR15] mais n'a pas été publié. Ce travail est trop récent pour pouvoir être incorporé dans cette synthèse.

Dans cette partie théorique, deux contributions originales sont mises en exergue.

- La démonstration de la stabilité en freinage frontal d'un véhicule en ligne droite en utilisant les outils de l'automatique non linéaire.
- L'utilisation de la théorie de la viabilité dans le cadre de la sécurité routière.

### 1.2.1 Stabilité du freinage

Dans le cadre d'un travail avec Renault, nous souhaitons établir expérimentalement la relation entre le coefficient de frottement longitudinal et le taux de glissement lors du freinage d'un véhicule en ligne droite. Les objectifs et les résultats de l'étude seront présentés dans le chapitre sur les applications. Dans ce chapitre plus théorique, nous insistons sur le problème théorique soulevé par cette attente. Il s'agit de montrer qu'un freinage à couple constant amène le système dans un état stable pendant lequel une mesure est possible. La démonstration a été publiée dans l'article [AVLC10].

Malgré une instrumentation importante, la métrologie de la relation entre le coefficient de frottement longitudinal et le taux de glissement est difficile pour, principalement, les raisons suivantes :

- le taux de glissement fait intervenir la différence entre deux vitesses et l'intérêt de la recherche est d'analyser les phénomènes physiques à faible taux de glissement, en dessous de 5 %. Il faut donc que la mesure de la vitesse soit connue à un pour mille.
- Lors d'un freinage d'urgence, le blocage des roues s'effectue en deux dixièmes de seconde. Il faut donc de très bonnes mesures à 100 Hz surtout que le phénomène physique qui nous intéressait se situait en début de freinage.
- Par ailleurs, lors d'un freinage d'urgence, des phénomènes transitoires apparaissent comme le transfert de charge dynamique de l'arrière vers l'avant qui rendent la mesure des efforts et donc du coefficient de frottement particulièrement délicate.

Ces difficultés nous ont amenés à proposer une mesure lors d'un régime stabilisé. Pour cela, nous avons proposé d'appliquer un couple de freinage constant sur les roue avant, le freinage sur les roues arrières étant désactivé. En supposant qu'un équilibre stable existe, nous pouvons alors faire la mesure en régime stabilisé. Ceci permet de s'affranchir des effets transitoires et d'être capable de faire des mesures de bonne qualité sur une durée de l'ordre d'une demi seconde.

L'objet de cette contribution est de prouver l'existence d'un équilibre stable.

Nous reprenons la modélisation d'une roue en cours de freinage proposée par le professeur Jean-Pierre Brossard ([Bro09]), illustrée par la figure 1.3 et dont la mise en équations est la suivante.

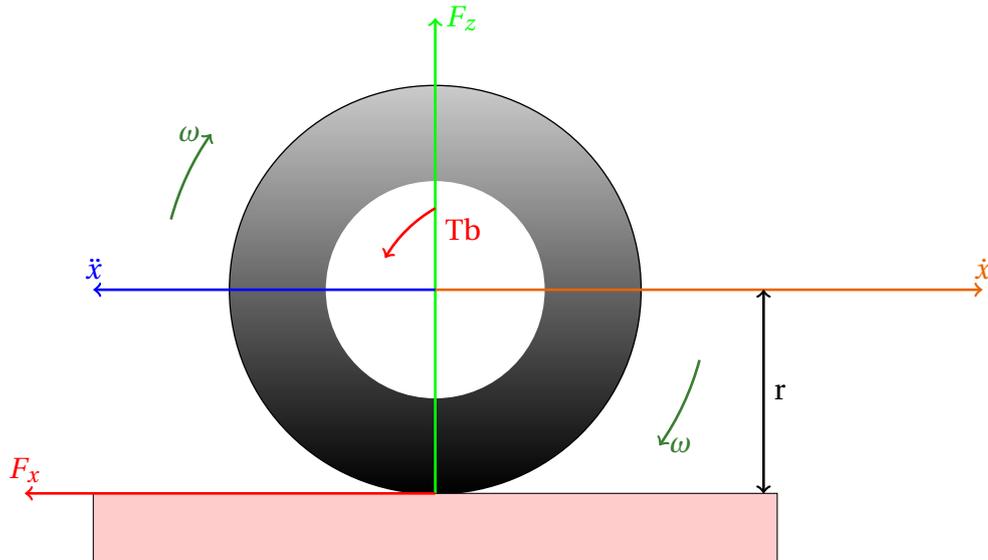


FIG. 1.3 – Modèle monoroue

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= -\mu \left(1 - \frac{r\omega}{\dot{x}}\right) g \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J} \left(r\mu \left(1 - \frac{r\omega}{\dot{x}}\right) m g - T_b\right)\end{aligned}\quad (1.70)$$

$x$ ,  $\dot{x}$ ,  $\ddot{x}$  sont les positions, vitesses et accélérations longitudinales.

$r$  est le rayon de la roue,  $J$  est son inertie,  $\omega$  sa vitesse angulaire,  $m$  est la masse que la roue supporte et sa masse propre,  $g$  est l'accélération de la gravité.

$T_b$  est le couple de frottement exercé sur la roue par le système de freinage. L'équation est écrite de telle sorte que ce couple soit positif.

$\mu$  est le coefficient de frottement longitudinal :

$$\mu = \frac{F_x}{F_z}\quad (1.71)$$

$F_z = m g$  est la réaction du sol qui équilibre la charge, supposée constante dans ce cadre.

$F_x$  est le frottement longitudinale.

$\mu$  est considéré comme une fonction au moins  $C_2$  dépendant du taux de glissement :  $\mu(\kappa)$ <sup>1</sup>. Une représentation usuelle est illustrée sur la figure 1.4.  $\mu_{max}$  est le maximum de la courbe.  $\mu_{bloquée}$  correspond à la valeur du coefficient de frottement lorsque la roue est bloquée. Le taux de glissement est défini, en freinage, par la formule :

$$\kappa = \frac{\dot{x} - r\omega}{\dot{x}}\quad (1.72)$$

1.  $\mu$  varie aussi avec la vitesse mais, dans les conditions expérimentales de l'essai, la vitesse varie peu car la mesure est effectuée au maximum en 0.5s en régime stabilisé.

## 1.2. AUTOMATIQUE

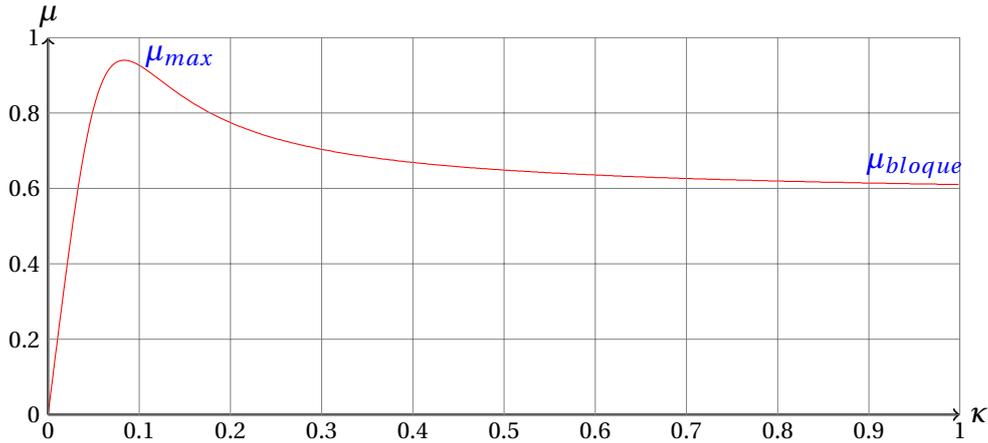


FIG. 1.4 – Coefficient de frottement longitudinal en fonction du taux de glissement

L'étude du modèle dynamique 1.70 se simplifie en remplaçant la variable d'état de la vitesse angulaire de la voiture  $\omega$  par le taux de glissement  $\kappa$ , le système devient :

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= -\mu(\kappa)g \\ \dot{\kappa} &= -\frac{g}{\dot{x}} \left( \mu(\kappa) \left( 1 - \kappa + \frac{mr^2}{J} \right) - \frac{Tb}{Jg} \right)\end{aligned}\quad (1.73)$$

L'objectif de l'étude est d'analyser et donc d'avoir des mesures précises sur le début de cette courbe. Ces mesures seront facilitées si le début de la courbe correspond à une solution stable pour le système 1.73. Concrètement, si un couple de freinage constant est appliqué, est-ce que le système converge vers une solution stable ?

Pour répondre à cette question, nous allons rechercher l'état stationnaire qui correspond à un glissement stationnaire et donc à une décélération stationnaire. Puis, le système sera linéarisé autour de l'état stationnaire. Cette démonstration mathématique a été inspirée du livre de base sur l'automatique non linéaire [KH02] et du livre d'automatique de M. Cotsaftis [Cot97]. Dans l'article que nous avons publié, un théorème de Lyapunov est utilisé pour établir cette démonstration. Dans ce manuscrit, une démonstration plus légère, qui n'a pas recours à ce théorème, est présentée.

Si nous appelons  $\kappa^*$ , l'état stationnaire. Nous écrivons :

$$\kappa = \kappa^* + \tilde{\kappa}$$

Une condition nécessaire des stabilité est que les écarts à l'état stationnaire ( $\tilde{\kappa}$ ) convergent vers 0 asymptotiquement (stabilité de Lyapunov).

A partir du système 1.73, l'état stationnaire,  $\kappa^*$ , vérifie l'équation suivante.

$$\mu(\kappa^*) \left( 1 - \kappa^* + \frac{mr^2}{J} \right) = -\frac{rTb}{Jg}\quad (1.74)$$

- cette équation n'a pas de solution si le freinage est trop important (au dessus de  $\mu_{max}$ ) ;
- cette équation a une solution si le freinage est en dessous de  $\mu_{bloque}$  ;

— cette équation a deux solutions sinon.

Un couple de freinage constant est appliqué en ligne droite de manière suffisamment faible pour que l'équation précédente (1.74) ait au moins une solution. Nous souhaitons vérifier que le taux de glissement se stabilise autour d'une valeur qu'il sera plus aisée de mesurer que lors d'un freinage d'urgence. Lors de la mesure, la vitesse est comprise entre une vitesse minimale  $v_{min}$  car nous ne mesurons pas à vitesse nulle et la vitesse d'essai  $v_{essai}$  qui correspond à la vitesse du véhicule avant freinage.

$$\dot{x} \in [v_{min}, v_{essai}] \quad (1.75)$$

Nous réécrivons l'équation 1.73 en faisant apparaître une fonction  $f$ .

$$\dot{\kappa} = -\frac{g}{\dot{x}} f(\kappa^* + \tilde{\kappa}) \quad (1.76)$$

Nous développons  $f$  en utilisant le théorème de la moyenne.

$$f(\kappa^* + \tilde{\kappa}) = f(\kappa^*) + \frac{\partial f(\kappa_m)}{\partial \kappa} \tilde{\kappa}$$

avec  $|\kappa_m - \kappa^*| \leq \tilde{\kappa}$

Nous faisons apparaître la dérivée en  $\kappa^*$

$$f(\kappa^* + \tilde{\kappa}) = f(\kappa^*) + \frac{\partial f(\kappa^*)}{\partial \kappa} \tilde{\kappa} + \left( \frac{\partial f(\tilde{\kappa}_m)}{\partial \kappa} - \frac{\partial f(\kappa^*)}{\partial \kappa} \right) \tilde{\kappa}$$

Comme nous avons fait l'hypothèse que la dérivée de  $\mu$  est  $C_2$ ,  $f$  hérite de cette propriété et donc, il existe une borne  $\delta$  telle que  $\forall |\tilde{\kappa}| \leq \delta$

$$\left| \frac{\partial f(\tilde{\kappa})}{\partial \kappa} - \frac{\partial f(\kappa^*)}{\partial \kappa} \right| < \left| \frac{\partial f(\kappa^*)}{\partial \kappa} \right|$$

Dès que  $\frac{\partial f(\kappa^*)}{\partial \kappa}$  est non nulle.

Dans cet intervalle,

$$\lambda(\kappa_m) = \frac{\partial f(\kappa^*)}{\partial \kappa} + \left( \frac{\partial f(\tilde{\kappa}_m)}{\partial \kappa} - \frac{\partial f(\kappa^*)}{\partial \kappa} \right)$$

a le même signe que

$$\frac{\partial f(\kappa^*)}{\partial \kappa}$$

Dans cet intervalle, la solution de l'équation différentielle 1.73 peut s'écrire sous la forme :

$$\dot{\kappa} = \tilde{\kappa}_0 e^{-\int_0^t \frac{g\lambda(\kappa_m(u))}{\dot{x}(u)} du}$$

Comme la vitesse longitudinale du véhicule,  $\dot{x}$ , est non nulle et bornée, l'équilibre est exponentiellement stable si

$$\frac{\partial f(\kappa^*)}{\partial \kappa} > 0$$

Et exponentiellement instable si

$$\frac{\partial f(\kappa^*)}{\partial \kappa} < 0$$

et dépendant de la dérivée seconde de  $f(\kappa^*)$  lorsque la dérivée est nulle.

## 1.2. AUTOMATIQUE

Étudions cette dérivée première :

$$\frac{\partial f(\kappa^*)}{\partial \kappa} = \frac{\partial \mu(\kappa^*)}{\partial \kappa} \left( 1 - \kappa^* + \frac{mr^2}{J} \right) - \mu(\kappa^*) \quad (1.77)$$

La condition de stabilité devient :

$$\frac{\partial \mu(\kappa^*)}{\partial \kappa} \left( 1 - \kappa^* + \frac{mr^2}{J} \right) > \mu(\kappa^*) \quad (1.78)$$

Comme dans l'expression précédente, le terme prépondérant est la masse supportée par la route ( $m$  est de l'ordre de 300 kg), la condition de stabilité peut être approximé par la formule suivante :

$$\frac{\partial \mu(\kappa)}{\partial \kappa} > 0$$

Dans la courbe 1.4, cette condition correspond à la partie de la courbe avant d'atteindre l'adhérence maximale  $\mu_{max}$ . Nous avons ainsi démontré que si le couple de freinage est suffisamment faible, c'est à dire, de telle sorte que l'adhérence maximale ne soit pas atteinte, le système se stabilisera autour d'une solution stable de taux de glissement  $\kappa^*$  solution de l'équation algébrique 1.74.

**Analyse du positionnement de cette recherche** Avant ce travail, les livres de dynamique de véhicule (comme le livre fondamental [Bro09]) démontrent la stabilité du système linéarisé mais ne démontrent pas la stabilité du système non linéaire. Cette section démontre que, pour le cas particulier du modèle bicyclette en freinage, le système non linéaire est aussi stable. Nous verrons, dans le chapitre "applications", que c'est aussi le cas du système réel.

La publication en revue associée à ces travaux est : [AVLC10].

### 1.2.2 Théorie de la viabilité

La théorie de la viabilité est née d'une modélisation des concepts du livre du biologiste Jacques Monod : le hasard et la nécessité ([Mon70]).

$$\dot{x}(t) \in F(x(t)) \text{ (Hasard)} \quad \& \quad x(t) \in K \text{ (Nécessité)} \quad (1.79)$$

La théorie de la viabilité permet de définir des métaphores mathématiques illustrant l'évolution d'un système :

- dont la dynamique n'est pas déterministe,
- qui obéit à des contraintes de viabilité,
- qui est régulé par des boucles de rétroaction. Dans ce cas,  $F(x) = \{f(x, u) \mid u \in U(x(t))\}$  et  $u$  est une commande.

Un des objectifs de la théorie est de trouver des mécanismes de sélection des régulateurs (appelés commandes en automatique) permettant de réguler le système. Un mécanisme de sélection est le principe d'inertie : les commandes du système restent constantes tant que la viabilité du système n'est pas en jeu.

Cette théorie a atteint un degré d'abstraction qui lui permet d'offrir des métaphores dans des domaines très différents, de l'économie à la biologie en passant par le traitement d'image ou les sciences cognitives. Plutôt que de présenter la théorie de point de vue le plus général mais aussi le plus abstrait, j'ai préféré présenter un exemple didactique proche de nos motivations. Cet exemple permet d'illustrer les principaux concepts qui seront utilisés pas la suite.

### Un exemple didactique

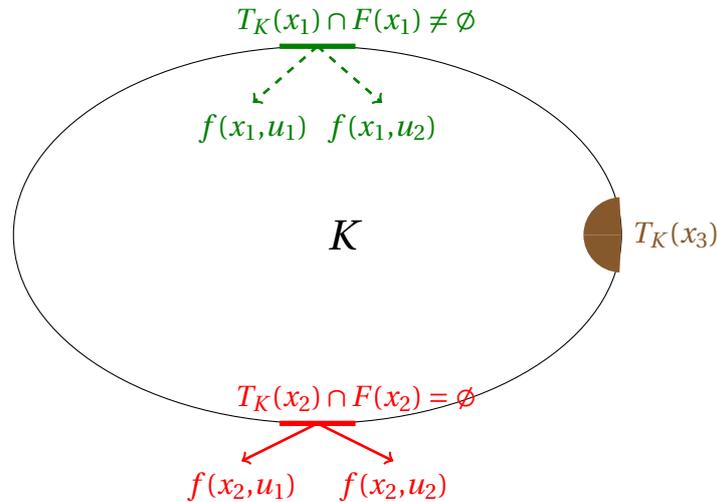


FIG. 1.5 – Contraintes de viabilité, Cônes contingents, domaine de viabilité

Dans la suite, nous prenons l'exemple classique en automatique d'un système déterministe commandé. Ce qui est moins classique, c'est de tenir compte de contrainte sur l'état et sur les commandes.

$$\dot{x} = f(x(t), u(t)) \quad (1.80)$$

$$u(t) \in U(x(t)), \forall t \geq 0 \quad (1.81)$$

$$x(t) \in K, \forall t > 0 \quad (1.82)$$

avec

$u(t)$  est la commande du système

$U(x)$  sont les limites sur les commandes, ces limites peuvent dépendre de l'état du système

$K$  est l'ensemble des contraintes sur l'état

$f(x, u)$  est l'équation du système dynamique

Un état viable  $x_0$  est un état tel qu'il existe une commande  $u(t)$  respectant les limites telle que la trajectoire issue de  $x_0$  reste dans  $K$ .

De même,  $K$  est viable pour le système  $f$  et  $U$  si  $\forall x \in K, x$  est viable.

L'un des enjeux de la théorie de la viabilité est de savoir si  $K$  est viable sans avoir besoin de le vérifier pour chacun de ses points  $x$ . Une idée simple est illustrée par la figure 1.5 où les contraintes de viabilités sont représentées par une ellipse. Sur cette figure, les flèches vertes et rouges indiquent les directions que peut prendre le système en partant des origines des flèches.

Pour savoir si  $K$  est viable, il suffit de regarder si lorsque nous sommes sur la frontière de  $K$ , il existe une commande  $u$  qui permet au système de retourner vers l'intérieur de  $K$ . Par exemple, sur la figure, les directions vertes permettent de partir de la frontière pour retourner à l'intérieur

## 1.2. AUTOMATIQUE

de  $K$ , donc le point de départ est viable. En revanche, les directions rouges ne permettent pas de retourner vers  $K$ . Si ces directions représentent l'ensemble des commandes possibles, le point à l'origine de ces flèches n'est pas viable.

Pour mettre en forme cette intuition géométrique, il faut définir la tangente d'un ensemble. En viabilité, il est repris la définition de Bouligand qui a introduit la notion de cône contingent.

