



**HAL**  
open science

# La dérivation non entière en modélisation, identification et commande des systèmes autonomes et vivants

Stéphane Victor

► **To cite this version:**

Stéphane Victor. La dérivation non entière en modélisation, identification et commande des systèmes autonomes et vivants. Automatique / Robotique. Université de Bordeaux, 2022. tel-03767355

**HAL Id: tel-03767355**

**<https://hal.science/tel-03767355v1>**

Submitted on 1 Sep 2022

**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.

# HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

École Doctorale n° 209 des Sciences Physiques et de l'Ingénieur

## Stéphane VICTOR

---

### LA DÉRIVATION NON ENTIÈRE EN MODÉLISATION, IDENTIFICATION ET COMMANDE DES SYSTÈMES AUTONOMES ET VIVANTS

---

Soutenue le 20 mai 2022

Après avis de

M. M'SAAD	Professeur à l'ENSICAEN, LAC Lab – EA 7478 – Caen	<i>Rapporteur</i>
A. RICHARD	Professeur à l'Université de Lorraine, CRAN – UMR 7039 CNRS – Nancy	<i>Rapporteur</i>
J.-L. BATTAGLIA	Professeur à l'Université de Bordeaux, I2M – UMR 5295 CNRS – Talence	<i>Rapporteur</i>

Devant la commission d'examen formée des rapporteurs et de

M. FLIESS	Directeur de Recherche à l'Ecole Polytechnique, LIX – UMR 7161 CNRS – Palaiseau	<i>Examineur</i>
P. MELCHIOR	Professeur à Bordeaux INP, IMS – UMR 5218 CNRS – Talence	<i>Examineur</i>
A. OUSTALOUP	Professeur émérite à Bordeaux INP, IMS – UMR 5218 CNRS – Talence	<i>Examineur</i>

Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système CNRS UMR 5218  
Univ. Bordeaux, IMS - UMR 5218 CNRS  
351 cours de la Libération – 33405 Talence Cedex – France  
<http://www.ims-bordeaux.fr/>



*A Manon, Mathéo, Martin & Mailys*

Leur patience et leur amour m'ont toujours  
accompagnés malgré mes divers engagements.

“Soyez toujours joyeux.”

*Saint Paul - Epîtres aux Thessaloniens*



# Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Alain Oustaloup pour les moments de qualités et d'échanges à la fois de nature scientifique et humaine. J'ai pu découvrir et vivre pleinement cette école de pensée qu'est la dérivation non entière : qui de mieux pour parler de l'opérateur des phénomènes de diffusion que son *diffuseur* français et international, aujourd'hui devenu quasi-anglophone. Sa passion, son dévouement et son enthousiasme ne peuvent être que des atouts dans la suite de mes projets.

Je témoigne également toute ma gratitude à Pierre Melchior qui m'a accordé son entière confiance dès mes débuts en thèse ainsi que depuis mon recrutement aussi bien en pédagogie qu'en recherche. Outre son dévouement en tant que responsable de l'équipe CRONE, j'apprécie sa disponibilité, sa bienveillance et son souci de toujours vouloir mettre l'humain en avant.

Je remercie ensuite Rachid Malti pour les échanges scientifiques (et pas seulement) et les projets toujours enrichissants que nous avons encore. Son enthousiasme, sa rigueur scientifique et sa volonté de ne voir que le positif sont des exemples à suivre.

J'exprime ma profonde gratitude à Mohammed M'Saad, Alain Richard et Jean-Luc Battaglia. C'est une charge de plus sur leurs nombreux engagements, et je leur suis très reconnaissant de leur prompt acceptation de rapporter sur mon mémoire d'HDR. C'est un immense honneur pour moi de leur partager mes activités de recherche et d'échanger avec eux, car se sont des personnes que j'apprécie fortement aussi bien pour leurs engagements scientifiques que pour leurs qualités humaines.

J'exprime également ma reconnaissance à Michel Fliess d'avoir accepté de faire parti de ce jury et d'avoir manifesté un grand intérêt au sujet de mes activités de recherche. Il n'y avait qu'une seule personne qui pouvait avoir un spectre aussi large aussi bien en identification qu'en planification de trajectoire, et je lui témoigne toute ma gratitude d'avoir pu se rendre disponible.

Je remercie aussi tous les doctorants qui ont contribué et/ou qui contribuent toujours au développement des thématiques de recherche présentées dans ce mémoire, à savoir par ordre chronologique : Jean-Baptiste Receveur, Julien Moreau, Abir Mayoufi, Kendric Ruiz, Jean-François Duhé et Mohamed Hajjem. Sans leur collaboration, je n'en serai pas certainement pas là.

Toute mon amitié va à l'ensemble de mes collègues du laboratoire et plus particulièrement aux permanents de l'équipe CRONE : Alain, André, Christophe, Mathieu, Patrick, Pierre, Ra-

---

chid, Tudor-Bogdan et Xavier. Chacun de mes collègues travaille autour de la dérivation non entière, et ils contribuent tous à la diffusion de cet opérateur ! Contrairement à la dérivée entière, la dérivation non entière prend en compte tout le passé, et il me semble qu'il en est de même avec mes collègues. Le passé commun vécu avec chacun d'eux, ne peut qu'aider à nous construire dans ce que nous sommes aujourd'hui et ce que nous serons demain.

Je ne saurais terminer ces remerciements sans une pensée pour mes enfants et Maïlys, que je remercie pour leur patience, leur amour, leurs sourires et leur soutien. Je remercie également mes parents qui m'ont toujours soutenu dans tout ce que j'entreprends aux niveaux artistique et scientifique (d'ailleurs, il faut peut être que je les rassure en leur disant qu'il n'y a pas d'autres diplômes au delà de l'HDR;) ). Une pensée pour mes sœurs et leurs familles ainsi qu'à toute ma belle-famille : déjà que l'automatique, personne n'y comprend rien, alors la dérivation non entière...

# Table des matières

<b>I Informations générales</b>	<b>3</b>
<b>1 Curriculum Vitæ</b>	<b>5</b>
1.1 Notice individuelle . . . . .	7
1.2 Formation et diplômes . . . . .	8
1.3 Fonctions principales . . . . .	10
1.3.1 En enseignement . . . . .	10
1.3.2 En recherche . . . . .	11
1.3.3 Collectives . . . . .	11
1.4 Résumé succinct de mes activités d'enseignement (détails au chapitre 3 p. 57) . .	11
1.5 Résumé succinct de mes activités de recherche (détails aux chapitres 4 et 5) . . .	13
1.6 Encadrement scientifique (détails au chapitre 2.1 p. 21) . . . . .	14
1.6.1 3 thèses soutenues avec un taux d'encadrement cumulé de 150% : . . . . .	14
1.6.2 3 thèses en cours avec un taux d'encadrement cumulé de 100% : . . . . .	14
1.6.3 16 stages de Master 2 Recherche . . . . .	15
1.7 Responsabilités scientifiques, animations et évaluations (détails au chapitre 2 p. 34)	15
1.8 Collaborations contractuelles (détails au chapitre 2.3 p. 42) . . . . .	16
1.9 Production scientifique (détails au chapitre 2.4 p. 48) . . . . .	17
<b>2 Complément au Curriculum Vitæ</b>	<b>19</b>
2.1 Encadrement scientifique . . . . .	21
2.1.1 Articulation des thèses encadrées et en cours d'encadrement dans mon projet de recherche . . . . .	21
2.1.2 Thèses soutenues (3), taux d'encadrement cumulé 150% . . . . .	24
2.1.3 Thèses en cours (3), taux d'encadrement cumulé 100% . . . . .	29

## TABLE DES MATIÈRES

---

2.1.4	Stage de Masters 2 Recherche (16), taux d'encadrement cumulé 758%	30
2.1.5	Stage de Master 1 ou ingénieur	33
2.2	Responsabilités scientifiques, animations et évaluations	34
2.2.1	Membre d'un comité technique de l'IFAC	34
2.2.2	Membre nommé du CNU 61ème section	34
2.2.3	Membre du comité de programme de la conférence (1)	35
2.2.4	Membre du comité d'organisation	35
2.2.5	Organisation de sessions dans des conférences internationales (3)	36
2.2.6	Organisation de workshop international (1)	36
2.2.7	Chair ou co-chair dans des conférences internationales (5)	37
2.2.8	Plénière lors d'un séminaire donné dans une école de formation par la recherche	38
2.2.9	Plénière réalisée lors de conférences internationales	38
2.2.10	Responsable des séminaires de l'équipe CRONE	39
2.2.11	Responsable des séminaires du Groupe Automatique	39
2.2.12	Evaluateur pour des revues (45) et des congrès internationaux (34)	40
2.2.13	Membre d'un comité de sélection	40
2.2.14	Expertises	41
2.2.15	Coresponsable du Workpackage 1 du Réseau Impulsion BEST	41
2.2.16	Co-responsable du développement de la toolbox CRONE	42
2.3	Activités contractuelles	42
2.3.1	Contrats de recherche évalués suite à AAP	42
2.3.2	Contrats de recherche de gré à gré	47
2.4	Production scientifique	48
A	Revue internationale indexée JCR avec comité de lecture (18)	48
B	Revue internationale non indexée avec comité de lecture (2)	50
C	Soumission à des revues internationales avec comité de lecture (4)	50
D	Chapitres dans des ouvrages de synthèse (2)	50
E	Communications dans des congrès internationaux (30)	51
F	Communications dans des manifestations scientifiques nationales (12)	54
G	Brevets (1)	56

<b>3</b>	<b>Activités pédagogiques</b>	<b>57</b>
3.1	Implications à l'Université de Bordeaux . . . . .	59
3.1.1	Unité de Formation des Sciences de l'Ingénieur . . . . .	59
3.1.2	Responsabilités administratives . . . . .	59
3.1.3	Responsabilités et mandats locaux . . . . .	62
3.1.4	Responsabilités pédagogiques . . . . .	63
3.1.5	Responsabilités et mandats nationaux . . . . .	64
3.1.6	Autres responsabilités . . . . .	64
3.2	Activités d'enseignement . . . . .	66
3.2.1	Charge pédagogique . . . . .	66
3.2.2	Ressources pédagogiques . . . . .	69
3.3	Relations partenariales . . . . .	75
3.4	Innovation pédagogique et perspectives . . . . .	76
3.4.1	Evolution des enseignements . . . . .	76
3.4.2	Plateforme sur la Robotique mobile . . . . .	78
3.4.3	CMI . . . . .	79
3.4.4	Développement à l'international . . . . .	81
<b>II</b>	<b>Activités de Recherche</b>	<b>83</b>
<b>4</b>	<b>Contributions à la théorie des systèmes et en planification de trajectoire</b>	<b>87</b>
4.1	Introduction . . . . .	89
4.2	Contributions à la théorie des systèmes non entier pour la platitude des systèmes non entiers linéaires . . . . .	89
4.2.1	Platitude fractionnaire . . . . .	90
4.2.2	0-platitude fractionnaire . . . . .	92
4.2.3	Application à un système thermique bidimensionnel . . . . .	93
4.3	Contributions en planification de trajectoire . . . . .	98
4.3.1	Contribution à la planification de trajectoire par champs de potentiel artificiel (blocs 2 et 3 de la figure 4.2) . . . . .	99
4.3.2	Contribution à l'optimisation multi-critère de trajectoire (bloc 1 de la figure 4.2) . . . . .	109

4.3.3	Planification prédictive et réactive . . . . .	122
4.4	Conclusion . . . . .	131
<b>5</b>	<b>Contributions en modélisation et en identification des systèmes non entiers</b>	<b>133</b>
5.1	Introduction . . . . .	135
5.2	Contributions en modélisation des systèmes non entiers . . . . .	135
5.2.1	Modélisation de la diffusion thermique en 2D . . . . .	135
5.2.2	Modélisation des transferts thermiques dans les poumons . . . . .	138
5.2.3	Modélisation des perturbations de vent . . . . .	147
5.3	Contributions en identification par modèle non entier . . . . .	154
5.3.1	Identification de systèmes non commensurables (ou quelconques) . . . . .	154
5.3.2	Identification de systèmes non entiers à entrées multiple et une sortie (MISO)	160
5.3.3	Identification de systèmes non entiers en temps-réel . . . . .	172
5.4	Contributions à la toolbox CRONE/Matlab® . . . . .	179
5.5	Conclusion et autres contributions . . . . .	182
<b>6</b>	<b>Perspectives de recherche</b>	<b>185</b>
6.1	Introduction . . . . .	187
6.2	Génération de consigne et génération de commande sur des robots volants . . . . .	187
6.3	Modélisation et commande d'un tracteur autonome . . . . .	188
6.4	Identification en temps réel en santé . . . . .	190
6.4.1	Modélisation des transferts thermiques dans les poumons . . . . .	190
6.4.2	Modélisation et identification des fractales musculaires dans le cœur . . . . .	190
6.5	Identification des systèmes dynamiques non linéaires non entiers par Deep Learning	191
6.6	Identification en temps réel et commande optimale dans les processus de fabrica- tion dans l'industrie du futur . . . . .	192
6.7	Modélisation et identification en boucle fermée d'une pile à combustible . . . . .	194
6.8	Modélisation et identification de cellules Lithium-Ion . . . . .	195
6.9	Développement d'algorithme dans la toolbox CRONE . . . . .	196
6.10	Caractérisation et identification de capteurs de flux en couches minces pour les applications de rentrée atmosphérique . . . . .	196

---

<b>A Rappels sur la dérivation non entière</b>	<b>199</b>
A.1 Intégrale d'ordre non entier . . . . .	199
A.2 Dérivée d'ordre non entier . . . . .	200
A.3 Propriétés sur le calcul fractionnaire . . . . .	201
1.3.1 Intégrabilité non entière . . . . .	201
1.3.2 Différentiabilité non entière . . . . .	202
A.4 Commutativité . . . . .	203
1.4.1 Commutativité des intégrales non entières . . . . .	203
1.4.2 Commutativité des dérivées non entières : . . . . .	204
A.5 Transformée de Laplace d'un intégrateur/dérivateur non entier . . . . .	204
A.6 Algèbre des polynômes en $\mathbf{D}_a^\gamma$ . . . . .	205
A.7 Systèmes non entiers . . . . .	207
1.7.1 Stabilité et résonance des systèmes non entiers . . . . .	208
<b>Références bibliographiques</b>	<b>211</b>



# Avant Propos

Ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches rassemble une synthèse de dix ans de mes activités d'enseignement et de recherche en Automatique en tant que Maître de Conférences de l'Université de Bordeaux. Par ailleurs, je développe également mes perspectives dans mes activités tant en enseignement qu'en recherche, certaines étant dans le prolongement de mes travaux actuels, d'autres étant dans une prospection. Ce manuscrit est constitué de deux parties.

La première partie définit une synthèse de l'ensemble de mes activités universitaires. Le chapitre 1 décrit brièvement mon Curriculum Vitæ, tandis que le chapitre 2 retrace mon état civil, mes diplômes, mes encadrements, mes responsabilités scientifiques, mes activités contractuelles et mes publications. Le chapitre 3 présente mes activités pédagogiques ainsi que mes responsabilités prises à l'université de Bordeaux.

En seconde partie de ce mémoire, j'expose de manière succincte mes activités de recherche. Je présente au chapitre 4 mes contributions à la commande des systèmes non entiers, puis au chapitre 5 mes contributions à l'identification de systèmes par modèle non entier. Enfin, je développe au chapitre 6 les différentes perspectives qui compléteront et enrichiront mes activités de recherche.



Première partie

Informations générales



# Chapitre 1

## Curriculum Vitæ

---

<b>1.1</b>	<b>Notice individuelle</b> . . . . .	<b>7</b>
<b>1.2</b>	<b>Formation et diplômes</b> . . . . .	<b>8</b>
<b>1.3</b>	<b>Fonctions principales</b> . . . . .	<b>10</b>
1.3.1	En enseignement . . . . .	10
1.3.2	En recherche . . . . .	11
1.3.3	Collectives . . . . .	11
<b>1.4</b>	<b>Résumé succinct de mes activités d'enseignement (détails au chapitre 3 p. 57)</b> . . . . .	<b>11</b>
<b>1.5</b>	<b>Résumé succinct de mes activités de recherche (détails aux chapitres 4 et 5)</b> . . . . .	<b>13</b>
<b>1.6</b>	<b>Encadrement scientifique (détails au chapitre 2.1 p. 21)</b> . . . . .	<b>14</b>
1.6.1	3 thèses soutenues avec un taux d'encadrement cumulé de 150% : . . . . .	14
1.6.2	3 thèses en cours avec un taux d'encadrement cumulé de 100% : . . . . .	14
1.6.3	16 stages de Master 2 Recherche . . . . .	15
<b>1.7</b>	<b>Responsabilités scientifiques, animations et évaluations (détails au chapitre 2 p. 34)</b> . . . . .	<b>15</b>
<b>1.8</b>	<b>Collaborations contractuelles (détails au chapitre 2.3 p. 42)</b> . . . . .	<b>16</b>
<b>1.9</b>	<b>Production scientifique (détails au chapitre 2.4 p. 48)</b> . . . . .	<b>17</b>

---



## 1.1 Notice individuelle

<i>NOM et Prénom</i>	<b>VICTOR Stéphane</b>
<i>Date et lieu de naissance</i>	19 juin 1983 à Villingen-Schwenningen (RFA)
<i>Situation de famille</i>	Marié, 3 enfants
<i>Coordonnées</i>	05 40 00 36 27 - <a href="mailto:stephane.victor@ims-bordeaux.fr">stephane.victor@ims-bordeaux.fr</a>
<i>Etablissement d'affectation</i>	<b>Université de Bordeaux</b>
<i>Unité de formation (UF)</i>	Sciences de l'Ingénieur (SDI)
<i>Adresse</i>	351, cours de la Libération, bât. A1, 33405 Talence cedex
<i>Contact</i>	PU. Hervé Wargnier, directeur de l'UF SDI
<i>Coordonnées</i>	05 40 00 62 17 - <a href="mailto:directeur.ufsdi@u-bordeaux.fr">directeur.ufsdi@u-bordeaux.fr</a>
<i>Unité de Recherche</i>	<b>IMS UMR 5218 CNRS</b> (Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système)
<i>Groupe/équipe</i>	Groupe Automatique, Equipe CRONE
<i>Adresse</i>	351, cours de la Libération, bât. A31, 33405 Talence cedex
<i>Contact</i>	PU. Xavier Moreau, resp. du Groupe Automatique
<i>Coordonnées</i>	05 40 00 24 17 - <a href="mailto:xavier.moreau@ims-bordeaux.fr">xavier.moreau@ims-bordeaux.fr</a>
<i>Section CNU</i>	61e
<i>Corps/Grade</i>	MCU, classe normale
<i>Echelon</i>	6e, depuis le 15/03/2019
<i>Date de nomination</i>	01 septembre 2011
<i>Primes</i>	Prime d'Encadrement doctoral et de Recherche (PEDR) depuis le 01/10/2019
<i>Indices</i>	10 ( <i>Scopus</i> ), 15 ( <i>Google Scholar</i> ), 23.52 ( <i>Researchgate</i> )
<i>Responsabilités pédagogiques</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Responsable du Master 2 AM2AS (depuis 2014)</li> <li>- Responsable de l'Apprentissage du Parcours de master AM2AS (Automatique et Mécatronique, Automobile, Aéronautique &amp; Spatial) (depuis septembre 2020)</li> </ul>
<i>Nominations</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nommé au Comité Technique 2.2 de l'IFAC (Linear Control Systems) depuis 2017</li> <li>- Nommé au CNU section 61 depuis décembre 2019</li> </ul>
<i>Responsabilités collectives</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Membre élu au CFVU (Commission de la Formation et de la Vie Universitaire) (décembre 2017-décembre 2021)</li> <li>- Responsable de la communication de l'UF SDI (2015-2020)</li> <li>- Responsable du site web du département EEA de l'UFR de Physique (2013-2015)</li> <li>- Responsable de l'axe disciplinaire "Automatique et Signal-Image" de la L1 au M2 (depuis septembre 2019)</li> <li>- Coresponsable du GT "Industrie du Futur" à l'UF SDI de l'Univ. Bordeaux (depuis septembre 2020)</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coresponsable du Workpackage 1 du projet de recherche Réseau Impulsion BEST (sur l’Industrie du Futur)</li> <li>- Membre du Comité de pilotage de la société savante “Fractional Differentiation and its Applications” (FDA) qui organise annuellement la conférence ICFDA (depuis mai 2021)</li> <li>- Chargé de Mission par le VP Numérique de l’Univ. Bordeaux pour le déploiement de la licence site Mathworks (depuis 2020)</li> </ul>
--	--

## 1.2 Formation et diplômes

### — 2010 – Doctorat de l’Université Bordeaux 1 en Automatique

[www.u-bordeaux1.fr/](http://www.u-bordeaux1.fr/)

<i>Titre</i>	Identification par modèle non entier pour la poursuite robuste de trajectoire par platitude
<i>Spécialité</i>	Automatique, Productique et Signal
<i>Laboratoire</i>	IMS, Talence
<i>Dates et durée</i>	1er Novembre 2006 au 25 novembre 2010 – 4 ans et 1 mois
<i>Financement</i>	Allocation de recherche MENRT + ATER (1 an)
<i>Directeur de thèse</i>	Alain Oustaloup, Pr à l’IPB/enseirb-matmeca IMS – UMR 5218 CNRS – Bordeaux
<i>Co-encadrants de thèse</i>	Rachid Malti, MCF à l’Université Bordeaux 1 IMS – UMR 5218 CNRS – Bordeaux
	Pierre Melchior, MCF à l’IPB/enseirb-matmeca IMS – UMR 5218 CNRS – Bordeaux
<i>Rapporteurs</i>	Jean Lévine, Directeur de Recherche MINES ParisTech CAS – Fontainebleau
	Alain Richard, Pr à l’Université Henri Poincaré CRAN – UMR 7039 CNRS – Nancy
<i>Examineurs</i>	Jean-Luc Battaglia, Pr à l’Université Bordeaux 1 TREFLE – UMR 8508 CNRS – Bordeaux
	Luc Dugard, Directeur de Recherche CNRS GIPSA-Lab – UMR 5216 CNRS – Grenoble

*Mention : Très honorable avec félicitations du jury*

**Résumé** Les travaux de thèse proposent des outils méthodologiques permettant de prendre en main un système depuis l’identification jusqu’à la commande robuste des systèmes non entiers. Les principes de la platitude permettent de parvenir à la planification de trajectoire à condition de connaître le modèle du système, d’où l’intérêt de l’identification des paramètres du système. Les principaux travaux de la thèse concernent l’identification

de système par modèle non entier, la génération et la poursuite robuste de trajectoire par l'application des principes de la platitude pour une classe de systèmes non entiers dits commensurables. Afin d'étendre les principes de la platitude, une algèbre sur les polynômes non entiers et sur les matrices polynômiales non entières sont introduites pour l'extension de la platitude aux systèmes non entiers commensurables. Puis des méthodes d'identification par modèle non entier commensurables sont proposées dans deux contextes de bruit : en présence de bruit blanc et en présence de bruit coloré. Dans chaque cas, deux estimateurs optimaux (sur la variance et le biais) sont proposés : l'un, en supposant une structure du modèle commensurable connue et d'ordres de dérivation fixés, et l'autre en combinant des techniques de programmation non linéaire qui optimise à la fois les coefficients et les ordres de dérivation. Puis, la platitude des systèmes non entiers linéaires commensurables est développée en proposant différentes approches telles que les fonctions de transfert et la pseudo-représentation d'état par matrices polynômiales. Enfin, La robustesse du suivi de trajectoire est abordée par la commande CRONE. Des exemples de simulations illustrent les développements théoriques en identification des systèmes dynamiques, en génération de trajectoire par platitude et en poursuite robuste de trajectoire au travers de la diffusion thermique sur un barreau métallique.

— **2006 – Diplôme d'ingénieur – ENSEIRB – spécialité Automatique**

[www.enseirb.fr](http://www.enseirb.fr)

**Double diplôme d'ingénieur – Ecole Polytechnique Montréal – spécialité Automatique** (3ème année en échange au Canada) – <https://www.polymtl.ca>

**Master 2 Recherche EEA – Université Bordeaux 1 – spécialité Automatique** (triple inscription en parallèle) – [www.u-bordeaux1.fr/](http://www.u-bordeaux1.fr/)

<i>Titre</i>	Etude des systèmes linéaires avec retards sur la commande et l'état
<i>Spécialité</i>	Automatique
<i>Laboratoire</i>	Laboratoire de Mécatronique, Département Génie Mécanique de l'Ecole Polytechnique de Montréal, Canada
<i>Dates et durée</i>	9 janvier 2006 au 22 juin 2006 – 5 mois
<i>Maître de stage</i>	El-Kébir Boukas, Pr à l'Ecole Polytechnique de Montréal Laboratoire de Mécatronique – Montréal
<i>Mention bien</i>	

— **2001-2003 – Classe préparatoire MPSI-MP au Lycée La Martinière Monplaisir à Lyon** – [www.lamartinieremonplaisir.org](http://www.lamartinieremonplaisir.org)

— **2001 – Baccalauréat – Série S – Lycée Français de Pondichéry (Inde)**

*Mention bien* – <https://lfpondichery.net>

## 1.3 Fonctions principales

<i>Depuis 2011</i>	Maître de Conférences à l'Université de Bordeaux (Fusion de l'Université Bordeaux 1, Université Bordeaux 2 et Université Bordeaux 4 en 2014), Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système (IMS) – UMR 5218 CNRS  Recrutement : MCF, classe normale, 1 <sup>er</sup> échelon, stagiaire 01/09/2011 Reclassement : MCF, classe normale, 3 <sup>ème</sup> échelon 01/12/2011 Titularisation : MCF, classe normale, 3 <sup>ème</sup> échelon 01/09/2012 Reclassement : MCF, classe normale, 4 <sup>ème</sup> échelon 01/07/2013 MCF, classe normale, 5 <sup>ème</sup> échelon 01/05/2016 MCF, classe normale, 6 <sup>ème</sup> échelon 01/03/2019
<i>2009-2011</i>	ATER à l'IPB/Enseirb-Matmeca, Filière électronique – spécialité Automatique (192h TD/an)
<i>2007-2009</i>	Moniteur de l'enseignement de l'Université Bordeaux 1, UFR Physique – spécialité Automatique (64h TD/an)
<i>2007</i>	Vacations à l'IUT GEII de Bordeaux et à l'ENSC (Ecole Nationale Supérieure de Cognitique) (50h TD)
<i>2006</i>	Stage de fin d'étude (PFE, 5 mois) – Ecole Polytechnique Montréal (Canada) – Laboratoire de Mécatronique : “Etude des Systèmes Linéaires avec retards sur la commande et l'état.” Direction : Pr. El-Kébir Boukas
<i>2005</i>	Stage (2,5 mois) – Institut Français de Pondichéry (Inde) – Laboratoire de Géomatique : “Élaboration d'un transfert d'une application sur un PDA.” Direction : Dr. Danny Lo Seen

### 1.3.1 En enseignement

- Responsable du Master 2 Recherche et Professionnel AM2AS (Automatique et Mécatronique, Automobile, Aéronautique & Spatial), mutualisé avec la 3<sup>ème</sup> (option AM2AS) de l'école d'ingénieur Bordeaux INP/enseirb-matmeca, depuis 2014
- Responsable de l'axe disciplinaire “Automatique et Signal-Image” de la L1 au M2, depuis 2019
- Responsable de l'Apprentissage du Parcours de master AM2AS, depuis 2020

### 1.3.2 En recherche

- Responsable du séminaire de l'équipe CRONE du laboratoire IMS, depuis 2014
- Responsable du séminaire du Groupe Automatique du laboratoire IMS, depuis 2015
- Membre nommé au Comité Technique 2.2 de l'IFAC (Linear Control Systems) depuis 2017
- Co-responsable du Workpackage 1 "Optimal Non Destructive Evaluation & Control" du Réseau Impulsion BEST (Industrie du Futur) de l'université de Bordeaux

### 1.3.3 Collectives

- Responsable du site web du département EEA de l'UFR de Physique, de 2013 à 2015
- Rapporteur d'expertise à l'Université de Bordeaux pour une dispense de qualification à un poste de Maître de Conférence, avril 2014
- Responsable de la communication de l'UF SDI, de 2015 à 2020
- Membre élu à la Commission de la Formation et de la Vie Universitaire (CFVU), de 2017 à 2021
- Rapporteur d'expertise à l'Université de Bordeaux pour une campagne d'avancement de grade EC, mars 2018
- Membre du Comité de Sélection de Bordeaux INP/enseirb-matmeca, Filière électronique (poste MdC 61<sup>ème</sup> Section), Avril-Mai 2019
- Membre nommé du CNU 61, depuis décembre 2019
- Chargé du Vice-Président "Numérique" de l'Université de Bordeaux pour la négociation de la licence campus de Mathworks, depuis 2020
- Coresponsable du Groupe de Travail "Industrie du Futur" au sein de l'UFSDI depuis octobre 2020

## 1.4 Résumé succinct de mes activités d'enseignement (détails au chapitre 3 p. 57)

Mes activités d'enseignement relèvent principalement de l'Automatique ainsi que du Traitement du Signal, disciplines de la 61e section du CNU. Elles sont réparties de la Licence 2 au Master 2 et sont principalement dispensées en **Licence 3** du Coursus Master en Ingénierie et Maintenance des Systèmes pour l'Aéronautique et les Transports (CMI IMSAT) à l'Institut Evering de l'Université de Bordeaux sur le site de Mérignac et en **Master 2** (Recherche et Professionnel) Automatique et Mécatronique, Automobile, Aéronautique & Spatial (AM2AS) sur le site de Talence.

Une synthèse de mes activités d'enseignement est présentée au tableau 1.1, où sont précisées les filières, les cours, les travaux dirigés (TD), les travaux pratiques (TP), les bureaux

d'étude (BE) ainsi que les périodes d'intervention. A l'exception du cours en SEE qui est à Bordeaux INP/enseirb-matmeca, l'ensemble de mon service est effectuée à l'Université de Bordeaux. D'autre part, le M2 AM2AS est mutualisé à avec l'option AM2AS de la troisième année d'école d'ingénieur de Bordeaux INP/enseirb-matmeca.

<i>Enseignement</i>	<i>Filière</i>	<i>Cours</i>	<i>TD</i>	<i>TP</i>	<i>BE</i>	<i>Période</i>
Dynamique des Systèmes Linéaires	L2 SPI		×	×		depuis 2011
Conception de Lois de Commande	L3 IMSAT	×	×	×		depuis 2011
Bases d'Automatique	L3 IMSAT	×	×			depuis 2013
Commande des Systèmes Linéaires	SEE	×		×		2011-2020
Commande Non Linéaire	M1 AM2AS			×		2011-2016
Commande optimale	M1 AM2AS				×	2011-2013
Aléatoires en Signal et Image	M1 AM2AS		×			2016-2019
Automatique	M2 SPIA	×	×	×		2011
Identification des Systèmes Dynamiques	M2 AM2AS	×			×	depuis 2011
Outils & Logiciels pour l'Automatique	M2 AM2AS	×	×	×		depuis 2011
Modélisation par Bond Graph	M2 AM2AS	×			×	depuis 2013
Modélisation des Procédés Robotisés	M2 AM2AS	×			×	depuis 2017

TABLE 1.1: Synthèse de mes activités d'enseignement

À ces cours s'ajoutent l'encadrement de différents projets portant notamment sur la modélisation et la commande (en L3 et surtout en M1) de différents systèmes tels que la pile à combustible, le véhicule autonome (drone et terrestre). Je participe également chaque année au suivi des stagiaires des Master 2 AM2AS (2 ou 3 par an) ainsi qu'au suivi des apprentis du Master AM2AS.

Ayant pris la responsabilité du M2 AM2AS en 2014, j'ai participé et préparé l'accréditation de ce parcours (en 2014 et en 2021). Pour rendre ce master plus attractif, j'ai remplacé et créé 2 nouvelles UEs optionnelles en 2019 sur :

- la “Robotique” : dans cette UE, mon collègue (S. Ygorra) intervient sur un module la modélisation et la simulation de bras manipulateurs, et j'interviens sur la modélisation des procédés robotisés en introduisant la dynamique newtonienne et le formalisme de Lagrange avec la création d'un bureau d'étude sous Matlab®/Simulink avec l'utilisation de la toolbox symbolic pour la résolution des équations différentielles partielles ; il est prévu que ce

module soit modifié en octobre 2023 (voir paragraphe 3.4.1.3.2) ;

- le “Véhicule Autonome Connecté” : dans cette UE, un collègue (M. Chevrié) intervient sur la simulation du véhicule autonome sous Matlab<sup>®</sup>, et 2 industriels (J. Moreau et G. Bel Haj) de Stellantis (ex groupe PSA) interviennent sur l’utilisation du logiciel SCANeR pour la modélisation et la simulation d’un véhicule autonome.

Mes propositions en innovations pédagogiques (évolutions des cours, nouvelle maquette, international) sont présentées en section 3.4.

## 1.5 Résumé succinct de mes activités de recherche (détails aux chapitres 4 et 5)

Mes activités de recherche s’articulent autour de la dérivation non entière permettant de modéliser et de commander les systèmes dynamiques.

Tout d’abord, l’identification des systèmes dynamiques est une thématique très importante dans notre communauté car elle permet d’avoir une connaissance *a priori* sur le comportement dynamique du système et d’en faire de la simulation, de la surveillance, de la prédiction ou de la commande. Il est donc important de pouvoir développer des méthodes d’identification efficaces et avec une grande fiabilité sur l’estimation paramétrique qui permettront d’avoir une bonne connaissance du système à la fois dans les domaines temporel et fréquentiel. Je me suis investi dans le développement de méthodes d’identification pour les systèmes non entiers, à savoir :

- l’identification paramétrique de systèmes non commensurables (ou quelconques),
- l’identification paramétrique en boucle ouverte ou en boucle fermée,
- la planification d’expériences pour optimiser le signal d’excitation,
- l’identification paramétrique à une entrée (SISO) ou plusieurs entrées (MISO),
- l’identification paramétrique hors-ligne ou en ligne (en temps-réel),
- et l’identification fréquentielle de la densité spectrale de puissance.

De plus, la planification de trajectoire, est également une thématique primordiale de notre communauté car elle permet de mieux générer les trajectoires de consigne et de commande de référence à partir de critères multiples tels que les contraintes dynamiques du système considéré, l’accroissement de l’autonomie du système, l’évitement d’obstacle, etc. Je me suis investi dans le développement de méthodes de génération de trajectoire, à savoir :

- l’extension de la platitude aux systèmes non entiers pour la génération de mouvement des systèmes non entiers,
- l’optimisation multi-critère de trajectoire 2D (pour les véhicules terrestres) et 3D (pour les drones),
- la planification prédictive et réactive pour l’évitement d’obstacle,
- et l’optimisation de la commande en vue du vieillissement et de la maintenance prédictive.

Tous ces outils méthodologiques ont permis de développer des fondements théoriques basés sur la dérivation non entière et de les incorporer dans la boîte à outil CRONE développée sous Matlab®. D'autre part, ils ont pu être mis en œuvre sur des applications très diverses, à savoir :

- la modélisation, l'identification et la commande de systèmes thermiques (matériaux et poumon)
- la planification de trajectoire et la commande de véhicules autonomes (terrestres et aériens),
- la modélisation et l'identification des transferts thermiques du poumon en chirurgie,
- la modélisation et l'identification du système climatique terrestre,
- l'identification et la commande d'un turbofan DGEN 380,
- la modélisation des perturbations de vent,
- la commande des antennes mobiles.

## 1.6 Encadrement scientifique (détails au chapitre 2.1 p. 21)

### 1.6.1 3 thèses soutenues avec un taux d'encadrement cumulé de 150% :

- Jean-Baptiste Receveur, *Optimisation de trajectoire en environnement dynamique 2D : application au système d'aide à la conduite*, soutenue le 12/12/2018, co-direction P. Melchior (50%) et **S. Victor (50%)** – Bourse ministérielle / ENS Cachan,  
Rapporteurs : L. Adouane (MCF HDR à Polytech'Clermont Ferrand) et E. Bideaux (PR à l'INSA Lyon)
- Julien Moreau, *Aide à la conduite et véhicule autonome connecté dans les intersections*, soutenue le 15 décembre 2020, co-direction P. Melchior (50%) et **S. Victor (50%)** – Contrat CIFFRE PSA Peugeot Citroën,  
Rapporteurs : E. Bideaux (PU à INSA de Lyon) et R. Talj Kfoury (Chargé de recherche à l'UTC)
- Abir Mayoufi, *Identification du système climatique terrestre*, soutenue le 15 mars 2022, co-direction R. Malti (50%) et **S. Victor (50%)** – thèse en cotutelle avec ENIG Gabès (Tunisie),  
Rapporteurs : N. Derbel (PU ENIS Sfax) et T. Raïssi (PU CNAM-Paris)

### 1.6.2 3 thèses en cours avec un taux d'encadrement cumulé de 100% :

- Kendric Ruiz, *Planification de trajectoire robuste en environnement 3D perturbé*, abandon du candidat en décembre 2020 après 3 ans de thèse, co-direction P. Melchior (33%, IMS), S. Chaumette (33%, LaBRI) et **S. Victor (33%, IMS)** – Bourse ministérielle / Bourse d'excellence de l'Université de Bordeaux
- Jean-François Duhé, *Modélisation d'ordre non entier des transferts thermiques dans les poumons pour des opérations de chirurgie cardiaque*, soutenance prévue en décembre 2022,

- co-direction P. Melchior (33%, IMS), F. Roubertie (33%) et **S. Victor (33%)** – Bourse ministérielle / Bourse d'excellence de l'Université de Bordeaux (AAP pluridisciplinaire)
- Mohamed Hajjem, *Optimisation de la commande d'antennes mobiles 2 axes et 3 axes*, soutenance prévue en juillet 2023, co-direction P. Melchior (33%), P. Lanusse (33%) et **S. Victor (33%)** – Contrat CIFFRE Safran Data System

### 1.6.3 16 stages de Master 2 Recherche

1. Alexandre Taymans (2014)
2. Elodie Eyang (2015)
3. Rémi Gardère (2015)
4. Jean-Baptiste Receveur (2015)
5. Arnold Diudichi Najera (2016)
6. Julien Moreau (2016)
7. Abir Mayoufi (2017)
8. Rodrigo Arauz Sosa (2017)
9. Louis Cassany (2018)
10. Chahinez Arezki (2019)
11. Jean-François Duhé (2019)
12. Sara Abdellaoui (2020)
13. Halim Ould Lahsen (2021)
14. Lukasz Mizgalski (2021)
15. Youcef Ferradji (2022)
16. Pierik Stuttgen (2022)

## 1.7 Responsabilités scientifiques, animations et évaluations (détails au chapitre 2 p. 34)

- Membre nommé du **comité technique de l'IFAC TC 2.2** Linear Control Systems, depuis 2017
- Membre nommé du **CNU 61<sup>ème</sup>** section depuis 2020
- Membre du **comité de pilotage** de la société savante “Fractional Differentiation and its Applications” (FDA) qui organise annuellement la conférence ICFDA (depuis mai 2021)
- Membre du comité de programme de la conférence ICFDA 2020
- Organisation de **3 sessions invitées** à des conférences internationales World Congress IFAC (2017 et 2020) et ICSC 2021
- Organisation de **1 workshop** à la conférence IFAC AAC'2019

- chair ou co-chair à **5** reprises dans des conférences internationales
- **Responsable du séminaire** de l'équipe CRONE du laboratoire IMS, depuis 2014
- **Responsable du séminaire** du Groupe Automatique du laboratoire IMS, depuis 2015
- Evaluator de **44** articles de revues et de **35** conférences internationales
- Membre de **1 comité de sélection** de Maître de Conférence en 2019 à Bordeaux INP/enseirbmatmeca en 61<sup>ème</sup> section
- Expertise dans deux instances locales de l'Université de Bordeaux (équivalence de qualification de Maître de Conférences en 2014 et avancement de grade en 2018)
- Co-responsable avec R. Malti (Univ. Bordeaux) du développement de la toolbox CRONE dédiée au calcul fractionnaire et à l'identification, depuis 2013
- Coresponsable du Workpackage 1 du Réseau Impulsion BEST (janvier 2021, en préparation depuis 2018)

## 1.8 Collaborations contractuelles (détails au chapitre 2.3 p. 42)

- Coresponsable d'**un contrat de recherche** en partenariat avec le Groupe PSA Peugeot Citroën (DRIA), Fév. 2016 à Déc. 2020, 60 k€
- Participant en tant que chercheur à **1 contrat de recherche** suite au Cluster SysNum de l'Idex de l'Université de Bordeaux, déc.. 2017 à déc. 2021, 90k€
- Participant en tant que chercheur à **1 projet Région Nouvelle-Aquitaine** PELICAN porté par Air Marine, juil. 2017 à juin 2019, 80k€/15M€
- Coresponsable d'**un AAP pluridisciplinaire** du Collège des écoles doctorales de l'Univ. de Bordeaux, oct. 2019-déc. 2022, 90k€
- Coresponsable d'**un projet de recherche** du Cluster SysNum (Univ. de Bordeaux), fév. 2020 à sept. 2021, 8.3 k€
- Responsable d'**un AAP pluridisciplinaire** du Département SIN/STS à l'Univ. de Bordeaux, oct. 2021 à déc. 2021, 11 k€
- Coresponsable d'**un contrat de recherche** en partenariat avec Safran Data System, Juil. 2020 à Juin 2023, juil. 2020 à juin 2023, 67.5 k€
- Coresponsable d'**un AAP pluridisciplinaire** du Département SIN à l'Univ. de Bordeaux, fév. 2022 à déc. 2022, 15 k€
- Coresponsable du Workpackage "Optimal Non Destructive Evaluation & Control" du **Réseau Impulsion BEST** de l'Université de Bordeaux, de jan. 2022 à déc. 2025, 130 k€

## 1.9 Production scientifique (détails au chapitre 2.4 p. 48)

L'ensemble de mes publications sont accessibles sous HAL (voir [CV-HAL](#)). Mes travaux de recherche ont donné lieu à :

- 18 articles parus dans des revues internationales
- 4 articles soumis ou en révision à des revues internationales
- 2 chapitres dans des ouvrages de synthèse
- 35 communications dans des congrès internationaux avec actes et comité de lecture
- 12 communications dans des manifestations scientifiques nationales
- 1 brevet
- 1 workshop international
- 3 sessions invitées à des conférences internationales (2 IFAC et 1 IEEE)
- 1 plénière pour un séminaire dans une école de formation par la recherche
- 5 plénières à des conférences internationales

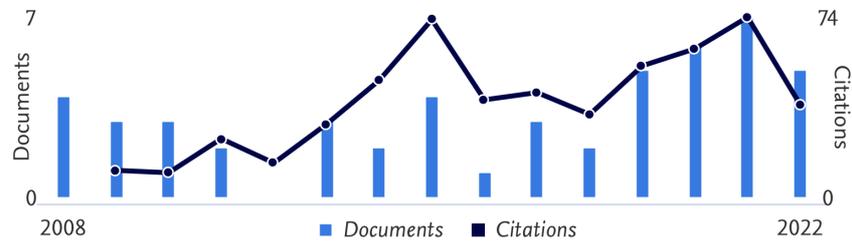


FIGURE 1.1: Graphique résumant les documents et citations sous [Scopus](#) ; H index : 10

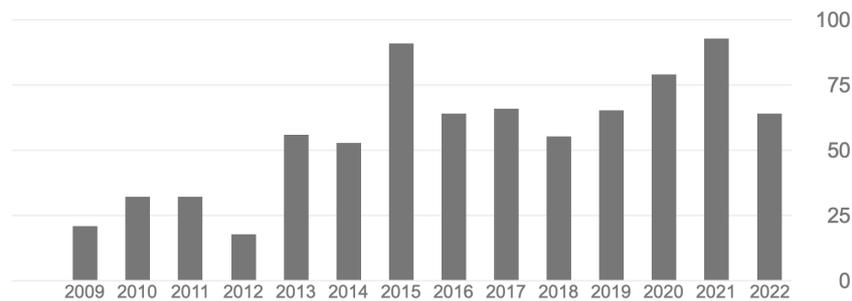


FIGURE 1.2: Graphique résumant les citations sous [Google Scholar](#) ; H index : 15 ; 803 citations

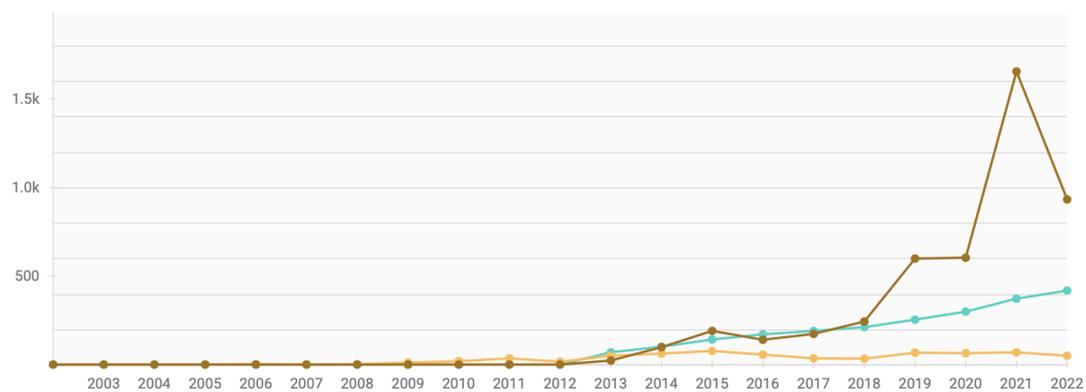


FIGURE 1.3: Graphique résumant les citations sous [Researchgate](#) ; H index : 12 ; 651 citations ; RG score : 23.52 (> 75% des utilisateurs de Researchgate, nombre de papiers lus (marron), l'intérêt en recherche (vert) et le nombre de citation (jaune))

## Chapitre 2

# Complément au Curriculum Vitæ

---

<b>2.1</b>	<b>Encadrement scientifique</b>	<b>21</b>
2.1.1	Articulation des thèses encadrées et en cours d'encadrement dans mon projet de recherche	21
2.1.2	Thèses soutenues (3), taux d'encadrement cumulé 150%	24
2.1.3	Thèses en cours (3), taux d'encadrement cumulé 100%	29
2.1.4	Stage de Masters 2 Recherche (16), taux d'encadrement cumulé 758%	30
2.1.5	Stage de Master 1 ou ingénieur	33
<b>2.2</b>	<b>Responsabilités scientifiques, animations et évaluations</b>	<b>34</b>
2.2.1	Membre d'un comité technique de l'IFAC	34
2.2.2	Membre nommé du CNU 61ème section	34
2.2.3	Membre du comité de programme de la conférence (1)	35
2.2.4	Membre du comité d'organisation	35
2.2.5	Organisation de sessions dans des conférences internationales (3)	36
2.2.6	Organisation de workshop international (1)	36
2.2.7	Chair ou co-chair dans des conférences internationales (5)	37
2.2.8	Plénière lors d'un séminaire donné dans une école de formation par la recherche	38
2.2.9	Plénière réalisée lors de conférences internationales	38
2.2.10	Responsable des séminaires de l'équipe CRONE	39
2.2.11	Responsable des séminaires du Groupe Automatique	39
2.2.12	Evaluateur pour des revues (45) et des congrès internationaux (34)	40
2.2.13	Membre d'un comité de sélection	40
2.2.14	Expertises	41
2.2.15	Co-responsable du Workpackage 1 du Réseau Impulsion BEST	41
2.2.16	Co-responsable du développement de la toolbox CRONE	42
<b>2.3</b>	<b>Activités contractuelles</b>	<b>42</b>
2.3.1	Contrats de recherche évalués suite à AAP	42
2.3.2	Contrats de recherche de gré à gré	47
<b>2.4</b>	<b>Production scientifique</b>	<b>48</b>
A	Revue internationale indexée JCR avec comité de lecture (18)	48

B	Revue internationale non indexée avec comité de lecture (2) . . . . .	50
C	Soumission à des revues internationales avec comité de lecture (4) . . . . .	50
D	Chapitres dans des ouvrages de synthèse (2) . . . . .	50
E	Communications dans des congrès internationaux (30) . . . . .	51
F	Communications dans des manifestations scientifiques nationales (12) . . . . .	54
G	Brevets (1) . . . . .	56

---

## 2.1 Encadrement scientifique

### 2.1.1 Articulation des thèses encadrées et en cours d'encadrement dans mon projet de recherche

Mes activités de recherche et plus particulièrement les thèses que j'ai encadrées, s'insèrent dans la progression globale de mon projet de recherche qui concernent la dérivation non entière en théorie des systèmes, en identification des systèmes dynamiques et en planification de trajectoire. En effet, les systèmes à dérivées non entières décrivent naturellement avec peu de paramètres (on parle alors de *compacité paramétrique*) les phénomènes de diffusion dans la propagation et dans l'effet à mémoire longue qu'apporte l'opérateur de dérivation non entière. On peut donc bien caractériser les comportements de divers phénomènes physiques tels que les transferts thermiques, les vibrations des matériaux viscoélastiques, les phénomènes de charge et de décharges de dispositif de stockage d'énergie (batteries, piles à combustible, supercapacités), la relaxation des systèmes biologiques (excitation et relaxation des muscles, transferts thermiques dans les poumons, fractalité dans le cœur,...), etc.