**Definition 1.2.1** *Le cône contingent  $T_K(x)$  de  $K$  en  $x$  est défini par :*

$$T_K(x) = \{v \in X \mid \liminf_{h \rightarrow 0^+} \frac{d_K(x + hv)}{h} = 0\} \quad (1.83)$$

avec  $d_K(x + hv) = \min_{y \in K} \|x + hv - y\|$  est une mesure de la distance entre  $x + hv$  et  $K$ .

La figure 1.5 illustre cette notion de cône contingent, c'est le cône marron.

On définit alors la fonction de régulation  $R_K(x)$  qui est l'ensemble des commandes viables, c'est à dire qui aboutissent à une direction appartenant au cône contingent. Attention, cette fonction est multivoque, l'image d'un point est un ensemble. On appelle aussi ce type de fonction, des correspondances.

**Definition 1.2.2** *La fonction de régulation  $R_K(x)$  de  $K$  en  $x$  est définie par*

$$R_K(x) = \{u \in U(x) \mid f(x, u) \in T_K(x)\} \quad (1.84)$$

$K$  est un domaine de viabilité si pour tout  $x$  dans  $K$ , la fonction de régulation  $R_K(x)$  est non vide, c'est à dire qu'il existe une commande  $u$  telle que  $f(x, u)$  appartienne à  $T_K(x)$ .

**Definition 1.2.3**  *$K$  est un domaine de viabilité si  $\forall x \in K, \exists u \in U(x) \mid f(x, u) \in T_K(x)$*

Les différents théorèmes de viabilité permettent de définir les hypothèses minimales qui permettent d'avoir une équivalence entre

- $K$  est un domaine de viabilité,
- et  $K$  est viable.

L'intérêt de ces théorèmes est qu'ils permettent de ramener une propriété sur la dynamique, la viabilité d'un système, à une propriété géométrique, le domaine de viabilité.

Cependant dans certains cas, et notre application en fait partie, l'ensemble  $K$  n'est pas viable. Il est alors défini le noyau de viabilité de  $K$ ,  $Viab(K)$  comme l'ensemble des états viables.

**Definition 1.2.4** *le noyau de viabilité  $Viab(K)$  est défini par :*

$$Viab(K) = \{x_0 \in K \mid \exists u(t), x(t) \in K, \forall t\} \quad (1.85)$$

On s'intéresse alors à l'anatomie de l'ensemble  $K$  en le décomposant entre son noyau et le complémentaire de son noyau.

Définir le noyau de viabilité est l'un des enjeux majeurs de cette théorie ainsi que de l'application à la sécurité routière qui est présentée ici. Les algorithmes vont utiliser la propriété qu'un

noyau de viabilité est nécessairement un domaine de viabilité. Si on définit la fonction à valeur multivoque (la correspondance)

$$F(x) = \{f(x, u) \mid u \in U(x(t))\} \quad (1.86)$$

L'équation différentielle initiale devient une inclusion différentielle :

$$\dot{x} \in F(x) \quad (1.87)$$

Et l'étude du domaine de viabilité revient à regarder la propriété géométrique  $T_{viab(K)(x)} \cap F(x) \neq \emptyset$ . Ceci est illustré par la figure 1.5 : le point vert vérifie la propriété mais pas le point rouge.

Par cet exemple, on voit que la théorie de la viabilité va utiliser les outils de l'analyse des fonctions multivoques (les correspondances). Plus généralement, elle aborde les fonctions sous la forme de leur graphe ou de leur épigraphe. Ses promoteurs indiquent qu'ainsi, cette théorie renoue avec la vision cartésienne des fonctions qui sont considérées comme des ensembles de point. D'ailleurs, dans un livre plus récent [Aub99] du même auteur, les concepts d'ensemble, d'évolution d'ensemble, d'équations différentielles d'ensemble sont approfondies. Le niveau d'abstraction de cette théorie, notamment dans ce livre plus récent, lui permet de dépasser sa genèse pour fournir des métaphores utilisables en biologie, en démographie, en économie, en traitement d'image,...

Cependant, dans cette première application de la théorie de la viabilité à l'analyse du système véhicule-infrastructure-conducteur en virage, seuls les concepts développés dans le livre plus ancien ([Aub91]) sont utilisés.

### Modélisation d'un véhicule en virage

**Modélisation** Un modèle usuel d'un véhicule en virage est présenté, il est appelé modèle lacet-dérive ou modèle bicyclette. Ce système est accéléré par un moteur sur les roues avants et freiné avec un système de freinage comportant une dissymétrie gauche/droite. C'est un modèle classique dans la littérature (voir par exemple [PVSDS11] qui utilise ce modèle pour tester la robustesse de lois de commande). Ce modèle est complexifié en utilisant le formule magique de Pacejka pour la modélisation des efforts transversaux.

La figure 1.6 présente une vue de dessus du véhicule. Les variables sont :  $\psi$ , l'angle de lacet (l'angle entre l'axe  $x$  du repère de la route et l'axe longitudinal du véhicule),  $\alpha$ , l'angle de dérive du véhicule (l'angle entre l'axe longitudinal le vecteur vitesse du centre de gravité du véhicule :  $\vec{v}$ ), l'angle de dérive du pneumatique avant  $\alpha_f$  (resp. arrière  $\alpha_a$ ) dont la tangente  $\tan(\alpha_f)$  (resp  $\tan(\alpha_a)$ ) est le rapport entre la vitesse longitudinale et la vitesse transversale de la roue avant (resp. arrière).  $\delta_f$  est l'angle de la roue avant. Ces angles de dérives sont supposés correspondant à la moyenne des angles de dérives des deux roues.  $v$  est le module de la vitesse du véhicule (il est approximé par  $v_x$ ). La route est supposée sans pente et sans dévers.

Les paramètres géométriques sont :  $l_f$  (resp.  $l_a$ ), la distance entre l'essieu avant (resp. l'essieu arrière) et le centre de gravité.  $l = l_f + l_a$  est l'empattement du véhicule.

Le transport du torseur cinématique depuis le centre de gravité à la roue avant et à la roue arrière fournit les équations suivantes.

## 1.2. AUTOMATIQUE

$$\alpha_f = \alpha + \frac{l_f \dot{\psi}}{v} - \delta_f \quad (1.88)$$

$$\alpha_a = \alpha - \frac{l_a \dot{\psi}}{v} \quad (1.89)$$

Les équations de la dynamiques s'écrivent :

$$\dot{v} = \gamma \quad (1.90)$$

$$m v (\dot{\psi} + \dot{\alpha}) = F_{y_a} + F_{y_f} \cos(\delta_f) - F_{x_f} \sin(\delta_f) - m \dot{v} \sin(\alpha) \quad (1.91)$$

$$I_z \ddot{\psi} = l_f F_{y_f} \cos(\delta_f) - l_a F_{y_f} - t \Delta F_x - F_{x_f} \sin(\delta_f) \quad (1.92)$$

$\gamma$  est la commande longitudinale du conducteur : freinage ou accélération,  $m$  est la masse,  $I_z$  l'inertie du véhicule selon l'axe  $z$ ,  $F_{y_f} = F_{y_{fl}} + F_{y_{fr}}$  (resp.  $F_{y_a} = F_{y_{al}} + F_{y_{ar}}$ ) est la force latérale des pneumatiques avant (resp. arrière). Elles sont calculées en utilisant la formule magique de Pacejka :

$$F_{y_i}(\alpha_i) = D_i \sin [C_i \arctan \{B_i (1 - E_i) \alpha_i + E_i \arctan (B_i \alpha_i)\}] \quad (1.93)$$

$i = f$  pour la force transversale sur la roue avant et  $i = a$  pour la roue arrière.

Les macro coefficients  $B_i, C_i, D_i, E_i$  dépendent de différents micro coefficients qui dépendent des caractéristiques des pneumatiques, de l'adhérence, etc.

$F_{x_f} = F_{x_{fl}} + F_{x_{fr}}$  (resp.  $F_{x_a} = F_{x_{al}} + F_{x_{ar}}$ ) est la force longitudinale sur la roue avant (resp. arrière). Lors d'un freinage, ces forces sont données par :

$$F_{x_{ij}} = b_i \times i r_j \times m \gamma \quad (1.94)$$

$i = f$  ou  $i = a$  pour distinguer le freinage avant et arrière.  $j = l$  ou  $j = r$  pour distinguer le coté gauche du coté droit du véhicule.

$b_i$  est la répartition avant-arrière du freinage ( $b_f = 1 - b_a$  et  $0 < b_a < 1$ ),  $i r_j$  ( $j = l, r$ ) modélise l'hétérogénéité du freinage entre les roues droites et les roues gauches. ( $i r_r = 1 - i r_l$  et  $0 < i r_l < 1$ ).  $t \Delta F_x$  est le moment due à la différence entre le freinage sur les roues droites et sur les roues gauches (selon l'équation 1.94,  $\Delta F_x = (i r_r - i r_l) m \gamma$ ).  $t$  est la voie du véhicule.  $t \Delta F_x$  est considéré comme une perturbation.

Lors d'une accélération, nous supposons que le véhicule est une traction avant ( $F_{x_a} = 0$ ), et  $F_{x_f} = m \gamma$  (nous ne prenons pas en compte l'hétérogénéité des forces entre la roue avant droite et la roue avant gauche en accélération, nous supposons un différentiel parfait.)

**Simplification pour un passage en représentation d'état** L'équation précédente est simplifiée pour être représentée sous forme classique en automatique :

$$\dot{x} = A(x) \cdot x + B \cdot u \quad (1.95)$$

$x$  est l'état,  $u$  est la commande Les simplifications consistent à effectuer les approximations aux petits angles et à remplacer la "formule magique" (équation 1.93) par son approximation linéaire :

$$F_{y_i}(\alpha_i) = C_i \alpha_i \quad (1.96)$$



## 1.2. AUTOMATIQUE

**Contraintes sur l'accélération et le jerk** De même la commande longitudinale est contrôlée :  $\gamma_{min} < \gamma < \gamma_{max}$  and  $|\dot{\gamma}| < \dot{\gamma}_{max}$

**Contraintes sur l'état** La vitesse est limitée :  $v_{min} < v < v_{max}$  mais d'autres contraintes moins directes doivent être prises en compte.

**Rester dans sa voie** Une contrainte est que le véhicule reste dans sa voie. Pour cela, nous devons passer des variables eulériennes :  $\alpha$  (l'angle de dérive),  $v$  (la vitesse) et  $\dot{\psi}$  (la vitesse de lacet) à des variables cartésiennes  $x, y$  qui sont la position du véhicule sur la chaussée et son orientation ( $\psi$ ). Dans l'algorithme, nous ajoutons le calcul de ces trois variables cartésiennes à l'état. Ceci permet de transformer cette contrainte en une contrainte directe sur l'état. La contrepartie est que l'espace d'état est augmenté de trois dimensions.

**Glissement et stabilité** Comme nous sommes en conduite apaisée, nous interdisons le glissement macroscopique (c'est à dire le dérapage), ceci est pris en compte par des contraintes sur l'angle de dérives. Nous souhaitons aussi que le système reste stable dans le sens d'une contrainte de négativité sur les valeurs propres de la matrice  $A$ . Les calculs sont explicités dans [Bro09]. Cette contrainte, connue en dynamique du véhicule, s'écrit :

$$\frac{1}{v^2} + K > 0 \quad (1.98)$$

$l$  est l'empattement ;  $K = \frac{m_f}{C_f} - \frac{m_a}{C_a}$ , est le gradient de sous virage ;  $m_f$  (resp.  $m_a$ ) est la masse statique portée par l'essieu avant (resp. l'essieu arrière).  $m_f = m \frac{l_a}{l}$  ( $m_a = m \frac{l_r}{l}$ )

### Noyau de viabilité

Dans l'application présentée, le noyau de viabilité est l'ensemble des états tels qu'il existe une trajectoire issue d'une conduite apaisée qui partant de l'état considéré et arrivant à la sortie du virage. Lorsque le noyau de viabilité est connu, savoir si l'état du véhicule est compatible avec une conduite apaisée revient à vérifier si cet état appartient au noyau de viabilité. Le calcul d'une trajectoire est remplacé par un test d'appartenance à un ensemble. Il s'agit dans cette section de construire ce noyau de viabilité. Afin de construire effectivement ce noyau, nous devons discrétiser le système.

**Discrétisation** L'équation différentielle ordinaire 1.95 est résolue numériquement par un schéma d'Euler :

$$x_{n+1} = x_n + (A(x_n) \cdot x_n + B \cdot u_n) \Delta T \quad (1.99)$$

$\Delta T$  est le temps d'échantillonnage,  $x(n) = x(n\Delta T)$ ,  $u(n) = u(n\Delta T)$ .

La discrétisation de l'espace est plus problématique : la dimension de l'état est trois, mais nous avons ajouté les variables cartésiennes ce qui fait 6. Par ailleurs, nous avons besoin de discrétiser les commandes ce qui rajoute encore deux dimensions. En définitive, nous discrétisons un espace de dimension 8 : comprenant les variables lagrangiennes :  $x, y$  (les coordonnées cartésiennes),  $\psi$  (le lacet), les variables eulériennes :  $\alpha$  (l'angle de dérive),  $v$  (la vitesse),  $\dot{\psi}$  (la vitesse de lacet), les commandes du conducteurs :  $\delta_f$  (l'angle volant),  $\gamma$ , (l'accélération et le freinage).

A travers cette application, nous touchons du doigt une des limites de la théorie de la viabilité qui est le mur de la dimensionnalité. Chaque variable nouvelle discrétisée en 10 valeurs multiplie par 10 le nombre d'état à évaluer.

**Algorithme** L'algorithme générale de la construction d'un noyau de viabilité ainsi que sa convergence est présentée dans [SP94]. C'est un algorithme par récurrence arrière. Dans notre cas, les états du véhicule en conduite apaisée en fin de virage sont les éléments initiaux du noyau de viabilité. Ensuite, tous les états qui permettent d'atteindre ces états en un pas de temps sont ajoutés. Ainsi de suite. C'est un algorithme glouton, très rapide mais qui produit des ensembles immenses.

La figure 1.7 illustre cette procédure en dimension 2. Les limites de la voie sont symbolisées par les arcs de cercle noirs. Les points bleues appartiennent au noyau de viabilité contrairement aux points rouges.

La voiture rouge n'appartient pas au noyau de viabilité. En effet, une commande envoie le véhicule en dehors de la route, l'autre l'envoie sur un point rouge. Pour cette voiture, aucune conduite apaisée ne permet d'atteindre la fin du virage.

La voiture bleu appartient au noyau de viabilité car une commande lui permet d'atteindre un point bleu. Pour cette voiture, nous pourrions évaluer le nombre de commande qui permet d'atteindre un état appartenant au noyau de viabilité. Ceci pourrait être une mesure de la "robustesse" de l'état.

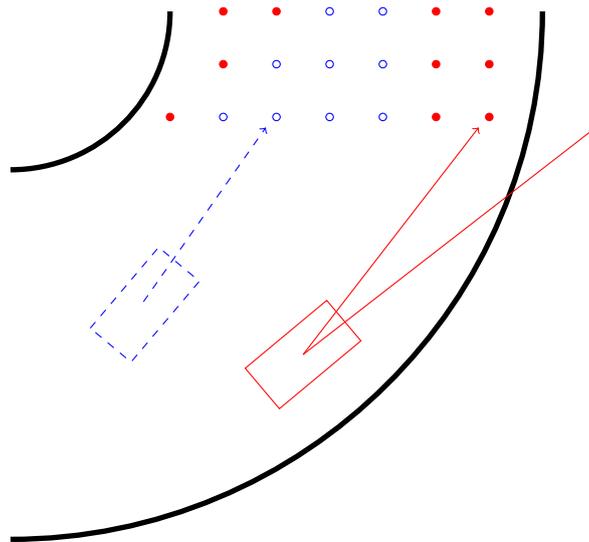


FIG. 1.7 – Principe de l'algorithme de viabilité

**Classification d'un état** Les sorties de l'algorithme précédent sont une liste d'états qui appartiennent au noyau de viabilité et une liste d'états qui n'y appartiennent pas. Cependant, dans le cas réel, nous avons à évaluer un état,  $x_0$  qui a très peu de chance d'appartenir à ces deux listes, il faut pourtant déterminer si  $x_0$  appartient ou pas au noyau de viabilité. Très concrètement, il s'agit de déterminer la frontière de  $K$  entre le noyau de viabilité et son complémentaire dans  $K$  à partir d'un ensemble fini d'états qui appartiennent au noyau et un ensemble fini d'états qui n'appartiennent pas au noyau.

## 1.2. AUTOMATIQUE

Cette question peut s'interpréter dans le cadre des "machines learning" comme la phase de généralisation.

Nous avons utilisé un algorithme issu des machines à vecteurs de support (Support Vector Machines ou SVM) car des algorithmes issus de ces méthodes de classification ont été mis en œuvre dans le cadre de l'application de la théorie de la viabilité dans le champ de l'écologie ([CDMM08] et [Cha07]).

L'algorithme précédent fournit une liste d'exemple  $(x_i, y_i)$  où  $x_i$  est un état de  $K$  et  $y_i = 1$  si  $x_i \in Viab(K)$  et  $y_i = -1$  si  $x_i \notin Viab(K)$ .

A partir de cette liste, les machines à vecteur de support calculent une fonction de classification, appelée dans cette méthodologie, fonction de décision, qui sépare les exemples :

$$d(x) = \sum_{i=1}^n s_i y_i k(x_i, x) + b \quad (1.100)$$

$k(x_i, x)$  est une fonction définissant un produit scalaire des projetés de  $x_i$  and  $x$  dans un autre espace que celui auquel ils appartiennent naturellement.  $b$  est une constante ;  $s_i$  est un scalaire qui est non nul seulement pour les vecteurs  $x_i$  qui appartiennent aux "marges" de l'espace projeté. Ce sont ces vecteurs qui sont appelés "vecteurs supports".

Un nouvel état  $x_0$  appartient au noyau de viabilité si  $d(x_0) \geq 0$

### Application

Dans cette section, nous montrons une application grandeur réelle des concepts vus précédemment. Le scénario est le suivant : une voiture est dans un virage. Au milieu de la clothoïde, le conducteur tourne le volant simulant un comportement inapproprié. A vitesse basse, cette réaction est compatible avec une conduite apaisée, il peut rattraper aisément cette manœuvre. A vitesse plus élevée, cette réaction reste dans les contraintes admises mais amène le véhicule dans un état qui n'est plus compatible avec une conduite apaisée. Pour rester dans sa voie, le conducteur sera obligé d'utiliser des commandes importantes incompatibles avec une conduite apaisée.

Au moment où le conducteur tourne le volant, la fonction de classification doit être positive pour l'état à basse vitesse et doit être négatives pour l'état à vitesse plus élevée.

**Infrastructure** L'expérimentation s'est déroulée sur le virage "contrôlabilité"<sup>2</sup> de la piste d'expérimentation routière de l'Ifsttar. Ce virage se décompose en une ligne droite de 50m, une première clothoïde de 87m, un cercle de longueur 134 m et de rayon 110m, une seconde clothoïde qui est la symétrique de la première, et une ligne droite de 50m. Elle est présentée sur la photo 1.8.

**Véhicule** Nous avons utilisé un véhicule classique (une berline sedan en traction avant sous vi-reuse) équipé de pneus été. Les paramètres du véhicule sont donnés dans la table 1.3.  $C_f$  et  $C_r$  sont les rigidités de dérive des pneumatiques

**Manœuvres** 4 manœuvres ont été effectuées.

1. La première manœuvre consiste à prendre le virage à la vitesse constante de 60 km/h.

2. Virage construit dans le projet INFRASURE dont j'étais le chef du projet au moment de la construction.

FIG. 1.8 – *Le virage contrôlabilité*

m (kg)	$I_z$ ( $kg \cdot m^2$ )	$\Delta i_r$	t (m)	$l_f$ (m)	$l_a$ (m)	$C_f$ (N)	$C_a$ (N)
1485	2570	0.1	1.46	1.09	1.49	131500	117000

TAB. 1.3 – *Paramètres du véhicule*

2. La deuxième manœuvre est la même que la première sauf que le conducteur tourne le volant de manière soudaine mais limitée lors du passage sur la première clothoïde.
3. La troisième manœuvre consiste à prendre le virage à la vitesse constante de 80 km/h.
4. La quatrième manœuvre est la même que la troisième sauf que le conducteur tourne le volant de manière soudaine mais limitée lors du passage sur la première clothoïde.

Les photos du véhicule sont fournies dans la figure 1.9(a)-(b) pour les deux premières manœuvres à 60 km/h et (c)-(d) pour les manœuvres 3 et 4 à 80 km/h.

Les figures 1.10 illustrent les états du véhicule durant ces manœuvres. La commande du conducteur, traduite en angle des roues directrices avant, est affichée ainsi que les réponses du véhicules en terme de dérive et de vitesse de lacet.

Pendant les 4 premières secondes, le conducteur prépare la prise du virage en déportant son véhicule. Le conducteur tourne ensuite continûment son volant pour suivre la clothoïde avant d'atteindre le virage à rayon constant. Lors des manœuvres 2 et 4, le conducteur effectue un braquage inappropriée. Cette perturbation simulée est la même à 60 et 80 km/h. Le retour à une trajectoire nominale nécessite une commande plus vigoureuse du conducteur à 80 km/h qu'à 60 km/h. Les réponses du véhicule sont amplifiées à 80 km/h. La vitesse de lacet atteint un niveau qui n'est pas compatible avec une conduite apaisée.

**Construction du noyau de viabilité** L'algorithme décrit dans la section 1.2.2 a été appliqué au virage contrôlabilité. Les contraintes sont les suivantes : la vitesse minimale est 60 km/h, la vitesse maximale est 90 km/h, l'accélération est comprise entre  $-0.1 g$  et  $0.1 g$ , le jerk est compris dans la fourchette  $\pm 0.2 g/s$ .

La discrétisation spatiale est 4 m le long de l'abscisse curviligne ; 0.5 m pour l'axe transversal, l'échantillonnage temporel est 0.2 s. Ces valeurs ont été choisies après plusieurs essais afin, d'une part, de minimiser le temps de calcul et, d'autre part, d'avoir une dynamique compatible avec le passage d'un virage.

## 1.2. AUTOMATIQUE



(a) manœuvre 1 : vitesse 60 km/h



(b) manœuvre 2 : vitesse 60 km/h et coup de volant



(c) manœuvre 3 : vitesse 80 km/h



(d) manœuvre 4 : vitesse 80 km/h et coup de volant

FIG. 1.9 – Photos des différentes manœuvres

Le noyau de viabilité obtenu est illustré sur la figure 1.11 qui présente la projection du noyau de viabilité sur les deux dimensions  $x, y$ . C'est une représentation car le noyau de viabilité est dans un espace de dimension 8. Les points verts sont les projections des éléments du noyau. Ils entourent la trajectoire "nominale" qui passe au milieu de la voie. Lorsque l'état s'éloigne de cette trajectoire nominale, il appartient à  $K$  mais pas au noyau de viabilité.

La construction du noyau de viabilité prend 51 minutes sur un ordinateur affichant une performance de 10.3 giflops selon les tests de [Don11]. Seuls 759 états appartiennent au noyau de viabilité. 291471 n'y appartiennent pas.

Cette application montre que l'application de la théorie de la viabilité nécessite des puissances de calcul importante. C'est une des barrières de cette théorie. Dans le cas présent, ce n'est pas rédhibitoire car le calcul est effectué hors ligne.

**Classification** Pour les SVM, nous avons utilisé l'algorithme décrit dans [TL08] car il est bien adapté au problème comprenant beaucoup de données. Il est différent de l'algorithme utilisé dans le cas de l'application de la théorie de la viabilité à des problèmes issus de l'écologie. La fonction noyau ( $k(.,.)$ ) est une fonction gaussienne ce qui est un choix classique lorsque le problème est non-linéaire. La fonction de décision est calculée en 27 minutes. Elle classe correctement tous les états qui n'appartiennent pas au noyau de viabilité et plus de 95 % des états qui appartiennent au noyau. C'est une fonction de décision prudente compatible avec les exigences de sécurité. Pour cela, elle utilise 1482 vecteur de support.

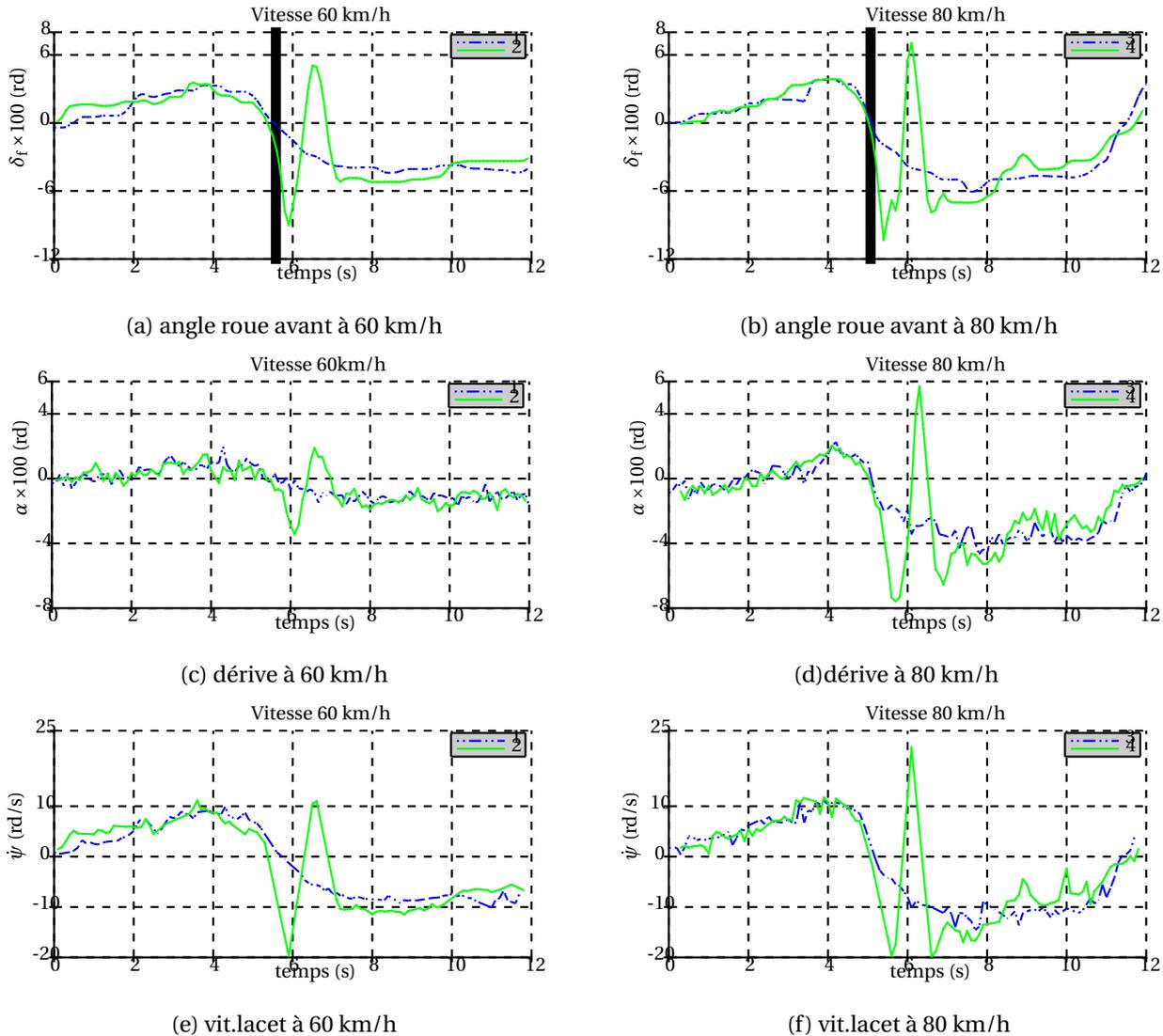


FIG. 1.10 – *Etats du véhicule pendant les manœuvres*

Le calcul de cette fonction de décisions est, aussi, effectuée hors ligne.

En ligne (c'est à dire en situation de conduite), pour savoir si l'état appartient au noyau de viabilité, il suffit de calculer la fonction de décision avec, en entrée, l'état du véhicule.

**Résultats** Selon le conducteur, les manœuvres 1,2, 3 sont compatibles avec une conduite apaisée mais pas la manœuvre 4. Ceci est cohérent avec nos mesures. En effet, le taux de lacet atteint un niveau qui n'est pas compatible avec une conduite apaisée (voir la figure figure 1.10(f)).

Nous allons maintenant classer l'état qui correspond au moment où le conducteur tourne le volant. Cet instant est représenté par une ligne verticale grasse dans les figure 1.10(a-b). Ces états sont présentés dans la table 1.4 pour les manœuvres à 60 km/h et dans la table 1.5 pour les manœuvres à 80 km/h. Les trois premières colonnes sont les coordonnées cartésiennes et l'orientation du véhicule. La dernière colonne est la valeur de la fonction de décision qui classe l'état en utilisant l'équation 1.100. Si la valeur est positive, l'état appartient au noyau de viabilité.

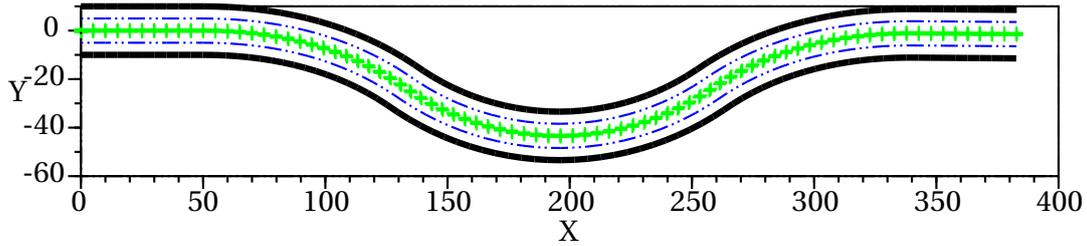


FIG. 1.11 – Noyau de viabilité

	$x$ (m)	$y$ (m)	$\psi$ (rd)	$\alpha$ (rd)	$\delta_f$ (rd)	$\dot{\psi}$ ( $\frac{rd}{s}$ )	$v$ ( $\frac{km}{h}$ )	$\gamma$ ( $\frac{m}{s^2}$ )	$d()$
viable	74.9	-1.7	-0.14	0	0.017	0.10	60	0	1
viable	74.9	-1.7	-0.14	0	-0.01	0.10	60	0	0.01

TAB. 1.4 – Comparaison de deux états à 60 km/h (manœuvres 1 et 2)

Si la valeur est négative, il n'appartient pas au noyau de viabilité. Les manœuvres 1, 2, 3 appartiennent au noyau de viabilité mais pas la manœuvre 4.

Au delà de cette application directe de la théorie de la viabilité, nous pouvons imaginer plusieurs utilisations du noyau de viabilité. En étudiant son anatomie, sa forme, nous pourrions repérer les endroits critiques ou au contraire robuste. Pour cela, nous pouvons nous inspirer des outils utilisés dans le domaine de l'écologie comme cela est décrit dans le livre [DG11].

### Conclusion-Perspectives

Ce travail montre l'applicabilité de la théorie de la viabilité sur un cas pratique d'un véhicule négociant un virage. Si l'état du véhicule appartient au noyau de viabilité, il existe alors une trajectoire apaisée permettant d'atteindre le fin du virage. Sinon, le conducteur devra utiliser des commandes plus brutales.

Il faudrait étendre cette approche à tout un itinéraire. Compte tenu des temps de calcul exigés pour l'exemple étudié, une extension à tout un itinéraire est impossible. En revanche, cette approche peut être appliquée sur des points noirs de l'itinéraire.

C'est la première fois que la théorie de la viabilité est appliquée à un exemple concret de sécurité routière comprenant une vérification expérimentale des concepts mis en jeu. Au delà de cette application immédiate, la théorie de la viabilité apporte un nouveau point de vue : il ne s'agit pas de calculer en temps réel des commandes optimales ou mêmes robustes mais plutôt de savoir si elles existent et si elles sont accessibles au conducteur.

Je pense que l'analyse du noyau de viabilité peut être riche d'enseignements sur le problème

	$x$ (m)	$y$ (m)	$\psi$ (rd)	$\alpha$ (rd)	$\delta_f$ (rd)	$\dot{\psi}$ ( $\frac{rd}{s}$ )	$v$ ( $\frac{km}{h}$ )	$\gamma$ ( $\frac{m}{s^2}$ )	$d()$
viable	74.9	-1.7	-0.14	0.01	0.018	0.13	80	0	0.5
not viable	74.9	-1.7	-0.14	0.01	-0.01	0.13	80	0	-0.02

TAB. 1.5 – Comparaison de deux états à 80 km/h (manœuvres 3 et 4)

pratique. Lorsque le noyau “se resserre”, l’état devient critique. Un autre outil serait de calculer les noyaux de viabilité comprenant les états où plusieurs commandes différentes peuvent amener à la fin du virage. Ceci permet de détecter les états sécuritaires.

Dans l’exemple concret présenté, le noyau de viabilité caractérise les états qui assurent un système résilient c’est à dire qui tolère un comportement inapproprié<sup>3</sup> du conducteur.

**Analyse du positionnement de cette recherche** Avant cette recherche, la problématique du véhicule-insrastructure-conducteur en virage était appréhendée avec les outils de l’analyse non linéaire classique (par exemple [RMP12]) ou les outils probabilistes ([RCFB11]). C’est la première fois que la théorie de la viabilité est appliquée à ce problème.

Ce travail a été publié dans Vehicle System Dynamics ([VCL14]).

---

3. dans une certaine limite !

## *1.2. AUTOMATIQUE*

## Chapitre 2

# Applications

Mes contributions au génie civil ont été d'abord sur la phase de construction des infrastructures de transport puis sur leur usage.

Une utilisation directe de mes compétences théoriques a été l'estimation du torseur des efforts entre compacteur et enrobé. J'ai repris le travail effectué lors de la thèse de Eric Guillo. J'ai ensuite encadré un post-doctorant, Arnaud Delclos sur ce sujet, financé sur le projet européen OSYRIS (Open System for Road Information Support).<sup>1</sup>. Ce travail s'est cristallisé dans la thèse de Charles-Eric Lemaire (bourse régionale pays de la Loire à 50 %).

Ce travail a été présenté chez les principaux fabricants de compacteur : Caterpillar, Bomag. Le transfert industriel s'est effectué au sein du projet OSYRIS. Les liaisons entre ce travail et mes contributions théoriques sont présentées dans le chapitre du livre sur les problèmes inverses : [VLG09]. Ce travail m'a aussi servi de base pour un cours sur les problèmes inverses.

Dans le domaine de la construction, j'ai contribué à d'autres résultats qui sont moins directement liés à mes compétences en robotique mais dans lesquelles j'ai fait intervenir mes compétences en statistique et filtrage. Lors d'un contrat avec la société RMC (Ready Mixed Concrete), le malaxage des bétons avec ciment composé et celui avec ciment classique mais dont les additifs sont ajoutés lors du malaxage ont été évalués. Les résultats, issus d'expérimentations importantes, dont j'étais le responsable, ont été publiés dans [VdLD<sup>+</sup>03].

Une autre contribution de ma part dans le domaine de l'élaboration des matériaux concerne l'application de la méthode des temps de séjours dans les tambours séjournes enrobés. Ces résultats ont contribué à la modélisation des TSE par réseaux de neurones effectuées dans la thèse de Tarek Madani (thèse Cifre, manuscrit confidentiel). Les résultats précurseurs à cette thèse ont été publiés dans [VGT00].

Je suis passé de la construction à l'usage des infrastructures des transports lorsque la sécurité routière est devenu un point important de la politique de recherche de mon institut.

Mon premier travail a été effectué au sein d'un partenariat avec Renault autour de la thèse Cifre d'Arnaud Andrieux (manuscrit confidentiel). Il s'agit d'étudier empiriquement la relation entre le taux de glissement et l'adhérence longitudinale. La base théorique de ce travail a été présentée dans le chapitre sur la méthodologie. Une partie des résultats a été valorisée dans une publication [AVLC10] et une autre partie dans le brevet [ACV10]. C'est aussi à partir de ce travail que j'ai monté un cours sur la dynamique du véhicule à l'Ecole Centrale de Nantes.

Les contraintes environnementales sont devenues de plus en plus prégnantes dans notre insti-

---

1. J'étais responsable des études de faisabilité dans ce projet

## 2.1. CONSTRUCTION

tut. En plus des critères classiques de mobilité, de sécurité et de coût, la conception des systèmes de transport doit aussi tenir compte de ces contraintes environnementale et devenir une écoconception.

J'ai participé à un partenariat avec RFF (réseau ferré de France), dont j'étais le responsable scientifique pour l'Ifsttar, comprenant notamment la thèse Cifre de Romain Bosquet. J'ai contribué ainsi à la modélisation et à l'identification à l'aide de technique robotique (IDIM-LS) de la consommation énergétique d'un TGV. Ce travail associé à un travail sur la construction a aboutit à la méthodologie PEAM (Project Energy Assessment Method) publiée dans [BJV<sup>+</sup>14].

Pour la clarté de l'exposé, toutes les applications sont présentées selon le même triptyque : la question posée, la démarche mise en œuvre, la réponse.

## 2.1 Construction

### 2.1.1 Estimation du torseur des efforts entre compacteur et enrobé

La construction d'une route passe par de nombreuses étapes depuis sa conception sur un système de CAO jusqu'à sa réalisation physique sur le terrain. La qualité des chaussées dépend de nombreux facteurs dont les deux principaux sont : les propriétés mécaniques des matériaux utilisés et la qualité du travail des engins mobiles de chantier qui détermine le respect des données de la CAO sur le terrain. De ce point de vue, la maîtrise du processus de compactage des chaussées constitue un enjeu important en terme de durée de vie des chaussées mais également en terme d'économie de matériau (souvent coûteux).

**La question posée** Les efforts de contact entre les cylindres des compacteurs et les matériaux compactés caractérisent le travail du compacteur, leur estimation permettrait l'amélioration du processus de compactage. Les travaux et les connaissances dans le domaine du matériel manœuvre de compactage ont permis d'envisager la réalisation d'un système d'estimation des efforts de contact d'un compacteur. Il existait des systèmes de mesure des efforts de contacts mais ils étaient hémiplés : soit ils mesuraient l'effort vertical, soit ils mesuraient l'effort longitudinal. Notre approche permet de connaître simultanément les deux.

La question précise posée était : est-il possible de mesurer un torseur des efforts projeté en dimension deux avec une instrumentation qui a un coût compatible avec le coût d'un compacteur ?

La réponse à cette question a été possible grâce une demi bourse de thèse fournie par l'Ifsttar, une demi bourse de thèse fournie par la région Pays de la Loire, et par la participation de l'entreprise Caterpillar. Le travail complet fait l'objet du manuscrit de thèse de Charles-Eric Lemaire ([Lem05]).