Afin de mieux comprendre mon projet de recherche, il me semble important de rappeler mes travaux de thèse. J'ai effectué ma thèse de doctorat au laboratoire IMS, équipe CRONE, de novembre 2006 à novembre 2010. Mes travaux de thèse ont portés sur l'identification par modèle non entier pour la poursuite robuste de trajectoire par platitude. Je travaillais donc sur deux thématiques bien précises, à savoir :

- la **planification de trajectoire** par platitude, thématique où j'ai développé l'algèbre des polynômes non entiers et de matrices polynomiales ainsi que l'extension des principes de la platitude aux systèmes non entiers, ces extensions reposant sur l'identité de Bézout.
- et l'**identification des systèmes dynamiques** par modèle non entier, thématique où je me suis focalisé sur le développement de méthodes (moindres carrés et variable instrumentale) d'identification des paramètres d'un modèle non entier qui est exclusivement commensurable (voir la section A.7 pour un rappel sur le calcul fractionnaire), et ce dans des contextes de bruit blanc et de bruit coloré ;

Après mon recrutement en 2011 au sein de la même équipe du laboratoire IMS, j'ai poursuivi mes activités de recherche dans ces deux thématiques.

Dans le cadre du laboratoire commun OpenLab entre l'IMS et le Groupe PSA, ce dernier souhaitait orienter leur thématique de recherche sur le véhicule autonome. Avant de pouvoir lancer cette collaboration avec PSA, j'ai lancé avec Pierre Melchior un sujet de stage sur l'optimisation de trajectoire des véhicules autonomes. J.-B. Receveur a réalisé son stage de Master Recherche en 2015 et a poursuivi en thèse avec une Bourse de l'ENS Cachan. Ses travaux de recherche nous ont permis de générer des trajectoires de référence par une optimisation multi-critère hors-ligne de la planification de trajectoire des véhicules autonomes. Enfin, pour garder la réactivité du véhicule autonome, les champs de potentiels fractionnaires ont été combiné pour

l'évitement d'obstacles. Puis, nous avons développé une méthode d'inversion de modèle au travers de la platitude pour effectuer de la génération de commande à partir d'un modèle bicyclette. Enfin, nous avons validé la poursuite de trajectoire optimale au travers de la génération de consigne et de la génération de commande en les couplant avec une synthèse de loi de commande robuste (commande CRONE de troisième génération) sur un simulateur de conduite disponible dans le cadre de l'OpenLab.

Un an après le début de la thèse de J.B. Receveur, la collaboration avec le Groupe PSA a pu démarrer et a commencé avec la thématique de replanification de trajectoire au travers du stage et de la thèse de J. Moreau en 2016. La méthode des champs potentiels est plus complexe à réaliser dans un contexte urbain d'une part, compte tenu du nombre important d'obstacles à considérer, mais également dans un souci d'implémentation en temps-réel, le Groupe PSA souhaitait avoir une méthode prédictive avec garantie de convergence en un temps minimal. Tout d'abord, l'optimisation d'une courbe de Bézier en utilisant le lagrangien combinée à une optimisation de descente du gradient a permis de développer un premier formalisme pour la replanification de trajectoire, puis une autre alternative au travers l'optimisation par programmation quadratique a pu être développée. A partir de cette planification prédictive de chemin, il a fallu ensuite y associer une planification de vitesse afin de rendre ce chemin réactif et dynamique en fonction des obstacles rencontrés. Pour cela, nous avons combiné l'espace de coordination au chemin prédictif afin d'y adapter un profil de vitesse. Tous ces développements ont pu être validés sous SCANeR.

Fort de cette expérience et notamment avec le lancement du Cluster SysNum de l'Idex (Initiative d'Excellence) de l'Université de Bordeaux, une collaboration a été menée avec le laboratoire d'informatique LaBRI pour réaliser l'extension en 3D des méthodes proposées dans la thèse de J.B. Receveur avec l'intégration des pertes de signaux liées aux capteurs embarqués. Ces travaux de recherche ont démarré avec la thèse de K. Ruiz. Bien que le candidat ait souhaité suspendre sa thèse suite aux confinements successifs de la pandémie 2020, nous avons tout de même pu avancer dans les travaux de recherche avec la proposition d'une nouvelle définition de champs de potentiels fractionnaires réactifs qui prend en compte à la fois des dynamiques des obstacles ainsi que de leur dangerosité. Nous avons pu développer un simulateur de drone sous Matlab® (stage de Master 2 Recherche de S. Abdellaoui en 2020). Enfin, le stage de Master 2 Recherche de H. Ould Lahsen en 2021 nous a permis de compléter le simulateur de drone avec la prise en compte des pertes de signaux de capteurs (GPS, caméra,...), au travers l'élaboration et le développement d'un arbre de défaillance et de décision sur les pertes des signaux de capteurs avec modélisation sous Matlab®/Stateflow.

Dans la continuité de l'identification des systèmes dynamiques, l'étape de planification d'expérience est une étape cruciale pour bien concevoir le signal d'excitation afin d'optimiser l'estimation des paramètres du modèle, et plus particulièrement pour un système non entier. En effet, cette thématique n'avait jamais été effectuée pour les systèmes non entiers de deuxième espèce (une structure d'un système du second ordre mais à dérivées non entières). Dans ce cas, l'objectif est de bien synthétiser le signal d'excitation pour pouvoir estimer jusqu'à quatre

paramètres : le gain statique, la pseudo-pulsation propre, le pseudo-facteur d'amortissement ou encore l'ordre commensurable. Ce travail a pu être mené lors du stage de A. Mayoufi ou seuls les cas de 1 ou 2 paramètres à estimer ont été abordés. Les études pour le cas de 3 ou 4 paramètres à estimer ont été abordé lors de sa poursuite en thèse.

En tant que responsable des séminaires du groupe automatique, j'organise des séminaires mensuels lors desquels doctorants, stagiaires, enseignants-chercheurs du laboratoire présentent leurs derniers avancements en recherche. Ce séminaire est également l'occasion d'inviter des personnes extérieures. En fin décembre 2016, le Professeur Ph. de Larminat a été invité et a présenté ses travaux de recherche sur la modélisation du système climatique terrestre. Le modèle climatique terrestre est très complexe et possède des dynamiques lentes et moyennes avec des caractéristiques de phénomènes de propagation et de propriétés thermiques puisque la sortie est la température, il m'a semblé judicieux de lancer un travail de recherche sur la modélisation du système climatique terrestre avec des modèles non entiers. Pour cela, il fallait développer des méthodes d'identification MISO (de l'anglo-saxon *multiple input single output* ou en français, entrées multiples et une sortie). Par conséquent nous avons développé ces méthodes lors de la thèse de A. Mayoufi. Nous avons établi plusieurs stratégies. Tout d'abord, l'estimation des coefficients au travers de deux méthodes d'identification : la méthode *output error* (erreur de sortie) et la variable instrumentale. Puis, dans un deuxième temps, l'estimation conjointe des ordres de dérivation et des coefficients a été réalisé avec une descente de gradient pour l'estimation des ordres.

Lors d'une collaboration de l'équipe CRONE avec le CHU Haut-Lévêque sur l'identification hors-ligne du modèle thermique des poumons lors d'opération chirurgicale à coeur ouvert, une connaissance de l'état des poumon en temps-réel a clairement été soulevée. En effet, lors de ces opérations à coeur ouvert avec circulation sanguine extracorporelle, un débit d'air froid est injecté dans les poumons pour ralentir le métabolisme. Cependant abaisser la température de manière trop significative ou encore trop longtemps peut causer des risques d'endommagement des tissus de manière irréversible. L'appel à projet transdisciplinaire de l'université de Bordeaux a été accepté en 2019, ce qui nous a permis de démarrer la thèse de J.-F. Duhé. Nous avons pu développer des modèles de transferts thermiques du poumon à partir de l'équation de la chaleur en prenant également en compte la perfusion dans les tissus. De plus, nous avons également élaboré des algorithmes d'identification en temps réel avec des contributions significatives sur l'estimation des coefficients, mais également des ordres de dérivation.

Compte tenu de mon spectre large en modélisation, identification, ainsi qu'en planification de trajectoire, la collaboration entre Safran Data System et l'IMS a permis d'initier la thèse de M. Hajjem en juillet 2020. Tout d'abord, afin d'améliorer les performances dynamiques des antennes, il est nécessaire de bien modéliser les nouveaux systèmes d'antenne à 3 axes proposés. Ces systèmes d'antennes présentent des non-linéarités de type jeux, des frottements secs liés en grande partie aux réducteurs et souplesse du système mécanique. Ces non-linéarités sont interprétées en termes de variations paramétriques sur le modèle complet de l'antenne. D'autre

part, afin d’avoir un simulateur réaliste, il est nécessaire de modéliser les perturbations de vent qui ont des effets non négligeables sur le comportement dynamique de l’antenne et sur la précision du positionnement de l’antenne. Le modèle de von Kármán utilisé dans la littérature pour la modélisation des perturbations de vent est un modèle non entier datant des années 1940. Ce modèle issu de l’analyse spectral des turbulences de vent, a été conçu pour des avions en hautes altitudes. L’analyse spectrale à partir de mesures réelles nous a permis de déterminer des modèles non entiers de Cole-Cole plus adaptés en basses altitudes, à partir de méthodes d’identification en fréquentiel, avec conception d’un générateur de vent. Ce générateur permettra de réaliser du dimensionnement sur la conception des pièces mécaniques des antennes 3 axes, et notamment de réduire l’impact important des contraintes mécaniques (ou relâcher) sur la conception de la mécanique) tout en assurant des performances au moins égales à celles des produits actuels. D’un point de vue technologique, l’enjeu est également de détecter un vieillissement de la mécanique et de garantir des performances équivalentes à celles du système en sortie d’usine.

### 2.1.2 Thèses soutenues (3), taux d’encadrement cumulé 150%

#### 2.1.2.1 Thèse de Jean-Baptiste Receveur, taux d’encadrement 50%

<i>Doctorat de :</i>	Université de Bordeaux
<i>Spécialité :</i>	Automatique, Productique, Signal et Image, Ingénierie cognitive
<i>Titre :</i>	Optimisation de trajectoire en environnement 2D : application au véhicule autonome
<i>Dates et durée :</i>	1er Octobre 2015 au 12 décembre 2018 – 3 ans et 2 mois
<i>Directeur :</i>	Pierre Melchior (50%)
<i>Co-encadrant :</i>	Stéphane Victor (50%)
<i>Financement :</i>	bourse MENRT / ENS Cachan
<i>Mention :</i>	Très honorable

Devant la commission d’examen formée de :

L. Adouane	Maître de Conférences HDR à Polytech’Clermont-Ferrand Institut Pascal UMR 6602 CNRS	Rapporteur
E. Bideaux	Professeur à INSA Lyon AMPERE UMR 5005 CNRS	Rapporteur
H. Abou-Kandil	Professeur à l’ENS Cachan SATIE UMR 6602 CNRS	Président
A. Rizzo	Docteur Ingénieur Groupe PSA	Examineur
P. Melchior	Professeur à Bordeaux INP/enseirb-matmeca IMS UMR 5218 CNRS	Directeur
S. Victor	Maître de Conférences à l’Université de Bordeaux IMS UMR 5218 CNRS	Co-encadrant

### 2.1.2.1.1 Contexte

Inscrit à l'ENS Cachan et en M2 Recherche AM2AS, Jean-Baptiste Receveur a obtenu une bourse ministérielle de l'ENS Cachan avec une mission d'enseignement qu'il a effectué au sein de l'Université de Bordeaux de 2015 à 2018.

### 2.1.2.1.2 Résumé

Les travaux de recherche de Jean-Baptiste Receveur nous ont permis de mener des études sur l'optimisation multi-critère de la planification de trajectoire des véhicules autonomes (danger, distance, temps, confort des passagers et consommation énergétique) afin de satisfaire les contraintes dynamiques du véhicule mais également les critères cités plus haut. Optimiser tous ces critères qui sont fortement non linéaires nous a permis de développer des méthodes de génération de consigne (hors-ligne) et de les combiner avec des champs de potentiels (en ligne) pour l'évitement d'obstacles. Pour cela, nous avons associé la méthode des champs de potentiels (pour garder la réactivité de véhicule et qui reste une méthode en ligne) avec l'algorithme génétique (qui est un algorithme hors-ligne permettant la génération de consigne optimale). Puis, nous avons développé une méthode d'inversion de modèle au travers de la platitude pour effectuer de la génération de commande à partir d'un modèle simplifié (le modèle bicyclette). Enfin, la validation de l'ensemble des résultats a été réalisé sur un simulateur de conduite où le suivi de trajectoire a été conçu avec une synthèse de loi de commande robuste (commande CRONE).

### 2.1.2.1.3 Publications associées

- 3 revues internationales : Fractional Calculus & Applied Analysis 2019 [118], Intelligent Service Robotics 2020 [120], Transactions on Intelligent Transportation Systems 2020 [33],
- 4 conférences internationales : IFAC World Congress 2017 [115], 2018 IEEE IV 2018 [117], ICFDA 2018 [116], AAC 2019 [119]
- 1 revue nationale : Automatique, Open Science, ISTE [121]
- 1 communication dans un Groupe de Travail du GdR MACS (CNRS) : GT Automatique et Automobile 2018 [122]

Devenir : Jean-Baptiste est aujourd'hui chef de projet chez Setec ITS.

### 2.1.2.2 Thèse de Julien Moreau, taux d'encadrement 50%

<i>Doctorat de :</i>	Université de Bordeaux
<i>Spécialité :</i>	Automatique, Productique, Signal et Image, Ingénierie cognitive
<i>Titre :</i>	Aide à la conduite et véhicule autonome connectée en intersection
<i>Dates et durée :</i>	1er Octobre 2016 au 15 décembre 2020 – 4 ans et 2 mois
<i>Directeur :</i>	Pierre Melchior (50%)
<i>Co-encadrant :</i>	Stéphane Victor (50%)
<i>Financement :</i>	CIFRE
<i>Mention :</i>	Très honorable

Devant la commission d'examen formée de :

R. Talj Kfoury	CR CNRS HDR à l'Université de Tech. de Compiègne Heudyasic UMR 7253	Rapporteur
E. Bideaux	Professeur à INSA Lyon AMPERE UMR 5005 CNRS	Rapporteur
M. Basset	Professeur à l'Université de Haute-Alsace MIPS EA 2332	Président
S. Mammam	Professeur à l'Université d'Evry IBISC EA 4526	Examineur
P. Melchior	Professeur à Bordeaux INP/enseirb-matmeca IMS UMR 5218 CNRS	Directeur
S. Victor	Maître de Conférences à l'Université de Bordeaux IMS UMR 5218 CNRS	Co-encadrant
M. Moze	Docteur Ingénieur de Recherche Groupe PSA	Co-encadrant
F. Guillemard	Docteur Ingénieur de Recherche Groupe PSA	Co-encadrant
F. Aioun	Docteur Ingénieur de Recherche Groupe PSA	Examineur

#### 2.1.2.2.1 Contexte

Issu du M2 AM2AS, Julien Moreau a effectué sa thèse en CIFRE avec le Groupe PSA. Julien a été embauché comme ingénieur de recherche chez PSA dès la fin de sa thèse. Julien a été embauché en tant qu'ingénieur de recherche dès le mois de novembre 2019 et ne pouvait se consacrer à sa thèse que 2 jours par semaine à partir de novembre 2019. De plus, lors du confinement de 2020 et lors du déconfinement, il ne pouvait accéder à ce logiciel que 1 jour par semaine de mars à juillet 2020 à cause du chômage partiel imposé par PSA, ce qui a fortement impacté son travail et plus particulièrement l'obtention de résultats de son dernier chapitre.

### 2.1.2.2.2 Résumé

La collaboration avec le Groupe PSA sur cette thématique de replanification de trajectoire a démarré au travers du stage de J. Moreau en 2016 sur la planification de trajectoire par la méthode de champs de potentiels appliquée au véhicule autonome connectée, puis s'est poursuivie en thèse. Tout d'abord, le stage nous a permis de réaliser que la méthode des champs potentiels n'étaient pas adapté dans le contexte urbain d'une part, compte tenu du nombre important d'obstacles à considérer, mais également car le Groupe PSA souhaitait avoir une méthode prédictive avec garanti de convergence en un temps réduit pour une implantation en temps-réel. Par conséquent, nous nous sommes penchés sur l'optimisation d'une courbe de Bézier en utilisant le lagrangien et une descente du gradient. Cependant, cette optimisation ne permet pas de prendre en compte un nombre suffisant de contraintes telle que l'angle de braquage maximum autorisée par le véhicule. Ainsi nous avons proposé une autre alternative au travers l'optimisation par programmation quadratique. Cette solution a fait l'objet d'un dépôt de brevet. A partir de cette planification prédictive de chemin, il a fallu ensuite y associé une planification de vitesse afin de rendre ce chemin réactif et dynamique en fonction des obstacles rencontrés. Pour cela, nous avons combiné l'espace de coordination au chemin prédictif afin d'y adapter un profil de vitesse selon deux méthodologies : une planification de vitesse en utilisant les informations a priori sur le parcours suivi par le véhicule et une en utilisant la replanification de vitesse du véhicule afin de coordonner le franchissement d'une intersection avec les autres véhicules présents.

### 2.1.2.2.3 Publications associées

- 1 revue internationale : Transactions on Vehicular Technology 2022 [108] en cours de re-lecture,
- 3 conférences internationales : IFAC World Congress 2017 [109], 2019 IEEE IV 2019 [113], AAC 2019 [110]
- 1 brevet [107]
- 1 revue nationale : Automatique, Open Science, ISTE [111]
- 1 communication dans un Groupe de Travail du GdR MACS (CNRS) : GT Automatique et Automobile 2018 [112]

Devenir : Julien est aujourd'hui ingénieur de recherche chez Stellantis (ex-groupe PSA).

### 2.1.2.3 Thèse d'Abir Mayoufi, taux d'encadrement 50%

<i>Doctorat de :</i>	Université de Bordeaux et Ecole Nationale d'Ingénieurs de Gabès (ENIG, Tunisie)
<i>Laboratoires :</i>	IMS – UMR 5218 CNRS (Bordeaux) et MACS – LR16ES22 (Gabès)
<i>Spécialité :</i>	Automatique, Productique, Signal et Image, Ingénierie cognitive
<i>Titre :</i>	Identification du système climatique terrestre
<i>Dates et durée :</i>	5 janvier 2018 au 16 mars 2022 – 4 ans et 3 mois
<i>Directeur :</i>	Rachid Malti (50%)
<i>Co-encadrant :</i>	Stéphane Victor (50%)
<i>Co-Directeur :</i>	Mohamed Aoun (co-tutelle)
<i>Financement :</i>	Assistante à l'ENIG, Tunisie
<i>Mention :</i>	

Devant la commission d'examen formée de :

N. Derbel	Professeur à ENIS Sfax CEM Lab	Rapporteur
T. Raïssi	Professeur au CNAM de Paris Cedric EA4629	Rapporteur
M. Thomassin	Maître de Conférences à l'Université de Lorraine CRAN UMR 7039 CNRS	Examinatrice
H. Bouzaouache	Professeur à ISET'Com de Tunis LAPER	Examinatrice
R. Malti	Professeur à l'Université de Bordeaux IMS UMR 5218 CNRS	Directeur
S. Victor	Maître de Conférences à l'Université de Bordeaux IMS UMR 5218 CNRS	Co-directeur
M. Aoun	Professeur à l'ENIG MACS LR16ES22	Co-tutelle
M. Chetoui	Maître de Conférences à l'ENIG Gabès MACS LR16ES22	Co-tutelle

#### 2.1.2.3.1 Contexte

Abir est en thèse en co-tutelle avec l'ENIG Gabès, Tunisie. Elle avait une charge d'enseignement à l'ENIG afférente à son poste d'assistante pendant ses 3 premières années de thèse. Depuis septembre 2021, elle a obtenu un poste de demi-ATER à l'université de Bordeaux.

#### 2.1.2.3.2 Résumé

Le thème général de cette thèse repose sur l'identification du modèle climatique terrestre. Depuis sa création en 1988, le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du

Climat) a établi cinq rapports d'évaluations en vue de fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes et leurs répercussions potentielles. Il s'avère que leurs résultats sont fondées sur des données climatiques datant de la révolution industrielle, c'est-à-dire seulement depuis que l'activité anthropologique est la plus forte en terme de libération de gaz à effet de serre (et plus particulièrement en  $\text{CO}_2$ ). Le Professeur Philippe de Larminat a écrit un livre sur l'identification du climat terrestre à partir de modèle très simples. La diffusion thermique pouvant être régi par des modèles non entiers et compte tenu des dynamiques lentes et moyennes apportées par les facteurs de forçage, il m'a semblé judicieux de proposer une identification par modèle non entier afin de déterminer, de manière objective, un modèle du système climatique terrestre. Pour cela des techniques d'identification en multivariable ont été proposées à l'aide de la méthode à erreur de sortie ainsi qu'avec la méthode de la variable instrumentale. Il a été nécessaire de définir de nouvelles définitions de commensurabilité, à savoir les commensurabilités structurées (ou S-commensurabilité) globale et locale qui permettent de limiter le nombre de paramètres et plus particulièrement le nombre d'ordres de dérivation. Ces nouvelles techniques d'identification ont été appliquées et comparées sur les données climatiques.

### 2.1.2.3.3 Publications associées

- 3 revues internationales : Fractional Calculus & Applied Analysis [103] , Automatica [32] acceptée, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation [77] en cours de 3ème relecture
- 3 conférences internationales : IFAC SYSID 2018 [76], IFAC World Congress 2020 [101], 2020 IEEE SSD [104]
- 2 communications nationales du GdR MACS/SAGIP (CNRS) : Journées Doctorales et Journées Nationales du GdR MACS 2019 [105] et GT Identification du GdR MACS/SAGIP 2021 [102]

Devenir : Abir est actuellement ATER à l'université de Bordeaux.

## 2.1.3 Thèses en cours (3), taux d'encadrement cumulé 100%

### 2.1.3.1 Thèse de Kendric Ruiz, taux d'encadrement 33%

<i>Doctorat de :</i>	Université de Bordeaux
<i>Laboratoires :</i>	IMS – UMR 5218 CNRS et LaBRI – UMR 5800 CNRS
<i>Spécialité :</i>	Automatique, Productique, Signal et Image, Ingénierie cognitive
<i>Titre :</i>	Planification de trajectoire robuste en environnement 3D perturbé
<i>Dates :</i>	depuis le 15 décembre 2017
<i>Directeurs :</i>	Pierre Melchior (IMS, 33%) et Serge Chaumette (LaBRI, 33%)
<i>Co-encadrant :</i>	Stéphane Victor (33%)
<i>Financement :</i>	Idex, cluster SYSNUM

### 2.1.3.2 Thèse de Jean-François Duhé, taux d'encadrement 33%

---

<i>Doctorat de :</i>	Université de Bordeaux
<i>Laboratoires :</i>	IMS – UMR 5218 CNRS et IHU LIRYC INSERM U1045
<i>Spécialité :</i>	Automatique, Productique, Signal et Image, Ingénierie cognitive
<i>Titre :</i>	Modélisation d'ordre non entier des transferts thermiques dans les poumons pour des opérations de chirurgie cardiaque
<i>Dates :</i>	depuis le 01 octobre 2019
<i>Directeurs :</i>	Pierre Melchior (IMS, 33%) et François Roubertie (IHU LIRYC, 33%)
<i>Co-encadrant :</i>	Stéphane Victor (33%)
<i>Financement :</i>	Idex, AAP Pluridisciplinaire

---

### 2.1.3.3 Thèse de Mohamed Hajjem, taux d'encadrement 33%

---

<i>Doctorat de :</i>	Université de Bordeaux
<i>Laboratoires :</i>	IMS – UMR 5218 CNRS
<i>Spécialité :</i>	Automatique, Productique, Signal et Image, Ingénierie cognitive
<i>Titre :</i>	Optimisation de la commande d'antennes mobiles 2 axes et 3 axes
<i>Dates :</i>	depuis le 01 octobre 2020
<i>Directeur :</i>	Pierre Melchior (33%)
<i>Co-encadrant :</i>	Stéphane Victor (33%) et Patrick Lanusse (33%)
<i>Financement :</i>	CIFRE avec Safran Data Systems

---

### 2.1.4 Stage de Masters 2 Recherche (16), taux d'encadrement cumulé 758%

#### Stage d'Alexandre Taymans (février à juillet 2014)

---

<i>Diplôme de :</i>	Master 2 Recherche EAPS de l'Université de Bordeaux
<i>Spécialité :</i>	Automatique et Mécatronique, Automobile, Aéronautique et Spatial
<i>Titre :</i>	Etude de la loi de commande du moteur turbofan DGEN 380, double corps et double flux, de Price Induction
<i>Encadrement :</i>	Stéphane Victor (50%) et Pierre Melchior (50%)

---

#### Stage d'Elodie Eyang (février à juillet 2015)

---

<i>Diplôme de :</i>	Master 2 Recherche ISC de l'Université de Bordeaux
<i>Spécialité :</i>	Automatique et Mécatronique, Automobile, Aéronautique et Spatial
<i>Titre :</i>	Identification en boucle fermée du modèle d'un turbu-fan
<i>Encadrement :</i>	Stéphane Victor (50%) et Pierre Melchior (50%)

---

**Stage de Rémi Gardère (février à juillet 2015)**

<i>Diplôme de :</i>	Master 2 Recherche ISC de l'Université de Bordeaux
<i>Spécialité :</i>	Automatique et Mécatronique, Automobile, Aéronautique et Spatial
<i>Titre :</i>	Calculs formels sur les principes de la platitude
<i>Encadrement :</i>	Stéphane Victor (25%), Tudor Airimitoiaie (25%), Franck Cazaurang (25%) et Pierre Melchior (25%)

**Stage de Jean-Baptiste Receveur (février à juillet 2015)**

<i>Diplôme de :</i>	Master 2 Recherche ISC de l'Université de Bordeaux
<i>Spécialité :</i>	Automatique et Mécatronique, Automobile, Aéronautique et Spatial
<i>Titre :</i>	Optimisation dynamique de trajectoire en environnement 2D : Application à l'aide à la conduite
<i>Encadrement :</i>	Stéphane Victor (50%) et Pierre Melchior (50%)

**Stage d'Arnold Diudichi Najera (février à juillet 2016)**

<i>Diplôme de :</i>	Master 2 Recherche ISC de l'Université de Bordeaux
<i>Spécialité :</i>	Automatique et Mécatronique, Automobile, Aéronautique et Spatial
<i>Titre :</i>	Identification en boucle fermée de la dynamique d'un moteur turbofan double corps, double flux DGEN 380
<i>Encadrement :</i>	Stéphane Victor (50%) et Pierre Melchior (50%)

**Stage de Julien Moreau (février à juillet 2016)**

<i>Diplôme de :</i>	Master 2 Recherche ISC de l'Université de Bordeaux
<i>Spécialité :</i>	Automatique et Mécatronique, Automobile, Aéronautique et Spatial
<i>Titre :</i>	Planification de trajectoire par la méthode des champs de potentiels : application au Véhicule Autonome Connecté
<i>Encadrement :</i>	Stéphane Victor (50%) et Pierre Melchior (50%)

**Stage d'Abir Mayoufi (février à juillet 2017)**

<i>Diplôme de :</i>	Master 2 Recherche de l'ENIG, Tunisie
<i>Spécialité :</i>	Electrique et Automatique
<i>Titre :</i>	Planification d'expérience pour l'identification des systèmes par modèles non entiers
<i>Encadrement :</i>	Stéphane Victor (50%) et Rachid Malti (50%)

### Stage de Rodrigo Arauz Sosa (février à juillet 2017)

<i>Diplôme de :</i>	Master 2 Recherche ISC de l'Université de Bordeaux
<i>Spécialité :</i>	Automatique et Mécatronique, Automobile, Aéronautique et Spatial
<i>Titre :</i>	Identification en boucle fermée et commande d'un moteur turboréacteur double corps, double flux DGEN 380
<i>Encadrement :</i>	Stéphane Victor (50%) et Pierre Melchior (50%)

### Stage de Louis Cassany (février à juillet 2018)

<i>Diplôme de :</i>	Master 2 Recherche ISC de l'Université de Bordeaux
<i>Spécialité :</i>	Automatique et Mécatronique, Automobile, Aéronautique et Spatial
<i>Titre :</i>	Replanification de trajectoire réactive en intersection
<i>Encadrement :</i>	Stéphane Victor (50%) et Pierre Melchior (50%)

### Stage de Chahinez Arezki (février à juillet 2019)

<i>Diplôme de :</i>	Master 2 Recherche de l'Université Grenoble Alpes
<i>Spécialité :</i>	Control Systems and Information Technology
<i>Titre :</i>	Autonomous Driving : Decision and Motion Planning
<i>Encadrement :</i>	Stéphane Victor (50%) et Pierre Melchior (50%)

### Stage de Jean-François Duhé (février à juillet 2019)

<i>Diplôme de :</i>	Master 2 Recherche de l'Université Grenoble Alpes
<i>Spécialité :</i>	Automatique et Mécatronique, Automobile, Aéronautique et Spatial
<i>Titre :</i>	Planification de trajectoire robuste en environnement dynamique 2D/3D
<i>Encadrement :</i>	Stéphane Victor (50%) et Pierre Melchior (50%)

### Stage de Sara Abdellaoui (février à juillet 2020)

<i>Diplôme de :</i>	Master 2 Recherche ISC de l'Université de Bordeaux
<i>Spécialité :</i>	Automatique et Mécatronique, Automobile, Aéronautique et Spatial
<i>Titre :</i>	Modélisation d'un drone autonome en vue de sa commande
<i>Encadrement :</i>	Stéphane Victor (IMS, 33%) et Pierre Melchior (IMS, 33%) et Serge Chaumette (LaBRI, 33%)

**Stage de Halim Ould Lahsen (mars à septembre 2021)**

<i>Diplôme de :</i>	Master 2 Recherche EEA de l'Ecole Centrale de Lyon
<i>Spécialité :</i>	Automatique et Mécatronique, Automobile, Aéronautique et Spatial
<i>Titre :</i>	Replanification et poursuite robuste de trajectoire d'un robot en environnement perturbé
<i>Encadrement :</i>	Stéphane Victor (33%) et Pierre Melchior (33%) et Serge Chaumette (LaBRI, 33%)

**Stage de Lukasz Mizgalski (février à juillet 2021)**

<i>Diplôme de :</i>	Master 2 Recherche de l'Université d'Evry Val d'Essonne
<i>Spécialité :</i>	Smart Aerospace and Autonomous Systems
<i>Titre :</i>	Modeling of an autonomous tractor
<i>Encadrement :</i>	Stéphane Victor (IMS, 50%), Pierre Melchior (IMS, 25%) et Hugo Gimbert (LaBRI, 25%)

**Stage de Pierik Stuttgen (mars à juillet 2022)**

<i>Diplôme de :</i>	Master 2 Recherche ISC de l'Université de Bordeaux
<i>Spécialité :</i>	Automatique et Mécatronique, Automobile, Aéronautique et Spatial
<i>Titre :</i>	Caractérisation et identification de capteurs de flux en conditions extrêmes pour les applications de rentrée atmosphérique
<i>Encadrement :</i>	Stéphane Victor (IMS, 50%) et Jean-Luc Battaglia (I2M, 50%)

**Stage de Youcef Ferradji (mars à juillet 2022)**

<i>Diplôme de :</i>	Master 2 Recherche ISC de l'Université de Bordeaux
<i>Spécialité :</i>	Automatique et Mécatronique, Automobile, Aéronautique et Spatial
<i>Titre :</i>	Modeling and control of an autonomous tractor
<i>Encadrement :</i>	Stéphane Victor (IMS, 50%), Pierre Melchior (IMS, 25%) et Hugo Gimbert (LaBRI, 25%)

**2.1.5 Stage de Master 1 ou ingénieur****Stage d'Alexandre Taymans (mai à juillet 2013)**

<i>Diplôme de :</i>	2ème année à Bordeaux INP/enseirb-matmeca
<i>Spécialité :</i>	Dépt. Electronique
<i>Titre :</i>	Implémentation sur un simulateur de moteur (HIL) d'une loi de commande d'un banc moteur turbifan
<i>Encadrement :</i>	Stéphane Victor (IMS, 50%) et Pierre Melchior (50%)

### Stage de Fabien Frisan (mars à juillet 2014)

---

<i>Diplôme de :</i>	ISAE
<i>Spécialité :</i>	ENSICA
<i>Titre :</i>	Etude des différentes configurations de régulation d'un débit de gaz en entrée d'une pile à combustible
<i>Encadrement :</i>	Stéphane Victor (IMS, 33%), Pierre Melchior (33%) et Bruno Orsoni (Herakles, 33%)

---

### Stage de Rémy Tanays (avril à juillet 2017)

---

<i>Diplôme de :</i>	M1 à l'ENS de Rennes
<i>Spécialité :</i>	Mécatronique
<i>Titre :</i>	Modélisation d'un drone IRIS +
<i>Encadrement :</i>	Stéphane Victor (IMS, 100%)

---

### Stage de Thomas Venard (janvier à mars 2018)

---

<i>Diplôme de :</i>	Master 1 ISC de l'Université de Bordeaux
<i>Spécialité :</i>	Automatique et Mécatronique, Automobile, Aéronautique et Spatial
<i>Titre :</i>	Optimisation de trajectoire en environnement dynamique 2D/3D
<i>Encadrement :</i>	Stéphane Victor (IMS, 100%)

---

### Stage de Darren Loo (mai à novembre 2021)

---

<i>Diplôme de :</i>	3ème année à Bordeaux INP/enseirb-matmeca
<i>Spécialité :</i>	Dépt. Electronique, option AM2AS
<i>Titre :</i>	Graphical interface design for the object-oriented CRONE toolbox for fractional calculus, system identification and robust control
<i>Encadrement :</i>	Stéphane Victor (IMS, 50%), Rachid Malti (50%)

---

## 2.2 Responsabilités scientifiques, animations et évaluations

### 2.2.1 Membre d'un comité technique de l'IFAC

Membre du comité technique TC2.2 Linear Control Systems de l'IFAC, depuis 2017.  
<https://tc.ifac-control.org/2/2/members>

### 2.2.2 Membre nommé du CNU 61ème section

Membre nommé du CNU 61ème section depuis décembre 2019.  
[https://www.galaxie.enseignementsup-recherche.gouv.fr/ensup/Cand\\_elections\\_cnu2019.htm](https://www.galaxie.enseignementsup-recherche.gouv.fr/ensup/Cand_elections_cnu2019.htm)

### 2.2.3 Membre du comité de programme de la conférence (1)

<i>Conférence :</i>	International Conference on Fractional Differentiation and its Applications ICFDA 2020
<i>Fonction :</i>	Membre du comité de programme
<i>Dates :</i>	6-8 Septembre 2021
<i>Liste des membres :</i>	<a href="http://icfda2020.ee.pw.edu.pl/committees/">http://icfda2020.ee.pw.edu.pl/committees/</a>

### 2.2.4 Membre du comité d'organisation

#### 2.2.4.1 Membre du comité d'organisation pour un Groupe de Travail du CNRS (3)

<i>Groupe de Travail :</i>	Automatique et Automobile du GdR MACS du CNRS
<i>Fonction :</i>	Membre du comité d'organisation
<i>Dates :</i>	juil. 2011, nov. 2015, 2018
<i>Lieu :</i>	IMS
<i>Siteweb :</i>	<a href="https://www.cnrs.fr/CNRS-Hebdo/aquitaine/actus.php?numero=9042">https://www.cnrs.fr/CNRS-Hebdo/aquitaine/actus.php?numero=9042</a> <a href="http://gtaa-jaa-2015.sciencesconf.org">http://gtaa-jaa-2015.sciencesconf.org</a> <a href="https://gtaa-jaa-2018.sciencesconf.org">https://gtaa-jaa-2018.sciencesconf.org</a>

#### 2.2.4.2 Membre du comité d'organisation des JD-JN MACS (1)

<i>Workshop :</i>	Journées Doctorales et Journées Nationales du GdR MACS
<i>Fonction :</i>	Membre du comité d'organisation
<i>Dates :</i>	05-07 juin 2019
<i>Lieu :</i>	Bordeaux INP/enseirb-matmeca (2019)
<i>Siteweb :</i>	<a href="https://jmacs-bx2019.sciencesconf.org">https://jmacs-bx2019.sciencesconf.org</a>

#### 2.2.4.3 Membre du comité d'organisation pour une conférence internationale (2)

<i>Workshop :</i>	More Electric Aircraft
<i>Fonction :</i>	Membre du comité d'organisation
<i>Dates :</i>	fév. 2017, oct. 2021
<i>Lieu :</i>	Palais des Congrès de Bordeaux (2017), Bordeaux INP/enseirb-matmeca (2021) <a href="https://sciences-ingenieur.u-bordeaux.fr/Agenda/More-Electric-Aircraft-2017-MEA-2017-Bordeaux">https://sciences-ingenieur.u-bordeaux.fr/Agenda/More-Electric-Aircraft-2017-MEA-2017-Bordeaux</a> <a href="https://see.asso.fr/events/mea2021/">https://see.asso.fr/events/mea2021/</a>

## 2.2.5 Organisation de sessions dans des conférences internationales (3)

### 2.2.5.1 Conférence World Congress IFAC 2017

---

<i>Conférence :</i>	World Congress IFAC 2017, Toulouse, France
<i>Session invitée :</i>	Fractional order differentiation in modeling and control
<i>Dates :</i>	9-14 Juillet 2017
<i>Lien de session :</i>	<a href="#">lien</a>
<i>Siteweb :</i>	<a href="https://www.ifac2017.org">https://www.ifac2017.org</a>

---

### 2.2.5.2 Conférence World Congress IFAC 2020

---

<i>Conférence :</i>	World Congress IFAC 2020, Berlin, Germany
<i>Session invitée :</i>	Fractional order differentiation in modeling and control
<i>Dates :</i>	11-17 Juillet 2020
<i>Lien de session :</i>	<a href="#">lien</a>
<i>Siteweb :</i>	<a href="https://www.ifac2020.org">https://www.ifac2020.org</a>

---

### 2.2.5.3 Conférence IEEE ICSC'2021

---

<i>Conférence :</i>	IEEE ICSC'2021, Caen, France
<i>Session invitée :</i>	Fractional order differentiation in modeling and control
<i>Dates :</i>	24-26 Novembre 2021
<i>Lien de session :</i>	<a href="#">lien</a>
<i>Siteweb :</i>	<a href="https://controls.papercept.net/conferences/conferences/ICSC20">https://controls.papercept.net/conferences/conferences/ICSC20</a>

---

## 2.2.6 Organisation de workshop international (1)

---

<i>Conférence :</i>	9th IFAC International Symposium on Advances in Automotive Control, Orléans, France
<i>Nom :</i>	Workshop on new advances on autonomous vehicle
<i>Dates :</i>	24-27 Juin 2019
<i>Lien de session :</i>	<a href="#">lien</a>
<i>Siteweb :</i>	<a href="https://aac19.sciencesconf.org">https://aac19.sciencesconf.org</a>

---

## 2.2.7 Chair ou co-chair dans des conférences internationales (5)

### 2.2.7.1 World Congress IFAC 2017 (2)

---

<i>Conférence :</i>	World Congress IFAC 2017, Toulouse, France
<i>Session interactive :</i>	Fractional systems
<i>Session invitée :</i>	Fractional order differentiation in modeling and control
<i>Dates :</i>	9-14 Juillet 2017
<i>Lien de session :</i>	<a href="#">lien</a>
<i>Siteweb :</i>	<a href="https://www.ifac2017.org">https://www.ifac2017.org</a>

---

### 2.2.7.2 Conférence IFAC AAC 2019 (1)

---

<i>Conférence :</i>	9th IFAC International Symposium on Advances in Automotive Control, Orléans, France
<i>Session :</i>	Guidance and Collision Avoidance
<i>Dates :</i>	24-27 Juin 2019
<i>Lien de session :</i>	<a href="#">lien</a>
<i>Siteweb :</i>	<a href="https://aac19.sciencesconf.org">https://aac19.sciencesconf.org</a>

---

### 2.2.7.3 Conférence World Congress IFAC 2020 (1)

---

<i>Conférence :</i>	World Congress IFAC 2020, Berlin, Germany
<i>Open Invited Track :</i>	Fractional order differentiation in modeling and control
<i>Dates :</i>	11-17 Juillet 2020
<i>Lien de session :</i>	<a href="#">lien</a>
<i>Siteweb :</i>	<a href="https://www.ifac2020.org">https://www.ifac2020.org</a>

---

### 2.2.7.4 Conférence IEEE ICSC'2021 (1)

---

<i>Conférence :</i>	IEEE ICSC'2021, Caen, France
<i>Session invitée :</i>	Fractional order differentiation in modeling and control
<i>Dates :</i>	24-26 Novembre 2021
<i>Lien de session :</i>	<a href="#">lien</a>
<i>Siteweb :</i>	<a href="http://lias.labo.univ-poitiers.fr/icsc/icsc2021/">http://lias.labo.univ-poitiers.fr/icsc/icsc2021/</a>

---

### 2.2.8 Plénière lors d'un séminaire donné dans une école de formation par la recherche

<i>Ecole de Formation :</i>	Ecole Doctorale de l'université de Bordeaux
<i>Nom :</i>	UB Graduate Program Numerics, "Optimization and decision"
<i>Dates :</i>	6-10 Septembre 2021
<i>Titre :</i>	System modeling & Deep learning
<i>Siteweb :</i>	<a href="#">lien</a>

### 2.2.9 Plénière réalisée lors de conférences internationales

#### 2.2.9.1 Workshop on Unmanned and Swarming Conference - UAV show

<i>Conférence :</i>	UAV show
<i>Workshop :</i>	6th International Workshop on Unmanned and Swarming Conference
<i>Titre :</i>	Trajectory path tracking of a drone in a disturbed environment
<i>Date :</i>	19-21 octobre 2021
<i>Lieu :</i>	Bordeaux, France
<i>Siteweb :</i>	<a href="https://www.uavshow.com">https://www.uavshow.com</a>

#### 2.2.9.2 Workshop AAC 2019

<i>Conférence :</i>	9th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control AAC 2019
<i>Workshop :</i>	Workshop on New advances on autonomous vehicle
<i>Titre :</i>	Introduction to trajectory dynamic optimization
<i>Date :</i>	28-29 juin 2019
<i>Lieu :</i>	Orléans, France
<i>Siteweb :</i>	<a href="https://aac19.sciencesconf.org/resource/page/id/14">https://aac19.sciencesconf.org/resource/page/id/14</a>

<i>Conférence :</i>	9th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control AAC 2019
<i>Workshop :</i>	Workshop on New advances on autonomous vehicle
<i>Titre :</i>	Trajectory Multicriteria Optimization for Autonomous Vehicule
<i>Date :</i>	28-29 juin 2019
<i>Lieu :</i>	Orléans, France
<i>Siteweb :</i>	<a href="https://aac19.sciencesconf.org/resource/page/id/14">https://aac19.sciencesconf.org/resource/page/id/14</a>

### 2.2.9.3 Conférence ICFCTA 2019

<i>Conférence :</i>	2019 International Conference on Fractional Calculus Theory and Applications (ICFCTA 2019)
<i>Titre :</i>	From system identification to optimal and robust control of fractional systems
<i>Date :</i>	26 avril 2019
<i>Lieu :</i>	Bourges, France
<i>Siteweb :</i>	<a href="http://www.lestudium-ias.com/event/2019-international-conference-fractional-calculus-theory-and-applications-icfcta-2019">http://www.lestudium-ias.com/event/2019-international-conference-fractional-calculus-theory-and-applications-icfcta-2019</a>

---

### 2.2.9.4 Conférence MELECON 2008

<i>Conférence :</i>	The 14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON 2008)
<i>Titre :</i>	Extension de la platitude aux systèmes fractionnaires MIMO
<i>Date :</i>	7 mai 2008
<i>Lieu :</i>	Ajaccio, France
<i>Siteweb :</i>	<a href="http://wikicfp.com/cfp/servlet/event.showcfp?eventid=1625">http://wikicfp.com/cfp/servlet/event.showcfp?eventid=1625</a>

---

### 2.2.10 Responsable des séminaires de l'équipe CRONE

J'organise des séminaires scientifiques bimestriels sur la thématique de la dérivation non entière depuis 2014. Stagiaires, doctorants, enseignant-chercheurs, postdocs ou personnes extérieures sont invités à présenter leur travaux de recherche sur la thématique de la dérivation non entière à l'ensemble du groupe automatique, voire du laboratoire IMS quand on invite des personnalités extérieures. Nous avons ainsi invité :

- Fabrizio Padula, Curtin University (Australia), 2019
- Jean-Claude Trigeassou, Professeur à l'Université de Poitiers, 2022

### 2.2.11 Responsable des séminaires du Groupe Automatique

J'organise également des séminaires scientifiques mensuels au sein du groupe automatique depuis 2016. Stagiaires, doctorants, enseignant-chercheurs, postdocs ou personnes extérieures sont invités à présenter leur travaux de recherche à l'ensemble du groupe automatique, voire du laboratoire IMS quand on invite des personnes extérieures. Nous avons ainsi invité :

- Philippe de Larminat, Professeur émérite à l'Ecole Centrale de Nantes, 2016
- Stéphane Viollet, Directeur-adjoint de l'ISM de Marseille, 2017
- Jean Lévine, Directeur de Recherche Honoraire au CAS à Mines ParisTech, 2017
- Ali Zolghadri, Médaille de l'Innovation CNRS, 2018

- Michel Fliess, Directeur de Recherche CNRS émérite au LIX, médaille d'Argent du CNRS, prix de l'Académie des Sciences, 2019
- Dolores Alejandra Ferreira de Loza de l'université de Tijuana - INP Mexico, 2019
- Carolos Trapiello de l'UPC de Barcelona - Espagne, 2022

## 2.2.12 Evalueur pour des revues (45) et des congrès internationaux (34)

### 2.2.12.1 Revues (45)

IMage And VISion computing IMAVIS 2009 (1); J. of Applied Nonlinear Dynamics JAND 2012 (1); Signal, Image and Video Processing SIVP 2012 (1); Asian J. of Control 2013 (1); Entropy 2013 (1); Math Eng Pb 2013 (1); Automatica 2014 (2), 2015 (1), 2016 (2), 2017 (1), 2018 (1), 2021 (1); IEEE Cicuits, Systems & Signal Processing 2014 (3), 2015 (1), 2017 (1); J. of Control and Decision 2014 (1); IEEE J. Automatica Sinica 2015 (1); IEEE Trans. Automatic Control 2015 (2), 2016 (1), 2017 (1), 2019 (1); J. of Control Theory and Applications 2015 (1); Control and Systems Letters CSL 2017 (2); J. of the Franklin Institute FI 2018 (1), 2019 (2); IEEE Trans. on Control Systems Technology CST 2018 (2); IEEE Trans. on Circuits And Systems CAS 2019 (2); SIGnal PROcessing 2019 (1); European J. of CONTRol 2020 (1); IEEE Industrial Informatics 2020 (1), 2021 (1); IEEE T Industrial electronics 2020 (1); J. of Intelligent Service roboTics JIST 2020 (1); MAThematics and COMputers in Simulation MATCOM 2020 (1); IFAC J. of Systems and Control 2020 (1); Fractional Calculus & Applied Analysis FCAA 2021 (1); IEEE Robotic and Automation Letters RAL 2021 (1).

### 2.2.12.2 Communications dans des congrès (34)

Wolrd Congress IFAC 2008 (4), 2011 (3), 2014 (1), 2017 (2), 2020 (4); ASME 2009 (1); Conférence Internationale Francophone d'Automatique CIFA 2010 (2); International Conference on Computer Applications ICCA 2010 (1); Control and Decision Conference CDC 2013 (1), 2016 (2), 2021 (1); European Control Conference 2013 (2), 2015 (1); IFAC IEEE Symposium on System Structure and Control and joint conference with Fractional Differentiation and Its Applications FDA 2013 (1); International Conference on Fractional Differentiation and its Application ICFDA 2014 (1), 2016 (1); American Control Conference ACC 2016 (1), 2019 (2); IFAC SYStem IDentification SYSID 2018 (1); Int. Conf. on Advanced Robotics 2021 (1); IEEE Int. Conf. on Systems and Control ICSC 2021 (1).

## 2.2.13 Membre d'un comité de sélection

J'ai participé à un comité de sélection pour le recrutement de Maître de Conférences en 2019 à Bordeaux INP/enseirb-matmeca en 61<sup>ème</sup> section.

### 2.2.14 Expertises

J'ai expertisé des dossiers pour l'Université de de Bordeaux pour :

- Expertise dans le cadre de l'équivalence d'un emploi de Maître de Conférence en 2014 en 27<sup>ème</sup> section ;
- Expertise dans le cadre de l'avancement de grade de Maître de Conférence en 2018 en 60<sup>ème</sup> section.

### 2.2.15 Coresponsable du Workpackage 1 du Réseau Impulsion BEST

<i>Titre :</i>	Workpackage "Optimal Non Destructive Evaluation & Control"
<i>Contrat :</i>	Réseau Impulsion de l'Université de Bordeaux
<i>Responsables :</i>	Stéphane Victor (IMS) et Mehdi Sbartai (I2M)
<i>Partenaires académiques :</i>	IMS, I2M, IMB et LaBRI
<i>Dates :</i>	jan. 2021 à déc. 2024
<i>Durée :</i>	4 ans
<i>Montant :</i>	130 k€ HT / 880 k€
<i>Fonction :</i>	Coresponsable

Description : Initialement construit pour être un Grand Programme de Recherche (4M€) de l'Université de Bordeaux, suite à l'audit de début 2021, ce projet a été ré-orienté en tant que Réseau Impulsion. L'ambition de ce projet est de développer de nouvelles méthodologies de l'industrie du futur dans la conception, la fabrication et le contrôle des activités industrielles, en prenant en compte le rôle central de l'homme dans ces activités et la gestion de l'énergie à toutes les échelles. Les objectifs sont ambitieux afin de définir un programme sur un horizon de huit ans. Cinq critères ont été retenus pour définir 6 workpackages : les enjeux socio-economiques ; les verrous scientifiques menant à un haut niveau de recherche ; la consistance avec les projets scientifiques des unités de recherche impliqués ; les compétences en multidisciplinarité ; et l'importance des forces engagées en termes du nombre de chercheurs, de leurs compétences et des moyens expérimentaux pour obtenir des résultats convaincants.

Dans le Workpackage 1, l'idée est tout d'abord de développer et d'implémenter de nouvelles méthodologies pour l'évaluation non destructive et pour le contrôle multi-physique et multi échelle qui seront adaptés automatiquement en fonction des types de matériaux et structures et de leurs éventuelles endommagements. D'autre part, il sera également nécessaire d'investiguer dans de grandes variétés de conditions de mesures (nature des matériaux et leur variabilités et hétérogénéités, géométries complexes, environnement complexe, environnement des procédés, ...) et dans des contraintes de mesures très restreintes (accès limités, miniaturisations des instruments de mesure, coût, ...) pour palier aux applications de maintenance prédictive.

Financement : 2 demi-thèses, supports de stages et animations scientifiques

### 2.2.16 Co-responsable du développement de la toolbox CRONE

Il existe deux version de la toolbox CRONE, une dédiée à la commande robuste et l'autre dédiée au calcul fractionnaire et à l'identification. Elles sont toutes deux utilisables sous le logiciel Matlab®. Je contribue au développement et au déploiement de la deuxième version de la toolbox depuis 2013.

Une mise à jour majeure a été réalisée en octobre 2021 ce qui permet à cette nouvelle version d'être compatible avec la nouvelles versions de Matlab® après 2020, mais également de réaliser des tests unitaires et sauvegardes de manières plus performantes et plus fiables.

Mise en ligne en Octobre 2010, nombre de téléchargements > 2900 au 31 Déc 2020, [cronetoolbox.ims-bordeaux.fr](http://cronetoolbox.ims-bordeaux.fr)

## 2.3 Activités contractuelles

### 2.3.1 Contrats de recherche évalués suite à AAP

#### 2.3.1.1 Participant dans un projet de recherche du Cluster SysNum (Univ. de Bordeaux)

---

<i>Titre :</i>	Workpackage Robots & Drones
<i>Contrat :</i>	Labex SysNum/Idex de l'Univ. Bordeaux
<i>Responsables :</i>	Pierre Melchior (IMS) et Serge Chaumette (LaBRI)
<i>Partenaires académiques :</i>	IMS et LaBRI
<i>Dates :</i>	déc. 2017 à déc. 2020
<i>Durée :</i>	3 ans
<i>Montant :</i>	90 k€ HT
<i>Fonction :</i>	chercheur

Description : L'objectif des problématiques du Sense & Avoid et de la trajectographie étudiés dans ce projet de recherche est d'accroître les performances et l'autonomie des drones. Ceci passe d'une part par la génération de trajectoire, et d'autre part par l'introduction de la notion de robustesse dans le rejet de perturbation et dans la perte de signaux de capteurs.

Financement : thèse de K. Ruiz (2017-2020)

### 2.3.1.2 Participant en tant que chercheur dans un projet Région Nouvelle-Aquitaine PELICAN

<i>Titre :</i>	PELICAN (Projet d'Etude de Livraison de Colis Aérien en Nouvelle-Aquitaine)
<i>Contrat :</i>	Appel à Manifestation d'Intérêt (AMI), Drone City
<i>Responsables :</i>	Stéphane Victor et Pierre Melchior
<i>Partenaires académiques :</i>	IMS, ONERA
<i>Partenaires industriels :</i>	Cdiscount, Thalès Avionics, Serma Technologies, Air Marine
<i>Dates :</i>	Juillet 2017 à Juin 2019
<i>Durée :</i>	3 ans
<i>Montant :</i>	80 k€ HT /15M€
<i>Fonction :</i>	Chercheur

Description : AIR MARINE réunit un ensemble de partenaires aquitains, pluridisciplinaires afin de développer une solution innovante de transport et de livraison urbaine par drone vers des points relais, suivant des routes prédéfinies. Ce projet collaboratif apportera des réponses aux besoins du client CDISCOUNT, en collaboration avec l'Autorité, afin de définir les exigences réglementaires en cours d'élaboration. L'innovation de ce projet réside dans le développement d'un drone et de ses stations d'accueil et de commande à haut niveau de sécurité, permettant une intégration dans l'environnement urbain.

Financement : Financement d'un postdoc sur 8 mois (2019)

### 2.3.1.3 Coresponsable dans un projet pluridisciplinaire du Collège des écoles doctorales de l'Univ. de Bordeaux

<i>Titre :</i>	Modélisation d'ordre non entier des transferts thermiques dans les poumons pour des opérations de chirurgie cardiaque.
<i>Contrat :</i>	Collège des écoles doctorales - AAP pluridisciplinaire
<i>Responsables :</i>	Stéphane Victor (IMS), Pierre Melchior (IMS), François Roubertie (LYRIC, CHU Haut Lévêque) et Youssef Abdelmoumen (LYRIC, Clinique Saint Augustin)
<i>Partenaires académiques :</i>	IMS, LYRIC
<i>Dates :</i>	Oct. 2019 à déc. 2022
<i>Durée :</i>	3 ans
<i>Montant :</i>	90 k€ HT
<i>Fonction :</i>	Coresponsable et chercheur

Description : Le projet de recherche vise à proposer de nouvelles méthodes d'identification en temps-réel afin d'identifier des modèles pour prédire l'évolution de la température à l'intérieur

des poumons pendant les opérations à coeur ouvert. Les complications respiratoires représentent la majorité des effets secondaires liés à l'utilisation de la circulation extracorporelle (CEC) en chirurgie cardiaque. L'organe poumon, compte tenu de sa position anatomique, représente un des organes les plus touchés par ces phénomènes adverses. L'identification en temps-réel permettra la surveillance des situations à risque ischémique in vivo. Cet appel à projet permettra de réaliser des campagnes de mesures sur des moutons pour combler ce manque de données expérimentales et de valider les techniques et modèles développés en temps-réel.

Financement : thèse de J.-F. Duhé (2019-2022)

#### 2.3.1.4 Coresponsable dans un projet de recherche du Cluster SysNum (Univ. de Bordeaux)

---

<i>Titre :</i>	Workpackage Robots & Drones
<i>Contrat :</i>	Labex SysNum
<i>Responsables :</i>	Stéphane Victor (IMS), Pierre Melchior (IMS), Serge Chaumette (LaBRI) et Hugo Gimbert (LaBRI)
<i>Partenaires académiques :</i>	IMS et LaBRI
<i>Dates :</i>	fév. 2020 à sept. 2021
<i>Durée :</i>	1,5 ans
<i>Montant :</i>	8,3 k€ HT
<i>Fonction :</i>	Chercheur et coresponsable
<i>Publications :</i>	3 conférences

Description : L'objectif des problématiques du Sense & Avoid et de la trajectographie étudiés dans ce stage et dans le cadre du Cluster SysNum (Systèmes Numériques) est d'accroître les performances et l'autonomie des robots. Ceci passe d'une part par la génération de trajectoire, et d'autre part par l'introduction de la notion de robustesse dans le pilote automatique afin d'obtenir une génération et un suivi de trajectoires eux-mêmes robustes. Une première partie de l'étude consiste à effectuer la modélisation des robots (tracteur agricole autonome et drone), puis de faire de la génération de consigne et de commande, pour finir sur la détection et l'évitement d'obstacles malgré les pertes de signaux.

Financement : 3 stages de Master 2 Recherche (1 en 2020 et 2 en 2021).

### 2.3.1.5 Responsable dans un projet pluridisciplinaire du Département SIN/STS à l'Univ. de Bordeaux

<i>Titre :</i>	Application à un modèle expérimental ovin d'ischémie pulmonaire en chirurgie cardiaque sous circulation extracorporelle
<i>Contrat :</i>	AAP transverse des Département Sciences du Numérique et de l'Ingénierie (SIN) et Département Sciences et Technologies de la Santé (STS)
<i>Responsables :</i>	Stéphane Victor (IMS), Pierre Melchior (IMS), François Roubertie (LYRIC, CHU Haut Lévêque) et Youssef Abdelmoumen (LYRIC, Clinique Saint Augustin)
<i>Partenaires académiques :</i>	IMS, LYRIC
<i>Dates :</i>	Oct. 2021 à déc. 2021
<i>Durée :</i>	3 mois
<i>Montant :</i>	11 k€ HT
<i>Fonction :</i>	Responsable et chercheur

**Financement :** Le projet de recherche vise à identifier des modèles pour prédire l'évolution de la température à l'intérieur des poumons pendant les opérations à coeur ouvert. Les complications respiratoires représentent la majorité des effets secondaires liés à l'utilisation de la circulation extracorporelle (CEC) en chirurgie cardiaque. De plus en plus décrits, les phénomènes d'ischémie reperfusion engendrés par la CEC semblent responsables des altérations structurelles et fonctionnelles tissulaires à l'origine des dysfonctionnements d'organes postopératoire. L'organe poumon, compte tenu de sa position anatomique, représente un des organes les plus touchés par ces phénomènes adverses. Ce projet a pour objectif principal d'étudier le rôle des anastomoses bronchopulmonaires et leurs réactivations lors de la CEC et de créer un modèle de simulation de ces mécanismes lésionnels. Une fois ce modèle validé, l'efficacité de l'hypothermie bronchique sera étudiée dans la préservation du tissu pulmonaire. L'identification en temps-réel permettra la surveillance des situations à risque ischémique in vivo. Cet appel à projet permettra de réaliser des campagnes de mesures sur des moutons pour combler ce manque de données expérimentales et de valider les techniques et modèles développés en temps-réel.

**Financement :** achats de moutons et de kits pour la CEC.

### 2.3.1.6 Coresponsable dans un projet du Département SIN à l'Univ. de Bordeaux

<i>Titre :</i>	Caractérisation et identification de capteurs de flux en conditions extrêmes pour les applications de rentrée atmosphérique
<i>Contrat :</i>	AAP du Département Sciences du Numérique et de l'Ingénierie (SIN)
<i>Responsables :</i>	Stéphane Victor (IMS), Jean-Luc Battaglia (I2M)
<i>Partenaires académiques :</i>	IMS, I2M
<i>Dates :</i>	fév. 2022 à déc. 2022
<i>Durée :</i>	11 mois
<i>Montant :</i>	15 k€ HT
<i>Fonction :</i>	Coresponsable et chercheur

Description : Un banc d'essai sera développé durant le projet au sein de l'équipe TIFC du laboratoire I2M. Ce banc d'essai permettra de reconstituer le scénario de rentrée atmosphérique à partir d'une source laser. Le flux de photons (parfaitement connu et contrôlable) est appliqué de manière transitoire à la surface de la coque dans laquelle est implanté le capteur de température qui est un thermoresponsable donnant une information proportionnelle à l'évolution de la température. L'équipe CRONE du laboratoire IMS, compte tenu de son expertise pour modéliser des phénomènes de diffusion avec peu de paramètres développera un modèle basé sur l'opérateur de dérivation d'ordre non entier. Enfin, à partir du flux appliqué et des mesures du signal du thermocouple (image de la température), ces modèles seront identifiés pour retrouver les paramètres caractéristiques de la navette lors d'une rentrée atmosphérique. Ce modèle peut alors être utilisé lors du processus de rentrée par la mise en œuvre d'une méthode inverse pour identifier le flux appliqué sur la coque. Cette approche a été utilisée pour la détermination du flux de chaleur dans différents procédés d'usinage et sur des capteurs de flux utilisés sur les torches plasma simulant les conditions de rentrée en termes de température mais aussi de vitesse et de pression.

Financement : dispositifs optiques, thermocouples, coque d'engin spatial (fourni par l'ONERA) et 2 stages.

## 2.3.2 Contrats de recherche de gré à gré

### 2.3.2.1 Coresponsable dans un contrat industriel avec le Groupe PSA

<i>Titre :</i>	Aide à la conduite et véhicule autonome connectée en intersection
<i>Contrat :</i>	Contrat industriel avec le Groupe PSA – accompagnement de la thèse Cifre de J. Moreau
<i>Responsables :</i>	Stéphane Victor et Pierre Melchior
<i>Partenaires académiques :</i>	IMS, OpenLab
<i>Partenaires industriels :</i>	Groupe PSA
<i>Dates :</i>	Février 2016 à décembre 2020
<i>Durée :</i>	4 ans
<i>Montant :</i>	65k€ HT
<i>Fonction :</i>	Coresponsable et chercheur
<i>Publications :</i>	1 article de revue, 4 conférences et 1 brevet

Description : La problématique concerne la planification de trajectoire dans le domaine de l'automobile (cas 2D) à travers l'assistance à la conduite (ADAS), le véhicule autonome et le véhicule électrique. L'objectif global est d'accroître les performances et l'autonomie à travers la prise en compte de 4 verrous technologiques qui sont : l'évitement d'obstacles en environnement dynamique (reconfiguration dynamique de trajectoire temps réel) ; la conduite coopérative ou autonome (banc de poissons, essais) ; la prise en compte du coût énergétique de la trajectoire et la robustesse des performances à travers la prise en compte de variations paramétriques liées par exemple aux charges embarquées ou aux reconfigurations ; concevoir un algorithme de décision et de planification de vitesse permettant le passage d'une intersection de forme pré-définie.

### 2.3.2.2 Coresponsable dans un contrat industriel avec Safran Data System

<i>Titre :</i>	Optimisation de la commande d'antennes mobiles 2 axes et 3 axes
<i>Contrat :</i>	Contrat industriel avec le Groupe Safran Data System – accompagnement de la thèse Cifre de J. Moreau
<i>Responsables :</i>	Stéphane Victor, Pierre Melchior et Patrick Lanusse
<i>Partenaires académiques :</i>	IMS
<i>Partenaires industriels :</i>	Groupe Safran Data System
<i>Dates :</i>	Juillet 2020 à Juin 2023
<i>Durée :</i>	3 ans
<i>Montant :</i>	67.5k€ HT
<i>Fonction :</i>	Coresponsable et chercheur

Description : Aujourd'hui les performances des antennes sont satisfaisantes, mais les nouvelles exigences de performances des clients, ainsi que les nouvelles technologies pour suivre les satel-

lites en bande Ka, ne sont pas atteignables avec les méthodes actuelles. A cela, s'ajoute un besoin d'amélioration des performances pour de nouveaux produits : pour passer de la réception de la bande S à la bande Ka sur un même système mécanique, l'erreur de pointage autorisée pour recevoir le maximum de signal est divisée par 10. De plus, les frottements secs peuvent induire des dépointages allant jusqu'à 0.1° lors d'un changement de sens. Pour les besoins futurs, il faut pallier à ce dépointage. Un autre défi industriel est aussi de conforter/garantir des performances égales aux performances actuelles en réduisant les contraintes mécaniques et donc les coûts de fabrication : systèmes mécaniques plus souples, pouvant présenter des jeux mécaniques et des frottements secs plus importants. Pour cela, les boucles d'asservissement doivent être ou devenir robustes aux variations dues aux non-linéarités et aux souplesses. Enfin, un besoin découle également de la nécessité d'anticiper les impacts du vieillissement de la mécanique sur les performances et de détecter un vieillissement prématuré, afin de faire de la maintenance préventive.

## 2.4 Production scientifique

La liste exhaustive de mes publications est donnée ci-après. Les noms indiqués en **vert** désignent les doctorants que j'ai co-encadrés.

### A Revues internationales indexées JCR avec comité de lecture (18)

*IF* : "Impact Factor", du *Journal of Citation Reports (JCR)*, correspondant à l'année indiquée.

Les références [A-17] et [A-18] correspondent au travail de thèse et sont rappelées par souci d'exhaustivité. Les DOI cliquables permettent d'accéder directement aux documents en ligne.

- [A-1] **S. VICTOR**, **J.-F. DUHÉ**, P. MELCHIOR, Y. ABDELMOUMEN et F. ROUBERTIE. "Long memory recursive prediction error method for identification of continuous-time fractional models". In : *Nonlinear Dynamics* Accepted (2022). IF2021 : 5.022.
- [A-2] **S. VICTOR**, **A. MAYOUFI**, R. MALTI, M. CHETOUI et M. AOUN. "System identification of MISO fractional systems : parameter and differentiation order estimation". In : *Automatica* 141 (juil. 2022). IF2021 : 5.944. DOI : [10.1016/j.automatica.2022.110268](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2022.110268).
- [A-3] **S. VICTOR**, **K. RUIZ**, P. MELCHIOR et S. CHAUMETTE. "Dynamical repulsive fractional potential fields in 3D environment". In : *Fractional Calculus & Applied Analysis* (2022). IF2021 : 3.126. DOI : [10.1007/s13540-022-00015-5](https://doi.org/10.1007/s13540-022-00015-5).
- [A-4] J.-F. DUHÉ, **S. VICTOR**, P. MELCHIOR, Y. ABDELMOUMEN et F. ROUBERTIE. "Modeling thermal systems with fractional models : human bronchus application". In : *Nonlinear Dynamics* 108 (2022). IF2021 : 5.022, p. 579-595. DOI : [10.1007/s11071-022-07239-3](https://doi.org/10.1007/s11071-022-07239-3).
- [A-5] R. MALTI, **A. MAYOUFI** et **S. VICTOR**. "Experiment design for elementary fractional models". In : *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* (2022). IF2021 : 4.260. DOI : [10.1016/j.cnsns.2022.106337](https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2022.106337).

- [A-6] **J.-F. DUHÉ**, **S. VICTOR** et P. MELCHIOR. “Contributions on artificial potential field method for effective obstacle avoidance”. In : *Fractional Calculus & Applied Analysis* 24.2 (2021). IF2021 : 4.867, p. 421-446. DOI : [10.1515/fca-2021-0019](https://doi.org/10.1515/fca-2021-0019).
- [A-7] **A. MAYOUFI**, **S. VICTOR**, R. MALTI, M. CHETOUI et M. AOUN. “Output error MISO system identification using fractional models”. In : *Fractional Calculus & Applied Analysis* 5.24 (2021). IF2021 : 4.867, p. 1601-1618. DOI : [10.1515/fca-2021-0067](https://doi.org/10.1515/fca-2021-0067).
- [A-8] A. OUSTALOUP, F. LEVRON, **S. VICTOR** et L. DUGARD. “Non-integer (or fractional) power model of a viral spreading : application to the COVID-19”. In : *Annual reviews in Control* (2021). IF2021 : 6.091. DOI : [10.1016/j.arcontrol.2021.09.003](https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2021.09.003).
- [A-9] **S. VICTOR**, P. MELCHIOR, M. PELLET et A. OUSTALOUP. “Lung thermal transfer system identification with fractional models”. In : *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 28.1 (2020). IF2021 : 5.485, p. 172-182. DOI : [10.1109/TCST.2018.2877606](https://doi.org/10.1109/TCST.2018.2877606).
- [A-10] **S. VICTOR**, **J.-B. RECEVEUR**, P. MELCHIOR et P. LANUSSE. “Optimal trajectory planning and robust tracking using vehicle model inversion”. In : *Transactions on Intelligent Transportation Systems* (2020). IF2021 : 6.492, p. 1-14. DOI : [10.1109/TITS.2020.3045917](https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3045917).
- [A-11] **J.-B. RECEVEUR**, **S. VICTOR** et P. MELCHIOR. “Autonomous car decision making and trajectory tracking based on genetic algorithms and fractional potential fields”. In : *Intelligent Service Robotics* 13 (2020). IF2021 : 2.246, p. 315-330. DOI : [10.1007/s11370-020-00314-x](https://doi.org/10.1007/s11370-020-00314-x).
- [A-12] **J.-B. RECEVEUR**, **S. VICTOR** et P. MELCHIOR. “New interpretation of fractional potential fields for robust path planning”. In : *Fractional Calculus & Applied Analysis* 22.1 (2019). IF2021 : 3.126, p. 113-127. DOI : [10.1515/fca-2019-0007](https://doi.org/10.1515/fca-2019-0007).
- [A-13] **S. VICTOR**, P. MELCHIOR, R. MALTI et A. OUSTALOUP. “Robust motion planning for a heat rod process”. In : *Journal of Nonlinear Dynamics* 86.2 (2016). IF2021 : 4.867, p. 1271-1283. DOI : [10.1007/s11071-016-2963-2](https://doi.org/10.1007/s11071-016-2963-2).
- [A-14] **S. VICTOR** et P. MELCHIOR. “Improvements on flat output characterization for fractional systems”. In : *Fractional Calculus & applied analysis* 18.1 (2015). IF2021 : 3.126, p. 238-260. DOI : [10.1515/fca-2015-0016](https://doi.org/10.1515/fca-2015-0016).
- [A-15] **S. VICTOR**, P. MELCHIOR, J. LÉVINE et A. OUSTALOUP. “Flatness for linear fractional systems with application to a thermal system”. In : *Automatica* 57 (2015). IF2021 : 5.944, p. 213-221. DOI : [10.1016/j.automatica.2015.04.021](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2015.04.021).
- [A-16] **S. VICTOR**, R. MALTI, H. GARNIER et A. OUSTALOUP. “Parameter and differentiation order estimation in fractional models”. In : *Automatica* 49.4 (2013). IF2021 : 5.944, p. 926-935. DOI : [10.1016/j.automatica.2013.01.026](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2013.01.026).

- [A-17] **S. VICTOR**, P. MELCHIOR et A. OUSTALOUP. “Robust Path Tracking using Flatness for Fractional Linear MIMO Systems : a Thermal Application”. In : *Computers & Mathematics with Applications (CAMWA)* 59.5 (2010). IF2021 : 3.476, p. 1667-1678. DOI : [10.1016/j.camwa.2009.08.008](https://doi.org/10.1016/j.camwa.2009.08.008).
- [A-18] R. MALTI, **S. VICTOR** et A. OUSTALOUP. “Advances in System Identification using Fractional Models”. In : *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics* 3 (2008). IF2021 : 1.661, p. 021401.1-021401.7. DOI : [10.1115/1.2833910](https://doi.org/10.1115/1.2833910).

## B Revues internationales non indexées avec comité de lecture (2)

- [B-1] **J. MOREAU**, P. MELCHIOR, **S. VICTOR**, M. MOZE, F. AIOUN et F. GUILLEMARD. “Planification de trajectoire par champs de potentiel fractionnaires appliquée au véhicule autonome”. In : *Open Science Automatique* 2.1 (2018). DOI : [10.21494/ISTE.OP.2018.0282](https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2018.0282).
- [B-2] **J.-B. RECEVEUR**, P. MELCHIOR et **S. VICTOR**. “Optimisation multi-critère pour véhicules autonomes en environnement dynamique”. In : *Automatique, Open Science, ISTE* 2.1 (2018). DOI : [10.21494/ISTE.OP.2018.0283](https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2018.0283).

## C Soumission à des revues internationales avec comité de lecture (4)

- [C-1] **S. VICTOR**, P. MELCHIOR et A. DIUDICHI. “Improved instrumental variable methods for closed-loop continuous-time model identification with input and output noise”. In : *Nonlinear Dynamics* submitted (2022). IF2021 : 5.022.
- [C-2] **J.-F. DUHÉ**, **S. VICTOR**, P. MELCHIOR, Y. ABDELMOUMEN et F. ROUBERTIE. “Recursive system identification for continuous-time fractional models”. In : *IEEE Transactions on Control Systems Technology* submitted (2022). IF2021 : 6.091.
- [C-3] **H. HAJJEM**, **S. VICTOR**, P. MELCHIOR, P. LANUSSE et L. THOMAS. “Wind turbulence modeling for real-time simulation”. In : *Nonlinear Dynamics* submitted (2022). IF2021 : 5.022.
- [C-4] **J. MOREAU**, **S. VICTOR**, P. MELCHIOR, M. MOZE, F. AIOUN et F. GUILLEMARD. “Reactive Path Planning for Autonomous Vehicle”. In : *Transactions on Vehicular Technology* submitted (2022). IF2021 : 5.978.

## D Chapitres dans des ouvrages de synthèse (2)

- [D-1] P. MELCHIOR, **S. VICTOR**, M. PELLET, J. PETIT, J.-M. CABELGUEN et A. OUSTALOUP. “Handbook of Fractional Calculus with Applications. Applications in Engineering, Life and Social Sciences, Part A”. In : sous la dir. de D. BALEANU et A.M. LOPES. T. 7. De Gruyter, 2019. Chap. Skeletal muscle modeling by fractional multi-models : analysis of length effect. DOI : [10.1515/9783110571905-006](https://doi.org/10.1515/9783110571905-006).

- [D-2] P. MELCHIOR et **S. VICTOR**. “Fractional Approaches in Path Tracking Design (or Motion Control) : Prefiltering, Shaping, and Flatness”. In : *Fractional Order Differentiation and Robust Control Design : CRONE, H-infinity and Motion Control*. Sous la dir. de J. SABATIER, P. LANUSSE, P. MELCHIOR et A. OUSTALOUP. Dordrecht : Springer Netherlands, 2015. Chap. 5, p. 237-323. DOI : [10.1007/978-94-017-9807-5\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-017-9807-5_5).

## E Communications dans des congrès internationaux avec actes et comité de lecture (34)

Les références [E-25] à [E-35] correspondent au travail de thèse et sont données par souci d'exhaustivité.

- [E-1] S. CHAUMETTE, P. MELCHIOR, **S. VICTOR** et H. OULD LAHSEN. “Trajectory path tracking of a drone in a disturbed environment”. In : *6th International Workshop on Unmanned and Swarming Conference*. 2021.
- [E-2] **J.-F. DUHÉ**, **S. VICTOR**, P. MELCHIOR, Y. ABDELMOUMEN et F. ROUBERTIE. “Global thermal modeling of lung heat transfer with blood perfusion”. In : *International Conference on Fractional Differentiation and its Applications ICFDA 2021*. Sous la dir. de SPRINGER. T. 452. Warsaw, Poland, 2021.
- [E-3] **J.-F. DUHÉ**, **S. VICTOR**, P. MELCHIOR, Y. ABDELMOUMEN et F. ROUBERTIE. “Recursive system identification for coefficient estimation of continuous-time fractional order systems”. In : *19th IFAC Symposium on System Identification (SYSID 2021)*. T. 54. 7. Padova, Italy, 2021, p. 114-119. DOI : [10.1016/j.ifacol.2021.08.344](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.344).
- [E-4] **J.-F. DUHÉ**, **S. VICTOR**, P. MELCHIOR, Y. ABDELMOUMEN et F. ROUBERTIE. “Thermal modeling using two-port network impedance fractional order approximations”. In : *17th ASME/IEEE MESA International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE 2021*. T. 7. virtual, USA, août 2021. DOI : [10.1115/DETC2021-69968](https://doi.org/10.1115/DETC2021-69968).
- [E-5] **J.-F. DUHÉ**, **S. VICTOR**, P. MELCHIOR, Y. ABDELMOUMEN et F. ROUBERTIE. “Two-port network modeling for bio-heat transfers in lungs”. In : *11th IFAC Symposium on Biological and Medical Systems (BMS 2021)*. T. 54. 15. Ghent, Belgium, 2021, p. 169-174. DOI : [10.1016/j.ifacol.2021.10.250](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.250).
- [E-6] **H. HAJJEM**, **S. VICTOR**, P. MELCHIOR, P. LANUSSE et L. THOMAS. “Wind fractional modeling by spectral analysis”. In : *2021 9th International Conference on Systems and Control (ICSC)*. 2021, p. 436-441. DOI : [10.1109/ICSC50472.2021.9666651](https://doi.org/10.1109/ICSC50472.2021.9666651).
- [E-7] **J.-F. DUHÉ**, **S. VICTOR**, **K. RUIZ** et P. MELCHIOR. “Study on obstacle avoidance for fractional artificial potential fields”. In : *21st IFAC World Congress*. T. 53. 2. Berlin, Germany, 2020, p. 3725-3730. DOI : [10.1016/j.ifacol.2020.12.2059](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2059).

- [E-8] **A. MAYOUFI**, **S. VICTOR**, R. MALTI, M. CHETOUI et M. AOUN. “An optimal instrumental variable approach for continuous-time multiple input-single output fractional model identification”. In : *21st IFAC World Congress*. T. 53. 2. Berlin, Germany, 2020, p. 3701-3706. DOI : [10.1016/j.ifacol.2020.12.2055](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2055).
- [E-9] **A. MAYOUFI**, M. CHETOUI, **S. VICTOR**, M. AOUN et R. MALTI. “A comparison between two methods for MISO fractional models estimation”. In : *2020 17th International Multi-Conference on Systems, Signals Devices (SSD)*. 2020, p. 446-451. DOI : [10.1109/SSD49366.2020.9364187](https://doi.org/10.1109/SSD49366.2020.9364187).
- [E-10] **K. RUIZ**, **S. VICTOR**, P. MELCHIOR et S. CHAUMETTE. “A new dynamical repulsive fractional potential for UAVs in 3D dynamical environments”. In : *21st IFAC World Congress*. T. 53. 2. Berlin, Germany, 2020, p. 3719-3724. DOI : [10.1016/j.ifacol.2020.12.2058](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2058).
- [E-11] **J. MOREAU**, P. MELCHIOR, **S. VICTOR**, L. CASSANY, M. MOZE, F. AIOUN et F. GUILLEMARD. “Reactive path planning in intersection for autonomous vehicle”. In : *9th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control AAC 2019*. T. 52. 5. 2019, p. 109-114. DOI : [10.1016/j.ifacol.2019.09.018](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.09.018).
- [E-12] **J. MOREAU**, P. MELCHIOR, **S. VICTOR**, M. MOZE, F. AIOUN et F. GUILLEMARD. “Reactive Path Planning for Autonomous Vehicle Using Bézier Curve Optimization”. In : *2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. 2019, p. 1048-1053. DOI : [10.1109/IVS.2019.8813904](https://doi.org/10.1109/IVS.2019.8813904).
- [E-13] **J.-B. RECEVEUR**, **S. VICTOR** et P. MELCHIOR. “Robust longitudinal motion planning using vehicle model inversion”. In : *9th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control AAC 2019*. T. 52. 5. 2019, p. 103-108. DOI : [10.1016/j.ifacol.2019.09.017](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.09.017).
- [E-14] R. MALTI, **A. MAYOUFI** et **S. VICTOR**. “Experiment design for system identification using fractional models of the second kind”. In : *18th IFAC Symposium on System Identification (SYSID 2018)*. T. 51. 15. Stockholm, Sweden, 2018, p. 371-376. DOI : [10.1016/j.ifacol.2018.09.173](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.173).
- [E-15] **J.-B. RECEVEUR**, **S. VICTOR** et P. MELCHIOR. “New Definitions of Attractive and Repulsive Fractional Potential Fields for Robust Path Planning”. In : *International Conference on Fractional Differentiation and its Applications (ICFDA) 2018*. Amman, Jordan, 2018. DOI : [10.2139/ssrn.3277551](https://doi.org/10.2139/ssrn.3277551).
- [E-16] **J.-B. RECEVEUR**, **S. VICTOR** et P. MELCHIOR. “Trajectory optimization for autonomous vehicles on crossroads with mobile obstacles”. In : *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Changsu, China, 2018, p. 556-561. DOI : [10.1109/IVS.2018.8500379](https://doi.org/10.1109/IVS.2018.8500379).
- [E-17] **S. VICTOR**, A. DIUDICHI et P. MELCHIOR. “Closed-loop continuous-time model identification with noisy input-output”. In : *20th IFAC World Congress (IFAC WC 2017)*. T. 50. 1. Toulouse, France, juil. 2017, p. 12853-12858. DOI : [10.1016/j.ifacol.2017.08.1936](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1936).

- [E-18] **J. MOREAU**, P. MELCHIOR, **S. VICTOR**, F. AIOUN et F. GUILLEMARD. “Path planning with fractional potential fields for autonomous vehicles”. In : *20th IFAC World Congress (IFAC WC 2017)*. T. 50. 1. Toulouse, France, 2017, p. 14533-14538. DOI : [10.1016/j.ifacol.2017.08.2076](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2076).
- [E-19] **J.-B. RECEVEUR**, **S. VICTOR** et P. MELCHIOR. “Multi-criteria trajectory optimization for autonomous vehicles”. In : *20th IFAC World Congress (IFAC WC 2017)*. T. 50. Toulouse, France, 2017, p. 12520-12525. DOI : [10.1016/j.ifacol.2017.08.2063](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2063).
- [E-20] **S. VICTOR**, A. TAYMANS et P. MELCHIOR. “Robust control system design of a turbofan engine”. In : *International Conference on Fractional Differentiation and Its Applications (ICFDA 2016)*. Novi Sad, Serbia, juil. 2016.
- [E-21] R. MALTI et **S. VICTOR**. “CRONE Toolbox for system identification using fractional order models”. In : *17th IFAC Symposium on System Identification (SYSID 2015)*. T. 48. 28. Beijing, China, oct. 2015, p. 769-774. DOI : [10.1016/j.ifacol.2015.12.223](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.12.223).
- [E-22] **S. VICTOR**, P. MELCHIOR, J. LÉVINE et A. OUSTALOUP. “Flat output computation for fractional linear systems : application to a thermal system”. In : *19th IFAC World Congress (IFAC'14)*. T. 47. 3. Cape Town, South Africa, 2014, p. 2891-2896. DOI : [doi:10.3182/20140824-6-ZA-1003.01911](https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.01911).
- [E-23] **S. VICTOR** et R. MALTI. “Model order identification for fractional models”. In : *2013 European Control Conference (ECC)*. Zurich, Switzerland, 2013, p. 3470-3475. DOI : [10.23919/ECC.2013.6669589](https://doi.org/10.23919/ECC.2013.6669589).
- [E-24] **S. VICTOR**, P. MELCHIOR et A. OUSTALOUP. “Computation of flat outputs for fractional systems : a Thermal Application”. In : *6th IFAC Workshop on Fractional Differentiation and Its Applications (FDA'13)*. T. 46. 1. Grenoble, France, 2013, p. 42-47. DOI : [10.3182/20130204-3-FR-4032.00171](https://doi.org/10.3182/20130204-3-FR-4032.00171).
- [E-25] **S. VICTOR**, R. MALTI, P. MELCHIOR et A. OUSTALOUP. “Instrumental variable identification of hybrid fractional Box-Jenkins models”. In : *18th IFAC World Congress (IFAC'11)*. T. 44. 1. Milan, Italy, 2011, p. 4314-4319. DOI : [10.3182/20110828-6-IT-1002.01107](https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.01107).
- [E-26] **S. VICTOR**, P. MELCHIOR, R. MALTI et A. OUSTALOUP. “Path tracking with flatness and CRONE control for fractional systems : thermal application”. In : *18th IFAC World Congress (IFAC'11)*. T. 44. 1. Milan, Italy, 2011, p. 10818-10823. DOI : [10.3182/20110828-6-IT-1002.02002](https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.02002).
- [E-27] **S. VICTOR**, R. MALTI, P. MELCHIOR et A. OUSTALOUP. “From system identification to path planning using fractional approach : a thermal application example”. In : *21th ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE'09*. San Diego, USA, 2009, p. 235-242. DOI : [10.1115/DETC2009-87014](https://doi.org/10.1115/DETC2009-87014).