**La démarche mise en œuvre** L'approche proposée utilise la modélisation robotique des systèmes mécaniques articulés. Nous avons modélisé un compacteur comme un robot. La figure 2.1 présente le compacteur modélisé avec les corps numérotés. Les billes vibrent, le dispositif de vibration est présenté dans la figure 2.2. La modélisation géométrique est représentée par la structure arborescente équivalente de la figure 2.3. L'identification des paramètres du modèle dynamique a été réalisée en suivant la méthode décrite dans la partie théorique de ce mémoire.

Une particularité par rapport aux robots a été l'utilisation de capteurs qui permettaient de mesurer des variables Eulériennes et Lagrangiennes.



FIG. 2.1 – Compacteur modélisé dans la thèse de Charles-Eric Lemaire

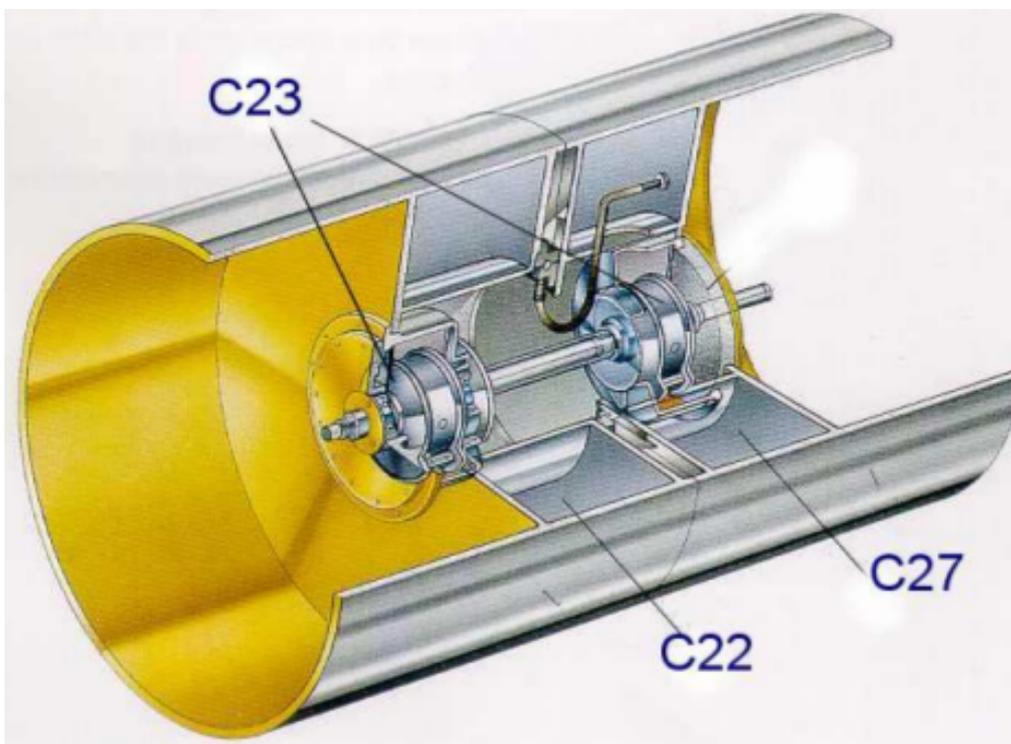


FIG. 2.2 – bille vibrante

2.1. CONSTRUCTION

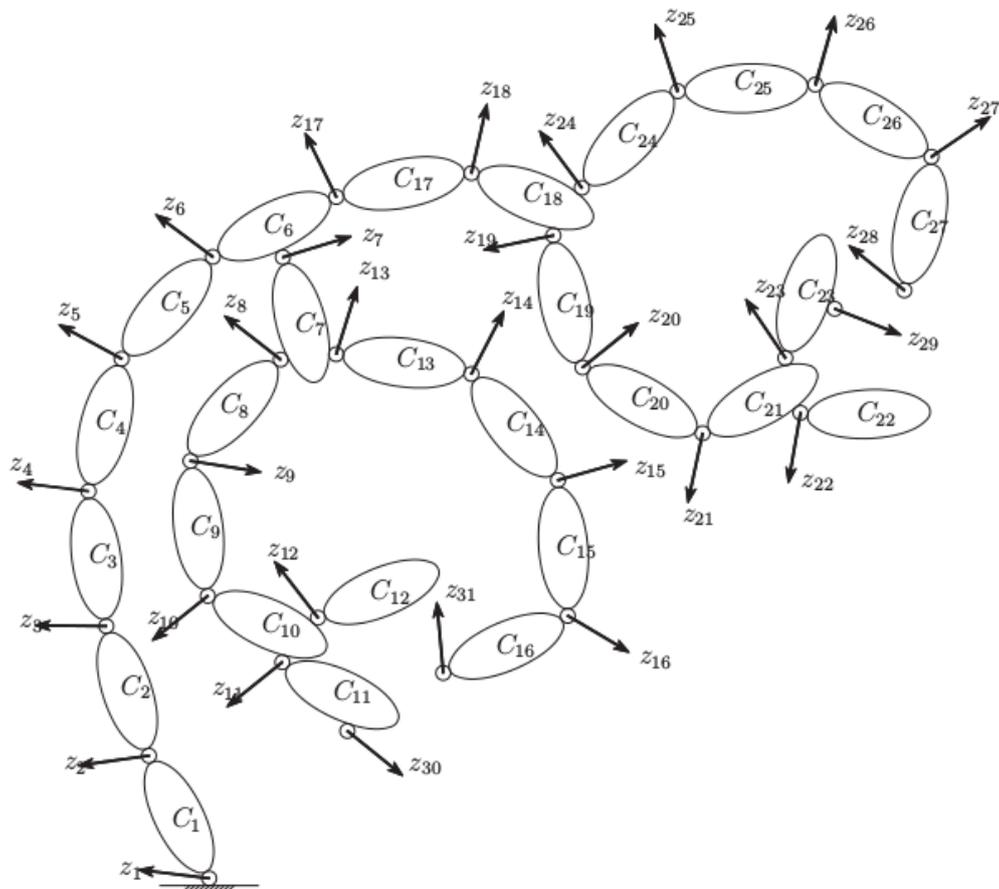


FIG. 2.3 – Structure arborescente équivalente du compacteur



FIG. 2.4 – Servovérin de 100kN monté sous la bille du compacteur avec étrier bridé

## 2.1. CONSTRUCTION

Nous avons donc construit un modèle adapté au système de mesure. C'est un modèle mixte Eulérien-Lagrangien. Ce modèle a, aussi, été adapté pour mieux représenter les phénomènes physiques comme la vibration en proposant des raideurs et des amortissements qui varient avec la fréquence.

Sur ce travail, le défi était aussi métrologique : plus de 20 capteurs ont été installés : accéléromètres résistifs, capteurs de pressions, codeur angulaire, capteur inductif de proximité, capteurs de distance à triangulation laser. . . Des mesures qui devaient être effectuées sur une large plage de fréquence : en basse fréquence pour le déplacement du compacteur et à haute fréquence pour le système de vibration. Pour celui-ci, des montages spéciaux ont été mis en place comme celui présenté dans la figure 2.4 qui consistait à exciter la bille du compacteur avec un vérin commandé afin d'identifier les paramètres des articulations élastiques.

**La réponse** Nous avons ainsi identifié les paramètres du modèle dynamique ce qui a permis de concevoir un capteur logiciel de l'interaction bille/matériaux. Ce capteur a été testé sur un chantier réel. Les résultats ont montré une sensibilité du capteur à la consistance de l'enrobé.

Beaucoup de concepts présentés dans la partie théorique ont été utilisés dans cette partie. C'est pourquoi, cette exemple sert de trame au cours sur les problèmes inverses que je donne aux doctorants des écoles doctorales STIM et SPIGA.

Ce travail a été mené à travers l'encadrement de la thèse de Charles-Eric Lemaire (encadrement à 50 %) et du post doctorant Arnaud Delclos. Il y a eu plusieurs publications en congrès (congrès Ifac-Ieee : [LVGL06, LVG05, LVG03a, LVG03b], congrès Iaarc : [LVGP02])

### 2.1.2 Evaluation des techniques d'élaboration des matériaux

Les chaussées sont, généralement, des mélanges granulaires produit, pour certains, en usine, appelée centrale, selon deux procédés : un procédé continu et un procédé discontinu. Les centrales continues utilisent un malaxeur continu qui est alimenté par les constituants du mélange et qui produit en continu le mélange souhaité. Elles sont adaptées à des fort tonnages requis par les travaux routiers. Les procédés discontinus consistent à mélanger les matériaux élémentaires dans un malaxeur. Celui ci malaxe sur une durée prédéfinie puis il est vidé, le matériaux produit est appelé une gâchée. J'ai travaillé sur les deux types de centrale. Sur les centrales continues de graves et d'enrobés, j'ai participé à leur modélisation en utilisant les méthodes de la distribution des temps de séjour (DTS) et des réseaux neuronaux. Sur les centrales discontinues, j'ai travaillé sur l'hétérogénéité des gâchées de béton.

#### Modélisation des centrales continues par la DTS

**La question posée** Dans un contexte de raréfaction des grands travaux et de la multiplication des petits travaux, les industriels étaient confrontés à un problème de gestion des débuts et fins de production des centrales continues suite à des changements plus fréquents de formules. Il s'agissait de mieux caractériser le fonctionnement de la centrale afin de minimiser les pertes de matériaux en début et fin de production. La figure 2.5 présente une photo d'un malaxeur continu sur lequel j'ai travaillé.

**La démarche mise en œuvre** L'Ifsttar a développé une technique de mesure avec des traceurs radioactifs. Un des constituants est marqué radioactivement. Un photomultiplicateur à l'entrée du processus permet de mesurer l'arrivée du constituant dans le malaxeur. Un photomultiplicateur en sortie mesure la sortie du constituant. En général, le signal d'entrée est un pic : le composant marqué passe devant le photomultiplicateur. Le signal de sortie est en retard sur l'entrée et est une courbe plus étalée compte tenu du mélange. Un exemple de signal est présenté dans la figure 2.6. La théorie de la distribution des temps de séjour permet de construire un modèle de réacteur chimique entre ces deux signaux. Celui-ci permet d'estimer le temps de séjour mais aussi la qualité du mélange. Nous utilisons un logiciel développé au sein de l'Ensic à Nancy dont les bases théorique sont dans le livre [Vil93]. Nous avons ainsi pu calculer les différents temps de séjours des matériaux dans le malaxeur. En revanche, nous n'avons pas eu de résultats positifs sur la possibilité de relier les paramètres du modèle à la qualité du mélange hormis le paramètre du temps de séjour.

Mon rôle a consisté à monter des expérimentations. Ceci requérait des précautions particulières compte tenu de l'utilisation de traceurs radioactifs. J'ai aussi travaillé sur la partie traitement des données, notamment, celles issues des photomultiplicateurs dont il fallait déterminer la fonction de transfert. Ma compétence acquise lors de ces expérimentations m'a permis d'être coencadrant de la thèse Cifre de Tarek Madani sur la Caractérisation du Fonctionnement des Tambours Sécheurs Enrobeurs en vue de leur Commande, financée par la PME Ermont. Le manuscrit ([Mad05]) est confidentiel. Ses travaux utilisent les réseaux de neurone en complément de la distribution des temps de séjour. J'ai ainsi pu confronter nos méthodes en identification avec les méthodes d'apprentissage des réseaux de neurones.

2.1. CONSTRUCTION



FIG. 2.5 – *Malaxeur continu*

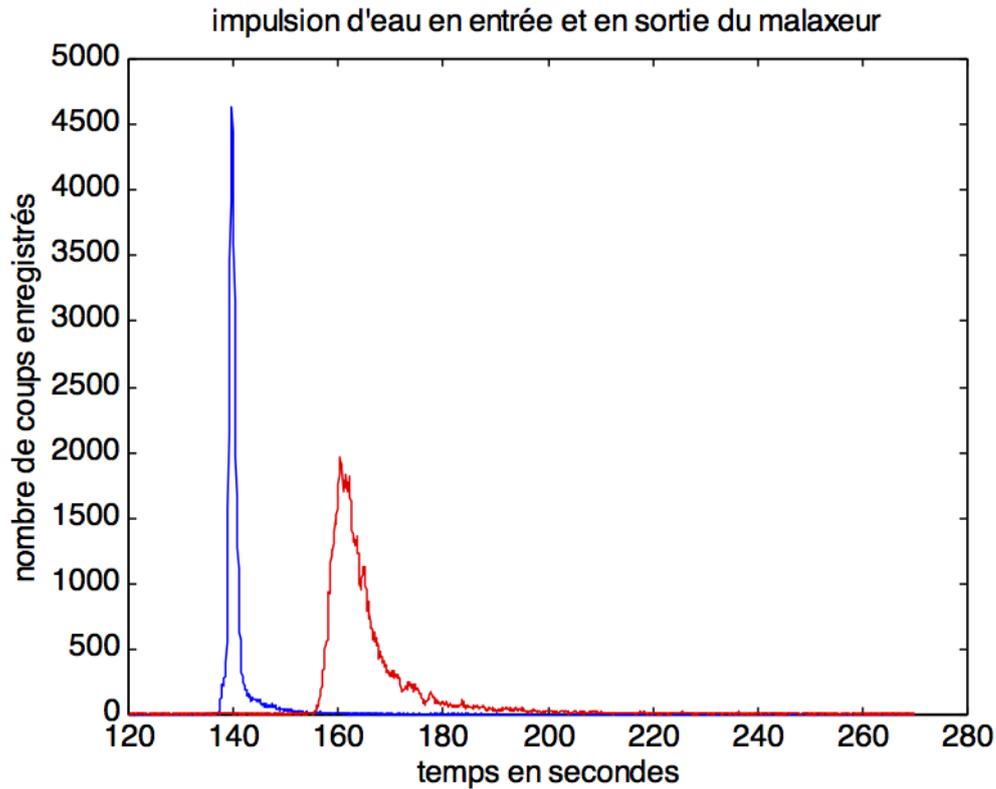


FIG. 2.6 – Entrée-Sortie d'un malaxeur continu (issue du rapport de stage de Guillaume Mocquet)

**La réponse** Grâce à la connaissance des temps de séjour des différents constituants, les industriels ont, maintenant, les informations nécessaires pour mieux régler leurs processus de production. La thèse de Tarek Madani (que j'ai encadrée à 50 %) est confidentielle. Une publication dans une revue technique présente le projet : [MDS<sup>D</sup>+06].

Les travaux préparatoires effectués avec des stagiaires ingénieurs et master 2 ont abouti à des publications francophones dans des revues technique : [VGT00, Van99].

Ces publications contiennent des informations sur les temps de séjour des constituants dans le malaxeur qui sont des données importantes pour la communauté du génie civil.

### Hétérogénéité des bétons

Un résultat majeur de mes recherches dans ce domaine porte sur le malaxage en centrale discontinue de bétons de type " bâtiment " contenant des additions minérales (cendres volantes, addition calcaire ou laitier de haut-fourneau).

**La question posée** L'augmentation du temps de malaxage lorsque l'addition minérale est ajoutée directement dans le malaxeur à béton est-il justifié par rapport au cas où l'addition est mélangée au ciment Portland ?

L'objectif principal était d'évaluer les bases techniques d'un disposition de la norme XP P 18-305, selon laquelle le temps de malaxage de ces bétons doit être augmenté lorsque l'addition minérale est ajoutée directement dans le malaxeur à béton, par opposition aux cas où le produit est mélangé au ciment Portland pour constituer un ciment composé. Les essais ont été pratiqués dans

## 2.1. CONSTRUCTION



FIG. 2.7 – Centrale discontinue

une centrale semi-industrielle, à l'échelle 1 ; différents moyens d'évaluation de l'homogénéité des gâchées et de caractérisation des performances des matériaux produits ont été mis en œuvre. Un industriel, RMC (Ready Mixed Concrete), était partenaire à 50 % de cette étude.

**La démarche mise en œuvre** Comme il n'y avait aucun travail antérieur sur ce sujet, l'évaluation a été effectuée à toutes les étapes de la production à travers différents types d'essais.

Une gâchée de béton était produite par un malaxeur discontinu, c'est à dire que les matériaux sont amenés dans le malaxeur qui les mélange puis s'ouvre pour laisser tomber par gravité une gâchée de béton. Différents types de bétons ont été produits : des bétons avec des ciments composés et de bétons avec des additions qui sont ajoutées lors du malaxage. Ces bétons ont été produits avec différents temps de malaxage : ceux donnés par les normes, c'est à dire 35 secondes pour les ciments composés et 55 secondes pour les ciments auxquels sont ajoutés les additions pendant le malaxage. Pour des objectifs de compréhension du phénomène de malaxage, des temps de malaxage plus extrêmes ont été ajoutés : 20 secondes et 90 secondes. Cette expérimentation est illustrée par la figure 2.7.

Nous souhaitions aussi faire un lien entre des essais qui peuvent être menés au moment de la production et les mesures de performances mécanique du matériau qui passent par un essai de compression réalisé 28 jours après la production. Compte tenu des enjeux industriels importants liés à cette étude, il fallait une grande rigueur métrologique et, notamment, vérifier nos résultats par des répétabilités.

Dans la suite, nous présentons les essais qui ont été mis en œuvre.

- Un essai de compression. 15 éprouvettes étaient réalisées par gâchée. 28 jours après la fabrication, la résistance à la compression de chacune des éprouvettes est testée.
- Un wattmètre a été utilisé durant les essais pour mesurer la puissance appelée par le malaxeur.
- Des essais avec traceurs radioactifs ont été mis en œuvre afin de mesurer l'hétérogénéité dans la gâchée des éléments fin (éléments dont le diamètre est inférieur à 80 microns). 40 échantillons étaient prélevés sur chaque gâchée pour faire ce test.
- un prototype appelé le " banc d'analyse granulométrique " a été utilisé pour mesurer l'hétérogénéité des mélanges du point de vue de la granularité. 15 échantillons étaient prélevés par gâchée.
- Un essai en lien avec la rhéologie du matériaux : l'affaissement au cône d'Abrams : 15 prélèvements par gâchée.
- La mesure de la teneur en eau a été effectuée sur 15 échantillons.

Outre l'organisation des essais, mon travail s'est situé sur les aspects statistiques et métrologiques de cette étude. Lors de cette expérimentation, un appareil de mesure novateur : le banc d'analyse granulométrique (bag) a été utilisé. Son objectif était de mesurer l'hétérogénéité du matériaux d'un point de vue granulométrique. Une photo de cet appareil est présentée dans la figure 2.8. Le matériau était d'abord échantillonné dans 48 bacs. Ces bacs étaient ensuite séchés afin de déterminer leur teneur en eau. Ils étaient amenés ensuite en entrée du BAG. Ils étaient lavés pour obtenir leur teneur en fines (particules dont le diamètre est inférieur à 80 microns) puis séchés et enfin tamisés. Les éléments supérieurs à 180 microns sont tamisés par une tamiseuse vibrante. Les mesures des autres particules sont effectuées selon un principe optique avec le vidéogranulomètre.