- [E-28] **S. VICTOR**, R. MALTI et A. OUSTALOUP. “Instrumental variable method for identifying fractional Box-Jenkins models”. In : *21th ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE’09*. San Diego, USA, 2009, p. 1197-1204. DOI : [10.1115/DETC2009-86984](https://doi.org/10.1115/DETC2009-86984).
- [E-29] **S. VICTOR**, R. MALTI et A. OUSTALOUP. “Instrumental variable method with optimal fractional differentiation order for continuous-time system identification”. In : *15th IFAC Symposium on System Identification (SYSID’2009)*. T. 42. 10. Saint Malo, France, 2009, p. 904-909. DOI : [10.3182/20090706-3-FR-2004.00150](https://doi.org/10.3182/20090706-3-FR-2004.00150).
- [E-30] **S. VICTOR**, P. MELCHIOR et A. OUSTALOUP. “Flatness Necessary and Sufficient Conditions for Non Linear Fractional Systems using fractional differential forms”. In : *2009 European Control Conference (ECC), 2009*. Budapest, Hongrie, 2009, p. 898-903. DOI : [10.23919/ECC.2009.7074518](https://doi.org/10.23919/ECC.2009.7074518).
- [E-31] **S. VICTOR**, P. MELCHIOR, D. NELSON-GRUEL et A. OUSTALOUP. “Flatness control for linear fractional MIMO systems : thermal application”. In : *3rd IFAC Workshop on Fractional Differentiation and Its Applications (FDA’08)*. Ankara, Turkey, 2008, p. 82-88.
- [E-32] **S. VICTOR**, P. MELCHIOR et A. OUSTALOUP. “Flatness principle extension to linear fractional MIMO systems : thermal application”. In : *14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON’08)*. doi : 10.1109/MELCON.2008.4618415. Ajaccio, France, 2008, p. 82-88. DOI : [10.1109/MELCON.2008.4618415](https://doi.org/10.1109/MELCON.2008.4618415).
- [E-33] **S. VICTOR**, P. MELCHIOR, J. SABATIER et A. OUSTALOUP. “Extension de la platitude aux systèmes fractionnaires MIMO : application à un système thermique”. In : *5ème Conférence Internationale Francophone d’Automatique (IEEE CIFA 2008)*. Bucarest, Roumanie, 2008.
- [E-34] R. MALTI, **S. VICTOR**, A. OUSTALOUP et H. GARNIER. “An optimal instrumental variable method for continuous-time fractional model identification”. In : *The 17th IFAC World Congress (IFAC’08)*. Seoul, Korea, 2008, p. 14379-14384. DOI : [10.3182/20080706-5-KR-1001.02436](https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.02436).
- [E-35] R. MALTI, **S. VICTOR**, O. NICOLAS et A. OUSTALOUP. “System identification using fractional models : state of the art”. In : *21th ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE’07*. Sous la dir. d’ASME. doi : 10.1115/DETC2007-35332. Las Vegas, USA, 2007. DOI : [10.1115/DETC2007-35332](https://doi.org/10.1115/DETC2007-35332).

## F Communications dans des manifestations scientifiques nationales (12)

Les références [23] et [16] correspondent au travail de thèse et sont données par souci d’exhaustivité.

- [F-1] L. MIZGALSKI, **S. VICTOR**, P. MELCHIOR, H. GIMBERT et S. NGUYEN. “Modeling and Control of an Autonomous Tractor”. In : *Workshop Réseau Régional de Recherche en Robotique*. 2021.
- [F-2] **A. MAYOUFI**, **S. VICTOR**, R. MALTI, M. CHETOUÏ et M. AOUN. “Multivariable fractional system identification”. In : *Groupe de Travail Identification - Journées de la SAGIP*. 2021.
- [F-3] H. OULD LAHSEN, **S. VICTOR**, P. MELCHIOR et S. CHAUMETTE. “Trajectory path tracking of a drone in a disturbed environment”. In : *Workshop Réseau Régional de Recherche en Robotique*. 2021.
- [F-4] A. OUSTALOUP et **S. VICTOR**. “Approche non entière de la dynamique d’une épidémie : le modèle FPM”. In : *Workshop Epidemics : modeling, identification, control*. 2021.
- [F-5] **A. MAYOUFI**, S. VICTOR, R. MALTI et M. AOUN. “Dynamic Harmonic Regression approach for global terrestrial temperature system identification”. In : *Journées Doctorales et Journées Nationales du GDR MACS du CNRS (JDMACS-JNMACS) à l’invitation du Groupe de Travail Identification du GDR MACS*. submitted. Bordeaux, France, 2019.
- [F-6] **K. RUIZ**, P. MELCHIOR, **S. VICTOR** et S. CHAUMETTE. “Robustesse de la planification de trajectoire d’un drone en environnement 3D”. In : *Journées Doctorales et Journées Nationales du GDR MACS du CNRS (JDMACS-JNMACS) à l’invitation du Groupe de Travail Identification du GDR MACS*. Bordeaux, France, 2019.
- [F-7] **J. MOREAU**, P. MELCHIOR, **S. VICTOR**, M. MOZE, F. AOUN et F. GUILLEMARD. “Planification de trajectoire par la méthode des champs de potentiels : application au véhicule autonome”. In : *Groupe de Travail Automatique et Automobile*. Bordeaux, France, 2018.
- [F-8] **J.-B. RECEVEUR**, P. MELCHIOR et **S. VICTOR**. “Planification de trajectoire dans le contexte du véhicule autonome”. In : *Groupe de Travail Automatique et Automobile*. Bordeaux, France, 2018.
- [F-9] **K. RUIZ**, S. CHAUMETTE, P. MELCHIOR et **S. VICTOR**. “Obstacle avoidance in 3D dynamic environment”. In : *5th International Workshop on Unmanned and Swarming Conference*. 2018.
- [F-10] **S. VICTOR**, A. DIUDICHI et P. MELCHIOR. “Identification de modèles à temps continu en boucle fermée avec entrée et sortie bruitées”. In : *Groupe de Travail Identification*. Paris, France, nov. 2017.
- [F-11] **S. VICTOR**, P. MELCHIOR, R. MALTI, J. SABATIER et A. OUSTALOUP. “Identification par modèles non entiers pour la poursuite de trajectoire par platitude : application à un barreau thermique”. In : *Journées de la Section Automatique du Club EEA, Démonstrateurs en Automatique à vocation recherche*. Angers, France, 2010.

- [F-12] **S. VICTOR**, R. MALTI, A. OUSTALOUP et H. GARNIER. “Variable instrumentale optimale pour l’identification de systèmes à dérivées fractionnaires”. In : *Groupe de Travail Identification*. Paris, France, 2007.

## G Brevets (1)

- [G-1] **J. MOREAU**, **S. VICTOR**, P. MELCHIOR, M. MOZE, F. AIOUN et F. GUILLEMARD. *Replanification du chemin d’un véhicule autonome en fonction des obstacles statiques sur le chemin initialement planifié*. Patent no. FR1905555. Avr. 2019. DOI : [FR1905555](https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2019-01).

# Chapitre 3

## Activités pédagogiques

---

<b>3.1</b>	<b>Implications à l'Université de Bordeaux</b>	<b>59</b>
3.1.1	Unité de Formation des Sciences de l'Ingénieur	59
3.1.2	Responsabilités administratives	59
3.1.3	Responsabilités et mandats locaux	62
3.1.4	Responsabilités pédagogiques	63
3.1.5	Responsabilités et mandats nationaux	64
3.1.6	Autres responsabilités	64
<b>3.2</b>	<b>Activités d'enseignement</b>	<b>66</b>
3.2.1	Charge pédagogique	66
3.2.2	Ressources pédagogiques	69
<b>3.3</b>	<b>Relations partenariales</b>	<b>75</b>
<b>3.4</b>	<b>Innovation pédagogique et perspectives</b>	<b>76</b>
3.4.1	Evolution des enseignements	76
3.4.2	Plateforme sur la Robotique mobile	78
3.4.3	CMI	79
3.4.4	Développement à l'international	81

---



## 3.1 Implications à l'Université de Bordeaux

### 3.1.1 Unité de Formation des Sciences de l'Ingénieur

L'Unité de Formation des Sciences de l'Ingénieur (UF SDI) de l'Université de Bordeaux propose des formations dans les domaines de l'EEA (électronique, énergie et automatique), de la mécanique et de la maintenance aéronautique dans le cadre de la formation initiale, continue et de l'alternance (contrat d'apprentissage, contrat de professionnalisation).

L'UF SDI regroupe l'ensemble des filières de formation en lien avec le métier de l'ingénieur, à savoir dans les domaines du génie électrique, de l'automatique, du signal et image, de la productique, de la mécanique, du génie mécanique, du génie civil, de l'aéronautique,...

Aussi, cette unité de formation propose une offre de formation variée (voir [Nos Formations](#)) : 1 licence, 2 licences professionnelles ainsi que 3 mentions de master avec possibilité de suivre un Cours de Master en Ingénierie (CMI, formation universitaire au métier d'ingénieur sur 5 ans).

Elle est installée sur deux sites : le campus de Talence ainsi que celui de Mérignac. Elle englobe 95 personnels enseignants, pour 650 étudiants en master, dont 160 apprentis.



FIGURE 3.1: Vue du bâtiment principal A1 de l'UFSDI/Univ. Bordeaux

### 3.1.2 Responsabilités administratives

#### 3.1.2.1 Responsable du site web du département EEA

Un an après mon recrutement, en octobre 2012, le directeur du Centre de Ressources, Didier Geoffroy, et le directeur du département EEA, Yves Ousten, m'ont proposé d'être le

nouveau **responsable du site web** du département EEA de l'UFR de Physique. J'ai endossé cette charge de 2013 à 2015 qui consistait à mettre à jour et à gérer le site internet ([www.ufr-physique.u-bordeaux1.fr/departements/eea](http://www.ufr-physique.u-bordeaux1.fr/departements/eea)) car il avait été délaissé et non maintenu pendant plusieurs années.

### 3.1.2.2 Responsable de la communication de l'UF SDI, de 2015 à 2020

Suite à la fusion de l'Université Bordeaux 1, l'Université Bordeaux 2 et l'Université Bordeaux 4 pour former l'Université de Bordeaux en 2014, l'UFR de Physique a choisi de se rattacher à la Chimie. Par conséquent, les filières EEA et Mécanique ont décidé de former leur propre UF : l'UFSDI. Compte tenu de mon dynamisme et de mes implications au sein du département EEA, le directeur de l'UFSDI, Christophe Aristegui, m'a proposé en fin 2015 de prendre une forte responsabilité en tant que **responsable de la communication** de toute l'UF. Il a fallu concerter toute la communauté afin de définir l'architecture du site web et ensuite créer le nouveau site web de l'UF SDI en respectant la nouvelle charte de graphique de l'université de Bordeaux. J'ai entièrement réalisé la création de ce site en 2016 : [sciences-ingenieur.u-bordeaux.fr](http://sciences-ingenieur.u-bordeaux.fr)). D'autre part, j'ai également eu d'autres tâches en tant que référent de la communication, à savoir l'organisation des différents salons pour étudiants (Journées Portes Ouvertes de l'Univ. Bordeaux, Salon de l'Étudiant,...), créer une newsletter mensuelle notamment avec la plateforme mailchimp, créer un espace de partage et de stockage sous nuxeo, et enfin créer les différents supports de communication (kakémonos pour les salons mais également pour les cérémonies de remise de diplômes, plaquettes des mentions de masters, posters, organigrammes des formations et organigrammes de l'UFSDI). Tous ces supports sont accessibles et téléchargeables sur le site de l'UF SDI.

### 3.1.2.3 Chargé du Vice-Président “Numérique” de l'Université de Bordeaux pour la négociation de la licence campus de Mathworks, depuis 2020

En 2015, j'ai été chargé par l'équipe CRONE puis par le Groupe Automatique pour faire partie de la “commission logiciel” du laboratoire IMS afin de définir les logiciels prioritaires du laboratoire qui pourraient être pris en charge directement par le laboratoire et non plus par les équipes. Suite à cette démarche, il s'est avéré que le montant de l'acquisition des licences Matlab® ne pouvait être supporté uniquement par le laboratoire IMS. Je me suis donc chargé avec un collègue de Bordeaux INP, Dominique Dallet, pour entamer une démarche conjointe entre Bordeaux INP et l'Université de Bordeaux pour l'acquisition d'une licence site. Après la rencontre du vice-président numérique de l'université de Bordeaux, Eric Dutil, en octobre 2017, de la DSI et du DGS de l'université de Bordeaux, cette négociation n'a pu aboutir.

En 2019, l'académie de Bordeaux a pu négocier une licence site Mathworks pour tous les lycées de l'académie. Après plusieurs échanges avec l'inspecteur académique, Patrick Cohen, je me suis donc dirigé vers l'UFSDI et le Collège Sciences et Technologies pour relancer cette négociation. Avant tout, j'ai recensé toute l'UFSDI ainsi qu'au laboratoire IMS pour définir les

besoins du logiciel Matlab® en recherche et en pédagogie. Le directeur du Collège Sciences et Technologie, Pascal Lecroart, m'a convié à une réunion du comité des directeurs des UF en juin 2019. Cette réunion a été bénéfique car il s'est avéré que cette discussion devait être relancé au sein de toute l'université de Bordeaux (voir figure 3.2).

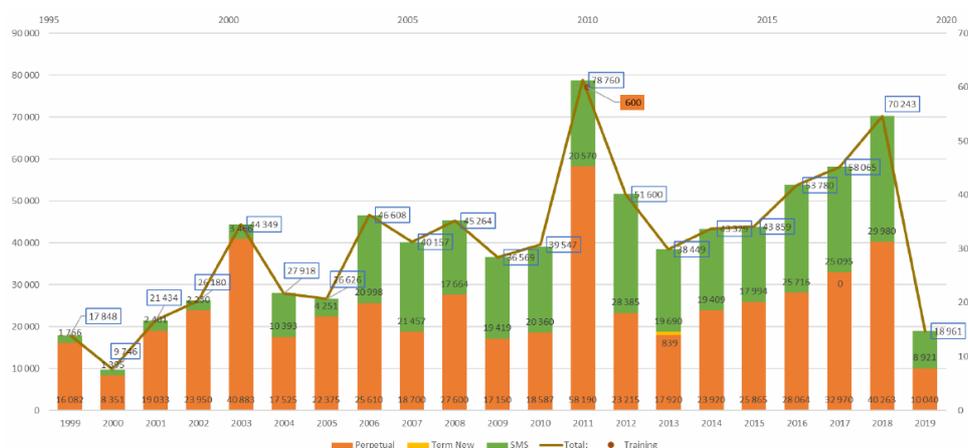


FIGURE 3.2: Dépenses annuelles de l'université de Bordeaux

D'autre part, les deux confinements ont accéléré la négociation avec l'université de Bordeaux, et le vice-président actuel, Guy Mélançon, a vu d'un oeil très favorable l'établissement d'une licence site pour toute l'université de Bordeaux. J'ai mené une enquête sur toute l'université de mai à juin 2021 pour mieux définir les différentes composantes utilisant Matlab® ainsi que pour trouver des ressources pérennes pour financer de manière pérenne cette licence site.

### 3.1.2.4 Coresponsable du Groupe de Travail "Usine du Futur" au sein de l'UFSDI depuis Octobre 2020

Compte tenu de mon implication dans la filière EAPS (Electronique, Automatique, Productique et Signal-image), en tant que responsable de l'axe disciplinaire Automatique et Signal-Image, ainsi qu'en tant que responsable du Workpackage 1 sur l'évaluation non destructive et le Contrôle optimal du projet de recherche BEST sur l'industrie du Futur, l'UF SDI m'a proposé de créer un groupe de travail sur l'**Industrie du Futur**. Nous sommes 5 co-porteurs, un par parcours principal dans les filières EAPS et Mécanique : Tristan Dubois pour les Systèmes Electroniques, Anne Zouggar pour le Génie Industriel, Alex Ballu pour la Mécanique fondamentale et Jean Lachaud pour la Mécanique Energétique. L'usine du futur est une thématique qui est devenu un axe prioritaire de l'université de Bordeaux depuis février 2020. L'objectif de ce GT est de faire un état des lieux de nos formations actuelles ; de proposer un catalogue de cours orienté sur l'usine du futur ce qui consiste à modifier ou à créer des nouveaux cours afin de les labelliser sur l'usine du futur ; de préparer la prochaine accréditation des mentions de master ; et de définir des compétences en lien avec l'usine du futur pour les futurs recrutements (enseignants

et enseignants-chercheurs) de l'UFSDI. Ce GT se réunit à une fréquence d'une à deux fois par mois et des jalons sont effectués une fois par trimestre au comité de pilotage de l'UFSDI afin de proposer de nouvelles orientations de nos réflexions. En 2021, j'ai proposé et mener à la création d'un cours transverse sur la "Psychologie du travail et des Organisations dans l'industrie du futur" aux parcours de master des mentions "Ingénierie des Systèmes Complexes" (ISC) et "Mécanique et Ingénierie" (MEI). Ce cours va débiter en janvier 2021. Nous sommes actuellement en train de monter un nouveau cours sur l'IOT et capteurs/actionneurs qui sera prochainement proposé à l'UFSDI.

### 3.1.3 Responsabilités et mandats locaux

#### 3.1.3.1 Expertise qualifications MCF

J'ai été **rapporteur** à l'Université de Bordeaux pour l'expertise d'une dispense de qualification à un poste de Maître de Conférence en section 27 (avril 2014).

#### 3.1.3.2 Membre invité au conseil de l'UF SDI (2015-2020)

En tant que responsable de la communication, j'ai été **membre invité** au conseil de l'UF SDI (mensuel) ainsi qu'au bureau du conseil de l'UFSDI (bimensuel).

#### 3.1.3.3 Membre élu à la Commission de la Formation et de la Vie Universitaire (CFVU) depuis 2017

Dans le cadre des élections des représentants des personnels au conseil académique de l'université de Bordeaux du 5 décembre 2017, j'ai été membre suppléant de la liste "Avec Manuel TUNON DE LARA, faire ensemble l'université de demain" (CFVU - Collège B - Secteur de formation : Sciences et technologies). Madame Sandrine PAYAN-GUILLAUME était membre titulaire du CFVU depuis 2017. Etant démissionnaire en 2021, j'ai siégé en tant que **membre titulaire** à la CFVU jusqu'à décembre 2021.

#### 3.1.3.4 Expertise Avancement de Grade MCF

J'ai été **rapporteur** à l'Université de Bordeaux pour l'expertise d'une campagne d'avancement de grade d'enseignant-chercheur en section 60 (mars 2018).

#### 3.1.3.5 Responsable de l'axe disciplinaire "Automatique et Signal-Image" de la L1 au M2 (depuis septembre 2019)

Le directeur de l'UF SDI, Christophe Aristegui, m'a proposé d'être responsable de cet axe disciplinaire pour coordonner les actions afin de favoriser le recrutement des étudiants et de

maintenir une cohérence des programmes des différents parcours de la L1 au M2 afin de préparer l'évaluation HCERES (2014-2021) de la licence SPI (Sciences Pour l'Ingénieur) et du master ISC (Ingénierie des Systèmes Complexes), mais également pour préparer la prochaine accréditation (2022-2026) et enfin de préparer la mise en place des blocs de compétences en licence SPI et en master en lien avec cet axe disciplinaire. Je suis également en charge de proposer des améliorations continues des contenus pédagogiques, des maquettes de TP et des propositions de nouvelles UEs et parcours au niveau national et international.

### 3.1.4 Responsabilités pédagogiques

J'ai été recruté en septembre 2011 à l'UFR de Physique (qui est devenue l'UF SDI en 2014 lors de la fusion de l'Université Bordeaux 1, l'Université Bordeaux 2 et l'Université Bordeaux 4). La charge d'enseignement en automatique étant très importante, je me suis rapidement investi au sein de l'équipe pédagogique ainsi que dans des responsabilités pédagogiques.

#### 3.1.4.1 Responsable du parcours de Master 2 Recherche et Professionnel AM2AS (Automatique et Mécatronique, Automobile, Aéronautique & Spatial), depuis 2014

Le Master 2 AM2AS est une formation en commun avec la 3<sup>me</sup> année (option AM2AS) de l'école d'ingénieur Bordeaux INP/enseirb-matmeca, depuis 2014 ; je suis en charge de toutes les charges administratives liées à ce parcours de master : du recrutement des étudiants sous apoflux et Campus France, de l'emploi du temps, des jurys de semestres et d'année, de l'établissement des conventions de stage et du suivi des étudiants en stage, du conseil de perfectionnement, des accréditations (2014-2021 et 2022-2026) et des évaluations HCERES (2021),...

#### 3.1.4.2 Responsable de l'Apprentissage du Parcours de master AM2AS (M1 et M2), depuis 2020

: avec la réforme des CFA (Centre de formation des apprentis) de l'université de Bordeaux, nous avons pu ouvrir le parcours de master AM2AS à l'apprentissage ; je suis donc en charge de la cohérence des missions d'apprentissage auprès du CFA mais également pour recruter des étudiants en master AM2AS (M1 et M2), leur proposer des missions en alternance (apprentissage ou contrat de professionnalisation), de contacter les entreprises pour le recrutement des apprentis, de vérifier la cohérence du parcours AM2AS avec le CFA et notamment du suivi des apprentis

#### 3.1.4.3 Responsable d'Unités d'Enseignements, depuis 2014

Je suis responsable de toutes les Unités d'Enseignements (UEs) dans lesquelles je fais des cours magistraux (voir la tableau 3.3 p. 69), à savoir pour l'UE "Systèmes Analogiques" dans lequel je fais le cours de Conception de Lois de Commande (L3 IMSAT), l'UE "Modélisation,

Identification, Surveillance” dans lequel je fais le cours d’Identification des Systèmes Dynamiques (M2 AM2AS), l’UE “Outils et logiciels pour l’Automatique” dans lequel je fais cours de Modélisation par Bond Graph (M2 AM2AS) et enfin l’UE “Robotique” dans lequel je fais cours de Modélisation des Procédés Robotisés (M2 AM2AS).

#### 3.1.4.4 Responsable des TP de licence 3 en Conception de Lois de Commande, depuis 2013

Depuis que je suis responsable du cours de “Conception de Lois de Commande” en L3 IMSAT depuis 2011, je suis également en charge des TP d’automatique en L3 à savoir pour la licence 3 EEA (Electronique Energie Automatique) et la licence 3 IMSAT (Ingénierie et Maintenance des Systèmes pour l’Aéronautique et les Transports) ; je suis donc en charge des différentes maquettes de TP, de leurs modifications et mises à jour et de la rédaction des fascicules.

### 3.1.5 Responsabilités et mandats nationaux

#### 3.1.5.1 Comité de sélection

J’ai été **membre du Comité de Sélection** à Bordeaux INP/enseirb-matmeca/Filière électronique pour un poste de Maître de Conférences en section (Avril-Mai 2019)

#### 3.1.5.2 Membre nommé au CNU section 61 (depuis décembre 2019)

Cette charge me tient particulièrement à coeur car elle me permet de rencontrer des collègues de toute la France et de connaître les bonnes pratiques d’un enseignant-chercheur au niveau national et international et notamment de connaître et faire reconnaître l’excellence d’un enseignant-chercheur tant au niveau de sa qualité de production scientifique que des ses collaborations et de la formation des jeunes chercheurs (doctorants) avec la prise de responsabilités dans son établissement d’accueil. Je participe volontairement à tous les sessions proposés par notre section 61 : qualification, promotion, PEDR (bientôt transformé en RIPEC) et suivi de carrière. [https://www.galaxie.enseignementsup-recherche.gouv.fr/ensup/Cand\\_elections\\_cnu2019.htm](https://www.galaxie.enseignementsup-recherche.gouv.fr/ensup/Cand_elections_cnu2019.htm)

### 3.1.6 Autres responsabilités

#### 3.1.6.1 Promotion de l’offre de formation

Depuis janvier 2013, je participe à tous les salons pour la promotion de la licence SPI et du parcours de master AM2AS, à savoir :

- la *Journée du Futur Etudiant* de l’Université de Bordeaux organisée sur une journée en fin janvier qui deviendra les *Journées Portes Ouvertes des lycéens* (JPO) à partir de 2017 et s’étaleront sur 2 journées à partir de 2018

- le *Salon de l'Etudiant* organisée sur 3 jours en janvier au Parc des Expositions à Bordeaux Lac ;
- le salon *Aquitec* organisé sur 3 journées au Parc des Expositions à Bordeaux Lac ; l'université de Bordeaux ne souhaitera plus être présente à ce salon à partir de 2016.

En 2013, j'ai participé au salon INNOROBO (voir figure 3.3) pour représenter le master AM2AS et notamment promouvoir notre formation à la robotique (<https://www.captronic.fr/INNOROBO-2013-salon-dedie-a-la.html> ).



FIGURE 3.3: Salon de la robotique INNOROBO 2013

En ce qui concerne les JPO, j'ai modifié complètement la présentation pour les étudiants afin de respecter la charte graphique de l'université mais également en y mettant des statistiques d'insertion professionnelle de nos diplômés en Sciences de l'Ingénieur. A partir de 2019, en tant que responsable de la communication à l'UFSDI, j'ai initié des visites des centres de ressources EEA et Mécanique (2 par demi-journées des JPO) afin d'intéresser les futurs étudiants à nos ressources et moyens pédagogiques qui sont utilisés en TP et en projet. En effet, il s'avère que les lycéens ont une image très éloignée de la réalité et notamment à cause des clichés transmis par leur parents et proches.

De plus, afin d'étendre l'intérêt des futurs étudiants à l'EEA, j'ai organisé avec Tristan Dubois, référent de l'axe disciplinaire "Electronique" en 2019 un forum pour les étudiants de L2 afin de les sensibiliser aux métiers de l'EEA. Des industriels, anciens élèves de l'université, ont été invités pour présenter leur parcours et leur métier actuel.

### 3.1.6.2 ASSETS+

L'industrie européenne de la défense a des difficultés à trouver les compétences nécessaires pour maintenir son leadership, sa compétitivité et sa durabilité à moyen et long terme avec un personnel vieillissant et des difficultés à attirer de jeunes professionnels. L'EDSP (European Defence Skills Partnership) regroupe 20 pays de l'Union Européenne formés d'industriels et d'académiques et a été lancé en 2018 pour développer une stratégie européenne en matière de compétence dans le domaine de la défense. Pour répondre à ce besoin, un appel de la commission européenne a été lancé en 2018 et s'est concrétisé par le projet ASSETS + (Alliance for Strategic Skills Addressing Emerging Technologies in Defence). Ce projet a démarré en 2020 pour une période de 4 ans sur un budget de 4M€ pour la mise en place de programmes de formation dans le domaine de la défense.

A court terme, un concours a été mis en place en 2020 pour les étudiants souhaitant participer sous forme de projet lié à la défense (<https://assets-plus.eu/challenge/>) avec une cérémonie de remise des prix qui a eu lieu au salon du Bourget en juin 2021.

La deuxième édition est actuellement en cours.

### 3.1.6.3 Mise en place des blocs de connaissances et de compétences

En avril 2019, la réforme de la formation professionnelle impose aux établissements de l'enseignement supérieur d'être acteur de la certification professionnelle en proposant des formations qui sont fondées sur des blocs de connaissances et de compétences (BCC). La licence SPI (Sciences Pour l'Ingénieur) du Collège Sciences et Technologies s'est donc attelée à la restructuration de cette licence sous forme de BCC en mars 2021. Je fais donc parti de cette commission en tant que référent de l'axe disciplinaire "Automatique et Signal-Image" de l'UF SDI. Les 6 semestres ont donc été revu sous forme de 8 blocs de compétences et les UEs ont ensuite été regroupées par unité d'enseignements de 6 à 9 ECTS.

La phase de construction des parcours de master en BCC sera également à construire pour la prochaine accréditation 2022-2026.

## 3.2 Activités d'enseignement

Cette partie a pour but de présenter mes activités d'enseignement en tant que Maître de Conférences de 2011 à aujourd'hui à l'Université de Bordeaux.

### 3.2.1 Charge pédagogique

Ma charge annuelle d'enseignement est présentée au tableau 3.1 et est illustrée sur la figure 3.4, est en moyenne de 248 heures équivalent TD, soit 56h en heures complémentaires. Le pic de 2015-2016 correspond à une demande d'un collègue en Signal-Image qui souhaitait mon

intervention en TD en renfort de son cours de "signal aléatoire" dispensé en M1 (18h eq. TD) ainsi qu'à la création d'un groupe de TD en L3 IMSAT suite à une augmentation significative de leurs effectifs (11h eq. TD) uniquement pour cette année universitaire.

	Charge admin.	CM	TD	TP	BE/projet	Total
2011-2012	5,00	50,38	52,91	79,17	22,00	209,46
2012-2013	32,00	33,75	44,96	65,83	42,00	218,54
2013-2014	24,00	33,75	47,21	65,83	42,00	212,79
2014-2015	20,00	69,33	48,58	38,67	62,00	238,58
2015-2016	29,67	84,42	31,33	54,00	65,00	264,42
2016-2017	16,00	89,67	63,91	52,83	60,50	282,91
2017-2018	17,00	98,79	49,33	33,00	52,00	250,12
2018-2019	19,00	99,42	49,33	33,00	57,00	257,75
2019-2020	25,00	99,42	49,33	33,00	57,00	263,75
2020-2021	42,00	99,42	31,33	25,00	65,00	262,75
2021-2022	46,00	94,42	31,33	24,50	75,00	271,25

TABLE 3.1: Synthèse de la charge annuelle de mes activités d'enseignement (heure eq. TD) (CM : Cours Magistral, TD : Travaux Dirigés, TP : Travaux Pratiques, BE : Bureau d'étude)

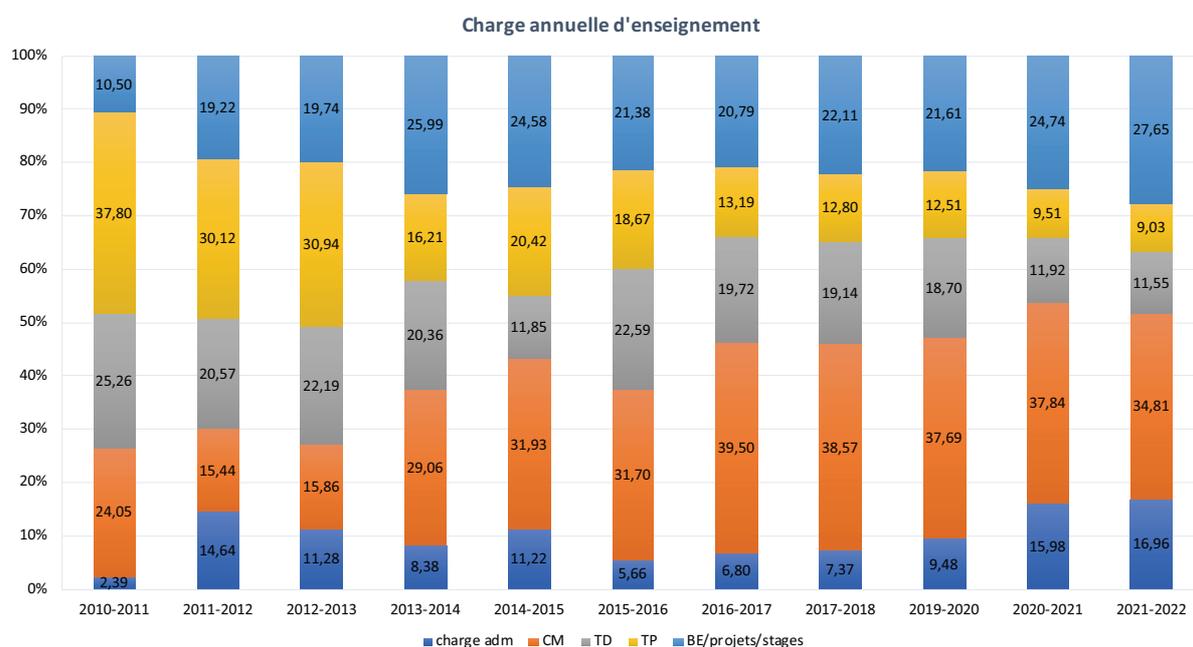


FIGURE 3.4: Charge annuelle des activités d'enseignement en pourcentage (voir tableau 3.1)

Mes interventions par année de parcours sont présentées au tableau 3.2 et sont illustrées sur la figure 3.5. Mes enseignements sont principalement dispensés, en L3 IMSAT (entre 60 et 80 étudiants) et en Master 2 AM2AS, dont je suis le coresponsable depuis la dernière accréditation de 2014. La particularité du M2 AM2AS est que les cours sont mutualisés avec la 3<sup>ème</sup> année

de l'école d'ingénieur Bordeaux INP/enseirb-matmeca, de l'option AM2AS, qui porte volontai-  
 rement le même nom. Pierre Melchior est le coresponsable du côté de l'enseirb-matmeca et je  
 suis le coresponsable du côté de l'Université de Bordeaux. Cette promotion comprend donc deux  
 populations d'environ 20 étudiants de l'enseirb-matmeca et 24 étudiants du côté du master, soit  
 un effectif de 44 étudiants en moyenne.

	L2	L3	M1	M2	Charge admin.
2011-2012	30,29	57,58	47,00	69,59	5,00
2012-2013	22,96	61,25	60,33	42,00	32,00
2013-2014	25,21	61,25	60,33	42,00	24,00
2014-2015	22,58	77,00	32,00	87,00	20,00
2015-2016	9,33	74,09	42,33	109,00	29,67
2016-2017	13,91	96,00	49,00	108,00	16,00
2017-2018	9,33	81,79	44,00	98,00	17,00
2018-2019	9,33	67,42	42,00	120,00	19,00
2019-2020	9,33	67,42	42,00	120,00	25,00
2020-2021	9,33	58,92	26,00	126,50	42,00
2021-2022	9,33	58,92	31,00	126,00	46,00

TABLE 3.2: Synthèse de mes interventions par année de parcours (heure eq. TD)

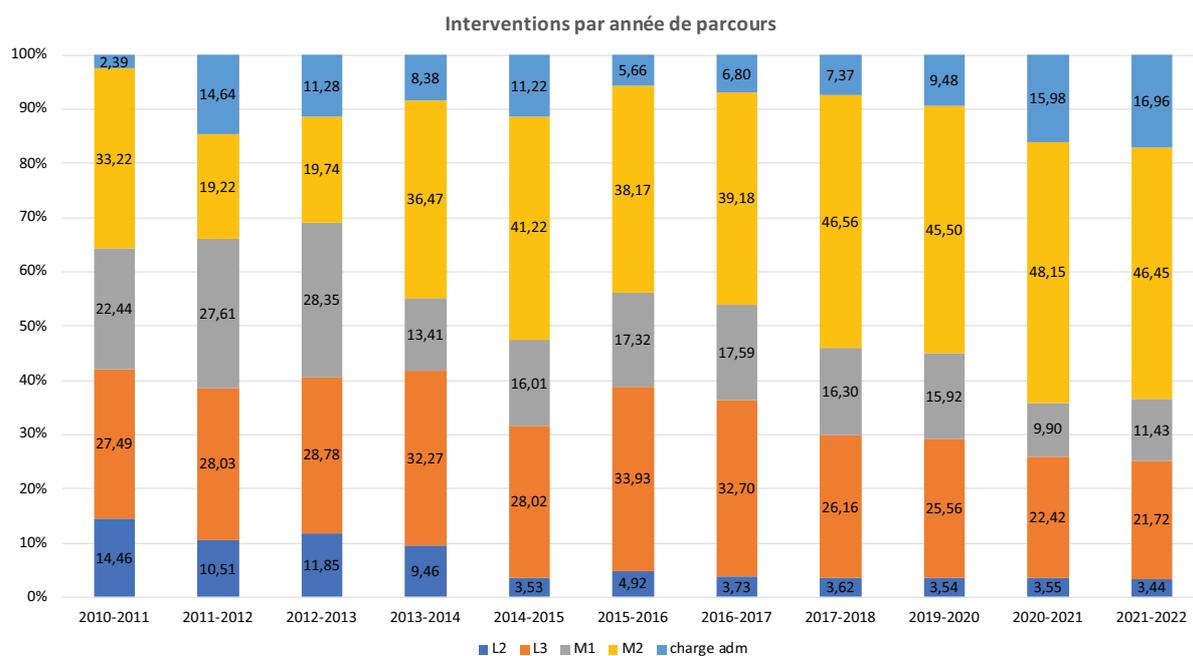


FIGURE 3.5: Intervention par année en pourcentage (voir tableau 3.2)

### 3.2.2 Ressources pédagogiques

Le tableau 3.3 présente une synthèse des enseignements que j'ai réalisés depuis mon arrivée à l'Université de Bordeaux en 2011. Par souci de lisibilité, les noms actuels des formations sont indiqués (les intitulés ayant changé à plusieurs reprises). Le détail des modules est présenté ci-dessous.

Enseignement	Filière	CM	TD	TP	BE/projet	Période
Dynamique des Systèmes Linéaires	L2 SPI		9.33			depuis 2011
Bases d'Automatique Conception de Lois de Commande	L3 IMSAT	14,66				depuis 2013
	L3 IMSAT	13,75	22	9		depuis 2011
Commande des Systèmes Linéaires	M1 SEE	20				2011-2021
Commande Optimale Automatique Non Li- néaire	M1 AM2AS				6	2011-2013
	M1 AM2AS			15		2011-2016
Aléatoire en Signal-Image Projet	M1 AM2AS		18			2015-2020
	M1 AM2AS				6	depuis 2012
Systèmes à temps continus	M2 SPIA	34,6		9		2011-2012
Mise à niveau	M2 AM2AS	6			16	depuis 2011
Identification des Sys- tèmes Dynamiques	M2 AM2AS	15			20	depuis 2011
Modélisation par Bond Graph	M2 AM2AS	15			20	depuis 2014
Modélisation des Procédés Robotisés	M2 AM2AS	15			4	depuis 2017

TABLE 3.3: Récapitulatif des enseignements (en heures eq. TD)

#### 3.2.2.1 Dynamique des Systèmes Linéaires (9.33h TD, L2 SPI/EEA et SPI/IMSAT, depuis 2011)

J'interviens en TD de L2 SPI. Ce cours est effectué par Xavier Moreau pour un effectif de 100 étudiants qui est en tronc commun de L2 pour les 3 filières de la mention de licence SPI : EEA, IMSAT et Mécanique. Ce cours traite de la modélisation des systèmes dynamiques linéaires ou au comportement linéaire (électrique, mécanique, hydraulique,...) et de leur représentation dans le domaine temporel (réponse impulsionnelle et réponse indicielle) et dans le domaine fréquentiel (diagramme de Bode). J'étais également en charge d'un deuxième groupe de TD (9.33h) et d'un groupe de TP (9h) lors de mes 3 premières années. Avec le recrutement de mon collègue, André Benine-Neto en 2012, je lui ai cédé cette charge d'enseignement pour ne conserver qu'un seul groupe de TD. En effet, comme je suis en charge du cours de Conception de lois de commande

pour les L3 IMSAT, j'ai conservé le groupe de TD du groupe IMSAT qui représente un effectif de 45 étudiants en moyenne.

### 3.2.2.2 Bases d'Automatique (14.66h Cours intégré, L3 SPI/IMSAT, depuis 2013)

Le groupe de L2 IMSAT de 45 est composé d'un effectif de 45 étudiants. En L3 IMSAT, ce groupe passe à un effectif oscillant entre 60 et 80 étudiants d'un flux étudiant extérieur pouvant provenir de BTS (électronique, mécanique ou aéro) ou DUT Mécanique (GMP) ou d'un équivalent L2. Par conséquent, entre 25% voire 33% de ce flux n'est pas familier avec la notion de système dynamique. A l'origine, ce cours était réalisé par une collègue de l'IMS en génie industriel, Thècle Alix, qui m'a cédé ces interventions en 2013. J'ai réadapté ce cours de Bases d'Automatique pour revoir les fondamentaux du cours proposé en L2 de Dynamique des Systèmes Linéaires portant sur les bases de la modélisation des systèmes dynamiques linéaires ou au comportement linéaire (électrique, mécanique, hydraulique,...) et de leur représentation dans les domaines temporel et fréquentiel, et enfin de l'identification des systèmes du premier ordre et du second ordre dans les deux domaines. Je suis en charge du cours intégré, c'est mon collègue Christophe Farges qui effectue les TP de Bases d'Automatique.

→ *J'ai créé le nouveau support de cours en 2013 avec des illustrations avec des exemples concrets traités sous forme d'exercices avec simulation sous Matlab®.*

### 3.2.2.3 Conception de Lois de Commande (13.75h CM + 22hTD + 4 × 9 TP, L3 SPI/IMSAT, depuis 2011)

A l'origine, ce cours était réalisé par des vacataires (ATER), j'ai donc pris en charge ce cours dès mon recrutement en 2011. Ce cours est la suite logique du cours précédent de Bases d'Automatique. Cet enseignement traite de la commande des systèmes linéaires par approche fréquentiel pour la conception d'un régulateur proportionnel P, proportionnel-Intégral (PI), Proportionnel-Dérivée (PD) ou Proportionnel-Intégral-Dérivée-Filtré (PIDF) à partir du respect d'un cahier des charges. Les notions de marges de stabilité, de performances dynamiques (poursuite, rejet de perturbation et robustesse), de conception de la boucle ouverte pour garantir des performances en boucle fermée sont abordés.

D'autre part, je suis également en charge des TP de toute la L3 SPI (parcours EEA et IMSAT). Initialement, il y avait 3 TP : commande d'un moteur d'ascenseur en position, asservissement d'une enceinte thermique et commande en position d'une bille sur un rail. J'ai initialement revu une partie du fascicule en 2012. Le premier TP sur le moteur d'ascenseur était vieillissant et était trop complexe à commander pour des étudiants de L3. Par conséquent, après consultation avec mes collègues de L3, j'ai orienté les maquettes de TP pour qu'elles soient d'une part plus adaptées aux étudiants de L3 mais également pour que l'environnement de travail migre progressivement uniquement sous Matlab®/Simulink au lieu de travailler sous différentes interfaces. En 2013, j'ai changé le premier TP pour basculer sur la commande d'un moteur LEGO NXT, qui est d'une

part plus ludique, mais également transportable en tant que démonstrateur pour faire de la commande d'un dispositif équivalent à un Segway (<https://fr-fr.segway.com/products/segway-i2-se>). En 2015, j'ai complètement revu le fascicule de TP pour l'unifier entièrement sous latex, avec notamment la rédaction d'un travail préparatoire plus adapté à la préparation préalable de chaque sujet de TP et avec une proposition de codes Matlab® (également compatible sous octave) pour que les étudiants puissent réaliser les synthèses des correcteurs et réaliser l'analyse. Enfin, en 2019, j'ai proposé de basculer sous arduino tous les TP pour que l'on n'utilise qu'une seule interface, celle de Matlab®. Avec un collègue, Stéphane Ygorra, nous avons également changé le deuxième TP qui devenait obsolète voir dangereux pour le réactualiser avec la commande d'une cellule de chauffe d'une imprimante 3D en passant par un arduino. Le dernier TP sur la bille sur rail a également été revu pour utiliser un servomoteur compatible pour être commandé sous arduino.

→ *J'ai créé mon propre fascicule de cours, de TD et de TP dès 2011 avec des mises à jour régulières de ces fascicules. De plus, j'ai complètement revu le fascicule de TP en 2015, puis en 2019 quand on est passé sous arduino en n'utilisant que l'interface Matlab®/Simulink.*

#### 3.2.2.4 Commande des Systèmes Linéaires (20h Cours Intégré, Bordeaux INP/SEE (M1), 2011-2021)

Cet enseignement est proposé à Bordeaux INP/enseirb-matmeca en deuxième année de la filière en apprentissage "systèmes électroniques et embarqués" pour un effectif de 24 étudiants. Il traite de la commande des systèmes linéaires par approche fréquentiel pour la conception d'un régulateur proportionnel P, proportionnel-Intégral (PI), Proportionnel-Dérivée (PD) ou Proportionnel-Intégral-Dérivée-Filtré (PIDF) à partir du respect d'un cahier des charges. Les notions de marges de stabilité, de performances dynamiques (poursuite, rejet de perturbation et robustesse), de conception de la boucle ouverte pour garantir des performances en boucle fermée sont abordés. La particularité de ce cours est qu'il est proposé à une filière en apprentissage en systèmes embarqués avec des notions plus pratiques sur la bande passante, la compilation embarquée et la fréquence d'échantillonnage. D'autre part, ce cours est sous forme de cours intégré avec manipulation sous Matlab®/Simulink. Enfin, l'épreuve terminale est également réalisée sous Matlab®/Simulink. Je ne réalise que le cours théorique, ce sont mes collègues de Bordeaux INP, Pierre Melchior et Patrick Lanusse qui réalisent les TP (4 séances de 4h). Ma charge d'enseignement et de responsabilités étant grandissante surtout depuis 2019, j'ai proposé à un jeune collègue de Bordeaux INP, Mathieu Chevré, qui a été recruté en 2020, de prendre la suite de ce cours.

→ *J'ai créé mon propre fascicule de cours dès 2012 avec des mises à jour régulières de ce fascicule.*

### 3.2.2.5 Commande optimale (6h BE, M1 AM2AS, 2011-2013)

En support de mon collègue Stéphane Ygorra qui réalisait le cours de commande optimale multivariable par commande LQG (Linear Quadratic Gaussian), je m'occupais d'un Bureau d'étude pour l'application de la commande LQG sur un robot Segway NXT (<http://robotsquare.com/2012/09/04/segway-with-robot-driver/>). L'objectif de ce bureau d'études était l'asservissement en position de deux moteurs LEGO NXT montés sur un corps rigide qui contient le code embarqué. Cette maquette peut être vu comme l'asservissement multivariable en temps-réel d'un pendule inversé. Je me suis d'ailleurs servi de cette maquette en tant que démonstrateurs lors des manifestations de promotion de la filière SPI (salon de l'Etudiant et Portes Ouvertes de l'Université de Bordeaux).

### 3.2.2.6 Automatique non linéaire (15h TP, M1 AM2AS, 2011-2016)

En support de mon collègue David Henry, j'étais en charge d'un groupe de TP sur l'automatique non linéaire. L'objectif de ces TPs étaient de mettre en pratique l'analyse de la méthode du premier harmonique en présence d'une non-linéarité sur la boucle d'asservissement pour mettre en évidence les phases de stabilité et notamment le phénomène de pompage. En 2016, j'ai cédé cette charge de TP à mon collègue, Tudor Arimitoiaie, qui venait d'être recruté.

### 3.2.2.7 Aléatoire en Signal-Image (20h Cours Intégré, M1 AM2AS, 2015-2020)

Comme j'effectue le cours d'Identification des systèmes dynamiques" en M2 AM2AS, cet enseignement nécessite un certain nombre de notion du traitement du signal et image, mon collègue, Jean-François Giovannelli, souhaitait avoir un intervenant pérenne pour effectuer la charge de TD dans cet enseignement. L'idée est d'introduire les outils de base de la modélisation des phénomènes aléatoires pour des signaux (dimension dynamique) et des images (dimension spatiale) à index discret et continu : description à l'ordre deux, covariance et corrélation, stationnarité, densité spectrale de puissance, bruits blancs et colorés et leur filtrage. Il faut également acquérir la capacité à développer et utiliser un filtre de Wiener afin de mettre en œuvre ces outils au travers d'applications en débruitage, simulation de textures, analyse spectrale (périodogramme et corrélogramme).

### 3.2.2.8 Systèmes à temps continus (34,6h CM + 9h TP, M2 SPIA, 2011-2012)

En filière productique, le parcours de master SPIA (Systèmes de Production Industrielles et Automatisés), on m'a proposé avec Stéphane Ygorra de réaliser un cours de modélisation et d'asservissement des systèmes dynamiques à temps continu. Dans un premier temps, après un rappel de la transformée de Laplace, ce cours traitait des bases de la modélisation des systèmes dynamiques linéaires ou au comportement linéaire (électrique, mécanique, hydraulique,...) et de leur représentation dans les domaines temporel et fréquentiel, et enfin de l'identification des

systèmes du premier ordre et du second ordre dans les deux domaines. Il est également question de la linéarisation d'un système non linéaire autour d'un point d'équilibre. Puis, la deuxième partie du cours traitait de la commande des systèmes linéaires par approche fréquentiel pour la conception d'un régulateur proportionnel P, proportionnel-Intégral (PI), Proportionnel-Dérivée (PD) ou Proportionnel-Intégral-Dérivée-Filtré (PIDF) à partir du respect d'un cahier des charges.

Ce cours était une option de parcours de master SPIA et était destiné pour un effectif de 30 étudiants. Malheureusement, cette option n'a pas ouvert les 3 années suivantes et lors de l'accréditation du master en 2014, cette option a disparu.

→ *J'ai créé mon propre fascicule malgré le fait que ce cours n'ait eu lieu qu'une seule année.*

### 3.2.2.9 Mise à niveau (6h CM + 20h TP, M2 AM2AS, 2011-2021)

En 2011, le responsable du M2 AM2AS, Pierre Melchior, m'a proposé de mettre en place une série de TP de mise à niveau pour que les étudiants du master soient plus opérationnels sur l'utilisation du logiciel Matlab®. En effet, à cette époque, le choix de mes collègues de master de l'université de Bordeaux étaient de ne privilégier que les logiciels libres. Par conséquent, les étudiants arrivant en master 2 AM2AS étaient un peu démunis quant à l'utilisation de ce logiciel. Au démarrage de ces TP, de 2011 à 2013, je n'effectuais que 3 séances de 4h de TP. Puis, en 2013, j'ai proposé de transmettre aux étudiants un fascicule d'auto-apprentissage constitué des cours principaux de L3 SPI et M1 AM2AS sur l'automatique et de faire un cours de mise à niveau sur la représentation d'état (6h CM) et de faire 4 séances de TP de 4h pour la manipulation sous Matlab® de ces cours principaux : rappel sur la Conception de Lois de Commande d'un PID (par approche fréquentiel), méthode du premier harmonique, méthode du plan de phase, commande numérique et commande multivariable LQG.

Depuis 2020, Bordeaux INP a acquis une licence site de Matlab®. Il est donc proposé avec cette licence site de pouvoir faire des formations en ligne et certifiées de Matlab®. Depuis septembre 2021, les étudiants inscrits en M2 AM2AS doivent me transmettre leurs certificats de validation des formations suivantes : Matlab Onramp (2h), Simulink Onramp (2h), Control Design Onramp (1h), Optimization Onramp (1h), Symbolic Math (2h), Linear algebra (2h), Matlab fundamentals (25h) et Matlab for Data Processing and Visualization (9h).

→ *J'ai créé en 2013 le fascicule de cours d'auto-apprentissage ainsi que le cours de représentation d'état en 2016.*

### 3.2.2.10 Identification des systèmes dynamiques (15h CM + 2×10h BE, M2 AM2AS, depuis 2011)

De 2011 à 2013, j'effectuais les bureaux d'études (2×5h BE) pour un seul groupe d'étudiants. En 2013, le responsable du M2 AM2AS, Pierre Melchior, m'a proposé de prendre en charge tout le cours (CM + BE). Pour rappel, l'effectif global des étudiants comptabilise 44 étudiants (20 de l'enseirb-matmeca + 24 du master AM2AS). Cet enseignement permet aux étudiants de mettre en oeuvre les différentes phases d'identification de systèmes telles que le pré-traitement et le conditionnement des signaux d'entrée-sortie, le choix de la structure de modèle, l'estimation paramétrique, les régions de confiance des estimées, la validation, ou plutôt l'invalidation du modèle estimé. Différentes méthodes d'identification sont proposés : les moindres carrés, la méthode du gradient, la méthode à erreur de prédiction et la variable instrumentale. Toutes ces méthodes actuellement sont réalisés à temps discret. Il est prévu une mise à jour majeure de ce cours pour la rentrée 2022, car la première partie de ce cours sera désormais proposé en M1 AM2AS.

→ *J'ai créé mon propre cours en 2013 et préparé un fascicule de cours en 2015 avec des mises à jour régulières de ce fascicule. Les sujets de BE sont régulièrement mis à jour et j'ai notamment proposé d'utiliser la toolbox "System Identification" sous Matlab® en 2016 avec une réécriture du sujet de BE.*

### 3.2.2.11 Modélisation par Bond Graph (15h CM + 2×10h BE, M2 AM2AS, depuis 2011)

De 2011 à 2014, j'étais en charge des BE de Bond Graph. Le cours était initialement proposé par Bruno Orsoni, ingénieur à la Snecma. A la restructuration de son entreprise en 2014 et la rachat par ArianeGroupe, Bruno Orsoni ne pouvait plus assumer cette charge d'enseignement. Etant donné que je prenais déjà en charge les BE de Bond Graph quand j'étais moniteur en 2007, on m'a naturellement proposé de prendre en charge ce cours (CM+BE). Cet enseignement permet de réaliser de la modélisation d'un système dynamique avec une approche pluridisciplinaire (électrique, mécanique, hydraulique, pneumatique,...) par des éléments génériques qui font apparaître des variables de puissance. 3 niveaux de Bond Graph (Bond Graph de contexte, Bond Graph à mots, Bond Graph) sont proposés avec la réalisation d'un schéma blocs pour la simulation. Il est proposé d'établir la notion de causalité, de voir comment résoudre les conflits de causalité à partir d'un bilan de l'énergie cinétique ou de l'énergie potentielle, et notamment de représenter le formalisme de Lagrange sous Bond Graph.

→ *J'ai rédigé les nouveaux sujets de BE en 2016.*

### 3.2.2.12 Modélisation des procédés robotisés (15h CM + 4h BE, M2 AM2AS, depuis 2017)

En 2017, l'intervenant qui effectuait ce cours a décidé de ne plus intervenir dans le master AM2AS. Ayant pris en charge la coresponsabilité du M2 AM2AS, et en accord avec Pierre Melchior, étant donné que je réalise déjà le cours de modélisation par Bond Graph, il était tout naturel que je prenne en charge ce cours de modélisation des procédés robotisés. J'ai complètement revu ce cours en 2017 pour introduire des notions de mécanique Newtonienne (cinématique, dynamique Newtonienne, Energies, théorème du moment cinétique, référentiels galiléens et non galiléens,...), le principe fondamental de la dynamique, et le formalisme de Lagrange.

→ *J'ai créé mon propre fascicule de cours en 2017 avec la création d'un bureau d'étude en 2018 pour la mise en application sous Matlab® et de la toolbox Symbolic.*

## 3.3 Relations partenariales

J'assure chaque année le suivi pédagogique de plusieurs stagiaires et alternants du parcours de Master AM2AS. En effet, nos étudiants de M2 réalisent des stages chaque année. Le suivi consiste en une visite dans l'entreprise d'accueil de l'étudiant, la lecture du rapport et une soutenance en présence de l'étudiant, du tuteur de l'entreprise et du corps enseignant intervenant dans le M2 AM2AS. La visite en entreprise est l'occasion de mieux comprendre les problématiques industrielles et de se tenir au fait des évolutions technologiques. Cette activité est également essentielle pour promouvoir nos formations et débouche souvent sur de nouvelles offres de stage et d'alternance. Ces visites conduisent parfois à cerner des problématiques communes entre les besoins industriels et nos activités d'enseignement et de recherche.

De plus, en tant que responsable du M2 AM2AS, j'affecte toujours un tuteur de stage qui est expert (soit en enseignement ou en recherche) dans le domaine du sujet de stage de l'étudiant. Cela permet notamment à l'étudiant de mieux réaliser sa mission technique mais également au maître de stage et donc à l'entreprise de prendre connaissance des compétences que proposent notre master AM2AS. Ces stages nous permettent de créer un premier contact avec les maîtres de stage ce qui confortent nos relations avec les entreprises. A l'heure actuelle, nous transmettons environs 70 offres de stage à partir de nos réseaux internes sachant que nos effectifs tournent autour de 45 étudiants. Enfin, ces contacts en stage permettent également de créer une collaboration future soit au travers de propositions d'offres de stage, ou d'offres d'emploi mais également pour des collaborations de recherche. Cela a été le cas de Mohamed Hajjem qui a réalisé son stage chez Safran Data System, et qui aujourd'hui réalise une thèse cifre avec Pierre Melchior, Patrick Lanusse et moi-même.

Egalement, en tant que référent au CFA pour le parcours AM2AS depuis 2020, je suis également le tuteur des apprentis. Notre premier apprenti en 2020 a permis de réaliser sa mission d'apprentissage chez Stellantis (ex Groupe PSA qui a fusionné en 2021 avec les groupes

Fiat et Chrysler), et notamment, j'ai pu réorienter l'apprenti sur une mission à l'origine sur la chaîne de traction vers des besoins de gestion de la batterie d'un véhicule électrique au sein d'un domicile. Le maître d'apprentissage a fortement apprécié ce suivi et nous a proposé une autre mission d'apprentissage pour 2021-2022. De plus, notre deuxième apprenti réalise actuellement sa mission d'apprentissage chez Dassault Aviation pour le M2 AM2AS et nous a proposé de prendre contact avec les RH de leur groupe pour mieux anticiper les besoins en apprentissage de Dassault Aviation.

### 3.4 Innovation pédagogique et perspectives

#### 3.4.1 Evolution des enseignements

##### 3.4.1.1 Systèmes à dérivées non entières

Alain Oustaloup a créé une école de pensée quand il a fondé son équipe de recherche CRONE. Cette école de pensée s'est traduite par le développement de l'outil de la dérivation non entière à travers la calcul fractionnaire, la modélisation et l'identification par modèle non entier et la commande robuste CRONE. Depuis le départ à la retraite d'Alain Oustaloup en 2018, il n'y a plus de cours sur les "Systèmes à dérivées non entières". Compte tenu de mes activités de recherche en modélisation, identification et génération de commande et de consigne optimal, j'ai proposé de créer un nouveau cours sur la modélisation et l'identification par modèle non entier avec la création d'un bureau d'étude fondé sur la version orientée objet de la partie "System Identification" de la toolbox CRONE que je développe avec Rachid Malti (voir paragraphe 2.2.16 et [E-14]). Cette proposition de cours devrait voir le jour en 2022 pour la prochaine accréditation de la mention de master.

##### 3.4.1.2 Identification des systèmes dynamiques

###### 3.4.1.2.1 Identification des systèmes dynamiques I en M1 (semestre 8)

On m'a proposé de faire une partie de mon cours d'identification des systèmes dynamiques en 2<sup>ème</sup> année de Bordeaux INP/enseirb-matmeca pour le semestre 8. Par conséquent, je traiterai des fondamentaux en traitement du signal-image (corrélation, covariance, densité spectrale de puissance), développement des méthodes à erreur d'équation (ARX) et à erreur de sortie (OE) avec application en bureau d'étude sur un banc de turbofan DGEN 380 (voir figure 3.6). Ce banc d'essai a été acquis au travers d'un projet région Aquitaine en 2013 avec la société Price Induction et est disponible sur 3 sites du campus bordelais : à l'ENSAM pour la partie mécanique et structure, à Bordeaux INP/enseirb-matmeca pour la partie simulation dynamique et à Evinger pour le banc d'essai moteur (situé à Mérignac, derrière l'aéroport).

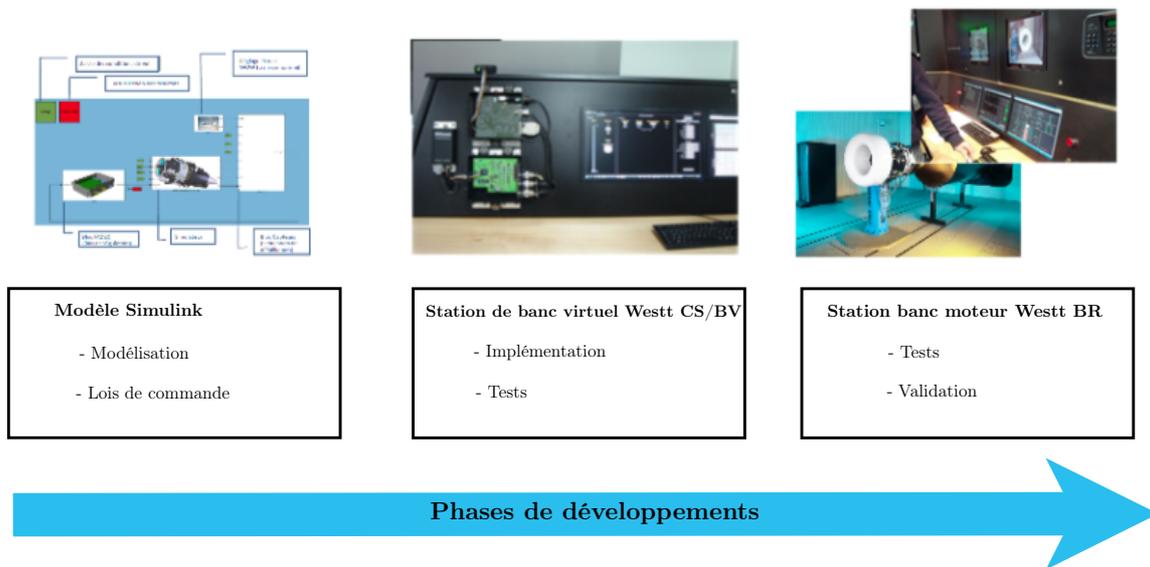


FIGURE 3.6: Banc d'essai turbofan DGEN 380 développé par Price Induction

### 3.4.1.2.2 Identification des systèmes dynamiques II en M2 (semestre 9)

Compte tenu de mon intervention précédente où j'interviendrais au semestre 8, je vais pouvoir aller plus loin dans l'identification des systèmes dynamiques : méthodes d'identification par la variable instrumentale et par la méthode du gradient, identification récursive (temps-réel), identification en boucle fermée. Mon cours actuel était focalisé que sur les méthodes à temps discret, je vais donc pouvoir aborder les méthodes d'identification dans le domaine continu. Enfin, dans le cadre de l'amélioration continue et de la prochaine accréditation, il est également prévu que mon cours sera effectué en anglais dès la rentrée 2022. Je vais donc également revoir mon sujet de bureau d'étude pour qu'il soit utilisable avec des méthodes à temps continus et directement en anglais. Enfin, dans le cadre des "UB Graduate Programs Numerics", où j'ai fait une première plénière sur l'aide de l'Intelligence Artificielle (IA) en modélisation et notamment en identification avec l'apprentissage profond ("*Deep Learning*" en septembre dernier, voir 2.2.8), dans la continuité des ces UB graduate School, le Collège Sciences et Technologies souhaite ouvrir un master international dans cette thématique de l'IA. J'ai donc proposé d'ouvrir ce cours d'identification des systèmes dynamiques à ce master international pour y introduire du "Deep Learning" associé à de l'identification pour l'aide à la décision et l'optimisation.

### 3.4.1.3 Robotique mobile

#### 3.4.1.3.1 Robotique mobile I en M1 AM2AS (semestre 7)

Bien que responsable du parcours de M2 AM2AS et responsable de l'apprentissage pour tout le parcours AM2AS (M1 et M2), je n'ai malheureusement aucune intervention de cours en

M1 AM2AS. J'avais eu quelques séances de TP et également des interventions de TD en Signal aléatoire, mais ce n'est plus le cas depuis 2019.

Compte tenu de la plateforme de robotique mobile (voir section 3.4.3) que je met en place cette année et du CMI sur les Systèmes Autonomes Connectés (voir section 3.4.3) que je souhaite mettre en place, avec mon collègue, André Benine-Neto (responsable du M1 AM2AS), nous souhaitons proposer un cours sous forme d'apprentissage par projet autour de capteurs embarqués, l'odométrie, la modélisation d'un robot, la navigation, la fusion de capteurs (estimation par filtrage de Kalman) et le filtre à particules (PSO, "particle swarm optimization" en anglais).

### 3.4.1.3.2 Robotique mobile II en M2 (semestre 9)

Dans cette même continuité, en M2 AM2AS, mon cours de modélisation des procédés robotisés qui tourne autour du formalisme de Lagrange sera réduit et sera inclus à la fin de mon cours de modélisation par Bond Graph. Ce qui me permettra de proposer un nouveau cours autour de la robotique mobile au semestre 9 (2024) du M2 AM2AS autour de la localisation, la planification de trajectoire, la détection et l'évitement d'obstacle et le suivi de trajectoire.

## 3.4.2 Plateforme sur la Robotique mobile

Depuis 2019, j'ai sollicité un certains nombre d'entreprises (du cluster Aquitaine robotics) et de collègues pour connaître l'intérêt de créer une formation autour des systèmes autonomes/robotique (voir section 3.4.3). Fort de cette première sollicitation et le Collège Sciences et Technologies de l'Université de Bordeaux ayant lancé 4 axes prioritaires (usine du futur, énergies du futur, technologies pour la santé et robotique), j'ai proposé d'orienter certains de nos TP et projets autour de la robotique mobile. Mes collègues de la mention de master ISC (en électronique, automatique, productique et signal-image) ont répondu très favorablement à ma sollicitation. Après concertation auprès de plusieurs fournisseurs de maquettes pédagogiques et notamment de l'investissement que nous avons effectué pour réaliser nos TP sous Matlab<sup>®</sup>, j'ai contacté la société Quanser en juillet 2021 pour acquérir un "studio sur le véhicule autonome" (autour de la robotique mobile) avec des petits robots (QBOT), des drones (Qdrone) ainsi qu'une arène comportant des caméras d'acquisition pour un projet à hauteur de 95k€ (voir figure 3.7).

Cette plateforme du véhicule autonome nous permettra de faire des projets en L3, M1 et M2 et notamment pour les TP de L3 en conception de lois de commande mais également, les TP du nouveau cours de robotique mobile en M1 ainsi que pour les Bureaux d'étude de robotique en M2.

Le financement a été accepté par le centre de ressources de l'EEA, et la salle de TP 303 du bâtiment A1 sera modifiée au premier semestre 2022 pour préparer la réception de l'arène de 5mx5mx2.5m et notamment démarrer des projets de L3 et M1 dès janvier 2023.

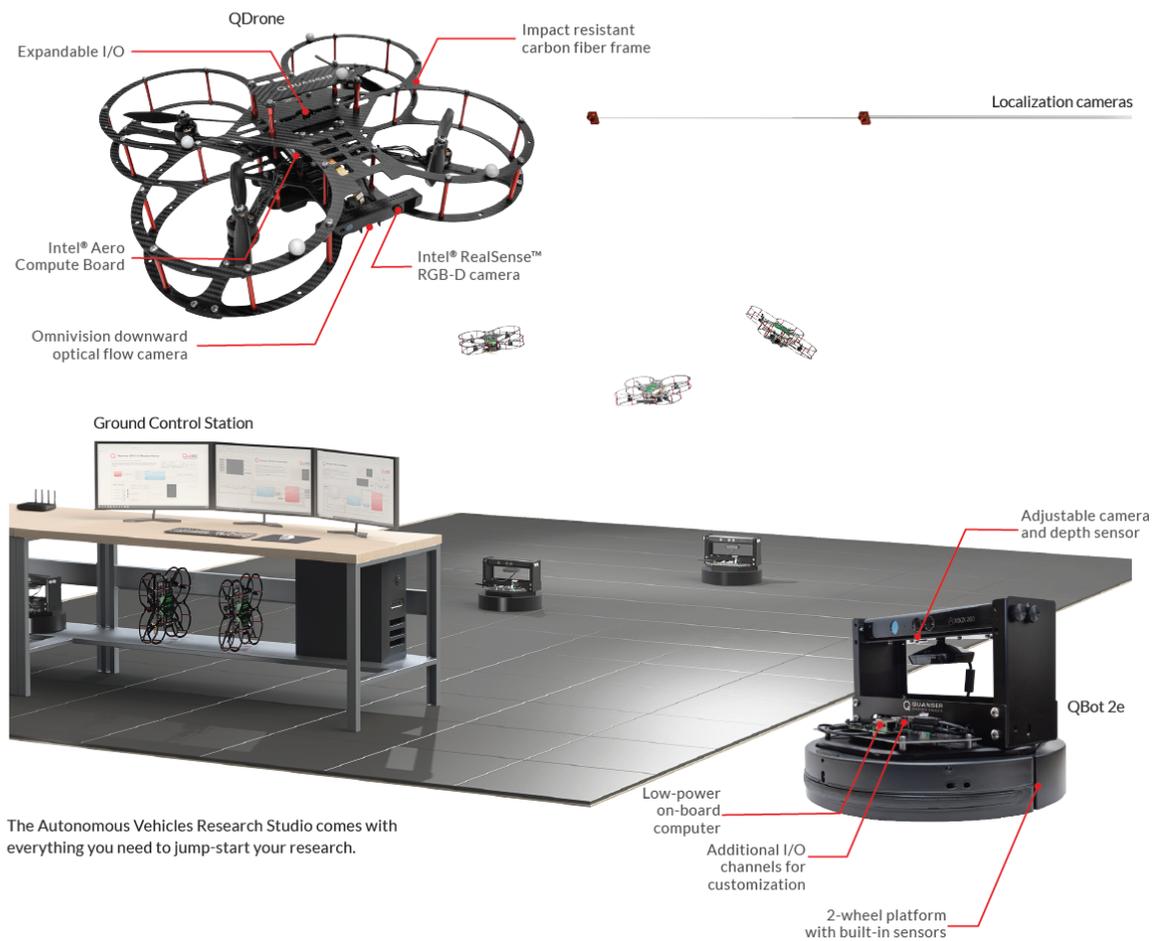


FIGURE 3.7: Station de recherche sur le véhicule autonome

### 3.4.3 CMI

Notre mention de master ISC est la seule des 3 mentions de masters de l'UF SDI qui ne propose pas de CMI (Cursus Master en Ingénierie). Ce cursus est une formation universitaire proposée en 5 ans et repose sur le respect d'un référentiel national proposé par le Réseau Figure (<https://reseau-figure.fr>). Cette formation est fondée sur le modèle international du Master of Engineering avec des enseignements dispensés par des professionnels du secteur industriel concerné et par des enseignants-chercheurs et des chercheurs des laboratoires d'appui.

Nous avons toujours constaté une baisse d'effectifs notamment entre la L3 et nos M1 (SE et AM2AS). D'autre part, en tant que responsable de la Communication à l'UFSDI, lors des Journées Portes Ouvertes des lycéens de l'Université de Bordeaux, les CMI représentent plus de 80% des attraites des lycéens par rapport aux formations initiales classiques.

Les atouts du CMI permettent d'avoir une cohérence globale de la formation, un lien fort avec la recherche et l'innovation, la pertinence des qualifications par rapport aux besoins des

entreprises et la valorisation de l'ouverture sociétal/culturel et à l'international. Ce cursus doit être adossé à une formation de licence et de master existants (voir figure 3.8) avec une immersion professionnelle plus soutenue (voir figure 3.9).

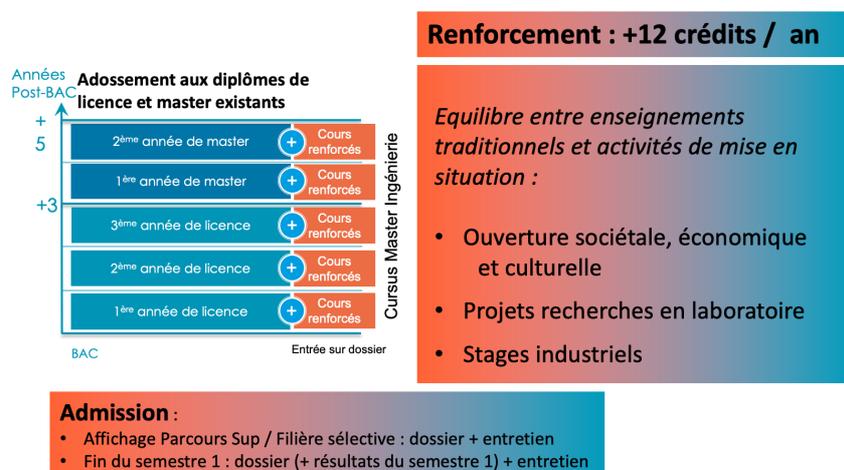


FIGURE 3.8: CMI intégré dans l'offre de formation

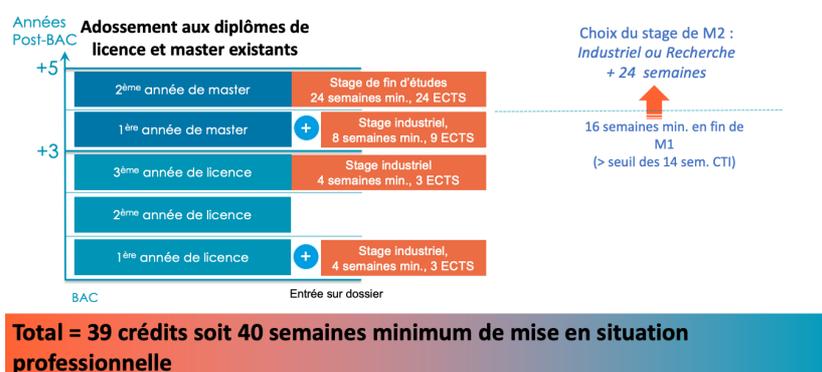


FIGURE 3.9: Mise en situation professionnelle renforcée

Enfin, j'ai sollicité plus de 80 industriels (ceux du cluster Aquitaine Robotics lancé par la Région Nouvelle-Aquitaine en 2013 (<https://www.aquitaine-robotics.com>) ainsi que ceux qui ont proposé des stages en M2 depuis 2010). Il s'avère que les industriels sont fortement demandeurs d'une formation tournant autour de la robotique car aucune formation actuelle ne propose de compétences suffisamment complète. En effet, les compétences souhaitées sont autour de la mécanique, l'électronique, l'automatique, les automates programmables, l'informatique, la vision/perception, la performance industrielle, la logistique,...

J'avais réalisé une présentation lors de l'AG du cluster Aquitaine robotics (12 avril 2019) car lors de mon sondage, le président du cluster m'avait invité à faire une présentation de ce CMI. J'ai également présenter ma proposition de CMI lors d'une réunion de mention de master ISC

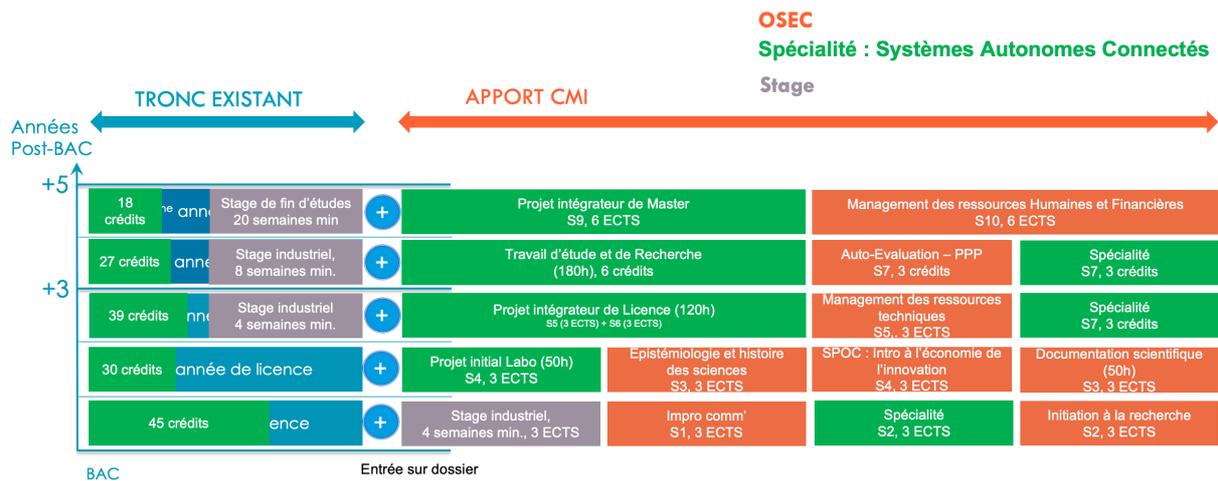


FIGURE 3.10: Proposition de maquette du CMI

(30 avril 2019). Enfin, étant donné qu'il fallait le soutien du laboratoire, j'ai également présenté mon projet de Yann Deval, directeur du laboratoire IMS (07 juin 2019). Étant donné qu'un CMI ne peut se monter qu'avec le soutien de l'équipe pédagogique, je devais convaincre mes collègues en EEA de mon projet. Il s'avère que mes collègues en électronique sont favorables à un CMI mais qu'il y a de nombreux chantiers d'amélioration et de restructuration qui sont en cours dans le parcours SE (Systèmes Electroniques). Nous avons convergé vers la thématique des **Systèmes Autonomes Connectés**.

Le projet de CMI a été mis en veille depuis la pandémie du COVID-19, mais je souhaite poursuivre ce chantier et le mettre en exécution lors de la prochaine accréditation (2022-2026). J'ai d'ailleurs fait une proposition de maquette (voir figure 3.10) sur laquelle 3 parcours de master pourront être proposés dans ce CMI, à savoir AM2AS, SE et GILOG, d'où ma volonté de mettre en place des cours sur la robotique mobile ou encore sur le véhicule autonome.

#### 3.4.4 Développement à l'international

À l'heure actuelle, chaque année en M2 AM2AS, j'ai 1 ou 2 étudiants qui viennent suivre cette formation par programme d'échanges (ERASMUS+ (de l'Europe (Allemagne, Espagne, Portugal,...)) ou MEXFITEC (avec l'Universidad Autónoma de Ciudad Juárez de Mexico, Mexique)), mais qui parlent en français.

Divers programmes (UB Graduate School, Erasmus +, Assests+) de l'université de Bordeaux permettent de s'ouvrir à un public d'étudiants plus large. Cette ouverture ne sera possible que si les cours proposés sont en anglais.

Pour l'instant, j'ai proposé avec mes collègues en automatique un calendrier pour basculer 70% de nos cours en anglais à l'horizon 2024. Depuis mars 2021, je suis en relation avec M.

François-Xavier Mortreuil, attaché des Coopérations Académique et Scientifique avec l'ambassade de France et l'Alliance Française de l'Inde pour établir un programme d'échange avec des universités et des Instituts de Technologies (IIT Madras, IIT Vellore, IIT Bangalore, Veltech) du sud de l'Inde.

D'autre part, cette collaboration franco-indienne doit se voir comme un tout : mobilité d'étudiants (échanges bilatéraux) ainsi que mobilité de chercheurs. En effet, ce programme d'échange ne pourra se développer que si les cours proposés seront effectivement en anglais.

Deuxième partie

Activités de Recherche



# Introduction à la deuxième partie

## Structure d'accueil et contexte

La thématique de recherche de l'équipe CRONE (Commande - Robotique - Ordres Non entiers) du Groupe Automatique du laboratoire IMS - UMR 5218 CNRS, porte sur la thématique des "Systèmes à dérivées non entières". Cette thématique de recherche a été initiée en 1975 par Alain Oustaloup et relève de la **dérivation non entière** en tant qu'*opérateur et outil de modélisation, sa synthèse étendue au corps des complexes ainsi que ses applications dans les sciences pour l'ingénieur*. Plus spécifiquement, les axes de recherche de l'équipe CRONE portent sur l'application de la dérivaison non entière en théorie des systèmes, en automatique à travers la modélisation par modèle non entier, l'identification par modèle non entier et la commande robuste Crone (abréviation de Commande Robuste d'Ordre Non Entier) et enfin, en robotique à travers la planification de trajectoire, l'isolation vibratoire et la génération de consigne et de commande.

L'opérateur de dérivaison non entière (réelle ou complexe) possède de nombreux atouts à savoir la **propriété de mémoire longue**, ce qui lui permet de bien décrire les phénomènes de diffusion (thermique, électrochimique, biologique,...) ainsi que **la propriété de compacité paramétrique** qui constitue ainsi l'outil mathématique par excellence pour modéliser avec peu de paramètres, un grand nombre de phénomènes de diffusion relevant tout aussi bien des sciences pour l'ingénieur que des sciences biologiques. De plus, l'opérateur de dérivaison non entière **généralise** les opérateurs de dérivaison "entière" et est un outil de synthèse très efficace dans le domaine de l'Automatique (en identification, commande robuste, planification de trajectoire, génération de consigne et de commande, ...).

L'équipe CRONE est attachée à développer des fondements théoriques déterminants, à les capitaliser et à les diffuser au travers du développement de la toolbox Crone, puis, par souci applicatif, à les concrétiser par des transferts technologiques relevant d'une véritable valorisation de la recherche amont et partenariale.

---

## Résumé de mes activités de recherche

En 2006, j'ai réalisé ma troisième année d'école d'ingénieur de l'ENSEIRB en échange à l'Ecole Polytechnique Montréal (Canada) en parallèle du Master Recherche AM2AS à l'Université Bordeaux 1. Mon stage de recherche réalisé au Département Génie Mécanique de l'Ecole Polytechnique a porté sur les systèmes linéaires à retard sur la commande et l'état et m'a donné l'attrait pour la recherche fondamentale en automatique.

J'ai effectué ma thèse de doctorat au laboratoire IMS/Univ. Bordeaux 1, sur l'identification par modèle non entier et la poursuite robuste de trajectoire par platitude, soutenue en novembre 2010. L'année suivante, en 2011, j'ai été recruté en tant que maître de conférences à l'université de Bordeaux au sein de la même équipe de recherche.

Mes activités de recherche s'articulent autour de la dérivation non entière en tant qu'opérateur et outil de modélisation, mais également en tant qu'outil en commande et en planification de trajectoire. Plus précisément, je m'intéresse :

- aux aspects fondamentaux liés à la **théorie des systèmes** à dérivées non entières notamment à l'extension de la platitude
- aux aspects méthodologiques liés à la **planification de trajectoire** (par optimisation multi-critère de trajectoire (2D et 3D) pour établir de la génération de consigne et de commande, pour l'évitement d'obstacle et la replanification de trajectoire)
- aux aspects méthodologiques liés à la **modélisation des systèmes non entiers** (modélisation des transferts thermiques dans les poumons, modélisation du système climatique terrestre et modélisation des turbulences de vent pour les antennes)
- aux aspects méthodologiques liés à l'**identification des systèmes dynamiques** par modèle non entier (systèmes non commensurables, en boucle fermée, de systèmes multivariables, en temps-réel)
- aux aspects applicatifs dans le domaine du **véhicule autonome** (2D pour la voiture avec notamment le Groupe PSA et 3D pour le drone avec le cluster Sysnum), dans le domaine **biologique** (modélisation des transferts thermiques), dans le domaine **climatique** (modélisation du système climatique terrestre et modélisation des turbulences de vent avec Safran Data System), dans le domaine **aéronautique** (identification et commande d'un turbofan développé par Price Induction, aujourd'hui racheté par Safran)
- et à la capitalisation du savoir-faire à travers le développement de la version orientée objet de la **toolbox CRONE** dédiée à la modélisation et à l'identification des systèmes.

Cette deuxième partie du manuscrit est consacrée à une synthèse de mes contributions et à la présentation de différents axes de recherche pour mes travaux à venir. Le chapitre 4 présente mes différentes contributions en théorie des systèmes et en planification de trajectoire. Le chapitre 5 concerne mes contributions en modélisation et en identification des systèmes dynamiques basés sur les modèles non entiers. Enfin, le chapitre 6 est consacré à la présentation de différentes perspectives de recherche que je souhaite mener dans ces deux thématiques de recherche.

## Chapitre 4

# Contributions à la théorie des systèmes et en planification de trajectoire

---

<b>4.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>89</b>
<b>4.2</b>	<b>Contributions à la théorie des systèmes non entier pour la platitude des systèmes non entiers linéaires</b>	<b>89</b>
4.2.1	Platitude fractionnaire	90
4.2.2	0-platitude fractionnaire	92
4.2.3	Application à un système thermique bidimensionnel	93
<b>4.3</b>	<b>Contributions en planification de trajectoire</b>	<b>98</b>
4.3.1	Contribution à la planification de trajectoire par champs de potentiel artificiel (blocs 2 et 3 de la figure 4.2)	99
4.3.2	Contribution à l'optimisation multi-critère de trajectoire (bloc 1 de la figure 4.2)	109
4.3.3	Planification prédictive et réactive	122
<b>4.4</b>	<b>Conclusion</b>	<b>131</b>

---



## 4.1 Introduction

Mes contributions en théorie des systèmes et plus particulièrement en planification de trajectoire par platitude sont décrites. Après avoir introduit la notion de matrices de définition et de matrice hyper-régulière pour les systèmes fractionnairement plats, j'ai proposé plusieurs théorèmes et algorithmes pour la caractérisation des sorties plates de systèmes non entiers avec l'application à des systèmes de diffusion thermique.

Ensuite, je me suis intéressé à la planification de trajectoire de systèmes autonomes en 2D dans un premier temps, puis en 3D au travers des champs de potentiels artificiels : le champ de potentiel attractif peut se réinterpréter comme une boucle de commande au travers d'une commande robuste, alors que diverses propositions de champs de potentiels répulsifs au travers de la dérivation non entière ont été introduits afin d'associer une notion de dangerosité à un obstacle.

Les trajectoires issus des champs de potentiels sont purement réactives à la cible et aux obstacles. Par conséquent, ces trajectoires sont saccadées et peuvent ne pas être confortables pour les usagers. Il convient alors d'établir une génération de consigne de référence au travers d'une optimisation multi-critère (distance, temps, confort, consommation énergétique, risque de collision). Pour cela, nous avons proposé de combiner l'algorithme génétique avec les champs de potentiel pour proposer de nouvelles références qui prennent également en compte les contraintes du véhicule concerné (vitesses et accélérations maximales, encombrement,...) mais également les vitesses et direction des obstacles mobiles. L'intérêt d'une telle optimisation est que dans un cas idéal où tout se passe exactement comme prévu, la consigne de référence est suffisante par elle-même pour amener le véhicule à la cible choisie. En pratique, il est clair que les imprévus sont nombreux : un piéton qui traverse, un obstacle qui change de vitesse voire de direction,... Le champ de potentiel répulsif va pouvoir justement modifier la trajectoire de notre véhicule afin de garder la réactivité et d'éviter une collision à un obstacle.

Pour finir, dans un contexte urbain où une replanification de trajectoire doit être recalculée pour éviter une collision à un obstacle, notamment lors d'une manœuvre réalisée dans une intersection, des propositions ont été élaborées pour élaborer une planification prédictive et réactive de chemin et de vitesse dans un environnement urbain en utilisant une optimisation par des courbes de Bézier. Ces résultats ont été validés en simulation sous le logiciel SCNAeR avec notamment une planification de vitesse.

## 4.2 Contributions à la théorie des systèmes non entiers pour la platitude des systèmes non entiers linéaires

Cette section a été initialement proposée dans [E-22] puis après un premier développement mathématique dans [A-14], s'est concrétisée dans [A-15].

Considérons un système non entier linéaire donné par la pseudo-représentation d'état suivante :

$$Ax = Bu \quad (4.1)$$

avec, pour pseudo-état (ou état partiel),  $x$  de dimension  $n$ , d'entrée  $u$  de dimension  $m$ ,  $A \in \mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]^{n \times n}$  et  $B \in \mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]^{n \times m}$ .  $B$  est supposé être de rang  $m$ , avec  $1 \leq m \leq n$ . Pour le système (4.1), on considère (voir *e.g.* [50, 66, 2]) :

- son *comportement*  $\ker \begin{bmatrix} A & -B \end{bmatrix}$ , où son noyau est pris respectivement dans l'espace  $\mathfrak{H}_a$  défini dans (A.16), i.e. l'ensemble  $\left\{ \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} \in (\mathfrak{H}_a)^{n+m} \mid \begin{bmatrix} A & -B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} = 0 \right\}$ ;
- et son *module de système*  $\mathfrak{M}_{A,B}$ , i.e. le *module quotient*

$$\mathfrak{M}_{A,B} = \mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]^{1 \times (n+m)} / \mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]^{1 \times n} \begin{bmatrix} A & -B \end{bmatrix}, \quad (4.2)$$

où  $\mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]^{1 \times (n+m)}$  est l'ensemble des vecteurs lignes avec composantes dans  $\mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]$  et où  $\mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]^{1 \times n} \begin{bmatrix} A & -B \end{bmatrix}$  est le module généré par les lignes de la matrice  $\begin{bmatrix} A & -B \end{bmatrix}$  de dimension  $n \times (n+m)$ .

Selon [49],  $\mathfrak{M}_{A,B}$  peut être décomposé en une somme directe :  $\mathfrak{M}_{A,B} = \mathcal{T} \oplus \mathcal{F}$  où le module (uniquement défini)  $\mathcal{T}$  est *torsion* et  $\mathcal{F}$  est *libre*.  $\mathcal{F}$  est unique à un isomorphisme près. Aussi, le système est dit  $F$ -commandable si et seulement si  $\mathcal{T} = \{0\}$ , ou en d'autres termes, si et seulement si  $\mathfrak{M}_{A,B}$  est libre.

### 4.2.1 Platitude fractionnaire

On suppose que la matrice  $F \triangleq \begin{bmatrix} A & -B \end{bmatrix} \in \mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]^{n \times (n+m)}$  est de plein rang ligne (à gauche). On note également par  $\mathfrak{M}_F \triangleq \mathfrak{M}_{A,B}$  le module du système pour des raisons de simplicité. Le système (4.1) s'écrit alors :

$$F \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} = 0. \quad (4.3)$$

Notre définition de **platitude fractionnaire** est fondée sur la notion de *matrices de définition* dans l'esprit de [2].

**Définition 4.2.1** (Matrices de définition). *Le système (4.3) est appelé **fractionnairement plat** si, et seulement si, il existe des matrices  $P \in \mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]^{m \times (n+m)}$  et  $Q \in \mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]^{(n+m) \times m}$  telles que*

$$Q(\mathfrak{H}_a)^m = \ker F \quad \text{et} \quad PQ = I_m. \quad (4.4)$$

En d'autres termes, il existe une matrice  $P$  avec inverse à droite  $Q$  sur l'anneau  $\mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]$  telle que, pour tout  $(x, u)$  satisfaisant  $F \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} = 0$ , on a  $y = P \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix}$  et  $\begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} = Qy$ . La variable  $y$ , prenant ses valeurs dans  $(\mathfrak{H}_a)^m$ , est appelée *sortie fractionnairement plate* et les matrices  $P$  et  $Q$  sont appelées *matrices de définitions*.

On obtient alors le résultat principal suivant :

**Théorème 4.2.2.** *Les trois formulations sont équivalentes :*

- (i) le système (4.3) est fractionnairement plat ;
- (ii) le module de système  $\mathfrak{M}_F$  est libre ;
- (iii) la matrice  $F$  est hyper-régulière sur  $\mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]$ . ■

*Démonstration.* (i)  $\implies$  (iii) En assumant que le système (4.3) est fractionnairement plat, selon la Définition 4.2.1, il existe  $P$  et  $Q$  telles que  $Q(\mathfrak{H}_a)^m = \ker F$  (ou  $FQ = 0$ ) et  $PQ = I_m$ . Selon la décomposition des morphismes (voir *e.g.* [36, A I, Théorème 3 p. 37]), puisque  $Q$  est dedans par définition, il existe un isomorphisme de  $\mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]$ -modules  $R := (\mathfrak{H}_a)^{n+m} / \ker F \mapsto F(\mathfrak{H}_a)^{n+m}$  tel que  $F \begin{pmatrix} R & Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_n & 0_{n \times m} \end{pmatrix}$ , ce qui, ensemble avec le fait que  $R \in GL_n(\mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma])$  et que  $Q$  a un inverse à droite, prouve que  $F$  est hyper-régulière.