Au préalable à ces essais, il a fallu mettre à niveau ce prototype puis le qualifier en suivant une

## 2.1. CONSTRUCTION

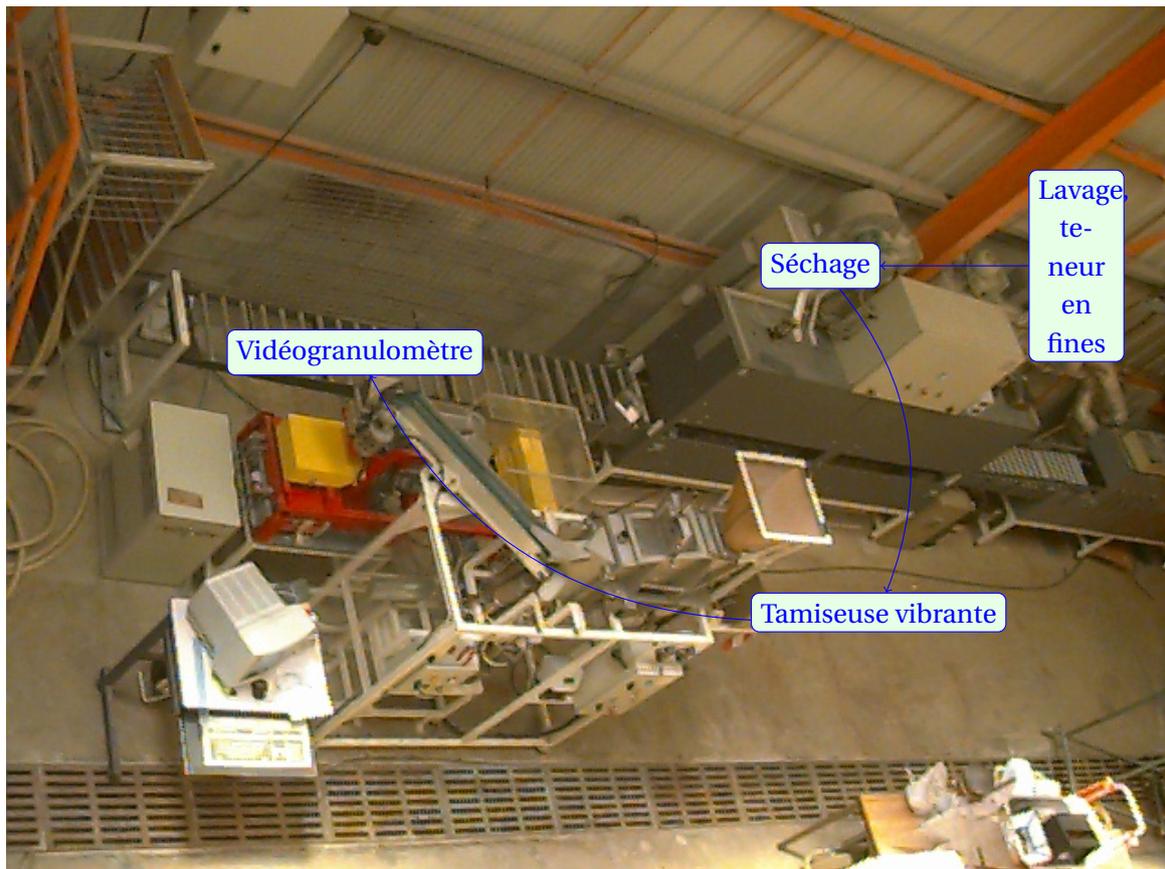


FIG. 2.8 – *Le banc d'analyse granulométrique*

démarche métrologique rigoureuse. La difficulté statistique est qu'il fallait mesurer une hétérogénéité et comparer cette hétérogénéité d'une production à une autre. Pour cela, j'ai mobilisé mes compétences acquises dans les problèmes inverses. L'hétérogénéité du mélange est appréhendée à travers une variance expérimentale. Il s'agissait donc de construire une variance de variance en tenant compte des erreurs de répétabilité et des erreurs d'échantillonnage.

**La réponse** Il en ressort un léger avantage en termes d'homogénéité interne des gâchées, au bénéfice des ciments composés, mais qui n'est pas forcément significatif à l'échelle des ouvrages (c'est-à-dire en comparaison des dispersions entre gâchées). Les résultats des évaluations du malaxage ont été publiés ce qui est une source importante de données pour la communauté du béton.

Les publications ont eu lieu dans une revue technique francophone [VdLD<sup>+</sup>00] pour les professionnels, et dans une revue internationale à comité de lecture [VdLD<sup>+</sup>03] pour les chercheurs.

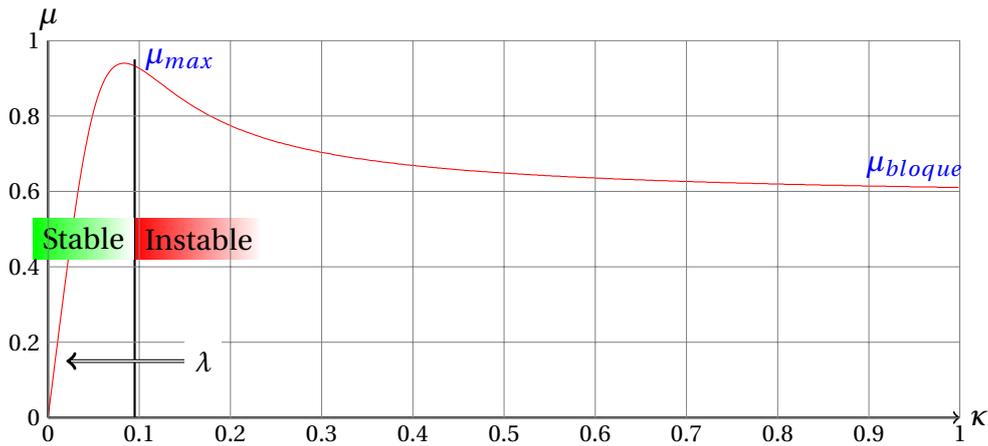


FIG. 2.9 – Coefficient de frottement longitudinal en fonction du taux de glissement, illustration de la pente à l’origine

## 2.2 Usage

### 2.2.1 Estimation de l’adhérence routière maximale

**La question posée** Les systèmes avancés d’assistance au conducteur d’un véhicule (Adas en anglais) sont basés sur des modèles utilisant une information sur la décélération maximale du véhicule et donc sur l’adhérence maximale entre les pneumatiques et la chaussée. Cette adhérence maximale n’est pas mobilisée en situation de conduite normale. Elle est sollicitée en situations critiques qui peuvent être dangereuses. L’attente de Renault était de mieux estimer cette adhérence maximale à partir d’une conduite normale. Ceci rejoignait aussi une préoccupation des gestionnaires de réseaux routier afin de suivre le niveau d’adhérence du réseau.

Il s’agissait de savoir si il était possible de prédire le coefficient de frottement maximal d’un couple pneumatique/chaussée lors d’un freinage en ligne droite d’un véhicule à partir de mesures proprioceptives c’est à dire à partir de mesures sur l’état du véhicule. L’interaction pneumatique-chaussée est représentée dans le plan  $(\mu, \kappa)$  avec  $\mu$  est le coefficient de frottement et  $\kappa$  est le taux de glissement.

La figure 2.9 illustre cette relation. Nous avons montré dans le chapitre “ méthodologies ” que pour une vitesse donnée et pour une charge constante, la relation est divisée en deux parties : la première partie de la courbe est la partie stable du freinage. Une caractéristique du début de cette courbe est la pente de la droite à l’origine (ou proche de l’origine) :  $\frac{d\mu}{d\kappa}$ , notée  $\lambda$ , et appelée “ raideur ”. Le coefficient de frottement atteint un maximum, c’est ce point que recherche les systèmes de type ABS. La deuxième partie montre une décroissance vers une valeur d’adhérence lorsque la roue est bloquée, le freinage est instable sur cette partie.

Il existe un brevet Michelin ([Mic02]) qui indique que la prédiction du  $\mu_{max}$  est possible lorsque la moitié du taux de glissement a été atteint selon la formule ci-dessous.

$$\frac{\mu_{max}/\kappa|_{\mu_{max}}}{\mu(\frac{\kappa|_{\mu_{max}}}{2})/\frac{\kappa|_{\mu_{max}}}{2}} = 0.58 \quad (2.1)$$

Cette relation remarquable nécessite d’avoir atteint 86 % (=  $1/(2 \times 0.58)$ ) du  $\mu_{max}$  ce qui est

rarement le cas en situation de conduite normale. L'entreprise Renault voulait savoir si il était possible de faire une prédiction en dessous de cette limite. La thèse Cifre d'Arnaud Andrieux a été construite sur cette problématique. Le manuscrit de thèse ([And09]) est confidentiel.

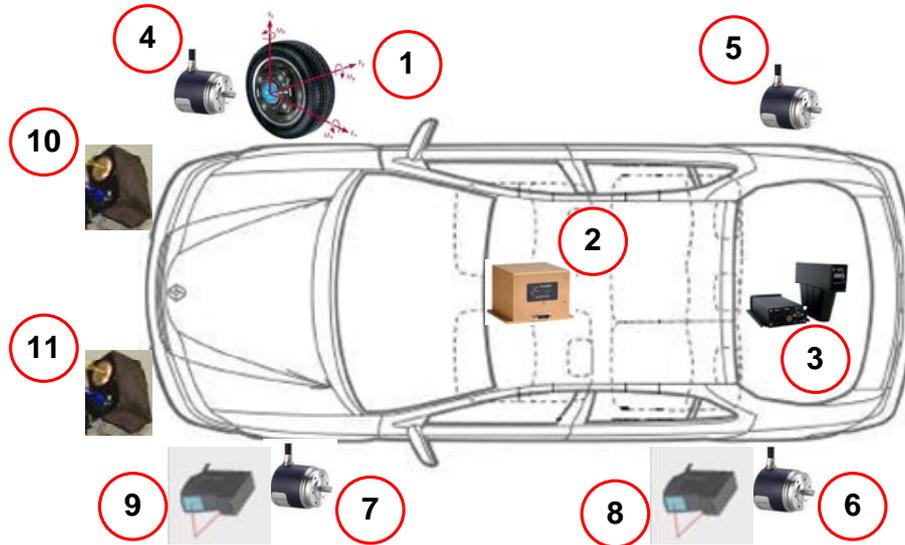


FIG. 2.10 – Localisation des capteurs embarqués sur le véhicule d'essais « laboratoire ».

Capteur	N°	Fonction	Précision
Kistler S625	1	Roue dynamométrique mesurant les forces et les moments dans l'aire de contact pneumatique-chaussée.	Linéarité pleine échelle 0.39%
Crossbow VG700AA	2	Centrale inertielle mesurant les accélérations du véhicule.	±1%
Datron S400	3	Correvit bi-axial mesurant la vitesse de référence du véhicule.	0.1%
Ivo G0355	4 à 7	Codeur angulaire mesurant la vitesse angulaire des roues.	10000 pts/tr
Keyence LK – G157	8 à 9	Télémètre laser mesurant la variation du rayon effectif des roues.	Linéarité pleine échelle 0.05%
Aquasens	10 à 11	Capteur optique pour mesurer la hauteur d'eau sur la chaussée en amont des pneus.	±0.1mm

TAB. 2.1 – Capteurs embarqués sur le véhicule d'essais « laboratoire »

**La démarche mise en œuvre** La recherche bibliographique a montré qu'il n'existait pas de données expérimentales publiées sur la relation  $\mu, \kappa$  pour un véhicule sur différents revêtements. Le défi était métrologique : en effet, en freinage d'urgence, le pic de la courbe (le  $\mu_{max}$ ) est atteint en 0,2 s. Par ailleurs, lors d'un freinage d'urgence, le transfert de charge de l'arrière vers l'avant, en-

## 2.2. USAGE

traîne des phénomènes transitoires. Il s'agissait de trouver une façon de construire la courbe mu kappa. Nous avons proposé la méthode suivante :

- le véhicule est en ligne droite à la vitesse de 90 km/h ;
- un freinage à couple constant est déclenché grâce à un robot de freinage ;
- le véhicule se stabilise autour d'un taux de glissement constant (la preuve de l'existence de cette phase est décrite dans la partie théorique de cette synthèse) ;
- le conducteur arrête le véhicule avec un freinage manuel.

Cette procédure est effectuée sur différents revêtements avec toujours le même mouillage (en terme de quantité d'eau déversé sur la chaussée) et avec différents pneumatiques.

Nous avons utilisés 8 trains de pneumatiques : pneumatique hivers ou été, pneumatique neuf ou usé, deux marques différentes. Les pneumatiques ne sont pas décrits pour des raisons de confidentialité.

Les revêtements utilisés sont présentés dans le tableau 2.2<sup>2 3</sup>.



FIG. 2.11 – Vue aérienne de la piste de référence du site Nantais de l'Ifsttar (issue de la thèse de Arnaud Andrieux).

Nous avons utilisé une berline classique. Les capteurs utilisés et leurs localisation sont présentés dans la table 2.1 et la figure 2.10.

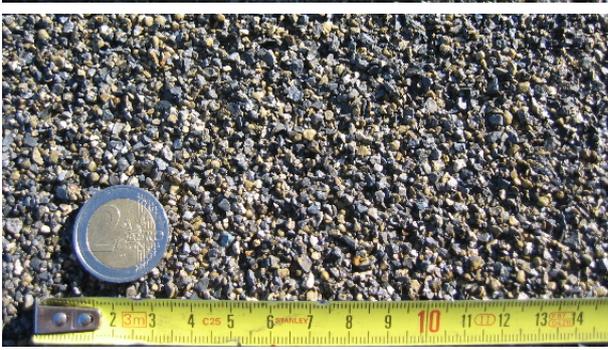
Les mesures s'effectuent pendant l'essai complet. La phase de stabilisation est détectée en analysant l'estimation du taux de glissement. Une fois celui-ci stabilisé, le coefficient de frottement est calculé. Ceci permet de calculer un point de la courbe  $\mu, \kappa$ . En variant le couple constant de freinage appliqué, nous pouvons balayer cette courbe. Plus de 1000 freinages ont été réalisés afin de tester toutes les modalités et de disposer d'essais de répétabilité.

**La réponse** Gustafsson [Gus93] [Gus97] est le premier à mettre en évidence, d'un point de vue expérimental, une relation entre  $\lambda$  et  $\mu_{max}$ . Cette relation est illustrée par la courbe 2.12. Cette relation est vraie dans les cas extrêmes, ici, entre enrobés et neige.

Avec ces travaux, de nombreuses équipes travaillaient sur l'estimation du  $\mu_{max}$  à partir des faibles sollicitations et de capteurs proprioceptifs en extrapolant cette relation à des cas de conduites

2. Dans ce tableau, CFL40 est le Coefficient de Frottement Longitudinal fourni par un appareil de mesure conventionnel appelé ADHERA utilisant un pneu lisse AIPCR (Association Internationale Pour le Congrès de la Route). La mesure du CFL40 est effectuée roue bloquée avec 1 mm d'épaisseur d'eau, à 40 km/h sous une charge de 250 daN.

3. Dans ce tableau, PTE est la Profondeur de Texture Équivalente fournie par un appareil de mesure conventionnel appelé Rugolaser

Revêtement	Nom et description
 <p>A photograph showing a smooth, light-colored epoxy coating. A 2 Euro coin and a yellow ruler are placed on the surface for scale.</p>	<p><b>Planche Epoxy</b> : Revêtement fabriqué avec une résine époxy. Il est utilisé pour les très faibles conditions d'adhérence. Quand cette planche est mouillée, son comportement est similaire à celui de la glace. CFL40= 0.1 et PTE= 0.15.</p>
 <p>A photograph showing a concrete surface covered with a white, pebbled paint. A 2 Euro coin and a yellow ruler are placed on the surface for scale.</p>	<p><b>Planche Peinte</b> : Béton bitumineux souple recouvert d'une peinture destinée aux passages pour piétons. CFL40= 0.50 et PTE= 0.50.</p>
 <p>A photograph showing a dark, porous drainage concrete surface. A 2 Euro coin and a yellow ruler are placed on the surface for scale.</p>	<p><b>Planche Drainante</b> : Béton drainant 0/6. Ce revêtement couvre 5% du réseau routier Français. Il est utilisé dans les localités soumises à de fréquentes précipitations. CFL40= 0.67 et PTE= 0.88.</p>
 <p>A photograph showing a dark, semi-rough concrete surface. A 2 Euro coin and a yellow ruler are placed on the surface for scale.</p>	<p><b>Planche BBSG</b> : Béton bitumineux semi-grenu (BBSG0/10). Ce revêtement est le plus utilisé sur le réseau routier Français (<math>\approx 40\%</math>). CFL40= 0.71 et PTE= 0.62.</p>
 <p>A photograph showing a concrete surface with a mix of small, dark and light aggregate. A 2 Euro coin and a yellow ruler are placed on the surface for scale.</p>	<p><b>Planche Colgrip</b> : Revêtement composé d'un liant en béton et époxy, mélangé à des granulats très durs (bauxite réfractaire) de taille comprise entre 1 mm et 3 mm. Il est mis en œuvre dans les zones accidentogènes pour ces très bonnes propriétés d'adhérence. CFL40= 0.93 et PTE= 1.54.</p>

TAB. 2.2 – Propriétés des revêtements testés (issue de la thèse de Arnaud Andrieux)

## 2.2. USAGE

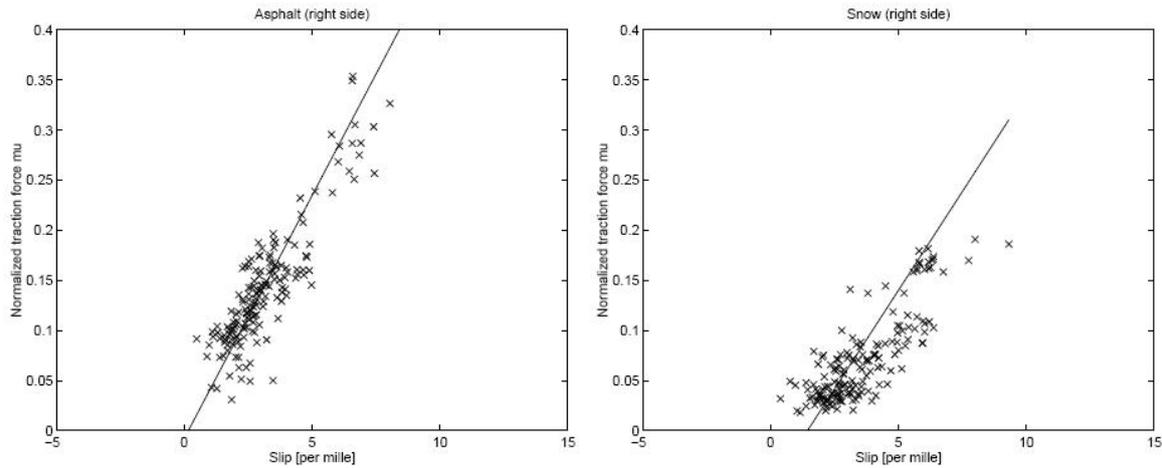


FIG. 2.12 – Mise en évidence de la relation entre la raideur,  $\lambda$ , et  $\mu_{max}$  dans des situations extrêmes selon Gustafsson [Gus93] [Gus97].

plus réalistes (notamment l'équipe du MIT : [Uch01]). En revanche, aucune équipe ne publiait des résultats permettant de confirmer ou d'infirmer les résultats initiaux de Gustafsson pour des différences d'adhérence plus réalistes. Nos travaux ont permis de changer de paradigme en passant du paradigme de la corrélation entre faible sollicitation et forte sollicitation illustrée par la courbe 2.12 au paradigme de l'indépendance, dans une certaine limite, entre faible sollicitation et forte sollicitation illustrée par la figure 2.13 qui est issue de nos travaux.

En effet, cette figure présente différentes courbes pour les mêmes pneumatiques, le même mouillage, le même véhicule. Les différences proviennent des revêtements. Nous avons montré que lors des faibles sollicitations, pour des adhérences maximales distinctes, les adhérences mobilisées étaient indiscernables. Ceci ruine l'idée que nous pouvons prévoir l'adhérence maximale à partir de situations de conduite normale en utilisant des capteurs proprioceptifs.

Ces résultats ont été publiés dans Vehicle System Dynamics ([AVLC10]). La communauté de la dynamique du véhicule a, ainsi, pu bénéficier de données expérimentales fiables sur les freinages.

Nos résultats expérimentaux montrent que la relation  $\mu$ ,  $\kappa$  lors des faibles sollicitations est alors très dépendante du pneumatique et moins de la chaussée. Les résultats complets sont confidentiels mais ont abouti au dépôt d'un brevet sur la détection de l'usure d'un pneumatique : [ACV10].

Ces travaux se sont cristallisés dans la thèse Cifre de Arnaud Andrieux que j'ai encadré à 33 % après avoir encadré son master 2.

Cette étude m'a permis d'acquérir des compétences en dynamique des véhicules que j'ai retransmises lors d'un cours éponyme que j'ai donné à l'Ecole Centrale de Nantes.

Lors de ce travail, j'ai acquis une compétence en adhérence. Actuellement, je fais partie d'un groupe d'expert qui conseille la société Tisséo, exploitant du métro à pneu sur Toulouse (métro automatisé de type VAL) sur la mise à jour de ses procédures de sécurité. La problématique est identique à celle du véhicule routier : une adhérence minimale est requise pour que le métro fonctionne de manière complètement sécurisée.

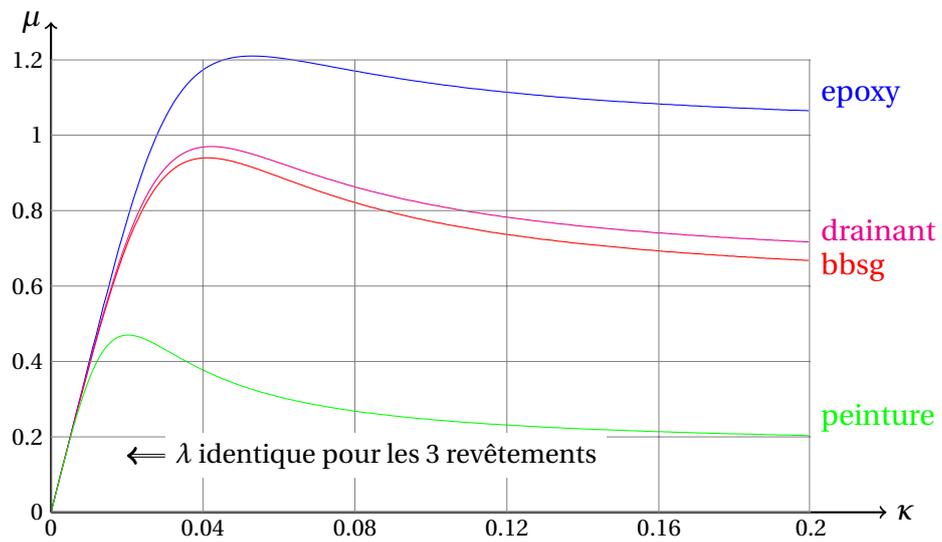


FIG. 2.13 – Indépendance entre la raideur,  $\lambda$ , et l'adhérence maximale,  $\mu_{max}$  dans des situations habituelles

## 2.2.2 Consommation des trains à grande vitesse

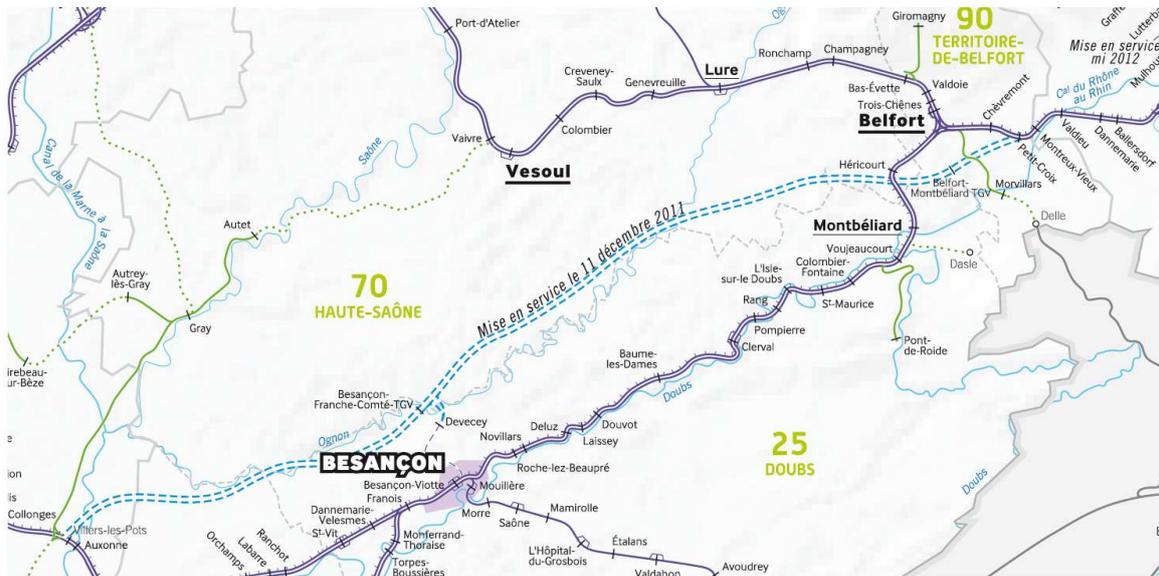


FIG. 2.14 – Situation de la lgv Rhin-Rhône (issue d'un document public de RFF)

**La question posée** L'entreprise RFF (Réseau Ferré de France), (devenue depuis janvier 2015, SNCF Réseau) souhaitait évaluer ses référentiels techniques de conception à l'aune de deux critères : la consommation d'énergie<sup>4</sup> et les émissions de gaz à effet de serre en tenant compte de la construction de l'infrastructure, de sa maintenance mais aussi de l'usage, c'est à dire de la consommation des trains circulant sur cette infrastructure. Dans le laboratoire Ease (Environnement Aménagement, Sécurité, Éco-conception), nous avons les compétences pour évaluer la phase de construction mais il restait à évaluer la phase d'usage. Un partenariat de recherche entre RFF et l'Ifsttar, intitulé "Améliorer l'efficacité énergie-carbone des investissements", a été monté afin d'effectuer des travaux de recherche sur l'impact énergétique du tracé ferroviaire des lignes à grande vitesse (lgv). J'étais le responsable scientifique pour l'Ifsttar de ce partenariat. La thèse Cifre de Romain Bosquet ([Bos15]) sur la modélisation énergétique et l'identification des trains pour l'écoconception des lignes ferroviaires à grande vitesse s'est déroulée dans ce partenariat. L'attente de la SNCF était d'avoir un modèle de consommation de trains à grande vitesse validé afin de pouvoir tester différentes variantes de tracé.

**La démarche mise en œuvre** Il n'y avait pas de modèles de consommations publiés reposant sur des expérimentations suffisamment décrites. Nous avons profité des essais de réception de la lgv Rhin-Rhône pour identifier le modèle de consommation. La localisation géographique de la ligne est présentée dans la figure 2.14. Le train instrumenté pour les essais est un TGV Dasye, acronyme de "Duplex Asynchrone ERTMS" (ERTMS indique qu'il est compatible le norme européenne de gestion de trafic éponyme). Il est illustré sur la figure 2.15.

4. En physique, le concept d'énergie a été précisément inventé pour tenir compte de ce qui était conservé lors de la transformation d'un état d'un système dans un autre ! La consommation d'énergie n'a, donc, en théorie, pas de sens. Dans ce manuscrit, la consommation d'énergie correspond à la part de l'énergie utilisable par l'Homme qui est transformé lors du processus dans une forme inutilisée par l'Homme.



FIG. 2.15 – TGV dasye utilisé pour la réception de la ligne à grande vitesse Rhin-Rhône

Nous avons ainsi pu bénéficier de données mesurées sur 200 trajets (environ 69 heures de mesures). Cette expérimentation faisait intervenir différents sous-traitants de la SNCF. Du point de vue métrologique, ce fut une difficulté car nous ne maîtrisons pas la chaîne de mesure.

Il est apparu qu'un modèle qui réduisait le train à un point pesant était suffisant pour les objectifs visés en écoconception. La difficulté était dans le traitement des données et dans la détermination des paramètres essentiels du modèle. Nous avons appliqué les techniques robotiques d'identification pour aboutir au modèle suivant :

$$P_p = m(g \sin(\alpha))V + mkaV + BV^2 + C(\rho(V + V_{vent})^2)V + D_u I + P_{co} \quad (2.2)$$

avec :

- $P_p$  est la puissance appelée au pantographe (elle peut être négative en phase de freinage) ;
- $m$  est la masse du train, elle est connue ( $m=380$  t à vide,  $m=424$  t en charge) ;
- $g$  est l'accélération de la gravité,  $\alpha$  est la déclivité locale de la voie ;
- $V$  est la vitesse du train,  $a$  son accélération  $k$  est le coefficient d'inertie de la masse tournante.  $k = 1,04$ , ce terme est connu. Il permet de prendre en compte, en partie, l'énergie cinétique des masses tournantes dans un modèle point qui, structurellement, ne peut pas en tenir compte explicitement.
- $B$  regroupe toutes les pertes électriques et mécaniques qui varient en puissance avec la vitesse au carré. Ce terme a été identifié :  $B = 154$  kg/s avec un écart-type  $\sigma_B = 4$  kg/s.

## 2.2. USAGE

- $\rho$  est la masse volumique,  $V_{vent}$  est la vitesse du vent projeté sur l'axe longitudinal du train. Ces données sont connues et calculées en fonction des données météorologiques.  $C$  représente principalement le coefficient des pertes liées à l'aérodynamique. Cette valeur a été identifiée :  $C = 5,04$  avec un écart-type  $\sigma_C = 0.04$ . Les pertes aérodynamiques sont prépondérantes dans ce problème (c'est, évidemment, une différence majeure avec les applications classiques en robotique).
- $I$  est le courant.  $D_u$  rassemble toute les pertes électriques qui varie en puissance avec le courant. C'est une paramètre identifié :  $D_u = 4250 \text{ V}$  avec  $\sigma_{D_u} = 14 \text{ V}$ .
- $P_{co}$  est une perte de puissance constante. Elle a été identifiés :  $P_{co} = 287 \times 10^3 \text{ W}$  avec un écart type de  $\sigma_{P_{co}} = 5 \times 10^3 \text{ W}$ .

Ce modèle permet de prédire 97 % de l'énergie consommée.

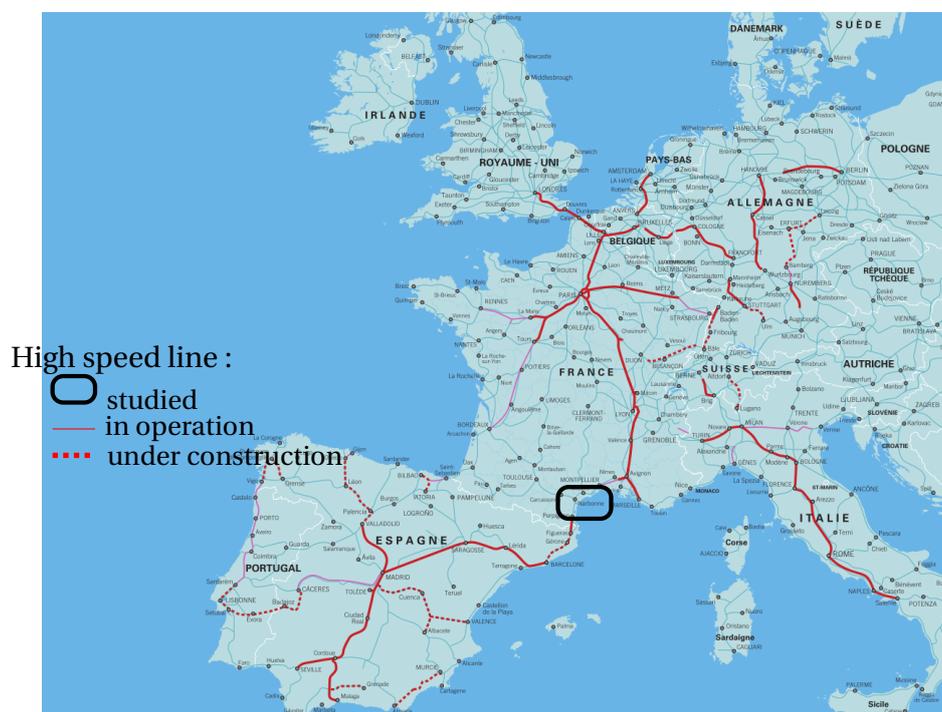


FIG. 2.16 – Réseau grande vitesse Européen (vitesse > 220 km/h) en 2009 fournie par la SNCF, avec la localisation du projet Montpellier-Perpignan

**La réponse** Avant ces travaux, les données de consommation des trains étaient fournies en joules par kilomètre. Il n'était pas tenu compte de la vitesse des trains. Par ailleurs, le fondement des chiffres fournis n'était pas clairement établi.

Notre partenaire, la SNCF, et la communauté du ferroviaire disposent, maintenant, d'un modèle de consommation de train à grande vitesse validé sur des expérimentations. La communauté bénéficie aussi d'une méthodologie pour identifier les paramètres d'un train différent.

Le partenariat avec la SNCF était plus vaste : il s'agissait d'évaluer les coûts en énergie dès la phase de conception de différentes variantes.

La décision d'un tracé ferroviaire est un processus complexe, qui peut être source de conflits entre les riverains, les associations écologiques, les élus, le gestionnaire de l'infrastructure, etc.



FIG. 2.17 – Les deux tracés possibles : au dessus une ligne dédiée au transport des passagers, au dessous une ligne mixte permettant le transport des passagers et du fret

([Leh12]). Suite à une première phase d'étude, il est fréquent d'aboutir à différentes propositions de tracé. Il est alors intéressant de les comparer d'un point de vue énergétique afin d'aider à la décision du choix final.

Nous nous sommes intéressés au projet de ligne nouvelle Montpellier-Perpignan. Comme l'illustre la figure 2.16, ce projet de ligne nouvelle est un barreau manquant de la grande vitesse ferroviaire européenne. Il permet de raccorder les lignes entre la France et l'Espagne et ainsi d'agrandir le réseau grande vitesse européen.

La zone des Corbières comporte 2 tracés possibles : un dédié au trafic voyageur (appelé new passenger line – NPL), l'autre acceptant un trafic voyageur et fret (appelé new mixed line – NML). Les deux tracés sont visibles sur la figure 2.17, le tracé voyageur est à l'ouest (au-dessus sur la figure) du tracé mixte. Le premier tracé ne peut pas accepter du trafic fret car il passe dans un massif montagneux (la déclivité maximale pour une ligne mixte est de 12,5 mm/m). Si ce premier tracé est choisi, le trafic fret passera par la ligne classique. Si le deuxième tracé est choisi, une partie du trafic fret passera par ce tracé et une autre partie par la ligne classique.

Grâce au modèle de consommation que nous avons établi ainsi qu'à un modèle connu pour le fret, nous avons pu simuler le trafic sur 50 ans et établir que l'énergie d'usage correspondant au

## 2.2. USAGE

premier tracé était de  $1,2 \times 10^7$  GJ et de  $1,6 \times 10^7$  GJ pour le second tracé.

Le choix entre ligne mixte et ligne dédiée a fait l'objet d'un débat public sur ce projet de ligne nouvelle ([CND14]). Les résultats présentés ici, auraient pu éclairer ce point technique lors de ces réunions.

Ces résultats ont été publiés dans [BJV<sup>+</sup>14]. La méthodologie de l'évaluation a fait l'objet d'une publication au sein d'un symposium dédié à l'Analyse du cycle de vie des infrastructures ([VCMP<sup>+</sup>12]). Le manuscrit de thèse de Romain Bosquet ([Bos15], thèse que j'ai encadrée à 25 %) présente l'ensemble des résultats et des expérimentations.

Au delà de cette application directe, notre travail a montré que le choix de la vitesse était prépondérant sur la consommation énergétique des lignes à grande vitesse. Ce n'est pas une grande découverte! Mais, maintenant, nous pouvons quantifier le coût énergétique de la vitesse lors de la phase d'usage. En nous associant avec les collègues de notre laboratoire qui travaillent sur la construction, le concepteur a aussi le coût énergétique en terme de construction. Entre différentes vitesses possibles et donc différents tracés, nous pouvons ainsi mettre en parallèle le temps gagné et le coût de ce temps gagné en terme d'énergie. Cette possibilité nouvelle permet de passer de la conception à l'écoconception.

Ceci amène à l'idée d'une meilleure exploitation des lignes. En parallèle à ce partenariat, j'ai participé à un travail sur la détermination de fiches horaires pour les conducteurs. L'idée était de proposer différentes fiches horaires, chacune étant associée à un coût énergétique. Ces couples : temps de trajets, coût forment un front de Pareto. Chaque couple est un optimum de Pareto. La publication de ces résultats est en cours. Ainsi, mon travail sur la conception peut aussi servir à l'exploitation des lignes ferroviaires.

# Chapitre 3

## Projet de recherche

Les perspectives ont été divisées en deux parties : méthodologie et application. Cette division entre une partie théorique et une partie appliquée est artificielle. Au quotidien, ces deux parties s'interpellent et se complètent.

Dans le domaine des problèmes inverses, mes travaux ne suivront pas prioritairement la thématique actuelle en robotique de la prise en compte des élasticités mais s'orienteront vers l'approfondissement des outils statistiques et, notamment, de l'approche bayésienne. Cette inflexion provient des applications auxquelles je suis confrontée avec des systèmes de mesures hétérogènes. Les outils bayésiens permettent d'envisager leur intégration.

Dans le domaine de la théorie de la viabilité, je me forme à des outils nouveaux comme le calcul parallèle sur carte graphique qui permettent d'élargir les systèmes auxquels cette théorie peut s'appliquer. Cette approche a été utilisée dans le domaine écologique, notamment concernant les quotas de pêche. Cette théorie est un réservoir à concepts qui seront appliqués dans mes futures travaux en écoconception.

Sur la partie applicative, mes perspectives sont centrées sur l'écoconception. Ce choix provient d'une analyse des attentes de notre société. En effet, les contraintes écologiques rendent notre système de transport fragile. L'ambition de cette recherche est d'aider à une reconception de celui-là en intégrant ces contraintes écologiques. L'écoconception est un domaine vaste car les critères écologiques sont variés et le domaine d'étude entre construction, usage et maintenant très étendue. Mes efforts de recherche seront concentrés sur les critères : énergie, CO<sub>2</sub> et sur la phase d'usage. Cela permet aussi de positionner mes travaux sur le thème porteur d'une meilleure utilisation des infrastructures existantes. Sur les lignes à grande vitesse, ce travail est bien engagé. Dans le domaine ferroviaire, il s'agit de l'étendre à des voies classiques et au fret. Dans le domaine routier, nous abordons l'écoconception avec une approche originale centrée sur les paramètres géométriques du tracé.

### *3.1 Méthodologies*

#### **Problèmes inverses**

Du point de vue de la robotique, les thématiques vivantes (et même bouillonnantes!) de recherche portent sur la prise en compte des élasticités dans les systèmes mécaniques articulés et de leurs identifications. Cependant, dans mon domaine d'application actuelle, l'écoconception, la problématique s'oriente sur des modèles de consommation d'énergie plus simples mais moins

### 3.2. ECOCONCEPTION

précis qu'en robotique avec une instrumentation et des essais pour l'identification qui sont aussi différents des bras manipulateurs. Par exemple, la problématique principale de l'identification d'un modèle de consommation électrique d'un train à grande vitesse est que l'instrumentation est hétérogène et n'est pas maîtrisée pour des raisons de propriétés intellectuelle. Il s'agit donc de retrouver des paramètres du train à partir d'une instrumentation variée. Pour traiter cela, nous avons d'abord utilisé les heuristiques que je maîtrise en robotiques : filtrage de butterworth, moindres carrés, tests statistiques.