(iii)  $\implies$  (ii) Si  $F$  est hyper-régulière, par la Propriété A.6.7, il existe  $T \in GL_{n+m}(\mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma])$  telle que  $FT = \begin{pmatrix} I_n & 0_{n \times m} \end{pmatrix}$ . Donc le module  $\mathfrak{M}_F$  est équivalent au module  $\mathfrak{M}_{FT} \simeq \mathfrak{M} \begin{pmatrix} I_n & 0_{n \times m} \end{pmatrix}$  qui est en effet libre.

(ii)  $\implies$  (i) Supposons que  $\mathfrak{M}_F$  est libre. Selon la taille de  $F$ , elle admet  $m$  variables indépendantes  $y_1, \dots, y_m \in \mathfrak{H}_a$  comme base, que l'on note  $y = (y_1, \dots, y_m)^T$ . Si  $\xi$  est un élément arbitraire de  $\mathfrak{M}_F$ , on a en effet  $y = T\xi$  et  $\xi = Sy$  pour des matrices unimodulaires convenables  $T$  et  $S$ . On obtient alors  $TS = I_m$  et, puisque, par construction,  $\xi = U \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix}$  pour un certain  $\begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix}$  satisfaisant  $F \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} = 0$ , *i.e.*  $U^{-1}\xi \in \ker F$ , on obtient  $U^{-1}S(\mathfrak{H}_a)^m = \ker F$ , prouvant ainsi que le système (4.3) est fractionnairement plat avec  $P = TU$  et  $Q = U^{-1}S$ . □

**Remarque 4.2.3.** *Etant donné (ii), un système non entier linéaire est plat si et seulement si il est  $F$ -commandable (voir la section précédente).*

L'algorithme 1 suivant permet de calculer les sorties fractionnairement plates :

---

**Algorithme 1** Calcul des sorties fractionnairement plates

---

**Entrée :** La matrice  $F = \begin{bmatrix} A & -B \end{bmatrix} \in \mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]^{n \times (n+m)}$

**Sortie :** Matrices des définitions  $P$  et  $Q$ , *i.e.* satisfaisant (4.4)

**Procédure :**

1. Utiliser la réduction de colonne pour vérifier si  $F$  est hyper-régulière. Sinon, retourner "échec".
  2. Sinon, trouver  $W \in GL_{n+m}(\mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma])$ , selon la Propriété A.6.7 (i), telle que  $FW = [I_n, 0_{n \times m}]$ .
  3. Les matrices de définition sont données par :
 
$$Q \triangleq W \begin{bmatrix} 0_{n \times m} \\ I_m \end{bmatrix} \text{ et } P \triangleq [0_{m \times n}, I_m] W^{-1}.$$
  4. Retourner  $P, Q$  et une sortie fractionnairement plate donnée par  $y = P \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix}$ .
-

On voit directement que cet algorithme donne  $FQ(\mathfrak{H}_a)^m = 0$  et que  $PQ = I_m$ , ce qui est précisément (4.4). De plus,  $x = [I_n, 0_{n \times m}]Qy$  et  $u = [0_{m \times n}, I_m]Qy$  satisfont identiquement (4.3).

### 4.2.2 0-platitude fractionnaire

En pratique, il peut être plus commode de distinguer l'état de l'entrée, et pour des systèmes linéaires, invariants dans le temps, et commandable, un ensemble de sorties plates peut être obtenu via la forme canonique de Brunovský (voir *e.g.* [37]) et ne dépend pas de l'entrée  $u$ . Cette propriété appelée *0-platitude fractionnaire*, donne : il existe  $P_1 \in \mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]^{m \times n}$  et  $Q_1 \in \mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]^{n \times m}$  telles que  $y = P_1x$ ,  $x = Q_1y$  et  $P_1Q_1 = I_m$ .

**Définition 4.2.4** (0-platitude). — *Un système est appelé fractionnairement  $k$ -plat, avec  $k \geq 1$ , si et seulement si le degré maximal de la matrice  $P \begin{bmatrix} 0_{n,m} \\ I_m \end{bmatrix}$  est égal à  $k - 1$ . Dans ce cas, la sortie  $y$  est dite sortie fractionnairement  $k$ -plate.*

— *Il est dit fractionnairement 0-plat si  $P \begin{bmatrix} 0_{n,m} \\ I_m \end{bmatrix} = 0_m$  et la sortie  $y$  est appelée sortie fractionnairement 0-plat.*

La 0-platitude fractionnaire est donc équivalente à l'existence de  $P$  et  $Q$  comme dans la Définition 4.2.1 telles que  $P = \begin{bmatrix} P_1 & 0_{m,n} \end{bmatrix}$  avec  $P_1 \in \mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]^{m \times n}$  et  $P_1Q_1 = I_m$  où  $Q_1 \triangleq \begin{bmatrix} I_n & 0_{n,m} \end{bmatrix} Q$ .

**Lemme 4.2.5** (Elimination). *Si  $B$  est hyper-régulière, il existe une matrice unimodulaire  $M \in \mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]^{n \times n}$  telle que  $MB = \begin{bmatrix} I_m \\ 0_{(n-m) \times m} \end{bmatrix}$ . De plus, il existe des matrices  $\tilde{F} \in \mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]^{(n-m) \times n}$  et  $R \in \mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]^{m \times n}$  telles que le système (4.1) est équivalent à  $Rx = u$ ,  $\tilde{F}x = 0$ . ■*

*Démonstration.* Soit  $MA \triangleq \begin{bmatrix} R \\ \tilde{F} \end{bmatrix}$  avec  $R$  de taille  $m \times n$  et  $\tilde{F}$  de taille  $(n - m) \times n$ , on a :

$$\begin{bmatrix} R \\ \tilde{F} \end{bmatrix} x = MAx = MBu = \begin{bmatrix} I_m \\ 0_{(n-m) \times m} \end{bmatrix} u. \quad \square$$

**Théorème 4.2.6.** *Si  $B$  est hyper-régulière, les affirmations suivantes sont équivalentes :*

- (i) le système (4.1) est fractionnairement 0-plat ;
- (ii) le module de système  $\mathfrak{M}_{\tilde{F}} \triangleq \mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]^{1 \times n} / \mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]^{1 \times (n-m)} \tilde{F}$  est libre, avec  $\tilde{F}$  défini dans le Lemma 4.2.5 ;
- (iii) la matrice  $\tilde{F}$  est hyper-régulière sur  $\mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]$ . ■

*Démonstration.* Ceci est la conséquence immédiate du Théorème 4.2.2. □

---

**Algorithme 2** Calcul des sorties 0-plates

---

**Entrée :** Les matrices  $A$  et  $B$  du système (4.1) avec  $B$  hyper-régulière.

**Sortie :** Matrices de définition  $P$  et  $Q$ , i.e. satisfaisant la Définition 4.4, avec  $P = \begin{bmatrix} P_1 & 0_{m,m} \end{bmatrix}$ ,  $P_1 \in \mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]^{m \times n}$ ,  $Q_1 \triangleq \begin{bmatrix} I_n & 0_{n,m} \end{bmatrix} Q$  et  $P_1 Q_1 = I_m$

**Procédure :**

1. Vérifier, en utilisant la réduction de ligne, si  $B$  est hyper-régulière. Sinon, retourner “échec”.
  2. Sinon, trouver  $M \in GL_n(\mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma])$  telle que  $MB = \begin{bmatrix} I_m \\ 0_{(n-m) \times m} \end{bmatrix}$ .
  3. Avec  $M$ , obtenir  $R \in \mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]^{m \times n}$  et  $\tilde{F} \in \mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]^{(n-m) \times n}$ , selon le Lemme 4.2.5, par :  $MA = \begin{bmatrix} R \\ \tilde{F} \end{bmatrix}$ .
  4. Appliquer l’Algorithme 1 à  $\tilde{F}$ , qui retourne  $P_1$  et  $Q_1$ .
  5. Poser  $P = \begin{bmatrix} P_1 & 0 \end{bmatrix}$  et  $Q = \begin{bmatrix} Q_1 \\ RQ_1 \end{bmatrix}$ .
- 

L’Algorithme 1 est facilement réadapté pour calculer les sorties fractionnairement 0-plates (voir l’Algorithme 2).

Pour résumer, l’Algorithme 2 donne une sortie fractionnairement 0-plate  $y$  par  $y = P_1 x$ . De plus,  $x = Q_1 y$  et  $u = RQ_1 y$  satisfont identiquement  $Ax = Bu$ .

### 4.2.3 Application à un système thermique bidimensionnel

Le modèle considéré traite de la diffusion d’un flux de chaleur sur une plaque métallique en 2D dont la modélisation est décrite en section 5.2.1.

#### 4.2.3.1 Calcul des sorties plates

Appliquons l’Algorithme 2. Puisque chaque matrice  $B_i$  hyper-régulière est dans sa forme de Smith, on introduit les matrices  $R_i \in \mathbb{R} \left[ \mathbf{D}_a^{\frac{1}{2}} \right]^{1 \times (\mathbf{K}+1)}$  et  $\tilde{F}_i \in \mathbb{R} \left[ \mathbf{D}_a^{\frac{1}{2}} \right]^{\mathbf{K} \times (\mathbf{K}+1)}$  telles que :

$$A_i = \begin{bmatrix} R_i \\ \tilde{F}_i \end{bmatrix} \text{ avec}$$

$$R_i = \left[ \mathbf{D}_a^{\frac{1}{2}} + |a'_{i,\mathbf{K}-1}|, |a'_{i,\mathbf{K}-2}|, \dots, |a'_{i,0}|, 0 \right],$$

$$\tilde{F}_i = \begin{bmatrix} -1 & \mathbf{D}_a^{\frac{1}{2}} & & 0 \\ & \ddots & \ddots & \\ 0 & & -1 & \mathbf{D}_a^{\frac{1}{2}} \end{bmatrix}, \quad i = 0, \dots, \mathbf{I}.$$

Pour obtenir la forme implicite requise, on considère la matrice unimodulaire

$$M = \begin{bmatrix} \text{diag}\{M_{R,i}, i = 0, \dots, \mathbf{I}\} \\ \text{diag}\{M_{F,i}, i = 0, \dots, \mathbf{I}\} \end{bmatrix}$$

avec  $M_{R,i} = [1, 0_{1,\mathbf{K}}]$  et  $M_{F,i} = [0_{\mathbf{K},1}, I_{\mathbf{K}}]$  pour tout  $i = 0, \dots, \mathbf{I}$  et on peut vérifier que

$$MA = \begin{bmatrix} \text{diag}\{R_i, i = 0, \dots, \mathbf{I}\} \\ \text{diag}\{\tilde{F}_i, i = 0, \dots, \mathbf{I}\} \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} R \\ \tilde{F} \end{bmatrix},$$

$\tilde{F}$  étant hyper-régulière, et ainsi le système (5.15)-(5.16)-(5.17)-(5.18) est fractionnairement 0-plat.

En appliquant l'Algorithme 1 à  $\tilde{F}$ , on calcule la matrice triangulaire supérieure  $W \in GL_{(\mathbf{I}+1)(\mathbf{K}+1)}(\mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma])$  satisfaisant  $\tilde{F}W = \begin{bmatrix} I_{\mathbf{K}(\mathbf{I}+1)} & 0_{\mathbf{K}(\mathbf{I}+1) \times (\mathbf{I}+1)} \end{bmatrix}$ ,

$$W = \text{diag}\{W_i, i = 0, \dots, \mathbf{I}\}, \text{ avec } W_i \triangleq \begin{bmatrix} -1 & -\mathbf{D}_a^{\frac{1}{2}} & -\mathbf{D}_a^1 & \dots & -\mathbf{D}_a^{\frac{\mathbf{K}}{2}} \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ & & \ddots & \ddots & -\mathbf{D}_a^1 \\ & & & \ddots & -\mathbf{D}_a^{\frac{1}{2}} \\ 0 & & & & -1 \end{bmatrix}, i = 0, \dots, \mathbf{I}.$$

et son inverse, également triangulaire supérieure,

$$W^{-1} = \text{diag}\{W_i^{-1}, i = 0, \dots, \mathbf{I}\}, \text{ avec } W_i^{-1} \triangleq \begin{bmatrix} -1 & \mathbf{D}_a^{\frac{1}{2}} & & & 0 \\ & \ddots & \ddots & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & \ddots & \mathbf{D}_a^{\frac{1}{2}} \\ 0 & & & & -1 \end{bmatrix}, i = 0, \dots, \mathbf{I}.$$

Par conséquent, en introduisant  $S_i = \begin{bmatrix} 0_{\mathbf{K} \times 1} \\ 1 \end{bmatrix}$ ,  $Q_{1,i} = \begin{bmatrix} -\mathbf{D}_a^{\frac{\mathbf{K}}{2}} \\ \vdots \\ -\mathbf{D}_a^{\frac{1}{2}} \\ -1 \end{bmatrix}$  et  $P_{1,i} = \begin{bmatrix} 0_{1 \times \mathbf{K}} & 1 \end{bmatrix}$ , pour

$i = 0, \dots, \mathbf{I}$  :

$$Q_1 = W \text{diag}\{S_i\} = \text{diag}\{Q_{1,i}, i = 0, \dots, \mathbf{I}\},$$

$$P_1 = \text{diag}\{P_{1,i}\} W^{-1} = \text{diag}\{-P_{1,i}, i = 0, \dots, \mathbf{I}\},$$

et on obtient ainsi  $P_1 Q_1 = I_{\mathbf{I}+1}$ . Finalement, les matrices de définition  $P$  et  $Q$  sont :

$$P = \text{diag}\{[-P_{1,i}, 0], i = 0, \dots, \mathbf{I}\}, \quad Q = \begin{bmatrix} Q_1 \\ RQ_1 \end{bmatrix}$$

ce qui prouve que le système (5.15) est fractionnairement 0-plat et que la sortie fractionnairement plate  $Y$  est donnée par

$$Y = P_1 X = - \begin{bmatrix} X_{0,0} \\ \vdots \\ X_{\mathbf{I},0} \end{bmatrix},$$

$$U = RQ_1Y = \begin{bmatrix} -\sum_{k=0}^{\mathbf{K}} |a'_{i,k}| \mathbf{D}_a^{\frac{k+1}{2}} Y_0 \\ \vdots \\ -\sum_{k=0}^{\mathbf{K}} |a'_{i,k}| \mathbf{D}_a^{\frac{k+1}{2}} Y_I \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} T_{\mathbf{I},\mathbf{K}}(x_0, y_0, t) &= CX = CQ_1Y \\ &= -\sum_{i=0}^{\mathbf{I}} \frac{i+1}{\lambda} \sum_{k=0}^{\mathbf{K}} a'_{i,k} \mathbf{D}_a^{\frac{k}{2}} Y_i. \end{aligned} \quad (4.5)$$

En particulier,  $Y_i = -X_{i,0}$ ,  $i = 0, \dots, \mathbf{I}$ .

**Remarque 4.2.7.** Le système de dimension infinie (5.1)-(A.5), une fois exprimé dans le domaine spatial, peut être vu comme fractionnairement plat avec la suite infinie

$$Y(s) \triangleq (L_{x,1}(s)L_{y,1}(s), \dots, L_{x,i}(s)L_{y,i}(s), \dots)$$

comme sortie fractionnairement plate, puisque les transformées de Laplace  $\hat{T}(x_0, y_0, s)$  et  $\hat{\varphi}(y, s)$  peuvent être exprimées en fonction de  $Y(s)$  (voir ((5.7)-(5.9)). La sortie 0-plate (4.5) n'a pas d'interprétation physique en terme de variable originelle de l'équation de la chaleur.

**Remarque 4.2.8.** Les opérateurs de dérivation non entière apporte une simplification majeure dans la conception, bien que les aspects de convergence doivent être confirmés numériquement. On peut vérifier numériquement que la série  $\hat{T}_{\mathbf{I},\mathbf{K}}$  converge rapidement. Par conséquent, les ordres de troncature  $\mathbf{I}$  et  $\mathbf{K}$  peuvent être choisi suffisamment petit.

#### 4.2.3.2 Génération de mouvement

On définit un mouvement de température arrêt-arrêt au point  $x_0 = 0.045\text{m}$  et  $y_0 = 0.02\text{m}$  (voir figure 5.1) avec une montée de température de  $30^\circ\text{C}$  au-dessus de la température ambiante pour une durée totale  $t_f$ , avec les conditions :

$$\begin{aligned} T(x_0, y_0, 0) &\triangleq T_0 = 0, \\ T^{(l)}(x_0, y_0, 0) &= 0, \quad l = 1, \dots, \mathbf{L}, \\ T(x_0, y_0, t_f) &\triangleq T_f = 30, \\ T^{(l)}(x_0, y_0, t_f) &= 0, \quad l = 1, \dots, \mathbf{L}, \end{aligned} \quad (4.6)$$

avec  $\mathbf{L}$  à déterminer.

La température désirée  $T_{\mathbf{I},\mathbf{K}}(x_0, y_0, t)$  et la commande  $U$  sont à déduire de (4.5), sans avoir à intégrer le système (5.15), en transposant les conditions (4.6) en conditions sur les sorties fractionnairement plates  $Y_i$ ,  $i = 0, \dots, \mathbf{I}$ , en assumant que leur mouvement est donné par un polynôme en  $t$  :

$$Y_i(t) \triangleq \sum_{j=0}^{\mathbf{r}} \eta_{i,j} \left(\frac{t}{t_f}\right)^j \quad (4.7)$$

avec un entier  $\mathbf{r}$  et des coefficients réels  $\eta_{i,j}$ ,  $i = 0, \dots, \mathbf{I}$ ,  $j = 0, \dots, \mathbf{r}$  à déterminer.

On calcule les valeurs initiales et finales  $Y_i(0)$  et  $Y_i(t_f)$  en utilisant (4.5) et sachant que, pour  $t \geq 0$  :

$$\mathbf{D}_a^{\frac{k}{2}} t^j = \frac{\Gamma(j+1)}{\Gamma(j+1-\frac{k}{2})} t^{j-\frac{k}{2}}, \quad k = 0, \dots, \mathbf{K}, \quad j = 0, \dots, \mathbf{r}.$$

On suppose également que l'on peut identifier  $T(x_0, y_0, t)$  avec  $T_{\mathbf{I}, \mathbf{K}}(x_0, y_0, t)$ . Ainsi,

$$\begin{aligned} T(t) &\triangleq T(x_0, y_0, t) \approx T_{\mathbf{I}, \mathbf{K}}(x_0, y_0, t) = - \sum_{i=0}^{\mathbf{I}} \frac{i+1}{\lambda} \sum_{j=0}^{\mathbf{r}} \frac{\eta_{i,j}}{t_f^j} \sum_{k=0}^{\mathbf{K}} a'_{i,k} \frac{\Gamma(j+1)}{\Gamma(j+1-\frac{k}{2})} t^{j-\frac{k}{2}}, \\ T^{(l)}(t) &\approx T_{\mathbf{I}, \mathbf{K}}^{(l)}(x_0, y_0, t) = - \sum_{i=0}^{\mathbf{I}} \frac{i+1}{\lambda} \sum_{j=0}^{\mathbf{r}} \frac{\eta_{i,j}}{t_f^j} \sum_{k=0}^{\mathbf{K}} a'_{i,k} \frac{\Gamma(j+1)}{\Gamma(j+1-\frac{k}{2}-l)} t^{j-\frac{k}{2}-l}. \end{aligned}$$

Afin de satisfaire les conditions initiales (en  $t = 0$ ), les coefficients  $\eta_{i,j}$ , correspondant aux exposants négatifs ( $j - \frac{k}{2} - l < 0$ ), doivent disparaître. Donc,  $\eta_{i,j} = 0$  pour tout  $j < \frac{\mathbf{K}}{2} + \mathbf{L}$  et  $T$  donne :

$$T(t) = - \sum_{i=0}^{\mathbf{I}} \frac{i+1}{\lambda} \sum_{j=\lceil \frac{\mathbf{K}}{2} + \mathbf{L} \rceil}^{\mathbf{r}} \frac{\eta_{i,j}}{t_f^j} \sum_{k=0}^{\mathbf{K}} a'_{i,k} \frac{\Gamma(j+1)}{\Gamma(j+1-\frac{k}{2})} t^{j-\frac{k}{2}}.$$

Puisqu'il reste  $\mathbf{L} + 1$  conditions finales pour  $T^{(l)}(t_f)$ ,  $l = 0, \dots, \mathbf{L}$ ,  $\mathbf{r}$  doit satisfaire  $(\mathbf{r} - \lceil \frac{\mathbf{K}}{2} + \mathbf{L} \rceil + 1)(\mathbf{I} + 1) \geq 2(\mathbf{L} + 1)$ , ainsi

$$\mathbf{r} \geq 2 \frac{\mathbf{L} + 1}{\mathbf{I} + 1} + \left\lceil \frac{\mathbf{K}}{2} + \mathbf{L} \right\rceil - 1. \quad (4.8)$$

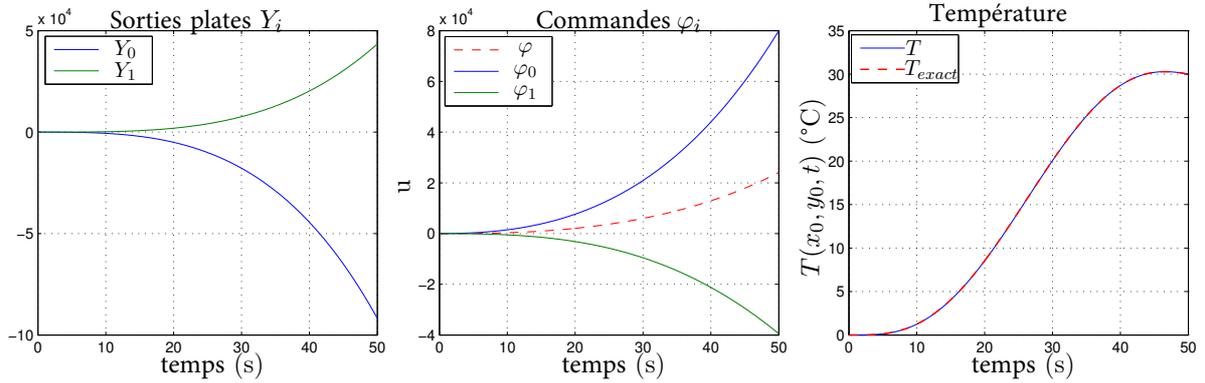


FIGURE 4.1: A gauche : sorties fractionnement plates  $Y_i$ ,  $i = 0, 1$ . Au centre : décomposition du flux de chaleur (commandes)  $\varphi_i(t)$ ,  $i = 0, 1$  avec la densité du flux de chaleur (rouge pointillé). A droite : mouvement de la température

On a alors à résoudre le système linéaire dans les coefficients  $\eta_{i,j}$ ,  $j = \lceil \frac{\mathbf{K}}{2} + \mathbf{L} \rceil, \dots, \mathbf{r}$ ,  $i = 0, \dots, \mathbf{I}$  :

$$T^{(l)}(t_f) = - \sum_{i=0}^{\mathbf{I}} \frac{i+1}{\lambda} \sum_{j=\lceil \frac{\mathbf{K}}{2} + \mathbf{L} \rceil}^{\mathbf{r}} \frac{\eta_{i,j}}{t_f^j} \sum_{k=0}^{\mathbf{K}} a'_{i,k} \times \frac{\Gamma(j+1)}{\Gamma(j+1-\frac{k}{2}-l)} t_f^{j-\frac{k}{2}-l} = 0, \quad (4.9)$$

$$T(t_f) = - \sum_{i=0}^{\mathbf{I}} \frac{i+1}{\lambda} \sum_{j=\lceil \frac{\mathbf{K}}{2} + \mathbf{L} \rceil}^{\mathbf{r}} \frac{\eta_{i,j}}{t_f^j} \sum_{k=0}^{\mathbf{K}} a'_{i,k} \times \frac{\Gamma(j+1)}{\Gamma(j+1 - \frac{k}{2})} t_f^{j - \frac{k}{2}} = T_f, \quad (4.10)$$

pour tout  $l = 1, \dots, \mathbf{L}$ , et insérer sa solution dans (4.7).

#### 4.2.3.3 Simulations

Les simulations sont présentées sur la figure 4.1 avec  $\alpha = 8.83 \times 10^{-5} m^2.s^{-1}$ ,  $\lambda = 210 W.m^{-1}.K^{-1}$  et  $t_f = 50s$ . On a choisi  $\mathbf{a} = 0$ ,  $\mathbf{K} = \mathbf{L} = 2$ ,  $\mathbf{I} = 1$  et  $\mathbf{r} = 5$ . Les coefficients  $a'_{i,k} = \frac{a_{i,k}}{|a_{i,3}|}$  avec  $a_{i,k} = \frac{(-1)^k (2\mathbf{K}-k)! \mathbf{K}!}{2\mathbf{K}! k! (\mathbf{K}-k)!} \left( \frac{x_0}{i+1} + y_0 \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{(i+1)^2}} \right)^k$  dans le système (4.9)-(4.10) sont donc :

$$\begin{aligned} a'_{0,1} &= 2.543 & a'_{0,2} &= -2.762 & a'_{0,3} &= 1 \\ a'_{1,1} &= 2.596 & a'_{1,2} &= -2.791 & a'_{1,3} &= 1, \end{aligned}$$

et les coefficients résultant  $\eta_{i,j}$ ,  $i = 0, 1$ ,  $j = 3, 4, 5$ , sont :

$$\begin{aligned} \eta_{0,3} &= -7.30.10^4 & \eta_{0,4} &= -1.13.10^3 & \eta_{0,5} &= -7.52.10^3 \\ \eta_{1,3} &= 1.84.10^4 & \eta_{1,4} &= 3.23.10^4 & \eta_{1,5} &= -7.33.10^3. \end{aligned}$$

On remarque que la durée  $t_f = 50s$  pour atteindre le point de coordonnées  $x_0 = 0.045m$  et  $y_0 = 0.02m$ , est petite comparée au temps de réponse du système. De plus, la densité de flux totale  $\varphi$  atteint  $2.10^4 W.m^{-2}$  (voir figure 4.1, au centre, en pointillé rouge) pour une augmentation de température de  $30^\circ C$  et reste raisonnable. Dans la figure 4.1 (à droite), la solution exacte de l'équation de la chaleur,  $T_{exact}$ , calculée en appliquant la transformée inverse de Laplace à (5.10), est tracée en pointillé rouge. En la comparant à la référence de mouvement  $T_{\mathbf{I},\mathbf{K}}$  (trait plein), on note que l'erreur entre ces deux températures reste très petite, à moins de  $0.02C$ , pendant le transitoire et converge vers 0, ce qui confirme la validité de notre approximation par modèle non entier, même par une troncature avec peu de termes (pour rappel  $\mathbf{K} = \mathbf{L} = 2$  et  $\mathbf{I} = 1$ ).

#### 4.2.3.4 Synthèse

Les développements théoriques sur la platitude fractionnaire ont permis les publications dans 2 revues [A-14, A-15] et une conférence internationale [E-22], et leur mise en application sur un banc d'essai constitué d'un barreau thermique soumis un flux de chaleur ont permis la publication à une revue [A-13].

### 4.3 Contributions en planification de trajectoire

La planification de trajectoire permet de trouver un chemin convenable tout en évitant des obstacles présents dans l'environnement. La navigation autonome est généralement divisée en trois niveaux (voir la figure 4.2) : la *perception et la localisation* le niveau stratégique), la *planification* (niveau tactique), et la *commande* (niveau opérationnel). Des revues complètes sur la planification de trajectoire des véhicules autonomes sont accessibles dans la littérature (voir [142, 57]). Pour un véhicule, la planification de trajectoire se traduit par trouver une trajectoire associée à un temps entre deux ou plusieurs lieux. En revanche, la poursuite de trajectoire concerne le suivi d'une trajectoire qui a été précédemment calculée. Le véhicule concernée sera appelé Ego-Vehicule (EGV) pour le distinguer des autres véhicules/obstacles de l'environnement. Dans le cadre du laboratoire commun OpenLab entre l'IMS et le Groupe PSA, ce dernier souhaitait développer leur thématique de recherche sur le véhicule autonome dont les différentes stratégies envisagées et dont les nouveaux concepts que j'ai été amenés à développer avec mes doctorants sont visibles sur la figure 4.2, notamment en environnement perturbé.

Les stratégies ont été développées sur le véhicule autonome terrestre, ainsi que sur le drone avec la collaboration avec le LaBRI.

Sur la figure 4.2 :

- le bloc 1 permet de faire de la génération de consigne (une optimisation multi-critère a été proposée dans [A-11] dans le cadre du véhicule autonome (2D) et dans le cadre d'un drone (3D)) ;
- les blocs 2 et 3 ont été développés dans le cadre de recherche des champs de potentiels attractifs [A-12] et répulsifs à la fois pour le véhicule autonome [A-10] et le drone [A-3] ;
- le bloc 5 a été pour l'instant réalisé que pour le véhicule autonome avec une génération de commande par platitude [A-10] ; il est en cours de réalisation pour le drone ;
- le bloc 6 concerne la modélisation du système considéré (soit un véhicule autonome qui a été fourni par l'OpenLab, soit un drone dont le modèle a été développé lors du stage de Master 2 Recherche de S. Abellaoui en 2020).

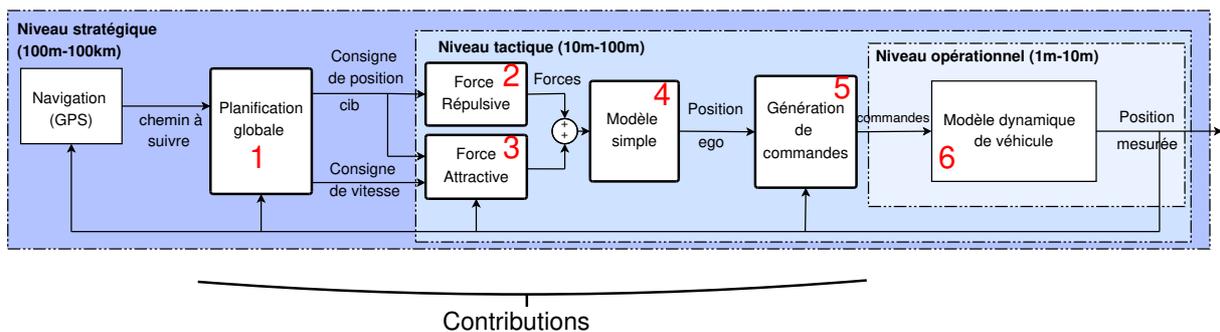


FIGURE 4.2: Stratégie et contributions apportées dans le cadre des systèmes autonomes

### 4.3.1 Contribution à la planification de trajectoire par champs de potentiel artificiel (blocs 2 et 3 de la figure 4.2)

Les obstacles peuvent être à la fois dynamiques ou statiques et une notion de dangerosité peut être nécessaire pour l'évitement d'obstacles de manière plus harmonieuse. La méthode des champs de potentiel artificiels (*Potential Fields* a été longuement étudiée depuis des décennies, (voir *e.g.* [62, 143], cependant, la plupart de ces méthodes sont pour des obstacles statiques ou ne prend aucune considération de la dangerosité des obstacles ou de leurs dynamiques. [55] ont introduit la dynamique des obstacles dans les champs de potentiel (PF pour *Potential Field* en anglais). Une nouvelle interprétation des PF a été introduite dans [A-12] pour donner un sens physique aux forces attractives et répulsives.

L'EGV peut présenter plusieurs incertitudes à la fois sur sa masse embarquée et les perturbations de l'environnement (vent, obstacles,...). Par exemple, lors d'une mission d'un EGV (véhicule ou drone) avec un moteur thermique où le carburant est consommé, la masse globale de l'EGV change. Ou encore, pour un drone de livraison, les charges peuvent comporter des variations de masse entre différents paquets et également en fonction des capteurs embarqués (lidar, caméra, capteur ultrasound,...) ce qui rend l'EGV sensible aux charges. De plus, en conditions extérieures, l'EGV peut subir des perturbations de vent, des obstacles ou encore des perturbations internes tels que des perturbations de courant des amplificateurs de puissance. Enfin, l'EGV peut travailler à différents points de fonctionnement en position ou en vitesse. Par conséquent, une réinterprétation directe du potentiel attractif de [55] en un simple proportionnel dérivé ne peut garantir une robustesse du degré de stabilité de l'EGV.

Le concept de la méthode des champs de potentiel est de remplir l'espace de travail du robot par des champs de potentiel dans lequel il est attiré par sa cible et repoussé par les obstacles (voir [64]). Cette méthode déterministe est particulièrement séduisante grâce à son analyse mathématique élégante et simple. Le PF prend en compte la vitesse et la position actuelles de l'obstacle en temps-réel, incluant ses mouvements imprévus. La figure 4.3 présente le principe des PF, où les forces exercées sur l'EGV sont représentées.

Deux types de PF sont présents : le potentiel attractif, représentant le besoin d'atteindre la cible et le PF répulsif, représentant la répulsion due à un obstacle. Les deux sont des visions du même phénomène : l'EGV suit la descente du gradient. Les PF attractifs et répulsifs sont générés en utilisant différentes approches, décrites dans la suite.

Les références de position et de vitesse sont fournies au champ de potentiel attractif, et agissent comme potentiel minimal, c'est-à-dire une cible attractive qui bouge selon la référence. Les forces répulsives issues des obstacles agissent comme des perturbations non rejetables dans la boucle de commande pour que l'EGV suive un potentiel minimal et évite ainsi les obstacles.

La méthode des PF est réactive et locale, et appartient au *niveau tactique* (voir les boîtes 2 et 3 dans la figure 4.2). Pendant un trajet, l'EGV peut passer devant des obstacles tels que des piétons, des oiseaux, des arbres, *etc.* qui ne sont pas toujours prévisibles avant le mouvement.

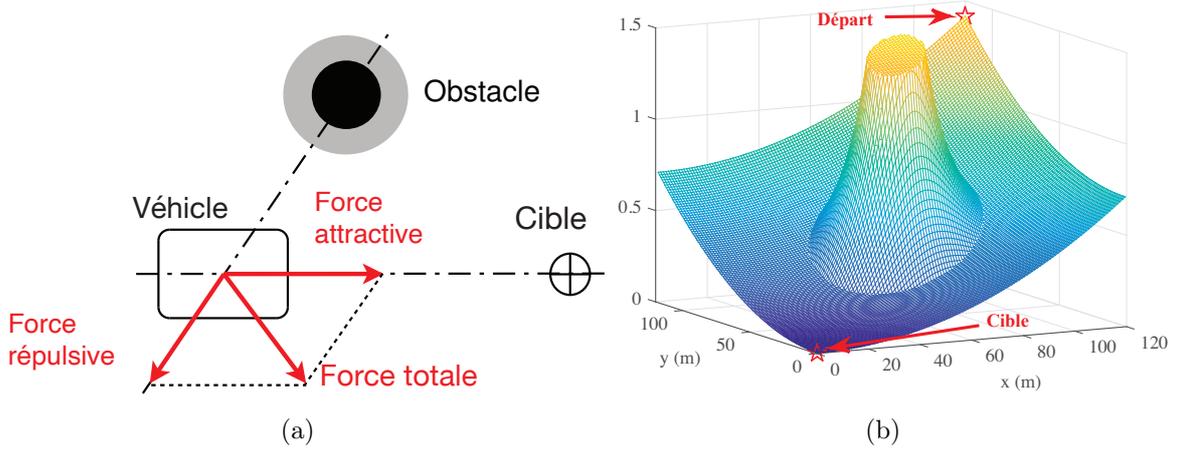


FIGURE 4.3: (a) Forces exercées sur l'EGV dans le champ de potentiel (b) Exemple de champs de potentiel attractif et répulsif autour d'un obstacle rond

Ainsi, ce PF local permet d'éviter les obstacles environnants dès qu'ils ont détectés selon la capacité des capteurs (LIDAR, camera,...).

#### 4.3.1.1 Champ de potentiel attractif

Initialement, les auteurs dans [55] ont introduit cette notion de PF, et son interprétation en tant que boucle de commande a été réalisée dans [84].

Le potentiel attractif  $U^{att}$  est défini comme une fonction de la position et de la vitesse relatives à la cible et l'EGV :

$$U^{att}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) = \alpha_p \|\mathbf{p}_{cible} - \mathbf{p}\| + \alpha_v \|\mathbf{v}_{cible} - \mathbf{v}\|, \quad (4.11)$$

où  $\mathbf{p}$  et  $\mathbf{v}$  sont, respectivement, la position et la vitesse de l'EGV, et  $\mathbf{p}_{cible}$  et  $\mathbf{v}_{cible}$  ceux de la cible.  $\alpha_p$  et  $\alpha_v$  sont des coefficients de pondération. Dans [83],  $\alpha_p$  et  $\alpha_v$  ont été interprétés comme des coefficients d'un régulateur Proportionnel Dérivé telle que dans (4.17). La force résultante s'exprime alors par :

$$\mathbf{F}^{att}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) = -\nabla_{\mathbf{p}} U^{att}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) - \nabla_{\mathbf{v}} U^{att}(\mathbf{p}, \mathbf{v}), \quad (4.12)$$

où

$$\nabla_{\mathbf{w}} U^{att}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) = \frac{\partial U^{att}(\mathbf{p}, \mathbf{v})}{\partial \mathbf{w}}. \quad (4.13)$$

Dans cette expression,  $\mathbf{w}$  peut être soit la position  $\mathbf{p}$  ou la vitesse  $\mathbf{v}$ , ce qui donne :

$$\mathbf{F}^{att}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) = \alpha_p (\mathbf{p}_{cible} - \mathbf{p}) + \alpha_v (\mathbf{v}_{cible} - \mathbf{v}), \quad (4.14)$$

ou encore

$$\mathbf{F}^{att} = M\mathbf{a} = \alpha_p \epsilon + \alpha_v \frac{d\epsilon}{dt} \quad (4.15)$$

avec  $\epsilon = \mathbf{p}_{cible} - \mathbf{p}$ .

Si l'accélération de la cible est nulle,  $\mathbf{a}_{cible} = \mathbf{0}$ , cette dernière équation peut être réinterprétée comme un régulateur :

$$F^{att}(s) = (\alpha_p + \alpha_v s)E(s). \quad (4.16)$$

Pour des raisons de causalité, ce régulateur est transformé en un régulateur à avance de phase :

$$F^{att}(s) = \frac{\alpha_p + \alpha_v s}{1 + \frac{s}{\omega_c}} E(s) = C_{PD}(s)E(s), \quad (4.17)$$

où  $\omega_c$  est la pulsation de coupure pour rendre ce filtre causal.

Le régulateur à avance de phase  $C(s)$  peut se réécrire selon :

$$C_{PD}(s) = C_0 \left( \frac{1 + \frac{s}{\omega_b}}{1 + \frac{s}{\omega_h}} \right), \quad (4.18)$$

où  $C_0 = \alpha_p$ ,  $\omega_b = \frac{\alpha_p}{\alpha_v}$ ,  $\omega_h = \omega_c$ .

Face à des incertitudes paramétriques, des perturbations ou des conditions de vol changeantes, une simple avance de phase ne peut garantir une robustesse du degré de stabilité. Un ordre non entier  $n_{att}$  a été introduit dans [82] pour introduire une forme explicite du numérateur, à savoir :

$$C(s) = C_0 \frac{1 + \frac{s^{n_{att}}}{\omega_b}}{1 + \frac{s}{\omega_h}}. \quad (4.19)$$

Cependant, en introduisant plutôt une forme implicite pour l'ordre non entier telle que proposée dans [A-3], on obtient :

$$C_{CRONE}(s) = \left( \frac{\alpha_p + \alpha_v s}{1 + \frac{s}{\omega_c}} \right)^{n_{att}} = \alpha_p^{n_{att}} \left( \frac{1 + \frac{\alpha_v s}{\alpha_p}}{1 + \frac{s}{\omega_c}} \right)^{n_{att}}, \quad (4.20)$$

ce qui correspond à une commande CRONE robuste de deuxième génération [129, 63] :

$$C_{CRONE}(s) = C_0 \left( \frac{1 + \frac{s}{\omega_A}}{1 + \frac{s}{\omega_B}} \right)^{n_{att}}, \quad (4.21)$$

où  $C_0 = \alpha_p^{n_{att}}$ ,  $\omega_A = \frac{\alpha_p}{\alpha_v}$  et  $\omega_B = \omega_c$ .

En termes de conception, une telle forme permet de concevoir plus précisément le régulateur, puisque la pulsation au gain unité  $\omega_{cg}$  s'obtient directement par le temps de réponse du système en boucle fermée, à savoir  $tr_{5\%} \approx \frac{3}{\omega_{cg}}$ .

De cette pulsation centrale  $\omega_{cg}$ , on obtient la bande de fréquences utile  $[\omega_A, \omega_B]$  avec  $\omega_A = \omega_{cg}/(10\lambda)$  et  $\omega_B = \omega_{cg} \cdot 10 \cdot \lambda$ , ce rapport  $\lambda$  étant donné par l'utilisateur afin d'obtenir un gabarit vertical autour de  $\omega_{cg}$  sur la boucle ouverte idéale (voir [129]). L'ordre non entier  $n_{att}$  est calculé pour assurer une marge de phase  $M_\varphi$  :

$$n_{att} = \frac{2}{\pi} (-\pi + M_\varphi - \arg(G(j\omega_{cg})) = \frac{2}{\pi} M_\varphi. \quad (4.22)$$

où le procédé  $G$  est considéré comme un double intégrateur en accord avec une masse ponctuelle, et a une phase constante de  $-\pi$ . On peut alors définir le gain  $C_0$  selon :

$$C_0 = m_{EGV} \omega_{cg}^2 \left( \frac{1 + \left( \frac{\omega_{cg}}{\omega_B} \right)^2}{1 + \left( \frac{\omega_{cg}}{\omega_A} \right)^2} \right)^{\frac{n_{att}}{2}}. \quad (4.23)$$

Une étude comparative entre un PID et une commande CRONE est proposée dans [A-3] montrant la robustesse de la commande CRONE vis-à-vis des incertitudes paramétriques et des obstacles dynamiques.

#### 4.3.1.2 Champ de potentiel répulsif

Le champ de potentiel répulsif proposé par Khatib dans [62] s'exprime par :

$$U(\rho) = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_{min}} \right)^2 & \text{si } \rho \leq \rho_{min} \\ 0 & \text{si } \rho > \rho_{min}, \end{cases} \quad (4.24)$$

où  $\rho$  est la distance entre l'EGV et l'obstacle,  $\rho_{min}$  est la plus petite distance de sécurité à l'obstacle pour éviter une collision et  $\eta$  est un facteur d'échelle permettant de varier l'ajustement vis-à-vis du potentiel attractif.

##### 4.3.1.2.1 Champ répulsif de Ge & Cui

[55] ont proposé de prendre en compte la vitesse relative entre l'EGV et l'obstacle alors que l'environnement est dynamique.

**Définition 4.3.1** (Champ de potentiel répulsif de Ge&Cui (voir [55])).

$$U_{rep}^{GeCui}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) = \eta \left( \frac{1}{\rho_{\Delta}} - \frac{1}{\rho_{min}} \right), \quad (4.25)$$

avec  $\rho_{\Delta} = \rho_s(\mathbf{p}, \mathbf{p}_{obs}) - \rho_m(v_{RO})$  et  $\rho_s(\mathbf{p}, \mathbf{p}_{obs}) = |\mathbf{p} - \mathbf{p}_{obs}|$ . A titre comparatif, la puissance au carré est retirée et la distance  $\rho$  est remplacée par  $\rho_{\Delta}$ , une expression qui considère la vitesse relative  $v_{RO}$  entre l'EGV et l'obstacle, et leurs positions respectives  $\mathbf{p}$  et  $\mathbf{p}_{obs}$ .

Bien que la figure 4.4 illustre la méthodologie en 2D, cette solution fonctionne également en 3D.