Maintenant afin d'améliorer la précision des résultats à partir de mesures non maîtrisées, je reviens vers une approche théorique plus fondamentale : l'approche bayésienne. Une approche bayésienne complète est, actuellement, hors de portée compte tenu des dimensions des espaces d'état et du nombre de paramètre. Des travaux sont en cours sur une application pragmatique des travaux de Jaynes [JB03].

Au delà de l'application immédiate à la question de la consommation d'énergie des trains, cet approfondissement des aspects bayésiens de notre démarche d'identification a pour objectif d'élargir ma base théorique et d'aborder ainsi les questions de l'incertitude dans le cas de l'éco-conception.

#### **Viabilité**

Nous avons vu que la mise en œuvre de la théorie de la viabilité passait par un échantillonnage spatiale de l'espace d'état. Concrètement, cela implique que lorsqu'une dimension est rajoutée et que celle-ci est découpée en 10 intervalles, la taille du maillage est alors multipliée par 10. D'un autre côté, les algorithmes de construction d'un noyau de viabilité sont, facilement, parallélisables. Ces deux analyses nous incitent à utiliser les outils d'utilisation des cartes graphiques pour mettre en œuvre les algorithmes de la viabilité. Une première tentative a été effectuée avec succès (les résultats ont été présentés dans un congrès dont les actes ne sont pas encore publiés).

Cet investissement dans le calcul parallèle sera aussi utile à l'application de l'approche bayésienne aux problèmes inverses car celle-ci passe souvent par des méthodes de Monte-Carlo qui peuvent être implantées de manière parallèle.

La théorie de la viabilité est un réservoir à concepts qui a été appliquée dans le domaine écologique [DG11]. Ces travaux sont une source d'inspiration pour adapter ces concepts aux préoccupations de l'écoconception des infrastructures de transport.

Les derniers travaux sur la viabilité ([AD16]) portent sur les problématiques de trafic. Il s'agit d'aider le régulateur de trafic à indiquer une vitesse conseillée à chaque conducteurs afin d'optimiser le temps de parcours de l'ensemble des véhicules. Ces derniers résultats, qui sont en cours d'analyse (le livre vient de paraître en version électronique), sont prometteurs pour nos projets de recherche sur l'écoexploitation du mode routier qui sont décrit dans la section suivante.

### **3.2 *Ecoconception des systèmes de transport***

Les systèmes de transport modernes ont été, d'abord, conçus pour des objectifs militaires : il fallait mobiliser les troupes le plus rapidement possible près des frontières. Ils sont conçus pour assurer la mobilité et la sécurité et en minimisant les coûts. Les recherches dans le domaine du génie civil sont basés sur ces critères. Elles ont contribué à un système de transport, principalement basé sur la route, qui est très performant dans les pays développés ([SET00]).

Dans le domaine routier, le critère énergétique n'était pas directement pris en compte. Il était pris en compte à travers les coûts des matières premières, notamment le bitume pour les routes, et le coût des opérations de construction (essence pour les engins de chantier). Le coût d'usage, c'est à dire, l'énergie consommée par les usagers n'étaient pas explicitement pris en compte dans le cas de la route.

Le domaine ferroviaire est différent car les concepteurs de voie ferrée électrifiée définissent aussi le système d'alimentation du matériel roulant. Ils sont plus sensibles à cette problématique. De plus, celle-ci est plus simple que dans le cas routier car ils sont confrontés à une variété des matériels roulants beaucoup plus faible que dans le cas routier.

Les succès du système de transport ont conduit à ce que celui-ci consomme une part importante de l'énergie. Le transport routier représente, à lui seul, 32 % de l'énergie consommée en Europe et est basée sur le pétrole, ceci entraîne des recherches importantes pour modifier le système de transport (voir, entre autres, les travaux récents de [BSFH12]).

Même si il est délicat de pronostiquer un pic pétrolier car les informations officielles sur les réserves pétrolières sont sujettes à caution, il semblerait que la production de pétrole conventionnel et non conventionnel ait atteint un plateau ([JWHJ14]). Notre consommation doit donc baisser.

Par ailleurs, l'utilisation du pétrole participe à la contribution anthropologique au dérèglement climatique selon les derniers rapport du Giec, notamment la synthèse de novembre 2015 : [IPC14]. Dans ce domaine aussi, les prédictions sont difficiles. Au fur et à mesure des progrès dans la connaissance du phénomène, les scénarios sont de plus en plus pessimistes.

Pour ces deux raisons, un principe de précaution raisonné devrait nous amener à limiter notre consommation d'énergie d'origine pétrolière. Celui-ci devra être remplacée par des énergies qui ne contribuent pas au dérèglement climatique et qui soient durables. Comme nous ne pouvons pas remplacer rapidement cette énergie d'origine pétrolière, notre consommation globale en énergie devra diminuer durant une phase transitoire. Selon ce point de vue, notre système de transport actuel n'est pas durable.

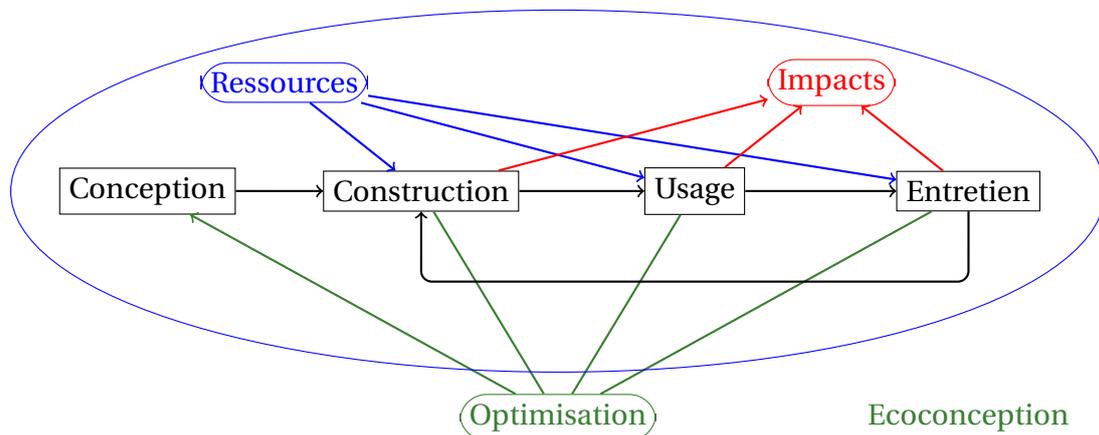


FIG. 3.1 – Ecoconception

C'est pourquoi, les applications de mon travail de recherche se tournent vers l'écoconception des systèmes de transport. Il s'agit d'aider à concevoir des systèmes de transport qui soient moins consommateurs en énergie. La figure 3.1 illustre la démarche générale de l'écoconception. Les trois phases : construction, usage, entretien de la vie d'une infrastructure sont représentées. Elles

### 3.2. ECOCONCEPTION

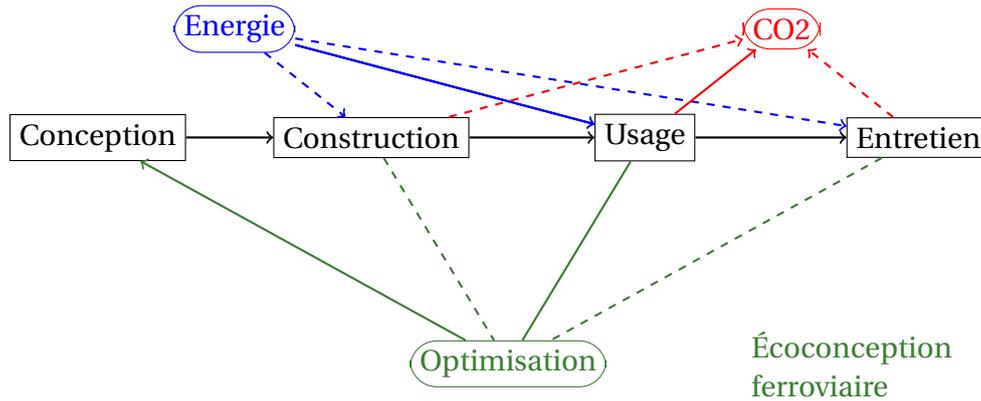


FIG. 3.2 – Ecoconception : Travail effectué sur les lignes à grande vitesse

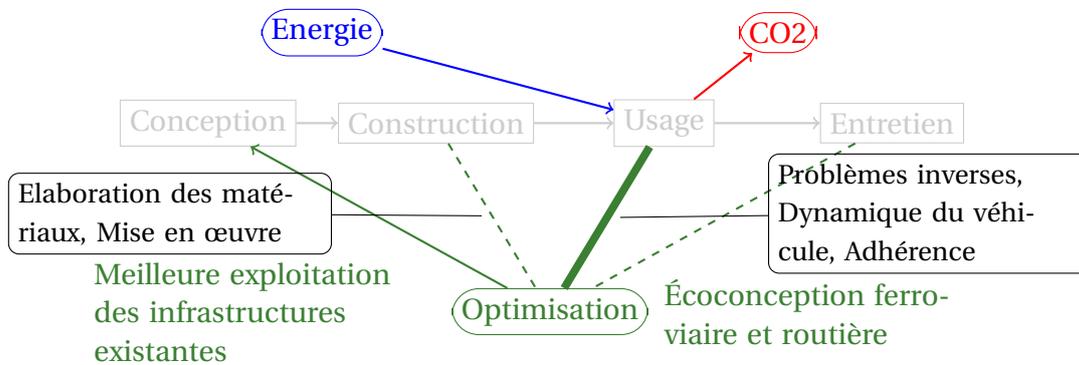


FIG. 3.3 – Ecoconception : objectifs de recherche

consommant des ressources et impactent l'environnement. La construction permet l'usage qui dégrade l'infrastructure et entraîne des étapes d'entretien. Certains entretiens assez lourds s'apparentent à des phases de constructions qui modifient l'usage. Par exemple, la mise à niveau des lignes ferroviaire permet d'augmenter la vitesse de circulation des trains.

L'objectif de l'écoconception est de régler les paramètres de la conception afin de minimiser le prélèvement de ressources et de minimiser les impacts négatifs tout en assurant le service de mobilité à un niveau de sécurité maximal. Pour cela, chacune des phases doit être évaluée (ce qui est représenté par les traits verts sur la figure 3.1).

Nous avons appliqué cette démarche dans notre travail sur les lignes à grande vitesse. C'est ce qui est illustré par la figure 3.2. La phase d'usage a été évaluée par rapport à deux critères l'énergie et le CO2. Dans ce manuscrit, seul le critère énergétique a été présenté mais dans l'article publié ([BJV<sup>+</sup> 14]), les deux critères sont pris en compte. L'optimisation a été effectuée en comparant deux variantes. Dans le manuscrit de thèse du doctorant, l'étude est allée plus loin en proposant un tracé optimisé pour le critère énergétique pour les points de départ et d'arrivée des deux variantes.

Les évaluations de la construction et de l'entretien sont en pointillé car celles-ci ont été effectuées par des collègues de notre laboratoire. Nous étions en interaction mais je n'y ai pas participé directement.

Mon objectif est d'aller vers une démarche symbolisée par le schéma 3.3. Il s'agit de rester sur

les critères d'évaluation de l'énergie et du CO2 et d'étendre l'écoconception au domaine routier.

Pour cela, je mobiliserai sur la phase d'usage mes compétences en problèmes inverses afin d'identifier les modèles de consommation. Ces modèles sont basés sur la physique des phénomènes mis en jeu notamment en dynamique des véhicules.

Jusqu'à présent, j'ai monté des expérimentations dédiées pour identifier les modèles car les industriels étaient dans une logique d'une protection de la propriété intellectuelle tout azimut. Dans ma pratique, je constate que cette attitude cède, un peu, le pas à la logique des partages de données afin de faire progresser notre compréhension des phénomènes en mutualisant les coûts de recherche et développement. Dans cette perspective, les bases de données seront plus accessibles. Je pense notamment à la base de données sur la consommation électrique des trains qui est, peu à peu, intégrée à la base de données Socle, pour le ferroviaire et à l'observatoire des vitesses pour le routier. Nous pouvons envisager un traitement statistique de ces bases de données pour renseigner nos modèles de consommation.

Le lien avec la construction ne sera pas rompu, je pourrai continuer de dialoguer avec mes collègues qui évaluent les phases de construction et d'entretien en mobilisant mes compétences dans le domaine de l'élaboration des matériaux et de leurs mises en œuvre (comme le compactage).

Sur ce schéma, la phase d'évaluation est en gras car une meilleure modélisation de cette phase contribue à l'écoconception mais aussi à une meilleure exploitation des infrastructures existantes. Cette dernière thématique est une demande sociale très importante car elle répond à des préoccupations environnementales, économiques et sociales en évitant les conflits sociaux, les coûts économiques et les impacts environnementaux liés à la construction de nouvelles infrastructures. Une meilleure exploitation passe souvent par une densification du trafic. Dans ce contexte, la maîtrise de l'adhérence est primordiale. C'est ce que j'ai constaté dans l'expertise sur le métro de Toulouse. J'amènerai dans ce domaine mes compétences acquises lors de mon travail de recherche avec Renault.

J'ai déjà infléchi mon travail de recherche afin de contribuer à cette thématique à travers une collaboration avec le laboratoire Estas de Lille qui a abouti à la soumission d'une publication sur la détermination des fiches horaires. Dans l'avenir, cette inflexion sera poursuivie.

En résumé, mon objectif est de développer une expertise dans l'usage des infrastructures en lien avec leur conception en rassemblant mes compétences acquises pendant ma carrière. Dans la suite, mes perspectives de recherche en écoconception sont précisées selon le monde considéré : ferroviaire ou routier.

### **ferroviaire**

Le modèle de consommation des tgv que nous avons développé représente un progrès par rapport à l'existant mais il reste très rudimentaire : il est conçu pour un matériel roulant (le tgv Dasye), pour un conducteur et il est basse fréquence. La première étape est d'avoir un meilleur modèle du conducteur car la consommation varierait d'au moins 20 % selon le conducteur. Dans cet objectif, nous pourrions nous rapprocher de l'équipe PsysCoTec de l'IRCCyN.

Par ailleurs, nous avons construit des outils pour les lignes à grande vitesse. Les prochaines étapes sont d'élargir à d'autres infrastructures.

- L'élargissement aux infrastructures pour les Trains Express Régional (TER). En effet, il est constaté de forts investissements dans ce type d'infrastructure et un ralentissement des investissements dans les lignes à grande vitesse. A mon niveau, il s'agit de proposer des outils d'évaluation énergétique de différentes stratégies d'exploitation des lignes qui seront

### 3.2. ECOCONCEPTION

modernisés, par exemple, en évaluant le coût énergétique des arrêts dans des gares secondaires.

Au delà de cet aspect très technique, j'anime un thème transversal dans le département AME (aménagement, mobilité, environnement) qui s'appelle aussi TER (pour transport à l'échelle régional). Il s'agit de présenter une approche pluridisciplinaire afin d'encourager une mobilité durable au niveau régional. Dans ce projet, mes collègues psychologues se proposent de travailler sur les freins comportementaux au changement modal. Mes collègues acousticiens travaillent sur les nuisances sonores. Mes collègues spécialistes du vélo étudient les itinéraires de rabattement vers les gares.

- L'élargissement au fret ferroviaire. Un report modal massif des marchandises transportées par les camions vers les trains demandent de revoir le système du fret ferroviaire dans son ensemble. Cette refonte ne pourra éviter la question énergétique. Dans la transition énergétique, nous pouvons adapter nos méthodologies d'évaluations au fret. Une adaptation au fret ferroviaire est nécessaire car nous avons montré que les gains sur les lignes à grande vitesse passaient par une meilleure exploitation des lignes et une meilleure maîtrise des vitesses. Cette préconisation a une origine physique : les termes aérodynamiques sont prépondérants. Dans le cas du fret, la problématique de l'énergie consommée est plutôt centrée sur la pente compte tenu des masses en jeu. Cela demande un travail spécifique pour ce type de matériel roulant.

#### **Routier**

Initialement, nos objectifs en écoconceptions concernaient la route. Nous avons acquis une compétence ferroviaire à la suite d'un contrat avec Réseau Ferré de France. Dans le domaine routier, les thématiques de recherche en écoconception routière concernent souvent la diminution de la résistance au roulement. Selon une idée de mon collègue Alex Coiret, nous développons une approche originale en nous intéressant à l'influence de la géométrie des routes sur la consommation.

Les difficultés sont, notamment, d'ordre météorologique. Par exemple, nous travaillons, actuellement, sur les dévers dans les virages. Ceux-ci agissent faiblement sur la consommation des véhicules (de l'ordre de 1 %). Or, cette consommation varie de manière importante avec des paramètres difficiles à contrôler ou à mesurer : champ de vent, taux d'humidité, température des pneumatiques, rendement du moteur. Il s'agit de trouver des moyens pour mettre en exergue ce paramètre.

Il peut paraître peu justifié d'un point de vue pratique de travailler sur ce type de paramètre car les gains en consommation d'essence sont faibles. Cependant, ces gains s'appliquent sur tout le trafic. En agrégeant les gains sur tout le trafic, l'intérêt de s'intéresser à ces phénomènes du second ordre devient manifeste.

Un autre travail très important du point de vue pratique que nous menons actuellement concerne l'exploitation du réseau routier de telle sorte que cette exploitation rende possible l'écoconduite des véhicules légers et des poids lourds. La perspective de voies dédiées au poids lourds permet d'envisager une écoconception d'infrastructure qui tienne compte explicitement de la consommation d'énergie à l'usage. C'est une thématique originale qui permet de mobiliser mes compétences acquises lors de la création d'une start-up dans ce domaine.

Ces travaux sont trop récents pour pouvoir faire l'objet d'un long développement dans ce mémoire.

# Conclusion

Mes apports méthodologiques sont les suivants.

- L'utilisation de la méthode de la variable instrumentale dans le contexte des techniques robotiques d'identification des systèmes mécaniques articulés.
  1. Cette méthode donne un nouveau point de vue sur le filtrage parallèle interprétée comme l'utilisation d'une variable instrumentale particulière.
  2. La construction d'un modèle auxiliaire en utilisant le modèle dynamique direct donne une réponse satisfaisante à la question du bruit sur la matrice d'observation en proposant un estimateur qui converge en théorie et en pratique. Par ailleurs, l'algorithme de résolution présenté permet de valider de manière concomitante le modèle dynamique direct et le modèle dynamique inverse.
  3. Des tests statistiques permettant de détecter un biais ont été mis en œuvre. Le biais était indétectable en restant dans le cadre de l'utilisation classique des moindres carrés. Le contexte statistique de cet outil a permis une diffusion plus importante des techniques statistiques dans le domaine de l'identification des systèmes mécaniques articulés.
  4. Ce travail a ouvert la voie pour d'autres recherches proposant un algorithme d'identification basé uniquement sur l'information d'effort.
- La stabilité du freinage longitudinal d'un véhicule routier a été démontrée mathématiquement dans le cadre d'un modèle bicyclette. Ce travail a permis de définir une méthodologie pour construire expérimentalement la relation entre le coefficient de frottement longitudinal et le taux de glissement à partir d'essais de freinage d'un véhicule.
- La théorie de la viabilité est à la base d'une méthode pour avertir le conducteur que sa trajectoire n'est plus compatible avec l'utilisation de commande apaisée. Ce travail apporte un regard nouveau en sécurité routière : il ne s'agit pas de calculer en temps réel des commandes optimales ou robustes mais de savoir si elles existent et si elles sont accessibles au conducteur. Elle analyse le système en terme d'ensemble. Dans le travail effectué, le noyau de viabilité est l'ensemble des états qui sont compatibles avec une conduite apaisée, il caractérise la résilience du système. L'analyse en terme de sécurité routière du système Véhicule-Infrastructure-Conducteur devient l'analyse d'un ensemble. C'est un changement de point de vue radical.

Les techniques robotiques ont été appliquées à la phase de construction et la phase d'usage des infrastructures de transport.

- Pour la construction des infrastructures de transport, j'ai contribué aux phases de mise en œuvre et d'élaboration des matériaux.
  - L'application la plus directe des techniques robotiques a été l'estimation du torseur des efforts entre une bille de compacteur et l'enrobé. Le compacteur est modélisé comme

## CONCLUSION

un système mécanique articulé. A partir de cette modélisation, la méthodologie robotique s'applique. Il a fallu l'adapter à notre système de mesure qui comprenait des capteurs mesurant des variables eulériennes. La métrologie était, d'ailleurs, un des défis de ce sujet.

- L'évaluation des techniques d'élaboration des matériaux a, surtout, été l'occasion d'utiliser les outils statistiques. Nous avons apporté à la communauté des données précieuses en terme de temps de séjour des matériaux dans les centrales continues. Nous avons, aussi, répondu à une question importante, du point de vue industriel, sur le temps de malaxage des bétons comprenant des ciments composés par rapport à des bétons comprenant des ciments et des additifs ajoutés au moment du malaxage. Dans ce domaine aussi, des données importantes sur l'hétérogénéité des gâchés en fonction du temps de malaxage ont été publiées.
- Pour l'usage des infrastructures de transport, mes contributions ont concerné l'adhérence pneumatique-chaussée et, plus récemment, la consommation électrique des trains à grande vitesse.
  - Sur la phase d'usage, mon premier travail concernait l'estimation de l'adhérence maximale d'un véhicule routier à partir d'une situation de conduite normale. Il y avait peu de données expérimentales publiques. Nous avons construit un protocole expérimental solide qui a permis de conclure que cette estimation n'était pas possible en utilisant seulement des capteurs proprioceptifs. J'ai mobilisé les techniques utilisées en robotique comme le filtrage mais aussi les outils d'automatiques non linéaire pour démontrer la stabilité de l'état lors du freinage longitudinal et donc la possibilité de la mesure de cet état.
  - Les techniques robotiques ont, aussi, été appliquées sur un train à grande vitesse dont il fallait évaluer la consommation. Le modèle était très simple mais ses coefficients n'étaient pas connus. Les techniques d'identification de la robotique ont été mis en œuvre avec succès. Dans ce domaine, nous avons fourni à la communauté un modèle de consommation de train à grande vitesse validé sur des essais réels.

Mes perspectives de recherches se situent dans le domaine de l'écoconception des infrastructures de transport. Ceci est motivé par une attente sociale forte dans ce domaine. Par ailleurs, ce domaine a l'avantage de mobiliser mes compétences dans la construction des infrastructures et dans l'usage. J'orienterai ma spécialisation dans l'usage afin de construire des modèles qui contribuent aussi à une meilleure exploitation des infrastructures existantes en favorisant l'écoconduite.

Dans ma pratique d'un dialogue entre théorie et pratique, il est difficile de prévoir quelles seront mes contributions induites par ces applications sur les aspects méthodologiques. Les aspects métrologiques de l'écoconception, qui combinent des mesures provenant de systèmes très différents et, notamment de bases de données, devraient m'amener à revisiter les techniques classiques de l'identification à travers le prisme bayésien.

# Liste des figures et des tableaux

1.1	Estimation de la dérivée d'un signal . . . . .	37
1.2	Comparaison des couples mesurés et des couples prédits . . . . .	42
1.3	Modèle monoroue . . . . .	51
1.4	Courbe $\mu, \kappa$ . . . . .	52
1.5	Contraintes de viabilité, Cônes contingents, domaine de viabilité . . . . .	55
1.6	modèle bicyclette en virage . . . . .	59
1.7	Principe de l'algorithme de viabilité . . . . .	61
1.8	Le virage contrôlabilité . . . . .	63
1.9	Photos des différentes manœuvres . . . . .	64
1.10	Etats du véhicule pendant les manœuvres . . . . .	65
1.11	Noyau de viabilité . . . . .	66
2.1	Modèle de compacteur . . . . .	71
2.2	bille vibrante . . . . .	71
2.3	Structure arborescente équivalente du compacteur . . . . .	72
2.4	Servovérin de 100kN monté sous la bille du compacteur avec étrier bridé . . . . .	73
2.5	Malaxeur continu . . . . .	76
2.6	Entrée-Sortie d'un malaxeur continu . . . . .	77
2.7	Centrale discontinue . . . . .	78
2.8	Le banc d'analyse granulométrique . . . . .	80
2.9	Courbe $\mu, \kappa, \lambda$ . . . . .	82
2.10	Localisation des capteurs embarqués sur le véhicule d'essais « laboratoire ». . . . .	83
2.11	Vue aérienne de la piste de référence du site Nantais de l' <i>Ifsttar</i> . . . . .	84
2.12	Mise en évidence de la relation entre la raideur, $\lambda$ , et $\mu_{max}$ dans des situations extrêmes	86
2.13	Indépendance entre la raideur, $\lambda$ , et l'adhérence maximale, $\mu_{max}$ dans des situations habituelles . . . . .	87
2.14	Situation de la lgv Rhin-Rhône . . . . .	88
2.15	TGV dasye utilisé pour la réception de la ligne à grande vitesse Rhin-Rhône . . . . .	89
2.16	Réseau grande vitesse européen . . . . .	90
2.17	Deux tracés de LGV à évaluer . . . . .	91
3.1	Ecoconception . . . . .	95
3.2	Ecoconception : Travail effectué sur les lignes à grande vitesse . . . . .	96
3.3	Ecoconception : objectifs de recherche . . . . .	96

*LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX*

# Bibliographie

- [ACV10] Arnaud Andrieux, Christian Chabanon, and Pierre-Olivier Vandanjon. Patent no wo/2010/125289, method and device for assessing the wear of a tyre, April 2010.
- [AD16] J-P Aubin and A Desilles. *Traffic Networks as Information Systems - A viability Approach*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016.
- [And09] Arnaud Andrieux. *Estimation de l'adhérence mobilisable des véhicules : application à la dynamique longitudinale*. PhD thesis, Troyes, January 2009.
- [Aub91] J-P Aubin. *Viability Theory*. Birkhauser, Boston, 1991.
- [Aub99] J-P Aubin. *Mutational and Morphological Analysis : tools for shape evolution and Morphogenesis*. Birkhauser, Boston, 1999.
- [AVLC10] A. Andrieux, P. O. Vandanjon, R. Lengelle, and C. Chabanon. New results on the relation between tyre-road longitudinal stiffness and maximum available grip for motor car. *Vehicle System Dynamics*, 48(12) :1511–1533, September 2010.
- [BJV<sup>+</sup>14] R. Bosquet, A. Jullien, P-O. Vandanjon, M. Dauvergne, and F. Sanchez. Eco-design model of a railway : A method for comparing the energy consumption of two project variants. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 33 :111–124, December 2014.
- [Bos15] R; Bosquet. *Modélisation énergétique et identification des trains pour l'écoconception des lignes ferroviaires à grande vitesse*. PhD thesis, université de Nantes, Nantes, June 2015.
- [Bro09] Jean-Pierre Brossard. *Dynamique du freinage*. PPUR presses polytechniques, 2009.
- [BSFH12] Patrícia C. Baptista, Carla M. Silva, Tiago L. Farias, and John B. Heywood. Energy and environmental impacts of alternative pathways for the portuguese road transportation sector. *Energy Policy*, 51 :802 – 815, 2012. Renewable Energy in China.
- [CDMM08] Laetitia Chapel, Guillaume Deffuant, Sophie Martin, and Christian Mullon. Defining yield policies in a viability approach. *Ecological Modelling*, 212(1) :10–15, March 2008.
- [Cha07] Laëtitia Chapel. *Maintenir la viabilité ou la résilience d'un système : les machines à vecteurs de support pour rompre la malédiction de la dimensionnalité?* PhD thesis, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, October 2007.
- [CND14] CNDP. Commission particulière du débat public ligne nouvelle Montpellier-Perpignan (Inmp), 2014. Online ; accessed April-2014.
- [Cot97] M. Cotsaftis. *Comportement et contrôle des systèmes complexes. Introduction aux méthodes algébriques, qualitatives et fonctionnelles*. sciences en actes. Diderot multimedia, 1997.

## BIBLIOGRAPHIE

- [DG11] Guillaume Deffuant and Nigel Gilbert. *Viability and Resilience of Complex Systems : Concepts, Methods and Case Studies from Ecology and Society*. Springer, August 2011.
- [DM93] R. Davidson and J. Mackinnon. *Estimation and Inference in Econometrics*. Oxford University Press Inc, July 1993.
- [Don11] Jack J. Dongarra. Performance of various computers using standard linear equations software, (linpack benchmark report),. Technical Report CS-89-85, University of Tennessee, USA, 2011.
- [Gau90] M. Gautier. *Contribution à la modélisation et à l'identification des robots*. Thèse de doctorat, Université de Nantes, École Nationale Supérieure de la Mécanique, 1990.
- [Gau91] M. Gautier. Numerical calculation of the base inertial parameters. *Journal of Robotic Systems*, 8(4) :485–506, 1991.
- [Gau97] M. Gautier. Dynamic identification of robots with power model. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Albuquerque, USA, 1997.
- [GJV13] M. Gautier, A. Janot, and P-O. Vandanjon. A New Closed-Loop Output Error Method for Parameter Identification of Robot Dynamics. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 21(2) :428–444, March 2013.
- [GK90] M. Gautier and W. Khalil. Direct calculation of the base inertial parameters. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 6(3) :368–373, 1990.
- [Gus93] F. Gustafsson. Slip-based estimation of tire-road friction estimation. Technical report, Linköping University, Linköping, Sweden, June 1993.
- [Gus97] F. Gustafsson. Slip-based tire-road friction estimation. *Automatica*, 33(6) :1087 – 1099, 1997.
- [GvL96] G. H. Golub and C. F. van Loan. *Matrix computations*. John Hopkins University Press, Baltimore, 1996.
- [IPC14] IPCC. *Climate Change 2014 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. R.K. Pachauri and L.A. Meyers, Geneva, Switerland, 2014.
- [JB03] Edwin T. Jaynes and G. Larry Bretthorst. *Probability theory*. Cambridge University Press, June 2003.
- [JGJV14] A Janot, M. Gautier, A Jubien, and P.O. Vandanjon. Comparison Between the CLOE Method and the DIDIM Method for Robots Identification. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 22(5) :1935–1941, September 2014.
- [JVG13] A. Janot, P-O. Vandanjon, and M. Gautier. Identification of Physical Parameters and Instrumental Variables Validation With Two-Stage Least Squares Estimator. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 21(4) :1386–1393, July 2013.
- [JVG14a] A. Janot, P-O. Vandanjon, and M. Gautier. A Generic Instrumental Variable Approach for Industrial Robot Identification. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 22(1) :132–145, January 2014.
- [JVG14b] Alexandre Janot, Pierre-Olivier Vandanjon, and Maxime Gautier. An instrumental variable approach for rigid industrial robots identification. *Control Engineering Practice*, 25 :85–101, April 2014.

- [JVG16] Alexandre Janot, Pierre-Olivier Vandanjon, and Maxime Gautier. A revised Durbin-Wu-Hausman test for industrial robot identification. *Control Engineering Practice*, 48 :52–62, March 2016.
- [JWHJ14] John L. Hallock Jr., Wei Wu, Charles A.S. Hall, and Michael Jefferson. Forecasting the limits to the availability and diversity of global conventional oil supply : Validation. *Energy*, 64(0) :130 – 153, 2014.
- [KC97] W. Khalil and D? Creusot. Symoro+ : A system for the symbolic modelling of robots. *Robotica*, 15 :153–161, 1997.
- [KD99] W. Khalil and E. Dombre. *Modélisation, identification et commande des robots*. Hermès Science Publications, Paris, second edition, 1999.
- [KH02] W Khalil and K Hassan. *Nonlinear systems - 3rd edition*. Upper Saddle River (New Jersey) : Prentice Hall, cop., 2002.
- [LCVR15] Aurélien Lejeune, Rémy Chévrier, Pierre-Olivier Vandanjon, and Joaquin Rodriguez. Towards eco-aware timetabling : evolutionary approach and cascading initialization strategy for the bi-objective optimization of train running times. *submitted to IET Intelligent Transport Systems*, December 2015.
- [Leh12] Stéphanie Leheis. High-speed train planning in France : Lessons from the Mediterranean TGV-line. *Transport Policy*, 21(0) :37 – 44, 2012.
- [Lem05] Charles-Éric Lemaire. *Estimation des efforts de contact cylindre / matériau d'un compacteur vibrant*. PhD thesis, Université de Nantes, January 2005.
- [LVG03a] C-E. Lemaire, P-O. Vandanjon, and M Gautier. Dynamic identification of a compactor using splines data processing. In *Proceedings of System Identification*, Rotterdam, Netherlands, 2003.
- [LVG03b] C-E Lemaire, P-O Vandanjon, and M Gautier. Dynamic identification of a compactor using splines data processing. In *Proc. of the 13th IFAC Symposium on System Identification*, pages 927–932, Rotterdam, The Netherlands, August 2003.
- [LVG05] C-E. Lemaire, P-O. Vandanjon, and M. Gautier. Dynamic modelling of a vibratory asphalt compactor and estimation of contact forces wrench. In *Proceedings of the 16th International Federation Of Automatic Control World Congress*, pages 2056–2062, Prague, Czech Republic, July 2005.
- [LVGL06] C-E. Lemaire, P-O. Vandanjon, M. Gautier, and C. Lemaire. Dynamic identification of a vibratory asphalt compactor for contact efforts estimation. In Brett Ninness, editor, *Proceedings of the 14th IFAC Symposium on System Identification (SYSID)*, pages 973–978, Newcastle, Australia, March 2006.
- [LVGP02] C. Lemaire, P. Vandanjon, M. Gautier, and F. Peyret. Motion Planning Taking Into Account the Dynamic Model of Vehicles : Application to the Compactor. In *Proceedings of the 19th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, pages 223–228, Washington, U.S.A, 2002. IAARC.
- [Mad05] Tarek Madani. *Caractérisation des Tambours Sécheurs Enrobeurs en vue de leur commande*. PhD thesis, Versailles, November 2005.
- [MDS<sup>D</sup>06] T Madani, T De Sars, M Ducasse, J Oudin, and P-O Vandanjon. Fonctionnement des tambours sécheurs enrobeurs (TSE) : phases transitoires. *Revue générale des routes*, (847) :55–61, March 2006.

## BIBLIOGRAPHIE

- [Mic02] Michelin. Brevet fr2842910 méthode d'asservissement, utilisable pour maintenir le glissement d'un pneu à niveau optimal pour qu'il fonctionne à un niveau de coefficient d'adhérence maximale, Juillet 2002.
- [Mon70] Jacques Monod. *Le hasard et la nécessité*. Editions Du Seuil, 1970.
- [PG93] C. Pressé and M. Gautier. New criteria of exciting trajectories for robot identification. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 907–912, 1993.
- [Pha02] M.T. Pham. *Contribution à la modélisation, l'identification et la commande de systèmes mécaniques à flexibilités localisées : application à des axes de machines-outils rapides*. PhD thesis, Université de Nantes, 2002.
- [Pre94] C. Pressé. *Identification des paramètres dynamiques des robots*. Thèse de doctorat, Université de Nantes - Ecole Centrale de Nantes, 1994.
- [PVSDS11] C. Poussot-Vassal, O. Sename, L. Dugard, and S. M. Savaresi. Vehicle dynamic stability improvements through gain-scheduled steering and braking control. *Vehicle System Dynamics*, 49(10) :1597–1621, 2011.
- [RCFB11] G. Rey, D. Clair, M. Fogli, and F. Bernardin. Probabilistic assessment of roadway departure risk in a curve. *Vehicle System Dynamics*, 49(10) :1649–1671, 2011.
- [Ric91] J. Richalet. *Pratique de l'identification*. Traité des Nouvelles Technologies. Hermès, Paris, 1991.
- [RMP12] Fabio Della Rossa, Giampiero Mastinu, and Carlo Piccardi. Bifurcation analysis of an automobile model negotiating a curve. *Vehicle System Dynamics*, 50(10) :1539–1562, 2012.
- [SET00] SETRA. *ICTAAL : Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des autoroutes de liaison*. Number ISBN 2-11-091797-0. Editions du SETRA, 2000. 58p.
- [SP94] Patrick Saint-Pierre. Approximation of the viability kernel. *Applied Mathematics & Optimization*, 29(2) :187–209, March 1994.
- [TL08] M. Tohme and R. Lengelle. F-SVC : a simple and fast training algorithm soft margin support vector classification. In *IEEE Workshop on Machine Learning for Signal Processing, 2008. MLSP 2008*, pages 339–344, October 2008.
- [Uch01] M.R. Uchanski. *Road Friction Estimation for Automobiles Using Digital Signal Processing Methods*. PhD thesis, University of California, Berkeley, 2001.
- [Van99] P-O Vandanjon. Evaluation et utilisation du banc d'analyse granulométrique : Un appareil de mesure de l'homogénéité des mélanges. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, (222) :3–11, August 1999.
- [VCL14] P-O. Vandanjon, A. Coiret, and T. Lorino. Application of viability theory for road vehicle active safety during cornering manoeuvres. *Vehicle System Dynamics*, 52(2) :244–260, 2014.
- [VCMP<sup>+</sup>12] P-O Vandanjon, A Coiret, B Muresan Paslaru, A Fargier, R Bosquet, M Dauvergne, A Jullien, D François, and F Labarthe. Practical guidelines for Life Cycle Assessment applied to railways project. In *International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction - Civil engineering and buildings*, pages 144–152, Nantes, France, July 2012. A. Ventura and C. de la Roche.

- [VdLD<sup>+</sup>00] P-O Vandanjon, F de Larrard, B Dehousse, G Villain, R Maillot, and R Laplante. Homogénéisation des bétons en centrale de fabrication discontinue : influence du temps de malaxage et du mode d'introduction des additions minérales. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, (208), October 2000.
- [VdLD<sup>+</sup>03] P-O Vandanjon, F de Larrard, B Dehousse, G Villain, R Maillot, and R Laplante. Homogenisation of concrete in a batch plant : the influence of mixing time and method on the introduction of mineral admixtures. *magazine of concrete research*, 55(2) :105–116, April 2003.
- [VGT00] P-O. Vandanjon, M-L. Gallenne, and J. Terriere. Modélisation de l'écoulement des constituants dans un malaxeur industriel : Interprétation physique et capacités prédictives. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, (228) :23–34, October 2000.
- [Vil93] J. Villiermaux. *Génie de la réaction chimique (2 Ed.)*. Génie des procédés de l'école de Nancy. Lavoisier, Technique & Documentation, 1993.
- [VLG09] P-O Vandanjon, C-E Lemaire, and M Gautier. Pratique de l'identification des systèmes mécaniques articulés. In *Problèmes inverses en génie civil*, Etudes et recherches - Série Sciences pour le génie civil SI 15. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, January 2009.
- [You11] Peter C. Young. *Recursive estimation and time-series analysis : An introduction for the student and practitioner*. Springer Science & Business Media, 2011.