La vitesse relative entre l'EGV et l'obstacle est définie par :

$$v_{RO}(t) = [\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}_{obs}(t)]^T \cdot \mathbf{n}_{RO}, \quad (4.26)$$

où  $\cdot$  est le produit scalaire,  $\mathbf{n}_{RO}$  est un vecteur unitaire allant de l'EGV (robot) à l'obstacle, et  $\mathbf{v}(t)$  et  $\mathbf{v}_{obs}(t)$  sont respectivement les vitesses instantanées de l'EGV et de l'obstacle. Connaissant l'accélération maximale  $a_{max}$  de l'EGV, on peut alors déterminer la distance que peut

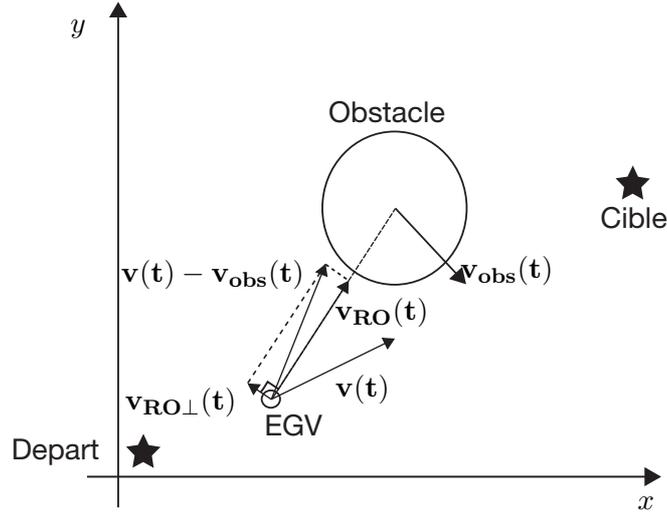


FIGURE 4.4: Vecteurs impliqués dans le champs répulsifs de Ge &amp; Cui

parcourir l'EGV :

$$\rho_m(v_{RO}) = \frac{v_{RO}^2(t)}{2a_{max}}. \quad (4.27)$$

De cette expression (4.25), la force résultante, correspondant au gradient négatif du potentiel, s'exprime alors par :

$$\begin{aligned} F_{rep}^{GeCui} &= -\nabla U_{rep}^{GeCui}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) \\ &= -\nabla_p U_{rep}^{GeCui}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) - \nabla_v U_{rep}^{GeCui}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) \end{aligned} \quad (4.28)$$

où

$$\nabla_p U_{rep}^{GeCui}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) = \frac{-\eta \left(1 + \frac{v_{RO}}{a_{max}}\right)}{\rho_{\Delta}^2} \mathbf{n}_{RO} \quad (4.29)$$

et

$$\nabla_v U_{rep}^{GeCui}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) = \frac{\eta v_{RO} v_{RO\perp}}{\rho_s(\mathbf{p}, \mathbf{p}_{obs}) a_{max} \rho_{\Delta}^2} \mathbf{n}_{RO\perp} \quad (4.30)$$

avec  $v_{RO\perp} = \sqrt{\|\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}_{obs}(t)\|^2 - \|v_{RO}(t)\|^2}$  étant l'amplitude de la vitesse relative entre l'EGV et l'obstacle. Notons que le vecteur  $\mathbf{n}_{RO\perp}$  est perpendiculaire à la droite passant par l'EGV et l'obstacle.

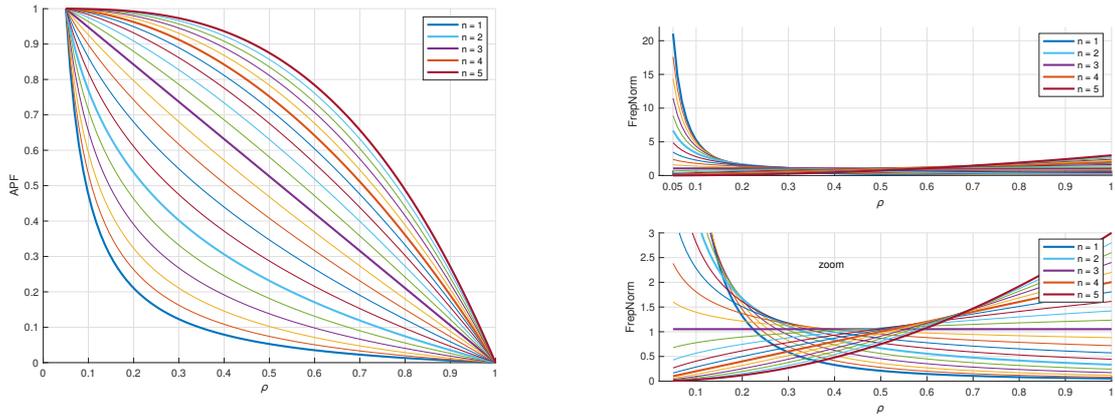
#### 4.3.1.2.2 Champ répulsif de Weyl

[136] a généralisé le champ potentiel de Weyl en y introduisant un ordre non entier  $n$ , qui influence l'évolution du champ en fonction de la distance à l'obstacle. Cette ordre  $n$  ajuste le champ de potentiel répulsif en fonction de la dangerosité de l'obstacle.

**Définition 4.3.2** (Champ de potentiel répulsif de Weyl (voir [136])). *Le champ répulsif de Weyl est défini par :*

$$U_{rep}^{Weyl}(\rho, n) = \begin{cases} \frac{\rho^{n-2} - \rho_{max}^{n-2}}{\rho_{min}^{n-2} - \rho_{max}^{n-2}}, & \forall n \in ]0, 2[ \cup ]2, +\infty[, \\ & \forall \rho \in [\rho_{min}, \rho_{max}] \\ \frac{\ln(\rho_{max}) - \ln(\rho)}{\ln(\rho_{max}) - \ln(\rho_{min})}, & n = 2, \forall \rho \in [\rho_{min}, \rho_{max}] \\ 0, & \forall \rho > \rho_{max} \end{cases} \quad (4.31)$$

La figure 4.5 illustre la forme du champ répulsif de Weyl pour une distance d'influence maximale à  $\rho_{max} = 1\text{m}$  et une distance minimale à l'obstacle à  $\rho_{min} = 0.05\text{m}$ .



(a) Profils du champ de potentiel de Weyl en fonction de l'ordre

(b) Profils de force normalisés correspondants

FIGURE 4.5: Influence de la distance  $\rho$  à l'obstacle par le champ de potentiel répulsif normalisé de Weyl

La force répulsive représente toujours le gradient négatif du champ de potentiel : plus l'ordre est élevé ( $n > 3$ ), plus la force répulsive est importante à  $\rho_{max}$ , ce qui conduit à un évitement de l'obstacle le plus tôt possible. Cependant, il faut noter que la force répulsive décroît au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'obstacle avec une amplitude minimale à  $\rho_{min}$  ; par conséquent, si pour une raison de détection tardive des capteurs, l'obstacle se retrouve très proche de l'EGV, la force répulsive de Weyl risque de ne pas être suffisante pour éviter un risque de collision, sans parler de discontinuité de la trajectoire de l'EGV surtout s'il est non holonome. En revanche, pour un ordre plus faible ( $n < 3$ ), la force répulsive croît plus progressivement en se rapprochant de  $\rho_{min}$ , ce qui conduit à des trajectoires plus régulières pour l'évitement d'obstacle. Dans le cas d'un véhicule autonome, une loi a été établie pour associer une vulnérabilité de l'obstacle à l'ordre non entier  $n$  (voir [A-12]). Cette loi peut également être transposée dans le cas des drones.

#### 4.3.1.2.3 Contribution avec un champ de potentiel répulsif fractionnaire dynamique

Le champ, de potentiel de Ge & Cui (4.25) dépend de la distance  $\rho$  entre l'EGV et l'obstacle, et leur vitesse relative  $v_{RO}$ . Cependant, aucune distinction n'est faite sur la dangerosité de l'obstacle. Un autre inconvénient de cette définition réside sur le fait que tous les obstacles

doivent être *a priori* connus pour la simulation et que l'EGV est influencé par tous les obstacles. Si un nouvel obstacle apparaît, l'EGV peut rentrer en collision avec ce nouvel évènement.

D'un autre côté, bien que l'on puisse différencier la dangerosité des obstacles avec l'ordre  $n$ , le champ de potentiel de Weyl (4.31) ne dépend que de la distance à l'obstacle sans prendre en compte sa dynamique. Cette définition empêche toute anticipation dans la poursuite de trajectoire. De plus, l'EGV n'étant influencé que par les obstacles les plus proches (quand il rentre dans sa zone de danger ( $\rho < \rho_{\max}$ )), il n'est donc pas nécessaire *a priori* de connaître tous les obstacles dynamiques de l'environnement.

J'ai proposé de combiner les avantages des deux méthodes précédentes. Ainsi, la dangerosité de l'obstacle est introduite pour adapter la trajectoire de l'EGV en maintenant l'ordre non entier  $n$ , et la réactivité à l'obstacle est assurée en y rajoutant la distance et la vitesse relative à l'obstacle. Aussi, seuls les obstacles les plus proches influencent l'EGV alors qu'il avance vers la cible.

**Définition 4.3.3** (Champ de potentiel répulsif dynamique [A-3]). *On obtient alors la définition du potentiel répulsif dynamique suivant :*

$$U_{rep}^{DRPF}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) = \begin{cases} \frac{\rho_{\Delta}^{n-2} - \rho_{max}^{n-2}}{\rho_{min}^{n-2} - \rho_{max}^{n-2}}, & \forall n \in ]0, 2[ \cup ]2, +\infty[, \\ \frac{\ln(\rho_{max}) - \ln(\rho)}{\ln(\rho_{max}) - \ln(\rho_{min})}, & n = 2, \forall \rho \in [\rho_{min}, \rho_{max}] \\ 0, & \forall \rho > \rho_{max} \end{cases} \quad (4.32)$$

d'où l'on tire la force répulsive résultante, à partir du gradient négatif (4.32) :

$$\begin{aligned} F_{rep}^{DRPF} &= -\nabla U_{rep}^{DRPF}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) \\ &= -\nabla_{\mathbf{p}} U_{rep}^{DRPF}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) - \nabla_{\mathbf{v}} U_{rep}^{DRPF}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) \end{aligned} \quad (4.33)$$

où

$$\nabla_{\mathbf{p}} U_{rep}^{DRPF}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) = \eta \frac{(n-2) \rho_{\Delta}^{n-3} \left(1 + \frac{v_{RO}}{a_{max}}\right)}{(\rho_{min}^{n-2} - \rho_{max}^{n-2})} \mathbf{n}_{RO} \quad (4.34)$$

et

$$\nabla_{\mathbf{v}} U_{rep}^{DRPF}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) = \eta \frac{(n-2) \rho_{\Delta}^{n-3} \mathbf{v}_{RO} \cdot \mathbf{v}_{RO\perp}}{\rho_s(\mathbf{p}, \mathbf{p}_{obs}) a_{max} (\rho_{min}^{n-2} - \rho_{max}^{n-2})} \mathbf{n}_{RO\perp}. \quad (4.35)$$

#### 4.3.1.2.4 Comparaison des 3 champs de potentiel répulsifs

Considérons le scénario suivant où l'EGV est ici un drone qui doit aller du point de départ  $(0, 60, 10)$  avec une vitesse initiale  $(0, 0, 0)$  (en m/s) pour arriver au point cible fixe  $(120, 60, 10)$  avec une vitesse finale  $(0, 0, 0)$  (en m/s). L'environnement contient deux obstacles : l'obstacle 1 part du point initial  $(40, 70, 10)$  et se déplace à la vitesse constante  $(-1, -1, 0)$ , alors que l'obstacle 2 part du point  $(70, 45, 10)$  et se déplace à une vitesse constante  $(0, 1, 10)$ .

Elément	Méthode	$\eta$	forme
Obstacle 1	Ge & Cui	1350	sphère
	Weyl	255	rayon $\rho_{max} = 5\text{m}$
	Dyn. frac.	67.5	
Obstacle 2	Ge & Cui	1350	sphère
	Weyl	255	rayon $\rho_{max} = 10\text{m}$
	Dyn. frac.	67.5	

TABLE 4.1: Paramètres des champs de potentiel répulsifs

Le modèle nominal de l'EGV est considéré pour  $m_{EGV} = 1.5\text{kg}$  ce qui correspond à celle d'un drone Iris +. Le champ de potentiel attractif se traduit selon une commande robuste CRONE de deuxième génération avec le modèle nominal de 1.5 kg et est identique pour tous les scénarios. En effet, il a été démontré dans [E-18, A-3] qu'un simple correcteur à avance de phase n'est pas suffisamment robuste compte tenu des variations paramétriques de l'EGV et des perturbations. Le détail de la synthèse de loi de commande est disponible dans l'article de revue [A-3].

Trois simulations sont effectuées, une pour chaque méthode de champ de potentiel répulsif. Les caractéristiques spécifiques pour implémenter chaque champ répulsif sont définies dans le tableau 4.1. Afin de mieux comparer les performances de chaque méthode, à chaque fois, les simulations sont effectuées pour différentes masses du drone :  $m_{EGV} = 1.5\text{kg}$ ,  $4.5\text{kg}$  et  $7.5\text{kg}$ .

Trois critères sont utilisés afin de comparer ces méthodes :

- le critère de distance parcourue par l'EGV exprimé par :

$$J_{distance} = \sum_i \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2},$$

qui est la mesure précise de la longueur de la trajectoire et où l'indice  $i$  dénote le point d'interpolation de la trajectoire ;

- le critère de temps exprimé par

$$J_{temps} = t_f - t_0,$$

qui est le temps effectué par l'EGV pour réaliser sa trajectoire ;

- et le critère énergétique (ou le critère de consommation) qui est exprimé par

$$J_{energie} = \sum_i m_{EGV} a(t_i) v(t_i)$$

où  $a(t_i)$  et  $v(t_i)$  sont respectivement l'accélération et la vitesse instantanées à l'instant  $t_i$ .

Les simulations illustrent bien que notre proposition de champ de potentiel répulsif dynamique rassemble tous les avantages des méthodes de Ge&Cui et de Weyl : la prise en compte de la dynamique des obstacles permet de maintenir une réactivité à l'obstacle pour l'évitement

Masse de l'EGV (kg)	Méthode	$n$	Energie (J)	Distance (m)	Temps (s)
1.5	Weyl	0.2	342.09	128.09	105.05
		0.5	335.07	126.94	105.13
		1	336.41	126.77	104.06
		1.5	339.92	125.32	99.39
		2.5	398.60	127.09	94.76
	Ge&Cui	-	210.47	122.13	100.23
	Dyn. Frac.	0.2	210.02	122.00	100.33
		0.5	210.07	122.02	100.34
		1	210.47	122.13	100.23
		1.5	216.64	122.62	100.22
2.5		256.49	125.34	98.80	
4.5	Weyl	0.2	397.14	123.29	98.75
		0.5	390.72	123.55	99.62
		1	387.57	125.73	101.54
		1.5	399.96	137.08	108.92
		2.5	402.42	148.04	122.06
	Ge&Cui	-	301.76	129.06	104.84
	Dyn. Frac.	0.2	305.16	127.53	103.47
		0.5	304.12	127.96	103.88
		1	301.76	129.06	104.84
		1.5	296.17	131.46	106.68
2.5		306.37	146.71	120.73	
7.5	Weyl	0.2	437.97	139.52	114.29
		0.5	357.65	134.50	113.56
		1	341.91	131.28	112.65
		1.5	338.08	131.49	113.35
		2.5	359.70	135.42	117.03
	Ge&Cui	-	308.56	127.21	110.81
	Dyn. Frac.	0.2	312.66	127.90	110.80
		0.5	310.82	127.68	110.81
		1	308.56	127.21	110.81
		1.5	306.10	126.63	110.83
2.5		301.86	125.79	111.34	

TABLE 4.2: Comparaison des méthodes de champs de potentiel répulsif ( $n$  définit l'ordre non entier pour l'obstacle 2, alors que  $n = 1$  pour l'obstacle 1)

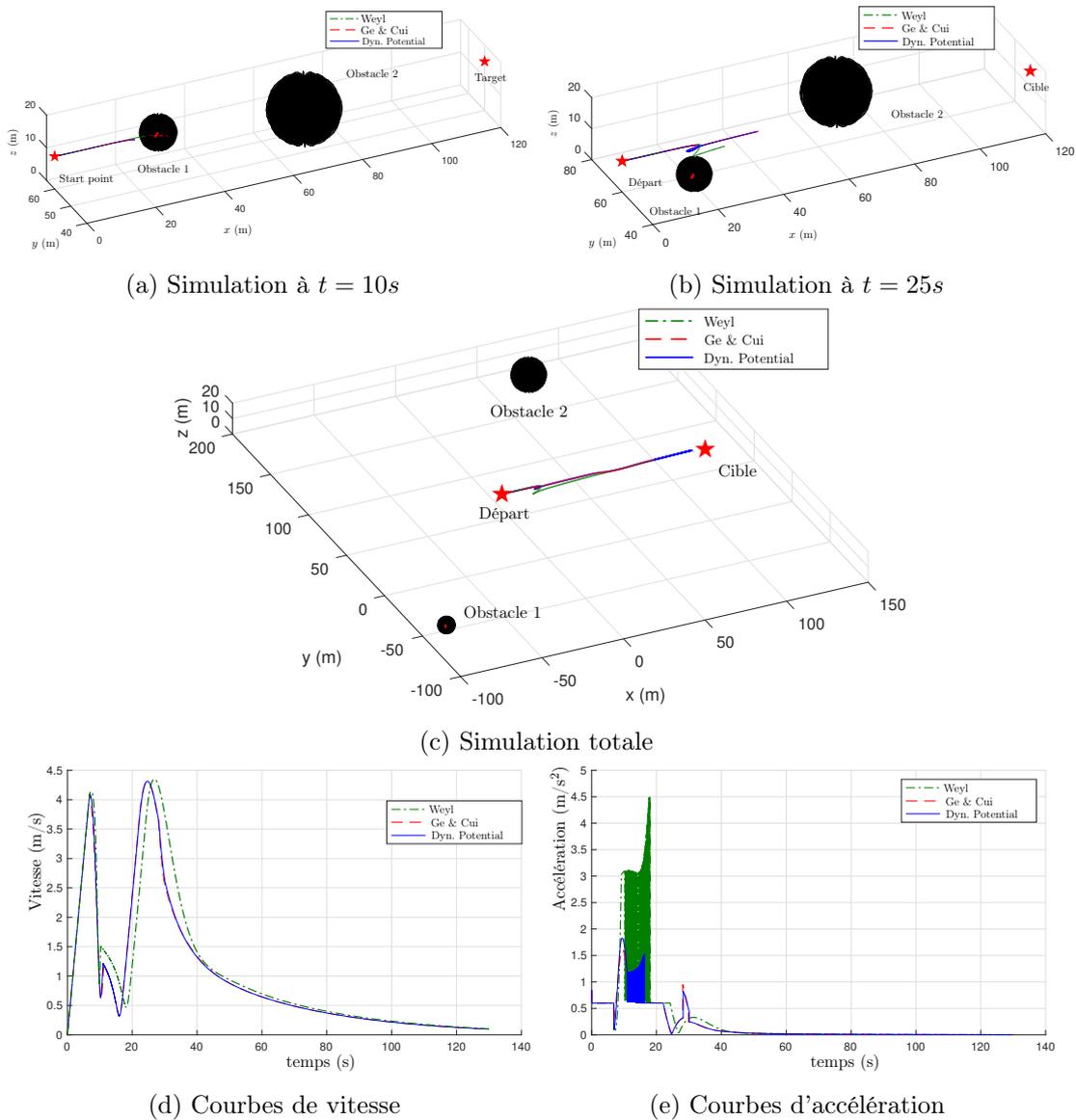


FIGURE 4.6: Comparaison d'un EGV de type drone, de masse  $m_{EGV} = 7.5kg$ , avec les méthodes de champs de potentiel répulsif de Ge & Cui, Weyl et le potentiel dynamique ( $n = 0.5$  pour l'obstacle 2, et  $n = 1$  pour l'obstacle 1)

de collision, et la distinction de la dangerosité des obstacles permet également une poursuite de trajectoire plus adaptée. Plus l'ordre non entier  $n$  est petit, plus on se rapproche de l'obstacle, plus la distance parcourue est raccourcie, et plus la durée est petite, et donc par conséquent, plus l'énergie consommée est moindre (voir le tableau 4.2). D'autres scénarios et comparaisons sont disponibles dans [A-3].

### 4.3.2 Contribution à l'optimisation multi-critère de trajectoire (bloc 1 de la figure 4.2)

Pour rappel, la figure 4.2 illustre le schéma global de la stratégie de planification de trajectoire dans le cas d'un véhicule autonome. Dans le paragraphe précédent, la méthode des champs de potentiel est une méthode locale et en-ligne qui permet d'avoir une réactivité face aux obstacles ; cependant, elle peut conduire à de fortes oscillations en accélération et peut donc conduire à une surconsommation de l'EGV. Par conséquent, l'objectif de cette section est de proposer une planification de trajectoire optimale qui sera globale et utilisée comme trajectoire de référence (bloc 1 de la figure 4.2).

#### 4.3.2.1 Formulation du problème de la planification de trajectoire

Nous avons proposé dans la thèse de J.-B. Receveur [114] (dans le cas 2D) et dans [E-10] (dans le cas 3D) une méthode combinant l'optimisation par algorithme génétique (méthode globale) afin de proposer une trajectoire de référence optimale avec les champs de potentiel (méthode locale) afin de maintenir une réactivité face aux imprévisibilités des obstacles de l'environnement. La méthode GA-PF (GA pour algorithme génétique (*Genetic Algorithm* en anglais) et PF pour champ de potentiel (*Potential Field* en anglais)) est utilisée pour générer des trajectoires sur des distances entre 10m à 1km, qui sont des distances usuellement supportées par des conducteurs. une centaine de mètres est la distance généralement considérée pour les capteurs (120m pour les capteurs infrarouges). A partir des informations fournies par les capteurs et des cartes de routes disponibles, l'environnement peut être partiellement reconstruit sur cette distance afin d'ajouter de l'anticipation dans l'optimisation.

La méthode GA permet d'avoir une optimisation globale de la trajectoire, en considérant l'environnement selon la distance considérée. Les points de passage optimaux sont placés par le GA, et sont ensuite liés à travers des splines, dont les continuités en termes de position et de vitesse sont assurées. La méthode des PF apporte réactivité et modifie directement la trajectoire de référence en dépendant des événements non prévus. Pour la génération des références, un modèle de masse ponctuelle est considéré. Pour des raisons de simplicité, les formulations seront décrites pour des exemples en 2D. Dans ce cas, les coordonnées  $x$  et  $y$  sont indépendantes, et à la fois le GA et le PF fournissent les références de positions et leur dérivées :  $(x(t), \dot{x}(t), \ddot{x}(t))$  et  $(y(t), \dot{y}(t), \ddot{y}(t))$ . Plus de détails de la méthode GA-PF sont disponibles dans [E-19, A-11].

##### 4.3.2.1.1 Variables d'optimisation

Dans la méthode hybride GA-PF, l'idée est d'utiliser le plus petit nombre de variables d'optimisation afin de proposer une trajectoire de référence le plus rapidement possible qui sera ensuite utilisée dans la navigation avec les champs de potentiel. Les notations utilisées sont décrites sur la figure 4.7.  $(x_0, y_0)$  et  $(x_f, y_f)$  sont respectivement les positions *a priori* connus

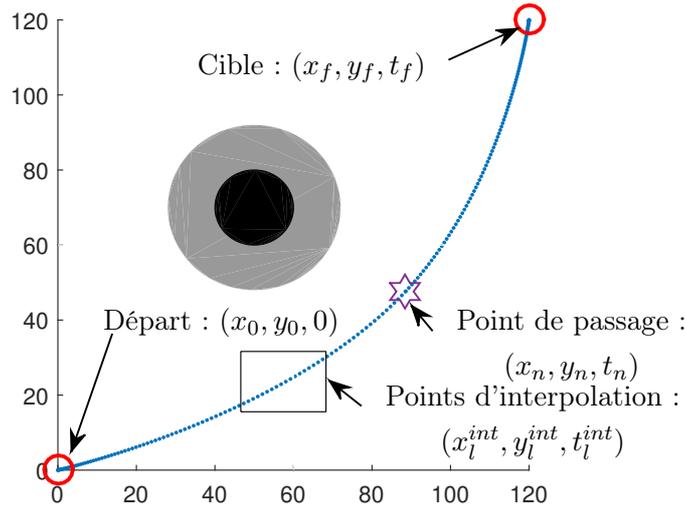


FIGURE 4.7: Illustration des différents points d'une trajectoire

du point de départ et du point d'arrivée, et le temps initial  $t_0$  est toujours supposé connu. La méthode d'optimisation de la trajectoire est donc basée sur l'optimisation des points de passage intermédiaires. Le nombre de points intermédiaires  $n_{opt}$  dépend fortement de l'environnement. Ceux-ci sont liés par des splines afin de définir des "trajectoires continues". Ces fonctions sont composées d'un nombre important de points appelés points d'interpolation  $n_{interp}$  et définies de sorte que :

$$n_{interp} \geq 2\sqrt{(x_f - x_0)^2 + (y_f - y_0)^2}.$$

$x_l^{int}$  sont les valeurs en abscisses et  $y_l^{int}$  celles en ordonnées, et  $t_f$  est le temps final.  $l$  est l'index du pont d'interpolation (*i.e.*  $l \in [1, n_{interp}]$ ).

Pour résumer, les variables d'optimisation sont composées des points de passage intermédiaires  $(x_n, y_n)$  associés à leur temps de passage  $t_n$ , avec  $n \in [1, n_{opt}]$ , ajouté du temps final  $t_f$  qui est également inconnu.

Le nombre de variables d'optimisation est donc de :

$$n_{var} = 3n_{opt} + 1. \quad (4.36)$$

On note qu'un point de passage additionnel rajoute trois variables à chaque fois, ce qui est significatif pour l'optimisation.

#### 4.3.2.1.2 Critère d'optimisation

Cinq critères ont été définis et seules leurs expressions sont rappelées ici (pour plus de détails, voir [E-19]).

— Le *critère de danger* dépend des obstacles dans l'environnement et est défini par :

$$J_{danger} = \frac{1}{n_{interp}} \sum_l U_{tot}^{rep}(x_l^{int}, y_l^{int}),$$

où  $U_{tot}^{rep}$  est le champ de potentiel répulsif total décrit en section 4.3.1 p. 99.

— Le critère de longueur de la trajectoire est défini par :

$$J_{longueur} = \sum_l \sqrt{(x_{l+1}^{int} - x_l^{int})^2 + (y_{l+1}^{int} - y_l^{int})^2}.$$

— Le critère de temps est défini par :

$$J_{temps} = t_f - t_0.$$

— Le critère d'énergie (ou de consommation) qui provient de [133] est exprimé par :

$$J_{energie} = \sum_l (b_1 \tilde{a}_l v_l + b_2 \tilde{a}_l^2) dt_n,$$

où

$$dt_n = \frac{(n_{opt} + 1)(t_{n+1} - t_n)}{n_{interp}},$$

$$\tilde{a} = \frac{a}{a_{max}},$$

avec l'accélération instantanée  $a$  de l'EGV à l'instant  $t$ , l'accélération maximale  $a_{max}$ , et  $n$  est l'indice du points de passage intermédiaires.

— Le critère d'inconfort est exprimé par :

$$J_{inconfort} = J_{long\ inconfort} + J_{lat\ inconfort}$$

$$= \frac{1}{n_{interp}} \sum_l (\sigma_l^{long} + \sigma_l^{lat}).$$

où  $\sigma^{long}$  est le jerk longitudinal et  $\sigma^{lat}$  est le jerk latéral.

Tous les critères sont difficilement tous satisfaits : il y a donc un compromis à déterminer (voir la figure 4.8).

La théorie de l'optimisation multi-critère est un large champ de recherche, et le plus courant est de combiner ces critères au travers d'une agrégation pondérées :

$$J_{global} = \alpha_{danger} J_{danger} + \alpha_{distance} J_{distance} + \alpha_{temps} J_{temps}$$

$$+ \alpha_{energie} J_{energie} + \alpha_{inconfort} J_{inconfort}. \quad (4.37)$$

Le choix des coefficients de pondération n'est pas trivial. Une étude de ces choix de pondération a été réalisée dans [A-11, section 2] en proposant des modes de planification (plus court, plus rapide, moins énergivore, plus confortable, plus équilibré). La somme des coefficients  $\alpha_{critere}$  est supposé égale à 1, sachant qu'ils ne peuvent être nuls, et  $\alpha_{danger} \geq 0.3$  pour maintenir une trajectoire sécurisée.

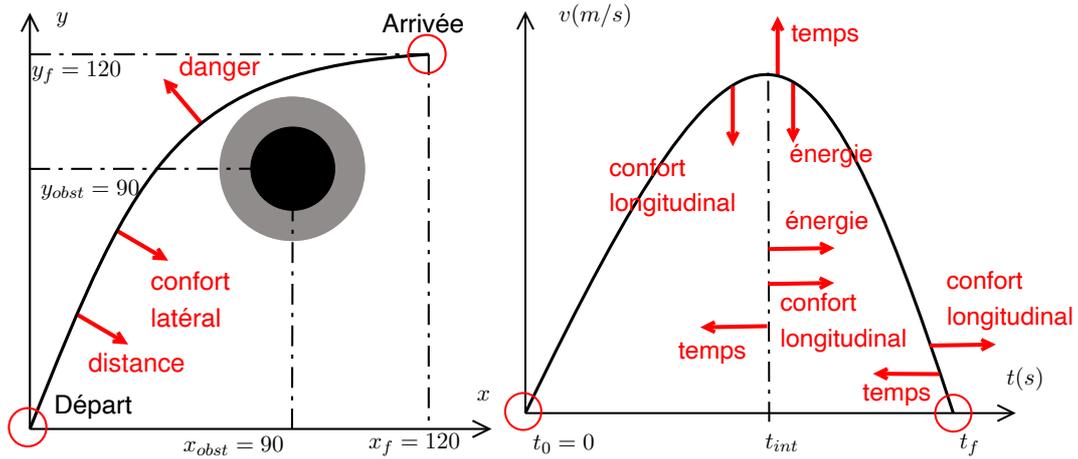


FIGURE 4.8: Dilemme des critères

#### 4.3.2.1.3 Contraintes d'optimisation

L'EGV est représenté par une masse ponctuelle soumise aux différentes forces. Ainsi, c'est un système holonome. L'optimisation de trajectoire étant réalisée au niveau stratégique (voir figure 4.2), il est impossible en un temps très court de résoudre les équations non linéaires du modèle de véhicule, même si l'on considère un modèle bicyclette. Par conséquent, des splines permettent de calculer une trajectoire en incluant des contraintes dynamiques de l'EGV telles que le maximum d'angle de braquage des roues et des fonctions de pénalités telles que l'accélération maximale.

Tout d'abord, des contraintes linéaires dites explicites sont considérées pour assurer la cohérence de la trajectoire, à savoir :

$$\begin{aligned} t_0 < \dots < t_k < \dots < t_f \\ 0 < x, y < 120. \end{aligned} \quad (4.38)$$

Ces contraintes sont linéaires et pénalisent très peu l'algorithme. Au contraire, elles lui permettent d'orienter la recherche.

Enfin, des contraintes implicites sont rajoutées pour rendre ces trajectoires plus réalistes. Par exemple, le critère de danger peut être modifié selon :

$$J_{danger} = \frac{1}{n_{interp}} \sum_l (U_{tot}^{rep}(x_l^{int}, y_l^{int}) + pen(v_l) + pen(a_l) + pen(\dot{\psi}_l)), \quad (4.39)$$

où  $pen(v_l)$ ,  $pen(a_l)$ , et  $pen(\dot{\psi}_l)$  sont des fonctions de pénalités qui dépendent de la vitesse maximale  $v_{max}$  (contrainte légale) en un point particulier de la trajectoire, sur le maximum d'accélération  $a_{max}$  (contrainte mécanique), et sur le maximum de variation de lacet  $\dot{\psi}_{max}$ , qui dépend de la vitesse et du maximum d'angle de rotation des roues. Ces pénalités aident l'optimisation afin de trouver une trajectoire réaliste pour l'EGV, même si on ne prend pas en compte l'ensemble des équations dynamiques de l'EGV.

L'encombrement de l'EGV peut être pris en considération dans le critère de danger en ajoutant d'autres points limites en plus du centre de gravité de l'EGV pour éviter toute collision avec un obstacle.

#### 4.3.2.2 Algorithme génétique

Dans un espace d'optimisation complexe, au-delà de trois variables, les algorithmes classiques et déterministes tombent rapidement dans des minima locaux ou sont trop complexes à résoudre d'un point de vue analytique. L'algorithme génétique résout des problèmes d'optimisation en se basant sur le principe de sélection. Il modifie itérativement une population d'individus qui sont des solutions potentielles. A chaque itération, l'algorithme choisit les meilleurs individus dans une population pour être des "parents" pour la prochaine génération.

Comme énoncé en section 4.3.1, l'EGV est attiré vers la cible finale en suivant le principe fondamental de la dynamique, sous l'influence d'une force attractive. L'EGV ne peut se déplacer qu'à l'intérieur du champ de potentiel, ce qui signifie que pour générer une trajectoire proche de l'optimum, le PF doit être optimal. Le PF ne peut être optimal par lui-même quand des obstacles mobiles sont présents. Ainsi, une référence optimale d'une cible dynamique doit être déterminée, *i.e.* un point attractif mouvant qui suit une trajectoire optimale afin que l'EGV soit attiré de manière permanente vers la trajectoire qu'il doit suivre.

##### 4.3.2.2.1 Définitions générales

L'algorithme génétique est une méthode itérative qui permet de résoudre des problèmes d'optimisation avec ou sans contraintes, basée sur le principe de sélection naturelle, processus à la base de l'évolution biologique.

**Définition 4.3.4** (Fonction coût ou fonction objectif). *La fonction coût ou fonction objectif est la fonction qui permet d'évaluer le coût, ou la valeur d'un individu. Il est question de coût lorsqu'il s'agit d'une valeur à minimiser et d'objectif quand il s'agit d'une fonction à approcher. Dans cette étude, les fonctions utilisées sont des fonctions coût, définies en section 4.3.2.1.2. L'algorithme se sert de cette fonction pour évaluer chaque individu.*

**Définition 4.3.5** (Individu). *Un individu est un élément de l'espace des solutions, un élément à évaluer au moyen de la fitnessfunction. La valeur de l'individu ou coût de l'individu est la valeur de la fonction coût pour cet individu. Par exemple, si une fonction coût dépend des variables  $x_1$  et  $x_2$ , un individu est un couple  $(x_1, x_2)$  de l'espace des solutions. La forme générale d'un individu est appelée chromosome et chacune des valeurs qui le composent un gène.*

**Définition 4.3.6** (Population). *Une population est un ensemble d'individus. Un même individu peut apparaître plusieurs fois dans une même population. A chaque itération, l'algorithme génétique utilise une série d'opérations décrites dans la suite pour créer une nouvelle population. Chaque nouvelle population est appelée nouvelle génération.*

**Algorithme 3** Description de l'algorithme génétique**Entrée** : Génération initiale d'individus (voir Tableau 4.3)**Sortie** : Meilleur individu et son coût**Tant que** : Critère d'arrêt = faux *faire*

Évaluation des individus de la Génération[i]

Normalisation des coûts des individu et agglomération dans le cas d'une optimisation multicritère

Sélection des parents pour construire la Génération[i+1]

Sélection de quelques individus *élites* à garder à l'identique pour la Génération[i+1]

Croisement de certains parents

Mutation de certains parents

Génération[i] = Génération[i+1]

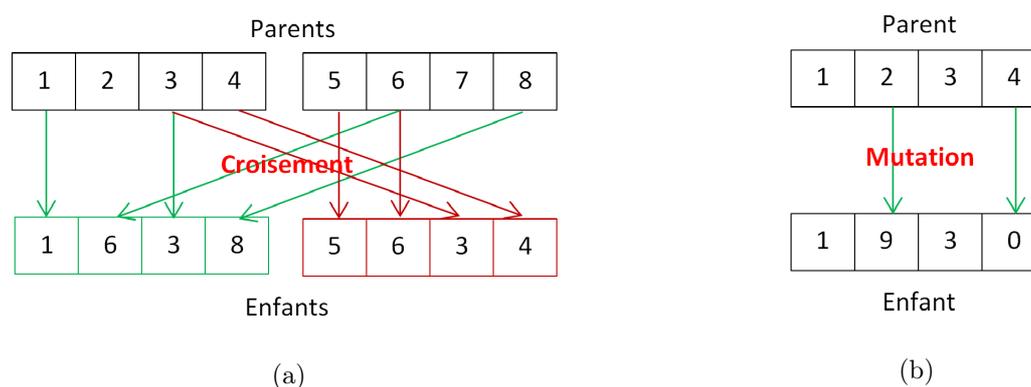


FIGURE 4.9: (a) Croisement de deux chromosomes parents pour créer un nouvel individu (b) Mutation d'un chromosome parent pour créer un nouvel individu

A chaque itération (ou génération), l'algorithme génétique sélectionne des individus dans la population considérée pour en faire des *parents* afin de créer la génération suivante. Au fur et à mesure des générations, la population évolue vers une solution optimale. Les opérations effectuées sur les parents sont les suivantes :

- *l'opération de sélection* choisit les individus appelés parents qui vont participer à la création de la génération suivante ;
- *l'opération de croisement*, illustrée en figure 4.9 (a), permet de combiner deux parents d'une façon déterminée au préalable pour former les enfants de la génération suivante ;
- *l'opération de mutation*, illustrée en figure 4.9 (b), change de façon aléatoire certains enfants pour diversifier la population et notamment pour éviter les minima locaux ;

Le meilleur individu est celui qui présente le coût le plus faible dans une population donnée. Le déroulé de l'algorithme génétique est présenté en Algorithme 3. Les critères d'arrêt possibles sont : le temps de calcul, le nombre maximum de générations, le taux de variation de la meilleure valeur obtenue à chaque génération, la valeur absolue minimale du critère global.

### 4.3.2.2.2 Application à l'optimisation de trajectoire

Les notions d'individu et de variables d'optimisation sont combinées afin de définir la structure d'un individu (voir le tableau 4.3).

$(x_1, y_1, t_1)$	$(x_2, y_2, t_2)$	...	$(x_n, y_n, t_n)$	...	$(x_{n_{opt}}, y_{n_{opt}}, t_{n_{opt}})$	$t_f$
-------------------	-------------------	-----	-------------------	-----	---	-------

TABLE 4.3: Tableau récapitulatif des variables d'optimisation

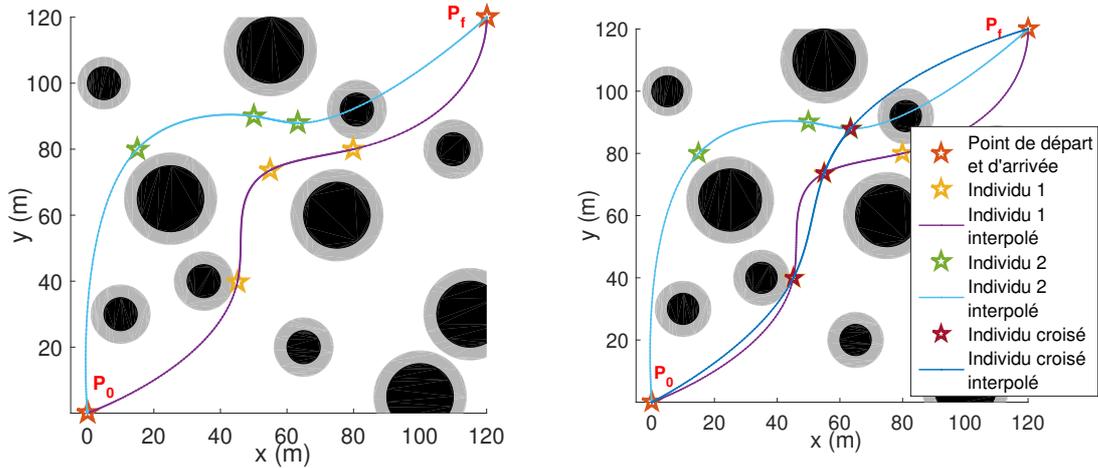


FIGURE 4.10: Exemple de deux individus après croisement. Valeurs du critère total pour chacune de ces trajectoires :  $J = 4.3 \times 10^5$ ,  $J = 0.762$ ,  $J = 0.547$

Le croisement de deux individus est illustré en figure 4.10. Sur cette dernière, la trajectoire interpolée peut être observée. Lors de la présentation des variables d'optimisation en section 4.3.2.1.1, la manière de relier les points intermédiaires avait été évoquée. En effet, ces points intermédiaires sont suffisant pour l'optimisation, mais pas suffisant pour l'évaluation correcte d'une trajectoire continue. Par exemple, l'individu 2 de la figure 4.10 a des points intermédiaires qui ne se situent pas sur des obstacles, mais quand les points de départ et d'arrivée sont reliés par une trajectoire continue, cet individu pose un problème puisque sa trajectoire passe au milieu d'un obstacle. De même, dans les contraintes d'optimisation en section 4.3.2.1.3, il a été vu qu'il est nécessaire d'évaluer la trajectoire partout pour tester le braquage, l'accélération ou la vitesse. Enfin, le calcul des différents critères ne peut se faire que sur une trajectoire qui présente suffisamment de points pour être pertinente. Pour relier ces points intermédiaires, une approche polynomiale est adoptée, en imposant des continuités en position et en vitesse aux points intermédiaires.

### 4.3.2.3 Application au véhicule dynamique

Le modèle de validation complet, correspondant au bloc 6 de la figure 4.2, est décrit dans l'article [A-10]. Ce modèle est utilisé pour modéliser la dynamique horizontale de l'EGV

(dynamiques latérales et longitudinales). Ce modèle a été développé au travers de l'OpenLab 'Electronics and Systems for Automotive', laboratoire commun entre le laboratoire IMS et le Groupe PSA et est inspiré de [56] complété de l'étude du véhicule expérimental décrite dans [88]. Ce modèle a 14 degrés de liberté et est fortement non linéaire en prenant en compte tous les phénomènes nécessaires en termes de validation de la trajectoire.

#### 4.3.2.3.1 Modèle bicyclette

Dans une stratégie de commande, le champ attractif est réinterprété comme une loi de commande robuste. Cependant, si on veut réaliser une poursuite de trajectoire efficace, il est nécessaire de générer une commande de référence optimale.

Or le modèle de validation est fortement non linéaire et trop complexe pour être inversé directement afin de définir les commandes de référence.

On choisit alors un modèle bicyclette cinématique pour la génération des commandes de référence : la commande d'angle de braquage  $\beta$  et l'accélération longitudinale  $a_{long}^{mes}$ .

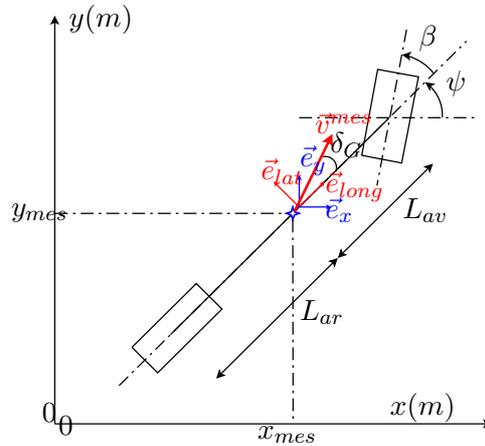


FIGURE 4.11: Schéma descriptif du modèle bicyclette

Dans ce modèle, à partir du vecteur d'état

$$\theta = \begin{pmatrix} x_{mes} \\ y_{mes} \\ v_{mes} \\ \psi \end{pmatrix} \quad (4.40)$$

et du vecteur de commande

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} \beta \\ a_{long}^{mes} \end{pmatrix}, \quad (4.41)$$

la représentation d'état est donnée par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x}_{mes} &= v^{mes} \cos(\delta_G + \psi) \\ \dot{y}_{mes} &= v^{mes} \sin(\delta_G + \psi) \\ \dot{v}^{mes} &= a_{long}^{mes} \\ \dot{\psi} &= \frac{v^{mes}}{L_{ar}} \sin(\delta_G) \\ \delta_G &= \arctan\left(\tan(\beta) \frac{L_{ar}}{L_{ar} + L_{av}}\right). \end{cases} \quad (4.42)$$

#### 4.3.2.3.2 Développement de la méthode de poursuite de trajectoire

On décrit maintenant la stratégie de poursuite de trajectoire, à savoir les blocs 5 et 6 tels que décrit dans la figure 4.2.

La figure 4.12 présente la boucle de commande : le contrôle longitudinal est en vert, avec  $C_1(s)$  pour l'asservissement de vitesse et  $C_2(s)$  pour l'asservissement de position, et le contrôle latéral est en rouge. La commande en feedforward (en bleu) permet de respecter toutes les contraintes liées aux règlementations et pour éviter les saturations des commandes.

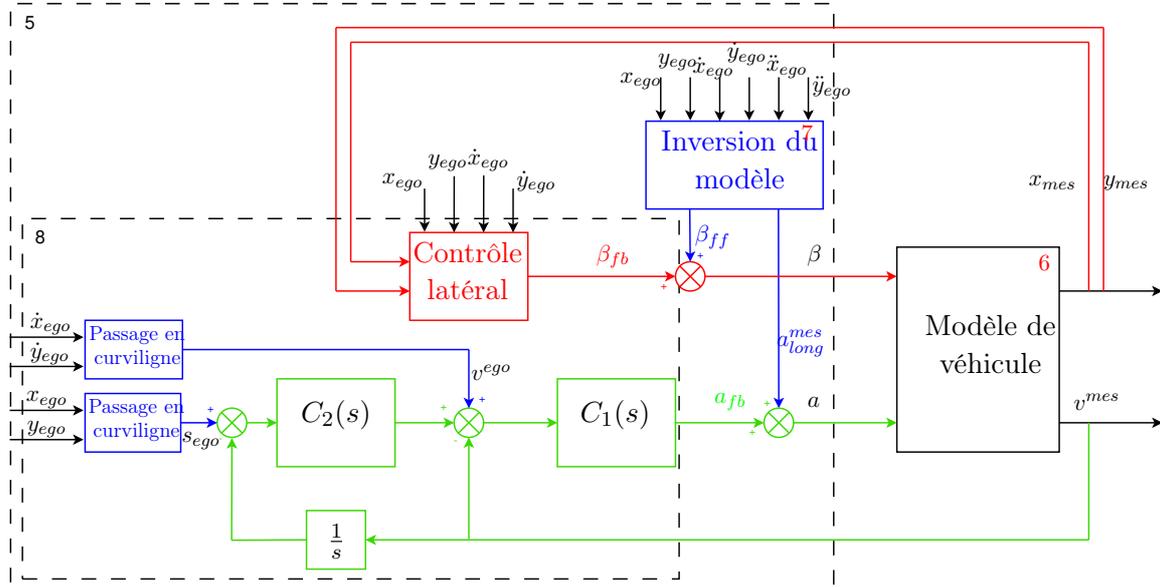


FIGURE 4.12: Schéma de commande en boucle fermée

#### 4.3.2.3.3 Commande en feedforward

L'inversion de modèle (bloc 7 de la figure 4.12) est réalisée en utilisant une inversion de modèle bicyclette présenté au paragraphe 4.3.2.3.1 au travers de la platitude. Le vecteur

$$\mathbf{Z}(t) = \begin{pmatrix} x_{long}(t) \\ y_{lat}(t) \\ \psi(t) \end{pmatrix} \quad (4.43)$$

définit une sortie plate où  $x_{long}$  et  $y_{lat}$  sont les coordonnées du véhicule dans le repère centrée en  $(0,0)_{\mathcal{R}_0}$  formant un angle  $\psi$  avec  $\mathcal{R}_0$ .  $v^{mes}$ ,  $\beta_{ff}$  et  $a_{long}^{mes}$  sont des fonctions de  $\mathbf{Z}$  et de ses dérivées :

$$\begin{cases} \dot{x}_{long} &= v^{mes} \cos(\delta_G) \\ \dot{y}_{lat} &= v^{mes} \sin(\delta_G) \end{cases} \quad (4.44)$$

ce qui signifie que

$$\delta_G = \arctan\left(\frac{\dot{y}_{lat}}{\dot{x}_{long}}\right). \quad (4.45)$$

De plus,  $v^{mes}$  peut être exprimé par  $x_{long}$  et  $y_{long}$  :

$$v^{mes} = \sqrt{\dot{x}_{long}^2 + \dot{y}_{lat}^2}. \quad (4.46)$$

Les commandes de références  $\beta_{ff}$  et  $a_{long,ff}^{mes}$  doivent aussi être exprimé en fonction de  $x_{long}$  et  $y_{long}$ . De (4.42),

$$\delta_G = \arctan\left(\tan(\beta_{ff}) \frac{L_{ar}}{L_{ar} + L_{av}}\right) \quad (4.47)$$

on obtient

$$\beta_{ff} = \arctan\left(\frac{L_{ar} + L_{av}}{L_{ar}} \frac{\dot{y}_{lat}}{\dot{x}_{long}}\right). \quad (4.48)$$

Comme énoncé au paragraphe 4.3.2.3.1, l'accélération longitudinale est directement liée à la vitesse par

$$a_{long,ff}^{mes} = \dot{v}^{mes}. \quad (4.49)$$

Par conséquent, le système est plat et on peut donc déterminer les commandes de références à partir des trajectoires de consigne de référence.

#### 4.3.2.3.4 Commande en boucle fermée

**Bouclage latéral** Le bouclage latéral est plus complexe car, de variables de position  $x_{mes}$  et  $y_{mes}$ , on se ramène à un bouclage monovariable en  $\beta_{fb}$ . La méthode la plus simple consiste à calculer la distance à la trajectoire et de faire tendre cette distance vers 0.

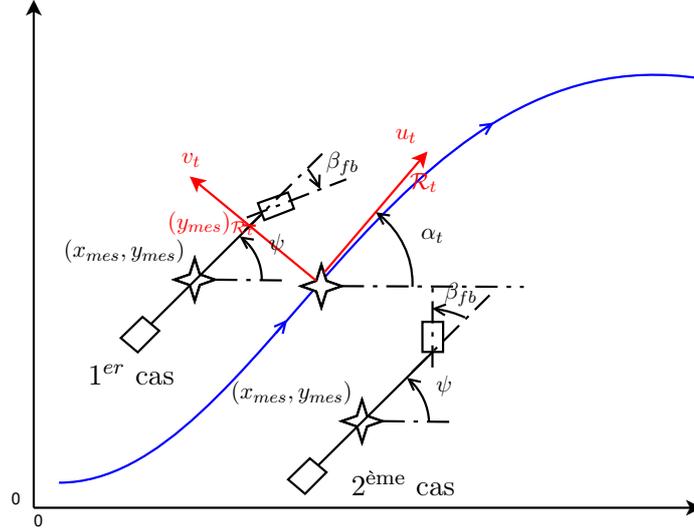
La commande  $\beta_{fb}$  est utilisée pour modifier l'angle de lacet  $\psi$ , afin que l'EGV se rapproche de la trajectoire en latéral.  $\beta_{fb}$  est directement lié à la variation  $\dot{\psi}$  à travers la relation :

$$\beta_{fb} = \arctan\left(\frac{L_{ar}}{L} \tan\left(\arcsin\left(\frac{\dot{\psi} L_{ar}}{v^{mes}}\right)\right)\right). \quad (4.50)$$

Puis,  $\dot{\psi}_{fb}$  conduit à  $\beta_{fb}$  par les quatrième et cinquième équations du système (4.42).

$(x_{ego}(t), y_{ego}(t))$  est le point de la trajectoire où l'EGV doit être à l'instant  $t$ . Le repère tangent à la trajectoire est construit de sorte que le vecteur tangent  $u_t$  est :

$$\vec{u}_t(t) = \frac{1}{D} \begin{pmatrix} x_{ego}(t) - x_{ego}(t-1) \\ y_{ego}(t) - y_{ego}(t-1) \end{pmatrix} \quad (4.51)$$


 FIGURE 4.13: Schéma explicatif de la distance à la trajectoire et du signe de  $\dot{\psi}_{fb}$ 

avec

$$D = \sqrt{(x_{ego}(t) - x_{ego}(t-1))^2 + (y_{ego}(t) - y_{ego}(t-1))^2}.$$

Le repère  $\mathcal{R}_t = (\vec{u}_t, \vec{v}_t)$ , où  $\vec{v}_t$  est le vecteur unitaire orthogonal à  $\vec{u}_t$ , est le repère cartésien absolu, translaté de  $(x_{ego}(t-1), y_{ego}(t-1))$  et tourné d'un angle  $\alpha_t$  tel que :

$$\alpha_t = \arctan\left(\frac{y_{ego}(t) - y_{ego}(t-1)}{x_{ego}(t) - x_{ego}(t-1)}\right). \quad (4.52)$$

Les coordonnées de l'EGV  $(y_{mes})_{R_t}$  dans  $\mathcal{R}_t$  permettent de définir la distance latérale à la trajectoire et se calcule par :

$$\begin{aligned} d_{traj} &= |(y_{mes})_{R_t}| \\ &= |-(x_{mes}(t) - x_{ego}(t-1)) \sin(\alpha_t) + (y_{mes}(t) - y_{ego}(t-1)) \cos(\alpha_t)|. \end{aligned} \quad (4.53)$$

D'après la figure 4.13, le signe de la variation souhaitée est, quant à lui, le signe inverse de celui de  $(y_{mes})_{R_t}$  :

$$\text{sign}(\dot{\psi}_{fb}) = -\text{sign}((y_{mes})_{R_t}). \quad (4.54)$$

La vitesse de lacet  $\dot{\psi}_{fb}$  dépend de  $d_{traj}$  et a le signe opposé de  $(y_{ego})_{R_t}$ , telle que :

$$\dot{\psi}_{fb} = -\text{sign}((y_{ego})_{R_t}) \arctan\left(\frac{d_{traj}}{d_0}\right) \quad (4.55)$$

où  $d_0$  est choisi comme distance médiane.

**Bouclage longitudinal** L'EGV doit non seulement être sur la trajectoire de référence, mais il doit également être sur la bonne abscisse curviligne au bon moment afin de bien suivre

la trajectoire optimale. Le bouclage longitudinal est composé de deux boucles : celle en vitesse et celle en position.

L'ensemble des variations paramétriques extrêmes de l'EGV sont présentées sur la figure 4.14 où on remarque des variations à la fois de phase et de gain. On synthétise alors une commande CRONE de troisième génération dont toute la conception est décrite dans [A-10, section 3].

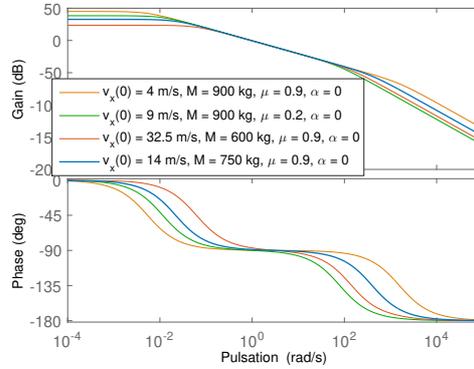


FIGURE 4.14: Variations extrêmes des réponses fréquentielles pour différentes variations paramétriques du modèle de validation

**Scénario de dépassement** La vitesse optimale issue du GA est utilisé comme référence pour une commande en vitesse sur un scénario de dépassement sur autoroute. L'objectif de cette simulation est d'observer la stabilité et la faisabilité de cette trajectoire de référence.

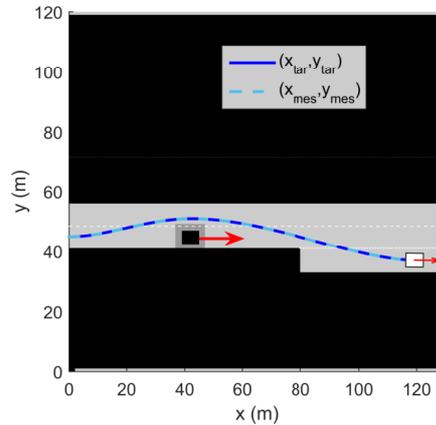


FIGURE 4.15: Trajectoire obtenue pour un scénario de dépassement

Sur la figure 4.15, la trajectoire résultante est donnée pour le modèle nominal et suit parfaitement la référence selon la figure 4.16 (a) montrant que l'erreur de position est inférieure à 1cm. Sur la figure 4.16 (b), la référence de vitesse et la vitesse mesurée sont quasiment identiques.

La commande en boucle fermée ne semble pas suffisamment stable car on aperçoit des

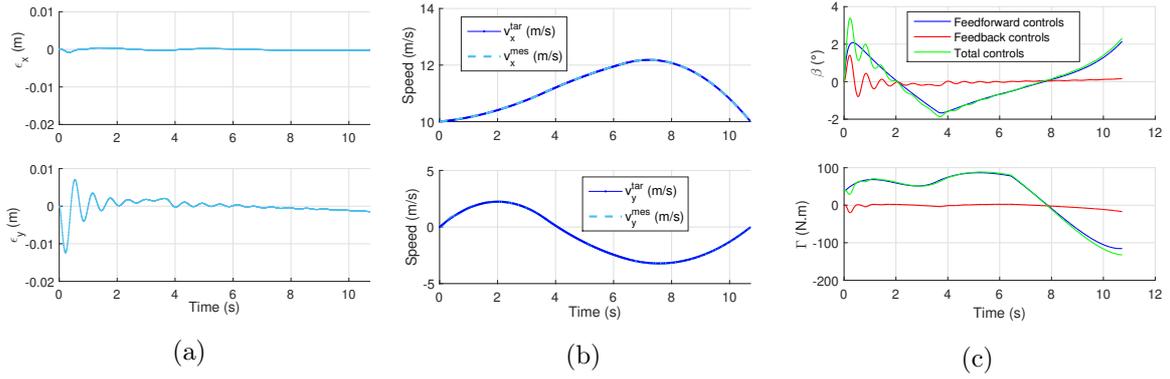


FIGURE 4.16: (a) erreurs de  $x$  et  $y$  correspondantes à la trajectoire de la figure 4.15 (b) Référence de vitesse et vitesse mesurée (c) *Feedforward* (—), *Feedback* (---) et *commande totale* (· · ·)

oscillations, mais il faut rappeler que le contrôle latéral est non linéaire (voir l'équation (4.50)). Les erreurs obtenues sont très petites (moins de 1.5cm), et ne seront donc pas problématiques en terme de suivi de trajectoire.

**Remarque 4.3.7.** *Un scénario de rond point est également présenté dans [A-10] où les points de fonctionnement du modèle de validation changent constamment en vitesse et en angle de braquage. La commande robuste montre un suivi de trajectoire qui respectent le cahier des charges et valide ainsi la stratégie proposée.*

#### 4.3.2.4 Synthèse

Les développements sur l'optimisation de trajectoire en 2D ont été réalisés lors de la thèse de J.-B. Receveur [114] alors que ceux réalisés en 3D ont été réalisés lors de la thèse de K. Ruiz [123].

En ce qui concerne l'optimisation combinant l'algorithme génétique et les champs de potentiels, ils ont conduit à la publication de deux revues [B-2, A-11] et 2 conférences internationales [E-19, E-16].

Les développements portant sur l'application au véhicule dynamique complet ont permis les publications dans 1 revue [A-10] et 1 conférence internationale [E-13].

Une nouvelle interprétation des champs de potentiels fractionnaires a été développée pour leur donner un sens physique et en introduisant une notion de dangerosité aux obstacles. Ces travaux ont permis les publications dans une revue [A-12] et une conférence internationale [E-15].

De plus, une nouvelle définition du champ de potentiel fractionnaire dynamique a été proposée pour associer à la fois dangerosité et dynamique aux obstacles, ce qui a conduit à la publication dans 1 revue [A-3] et 2 conférences internationales [F-9, E-10].

Enfin, les champs de potentiel fractionnaire de Weyl intègre une zone de danger à proximité de l'obstacle. Lorsque l'EGV rentre dans cette zone de danger, le potentiel de Weyl introduit

inévitables des oscillations d'accélération ce qui conduit à une surconsommation de l'EGV. Pour atténuer ces oscillations, plusieurs contributions ont été définies. La première consiste à rajouter des polynômes correctifs directement dans le champ de potentiel répulsif. La seconde consiste à rajouter une composante tangentielle au champ répulsif qui, par définition, n'est définie qu'avec une composante radiale. La troisième consiste à utiliser un champ de Poisson fractionnaire et enfin la dernière est issue d'un gradient pseudo-fractionnaire. Ces travaux ont permis la publication dans une revue [A-6] et une conférence [E-7].

### 4.3.3 Planification prédictive et réactive

Un véhicule autonome qui évolue dans un environnement urbain suit un chemin prédéfini à partir d'une étape de planification de trajectoire qui prend en compte la géométrie de la route ainsi que l'espace libre. La génération d'un tel chemin ne prend pas en compte les variations de l'environnement et l'EGV doit éviter les collisions avec un certain nombre d'obstacles. Ces obstacles peuvent être statiques ou mobiles. Dans le cas d'obstacles statiques, un nouveau chemin doit être généré par différents algorithmes de replanification de trajectoire s'il existe un chemin. Dans le cas d'obstacles dynamiques, une solution supplémentaire consiste à adapter la vitesse sans modification du chemin afin de laisser le passage aux obstacles rencontrés. Ces algorithmes de replanification doivent être utilisables en temps réel.

L'inconvénient principal des méthodes précédentes sont leur temps de calcul. En effet, afin de réagir à une situation de collision, un algorithme de replanification en temps-réel doit être utilisé avec un temps de calcul très court tout en satisfaisant les contraintes non-holonomes du véhicule. Ainsi, deux méthodes ont été proposées pour la planification de trajectoire réactive : la première est basée sur l'optimisation d'une courbe de Bézier en utilisant le Lagrangien et une descente de gradient de Newton-Raphson ; et la seconde est fondée sur l'optimisation d'un ensemble de courbes de Bézier par programmation quadratique.

#### 4.3.3.1 Contexte

##### 4.3.3.1.1 Modèle cinématique du véhicule

[66] a développé un modèle cinématique et non linéaire du véhicule, en considérant des conditions de roulement sans glissement. Dans ce modèle, l'angle de lacet  $\theta$  et l'angle de braquage  $\varphi$  peuvent être exprimés par une fonction du milieu de l'essieu arrière,  $P(t) = [X(t) Y(t)]^T$ . Ce modèle de véhicule non-holonome est différentiellement plat, et donc, toutes les variables du système peuvent être exprimées en fonction de  $X(t)$ ,  $Y(t)$  et de leurs dérivées successives  $\dot{X} = \frac{dX(t)}{dt}$ ,  $\dot{Y} = \frac{dY(t)}{dt}$ ,  $\ddot{X} = \frac{d^2X(t)}{dt^2}$  et  $\ddot{Y} = \frac{d^2Y(t)}{dt^2}$  selon :

$$\tan \theta = \frac{\dot{Y}}{\dot{X}} \quad (4.56)$$

et

$$\tan \varphi = \frac{l\dot{\theta}}{v} = l \frac{\ddot{Y}\dot{X} - \dot{Y}\ddot{X}}{(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (4.57)$$

où  $l$  est la distance entre les essieux arrière et avant, et  $v$  est la norme de la vitesse :

$$v = (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)^{\frac{1}{2}}. \quad (4.58)$$

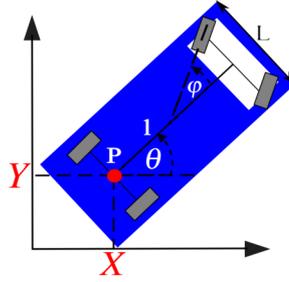


FIGURE 4.17: Modèle cinématique du véhicule

#### 4.3.3.1.2 Chemin de référence

Le point  $P$  dans le référentiel absolu correspond à la position du véhicule qui suit le chemin de référence selon une courbe de Bézier cubique, selon :

$$P(\tau) = \begin{bmatrix} X(\tau) \\ Y(\tau) \end{bmatrix} = (1 - \tau)^3 P_0 + 3\tau(1 - \tau)^2 P_1 + 3\tau^2(1 - \tau) P_2 + \tau^3 P_3, \quad (4.59)$$

où  $P_0 = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{bmatrix}$ ,  $P_1 = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{bmatrix}$ ,  $P_2 = \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \end{bmatrix}$ ,  $P_3 = \begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 \end{bmatrix}$  sont des points de contrôle de la courbe de Bézier et  $\tau \in [0, 1]$  est une *variable spatiale*.  $P_0$  est le point de départ de la courbe de Bézier et  $P_3$  est le point d'arrivée. Leur positionnement affectera toute la courbe de Bézier comme le montre la relation (4.59). La fonction associant  $\tau$  à  $P(\tau)$  alors que  $\tau$  varie de 0 à 1 définit un chemin. Ce chemin peut être suivi par le l'EGV si  $\varphi(\tau)$  respecte les limites d'angle de braquage du véhicule. Le profil de vitesse doit être adapté à la courbure du chemin, et cette adaptation peut être obtenue en ajustant  $\tau$ .

#### 4.3.3.1.3 Chemin replanifié

Toute courbe de Bézier peut être décomposée en une concaténation de courbes de Bézier de même degré. En effet, chaque portion d'une courbe de Bézier est une courbe de Bézier de

même degré. Soit une courbe de Bézier définie par :

$$P_\tau(\tau) = P_0^0(1 - \tau)^3 + 3P_1^0\tau(1 - \tau)^2 + 3P_2^0\tau^2(1 - \tau) + P_3^0\tau^3. \quad (4.60)$$

Pour couper cette courbe de Bézier initiale à  $\tau = \tau_{replan}$  en deux courbes, une définie sur  $[0, \tau_{replan}]$  et l'autre sur  $[\tau_{replan}, 1]$ , on considère le changement de variable  $\tau = f_1(U_1)$  telle que  $P_\tau(\tau)$  soit décrite sur  $[0, \tau_{replan}]$  par une courbe de Bézier  $P_{U_1}(U_1)$ ,  $U_1 \in [0, 1]$ .

En posant

$$U_1 = \frac{\tau}{\tau_{replan}},$$

$\tau = \tau_{replan}$  pour  $U_1 = 1$  et  $\tau = 0$  pour  $U_1 = 0$ , il apparaît que  $f_1(U_1) = \tau_{replan}U_1$  est une fonction candidate pour ce changement de variable. Il vient alors, après calculs :

$$P_{U_1}(U_1) = (3P_1' - P_0' - 3P_2' + P_3')U_1^3 + (3P_0' - 6P_1' + 3P_2')U_1^2 + 3(P_1' - P_0')U_1 + P_0',$$

avec

$$\begin{cases} P_0' = P_0^0 \\ P_1' = \tau_{replan}P_1^0 + P_0^0(1 - \tau_{replan}) \\ P_2' = P_0^0(1 - \tau_{replan})^2 + 2P_1^0\tau_{replan}(1 - \tau_{replan}) + \tau_{replan}^2P_2^0 \\ P_3' = P_0^0(1 - \tau_{replan})^3 + 3P_1^0\tau_{replan}(1 - \tau_{replan})^2 + 3P_2^0\tau_{replan}^2(1 - \tau_{replan}) + \tau_{replan}^3P_3^0. \end{cases}$$

D'une manière analogue, on considère le changement de variable  $\tau = f_2(U_2)$  telle que  $P_\tau(\tau)$  soit définie sur  $[\tau_{replan}, 1]$  par une courbe de Bézier  $P_{U_2}(U_2)$ ,  $U_2 \in [0, 1]$ . En posant

$$U_2 = \frac{\tau - \tau_{replan}}{1 - \tau_{replan}},$$

$\tau = \tau_{replan}$  pour  $U_2 = 0$  et  $\tau = 1$  for  $U_2 = 1$ , il apparaît que  $f_2(U_2) = U_2(1 - \tau_{replan} + \tau_{replan})$  est une fonction candidate pour ce changement de variable. Il vient alors, après développements, que sur  $\tau \in [\tau_{replan}, 1]$ ,  $P_{U_2}(U_2) = P_\tau(\tau)$  avec :

$$\begin{cases} P_0'' = P_3^0 \\ P_1'' = P_2^0(1 - \tau_{replan}) + P_3^0\tau_{replan} \\ P_2'' = P_1^0(1 - \tau_{replan})^2 + 2P_2^0\tau_{replan}(1 - \tau_{replan}) + P_3^0\tau_{replan}^2 \\ P_3'' = P_0^0(1 - \tau_{replan})^3 + 3P_1^0\tau_{replan}(1 - \tau_{replan})^2 + 3P_2^0\tau_{replan}^2(1 - \tau_{replan}) + P_3^0\tau_{replan}^3. \end{cases}$$

Sur la figure 4.18, la courbe de référence (en bleu) est définie par les points de contrôle  $P_0^0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ ,  $P_1^0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ ,  $P_2^0 = \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix}$ ,  $P_3^0 = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix}$ . Un obstacle a été détecté quand l'EGV est au point  $\tau_{replan} = 0.45$ . L'algorithme de décomposition est alors utilisé pour fournir la part de la courbe qui appartient à  $\tau \in [0.45, 1]$ . La courbe ainsi définie est obtenue avec les points de contrôle  $P_0^1 = \begin{bmatrix} 0.704 \\ 0.720 \end{bmatrix}$ ,  $P_1^1 = \begin{bmatrix} 1.28 \\ 0.84 \end{bmatrix}$ ,  $P_2^1 = \begin{bmatrix} 2 \\ 0.6 \end{bmatrix}$ ,  $P_3^1 = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix}$ .

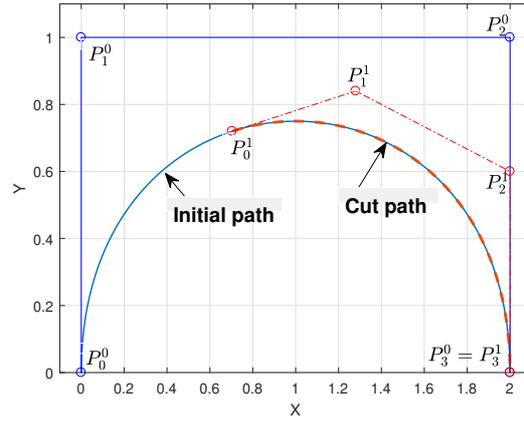


FIGURE 4.18: Illustration de l'algorithme de décomposition de courbes de Bézier

Ces développements montrent bien que pour replanifier une partie extraite d'une courbe de Bézier, cela revient à replanifier une courbe de Bézier dont les paramètres sont déterminés par ceux d'une courbe initiale et d'une valeur de la variable spatiale au point de coupe.

#### 4.3.3.2 Optimisation d'une courbe de Bézier par programmation quadratique

Quand l'EGV détecte un obstacle statique sur son chemin de référence, la position de l'obstacle devient connue, il est alors nécessaire de faire une replanification.

L'apparition d'un besoin de replanification pouvant intervenir à n'importe quel instant pendant une manœuvre, seule la partie non parcourue par l'égo-véhicule est replanifiée. L'objectif est donc de replanifier une partie du chemin afin de passer à une distance de sécurité prédéfinie de l'obstacle avec conservation des lacets initial et final ainsi que l'obligation d'obtenir au moins une courbe de classe  $\mathcal{C}^2$  afin d'assurer la continuité du lacet et du braquage le long du chemin. Il s'agit donc de traduire le problème de replanification de chemin en un problème d'optimisation de type programmation quadratique sous contraintes.

##### 4.3.3.2.1 Définitions des points de passage limite

Pour l'évitement de l'obstacle, le chemin replanifié doit passer par deux points de passage particulier

$$P_0^{C_2} = \begin{bmatrix} -(l - PAF_{ar}) - l_{obs} \\ \pm \left( \frac{L}{2} + \frac{l_{obs}}{2} + \Delta \right) \end{bmatrix}$$

et

$$P_{n+1}^{C_2} = \begin{bmatrix} (l - PAF_{ar}) + l_{obs} \\ \pm \left( \frac{L}{2} + \frac{l_{obs}}{2} + \Delta \right) \end{bmatrix},$$

situés à une distance latérale minimale de l'obstacle de  $\frac{L}{2} + \frac{l_{obs}}{2} + \Delta$  (voir figure 4.19) où  $L$  est la largeur de l'EGV,  $L_{obs}$  est la largeur de l'obstacle et  $\Delta$  est la marge de sécurité.

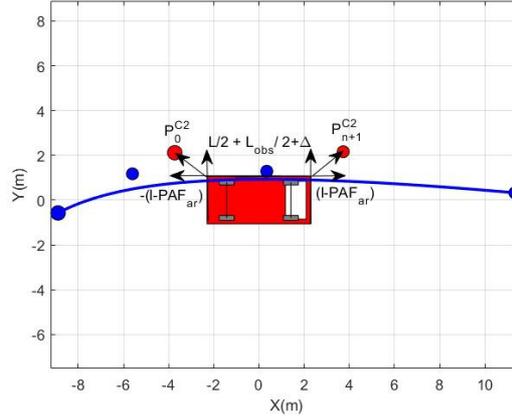


FIGURE 4.19: Illustration de la replanification par programmation quadratique : l'obstacle est la voiture en rouge et le chemin initial est en bleu

#### 4.3.3.2.2 Formulation du problème

Le problème d'optimisation est d'identifier le chemin le plus court qui respecte les contraintes de continuité et de passage aux deux points particuliers. Le chemin est donc défini par deux courbes de Bézier cubiques et une de degré 4 afin de respecter les contraintes aux points de passage et la continuité en vitesse d'angle de braquage. On définit alors le problème d'optimisation sous contrainte suivant :

$$\begin{aligned} \arg \min & J_{length} \left( P_0^{C_1}, \dots, P_3^{C_1} \right) + J_{length} \left( P_0^{C_2}, \dots, P_4^{C_2} \right) + J_{length} \left( P_0^{C_3}, \dots, P_3^{C_3} \right) \\ &= \sum_{i=0}^3 \left| P_{i+1}^{C_1} - P_i^{C_1} \right|^2 + \sum_{i=0}^4 \left| P_{i+1}^{C_2} - P_i^{C_2} \right|^2 + \sum_{i=0}^3 \left| P_{i+1}^{C_3} - P_i^{C_3} \right|^2 \end{aligned} \quad (4.61)$$

où  $C_k$  se réfère à la  $k$ -ème courbe de Bézier,  $P_i^{C_1} = \begin{bmatrix} X_i^{C_1} \\ Y_i^{C_1} \end{bmatrix}$  et  $P_\tau^{C_1} = \begin{bmatrix} X_\tau^{C_1} \\ Y_\tau^{C_1} \end{bmatrix}$ .

#### 4.3.3.2.3 Programmation quadratique

Le critère (4.61) peut être mis sous forme quadratique, à savoir :

$$J_{length}(x) = \frac{1}{2} x^T E x + x^T F. \quad (4.62)$$

Pour réduire le degré de liberté, l'ensemble des contraintes d'égalité s'écrivent :

$$\left\{ \begin{array}{l} X_3^{C_1} = X_0^{C_2} \\ Y_3^{C_1} = Y_0^{C_2} \\ X_3^{C_2} = X_0^{C_3} \\ Y_3^{C_2} = Y_0^{C_3} \\ Y_1^{C_1} = Y_0^{C_1} + (X_1^{C_1} - X_0^{C_1}) \tan(\theta_0) \\ Y_2^{C_3} = Y_3^{C_3} + (X_2^{C_3} - X_3^{C_3}) \tan(\theta_\infty) \\ X_1^{C_2} = 2X_0^{C_2} - X_2^{C_1} \\ Y_1^{C_2} = 2Y_0^{C_2} - Y_2^{C_1} \\ X_2^{C_2} = 2X_3^{C_2} - X_1^{C_3} \\ Y_2^{C_2} = 2Y_3^{C_2} - Y_1^{C_3} \\ X_2^{C_1} = X_1^{C_2} - 0.5X_2^{C_2} + 0.5X_1^{C_1} \\ Y_2^{C_1} = Y_1^{C_2} - 0.5Y_2^{C_2} + 0.5Y_1^{C_1} \\ X_1^{C_3} = X_2^{C_2} - 0.5X_1^{C_2} + 0.5X_2^{C_3} \\ Y_1^{C_3} = Y_2^{C_2} - 0.5Y_1^{C_2} + 0.5Y_2^{C_3}. \end{array} \right. \quad (4.63)$$

De plus, si on considère que l'encombrement de l'obstacle selon l'axe longitudinal est délimité par  $-l_{obs}/2$  et  $l_{obs}/2$ , on obtient :

$$X_0^{C_2} = -\frac{l_{obs}}{2} - (l - PAF_{ar})$$

et

$$X_4^{C_2} = \frac{l_{obs}}{2} + (l - PAF_{ar}).$$

En considérant les contraintes (4.63) dans (4.62), on obtient alors :

$$\arg \min J_{length}(x) = \frac{1}{2} x^T E x + x^T F \quad (4.64)$$

sous contraintes  $Mx \leq \gamma$

où  $x = [Y_0^{C_2}, Y_4^{C_2}]$ ,  $E = \frac{\partial^2 J_{length}}{\partial x^2}$ ,  $F = \frac{\partial J_{length}}{\partial x}$ ,  $M = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$ ,  $\gamma = \begin{bmatrix} -\frac{L}{2} - \frac{L_{obs}}{2} - \Delta \\ -\frac{L}{2} - \frac{L_{obs}}{2} - \Delta \end{bmatrix}$  et  $L_{obs}$  est la largeur de l'obstacle.

Le Lagrangien du problème permet de réécrire (4.64) en un problème sans contrainte, à savoir :

$$J(x, \lambda) = \frac{1}{2} x^T E x + x^T F + \lambda^T (Mx - \gamma), \quad (4.65)$$

où  $\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix}$  est un coefficient de Lagrange. Trouver  $x$  qui minimise le critère  $J_{length}$  revient à résoudre :

$$\max_{\lambda \geq 0} \min_x \left( \frac{1}{2} x^T E x + x^T F + \lambda^T (Mx - \gamma) \right). \quad (4.66)$$

En annulant la dérivée du critère (4.66) selon  $x$ , il est possible d'obtenir  $x = f(\lambda)$  selon :

$$x = -E^{-1}(F + M^T \lambda). \quad (4.67)$$

En remplaçant  $x$  dans (4.66) avec son expression dans (4.67), on obtient :

$$\max_{\lambda \geq 0} \left( -\frac{1}{2} \lambda^T H \lambda - \lambda^T K - \frac{1}{2} \gamma^T E^{-1} F \right), \quad (4.68)$$

qui peut être réécrite, en posant  $H = ME^{-1}M^T$  et  $K = \gamma + ME^{-1}F$ , par :

$$\min_{\lambda \geq 0} \left( \frac{1}{2} \lambda^T H \lambda + \lambda^T K + \frac{1}{2} \gamma^T E^{-1} \gamma \right), \quad (4.69)$$

que l'on résout selon l'algorithme de Hildreth tel que présenté dans [145].

#### 4.3.3.2.4 Simulations et comparaison

On considère un scénario qui correspond à "tourner à droite dans une intersection". L'EGV suit un chemin de référence défini par une courbe de Bézier avec le point de départ  $P_{0i} = \begin{bmatrix} 1.75 \\ -25 \end{bmatrix}$

et le point d'arrivée  $P_{3i} = \begin{bmatrix} 25 \\ -1.75 \end{bmatrix}$ .

Quand l'EGV atteint  $\tau = 0.5$ , un obstacle statique a été détecté et doit être évité.

Cet obstacle entre en conflit avec le chemin de référence en  $\tau = \tau_{obs} = 0.8$ . L'objectif est donc de replanifier la partie du chemin de référence correspondant à l'intervalle  $\tau \in [0.5, 1]$ . La largeur du véhicule  $l$  est de 2.117m et  $l_{obs} = l$ . La marge de sécurité  $\Delta$  est fixée à 0.1m.

Les angles de lacet initial et final sont à  $\theta_0 = 12^\circ$  et  $\theta_\infty = 20^\circ$ , et on note que le maximum d'angle de braquage est fixé à  $|\varphi_{max}| = 30^\circ$ .

Le problème d'optimisation défini en (4.69) est résolu avec

$$E = \begin{bmatrix} 8.3 & -2.2 & 0.63 & -0.12 \\ -2.2 & 3.5 & -2.1 & -0.047 \\ 0.63 & -2.1 & 3.5 & 0.16 \\ -0.12 & -0.047 & 0.16 & 3.5 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} 76 \\ -19 \\ 3.2 \\ -28 \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \text{ et } \gamma = \begin{bmatrix} -2.2170 \\ -2.2170 \end{bmatrix}.$$

Après convergence, on obtient l'optimum suivant :

$$x^* = \begin{bmatrix} X_1^{C_1} = -8.5887, \\ Y_0^{C_2} = 2.2170, \\ Y_3^{C_2} = 2.2170, \\ X_2^{C_3} = 7.7634 \end{bmatrix}.$$

La figure 4.20 montre le résultat de l'optimisation avec un chemin replanifié et on voit effectivement que l'EGV évite l'obstacle à une distance de 0.1m.

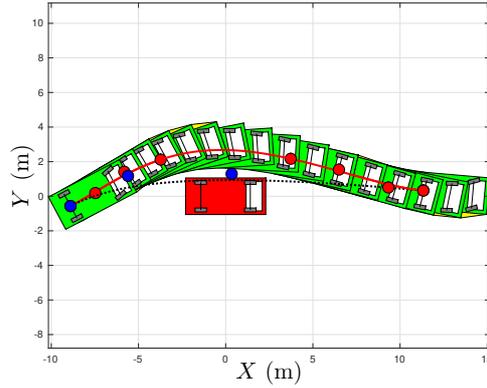


FIGURE 4.20: Replanification par programmation quadratique : EGV (voiture en vert), l'obstacle (voiture rouge), le chemin initial ( $\cdots$ ) et le chemin replanifié ( $\text{—}$ )

Une comparaison est effectuée entre la méthode des champs de potentiel avec la définition de Weyl (voir section 4.3.1.2.2), une méthode d'optimisation de courbe de Bézier (voir [E-12]) et la méthode de programmation quadratique cité précédemment. La paramétrisation des PF est détaillé dans [E-18]. Les résultats sont illustrés sur la figure 4.21a pour les chemins obtenus par les 3 méthodes, avec les angles de braquage correspondants (voir figure 4.21b). Les performances des 3 méthodes sont présentés dans le tableau 4.4.

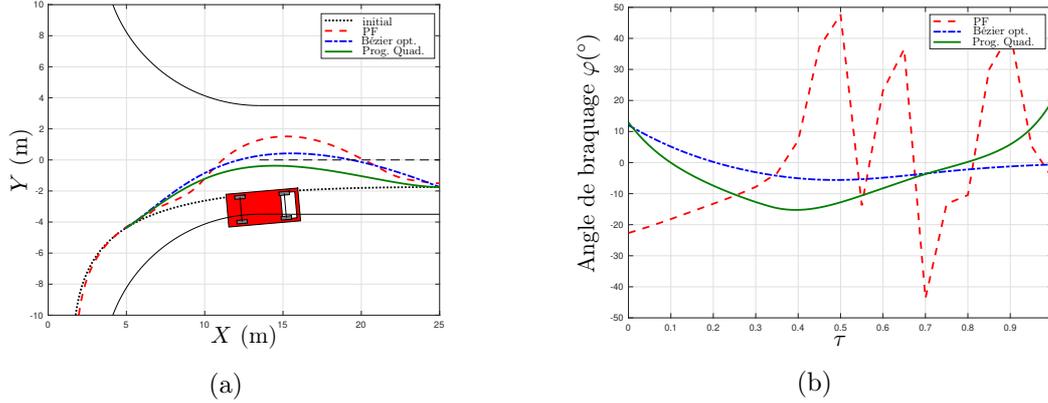


FIGURE 4.21: (a) Comparaison : chemin initial ( $\cdots$ ), méthode PF ( $\text{—}$ ), chemin replanifié selon une optimisation par courbe de Bézier ( $\text{-- --}$ ) et chemin replanifié selon une optimisation par programmation quadratique ( $\text{— — —}$ ) (b) Angles de braquage de l'EGV pour l'évitement d'obstacle

L'avantage des méthodes d'optimisation par courbes de Bézier réside dans le fait que l'on peut prendre en considération les contraintes cinématiques du véhicule contrairement au PF. En effet, la continuité du chemin est également respectée pour les méthodes d'optimisation contrairement au PF.

De plus, la conservation des angles de lacet initial ( $\theta_0 = 12^\circ$ ) et final ( $\theta_\infty = 20^\circ$ ) est satisfaite pour la programmation quadratique ainsi que pour le PF. La méthode d'optimisation de courbe de Bézier n'utilise qu'une simple courbe de Bézier cubique et n'a donc pas suffisamment

de degrés de liberté pour à la fois éviter une collision avec un obstacle et imposer un angle de lacet final.

Aussi, pendant une manœuvre d'évitement d'obstacle, la contrainte d'angle de braquage de l'EGV est respectée pour les deux méthodes d'optimisation contrairement au PF (voir figure 4.21b). Il est à noter que le maximum d'angle de braquage dépend de la marge de sécurité  $\Delta$  et de  $\tau_{replan}$ . En effet, plus  $\Delta$  est grand, plus le maximum de l'angle de braquage est grand. Similairement, plus  $\tau_{replan}$  est proche de  $\tau_{obs}$ , plus grand est le maximum de l'angle de braquage. Aussi, afin de limiter le maximum d'angle de braquage, il est préférable de replanifier le chemin le plus tôt possible et/ou de réduire encore plus la marge  $\Delta$ .

Finalement, l'optimisation par programmation quadratique a également le meilleur temps de calcul, celui de l'optimisation d'une courbe de Bézier étant acceptable et celui des PF étant la pire.

Méthode	Continuité du chemin replanifié	Respect du lacet initial et final	Marge sur l'angle de braquage max.	Temps de calcul
PF	non	oui	non	326 ms
Opt. Bézier	oui	non	18°	85 ms
Prog. Quad.	oui	oui	15°	37 ms

TABLE 4.4: Comparaison des méthodes PF, de l'optimisation des courbes de Bézier et de l'optimisation par programmation quadratique

### 4.3.3.3 Synthèse

Les développements sur la planification prédictive de chemin ont été réalisés lors de la thèse de J. Moreau [106] et ont permis les publications dans une revue [B-1], 3 conférences internationales [E-18, E-11, E-12] et un brevet [G-1].

A partir de cette planification prédictive de chemin, il a ensuite fallu y associer une planification de vitesse afin de rendre ce chemin réactif et dynamique en fonction des obstacles rencontrés. Pour cela, nous avons combiné l'espace de coordination au chemin prédictif afin d'y adapter un profil de vitesse selon deux méthodologies : une planification de vitesse en utilisant les informations a priori sur le parcours suivi par le véhicule et une en utilisant la replanification de vitesse du véhicule afin de coordonner le franchissement d'une intersection avec les autres véhicules présents. Ces travaux de recherche ont pu être validés sur banc de simulation à travers le simulateur SCANer (voir figure 4.22).



FIGURE 4.22: Validation de la replanification prédictive et réactive sous SCANeR

## 4.4 Conclusion

Les contributions que j'ai apportées dans ce chapitre permettent de mettre en exergue l'application de l'opérateur de dérivation non entière en planification de trajectoire, à la fois dans l'extension de la platitude aux systèmes fractionnellement plats, dans l'extension des champs de potentiel artificiel attractifs (au travers d'une commande robuste) et répulsifs (au travers d'une nouvelle définition fractionnaire et dynamique), dans l'optimisation multi-critère au travers de l'algorithme génétique pour obtenir des trajectoires optimales, en la combinant aux champs de potentiel pour garantir une réactivité aux imprévus de l'environnement, et enfin, dans la replanification de trajectoire en intersection en vue d'une optimisation de chemin et de vitesse en temps-réel au travers d'une programmation quadratique avec des courbes de Bézier et en prenant en compte les contraintes non-holonomes du véhicule.

Toutes ces méthodes ont été validées au travers de diverses applications : sur la diffusion thermique en 2D pour l'extension de la platitude, sur des exemples en 2D et en 3D pour l'optimisation multi-critère, et sous SCANeR pour la replanification de trajectoire.



## Chapitre 5

# Contributions en modélisation et en identification des systèmes non entiers

---

<b>5.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>135</b>
<b>5.2</b>	<b>Contributions en modélisation des systèmes non entiers</b>	<b>135</b>
5.2.1	Modélisation de la diffusion thermique en 2D	135
5.2.2	Modélisation des transferts thermiques dans les poumons	138
5.2.3	Modélisation des perturbations de vent	147
<b>5.3</b>	<b>Contributions en identification par modèle non entier</b>	<b>154</b>
5.3.1	Identification de systèmes non commensurables (ou quelconques)	154
5.3.2	Identification de systèmes non entiers à entrées multiple et une sortie (MISO)	160
5.3.3	Identification de systèmes non entiers en temps-réel	172
<b>5.4</b>	<b>Contributions à la toolbox CRONE/Matlab®</b>	<b>179</b>
<b>5.5</b>	<b>Conclusion et autres contributions</b>	<b>182</b>

---



## 5.1 Introduction

Depuis sa formalisation au XIX<sup>ème</sup> siècle, l'opérateur de dérivation non entière est longtemps resté un opérateur mathématique abstrait. A partir de la seconde moitié du XX<sup>ème</sup> siècle, cet opérateur a trouvé son utilité dans la modélisation des phénomènes de diffusion.

Je me suis toujours attaché à ne pas faire que de la simulation des systèmes non entiers mais à également concrétiser et valider les développements théoriques sur des applications réelles et concrètes. Je me suis donc investi pour utiliser cet opérateur afin de développer des modèles plus adaptés pour la modélisation

- de la diffusion thermique en 2D ;
- des transferts thermiques dans les poumons ;
- des perturbations de vent à partir de l'analyse dans le domaine fréquentiel ;
- de la propagation d'une épidémie (avec application au COVID-19).

A la suite de mon recrutement en 2011. J'ai poursuivi mes travaux de recherche dans l'identification des systèmes dynamiques par modèle non entier. Je n'avais développé des méthodes d'identification que pour des systèmes commensurables monovariables (une entrée une sortie) en boucle ouverte, en hors-ligne et dans le domaine temporel. Je me suis donc investi dans le développement de méthodes d'identification pour les systèmes non entiers au travers de :

- la planification d'expériences pour optimiser le signal d'excitation en vue d'une identification,
- l'identification paramétrique de systèmes non commensurables (ou quelconques),
- l'identification paramétrique de systèmes à plusieurs entrées (MISO),
- l'identification paramétrique de systèmes non entiers en ligne (en temps-réel).

Enfin, je me suis fortement investi dans le développement de la toolbox CRONE sous Matlab<sup>®</sup> pour la simulation, le calcul fractionnaire et l'identification des systèmes non entiers.

## 5.2 Contributions en modélisation des systèmes non entiers

La spécificité de l'équipe CRONE est de travailler sur l'opérateur de dérivation non entière. En effet, cet opérateur ayant une caractérisation globale possède la propriété de mémoire longue et s'avère particulièrement adapté pour modéliser avec peu de paramètres (la *compacité paramétrique*) les phénomènes de diffusion.

### 5.2.1 Modélisation de la diffusion thermique en 2D

#### 5.2.1.1 Equation de la chaleur

Une plaque métallique 2D est supposée isolée et sans perte de chaleur (voir figure 5.1), où la température  $T(x, y, t)$  est contrôlée par la densité de flux de chaleur  $\varphi(y, t)$  le long de

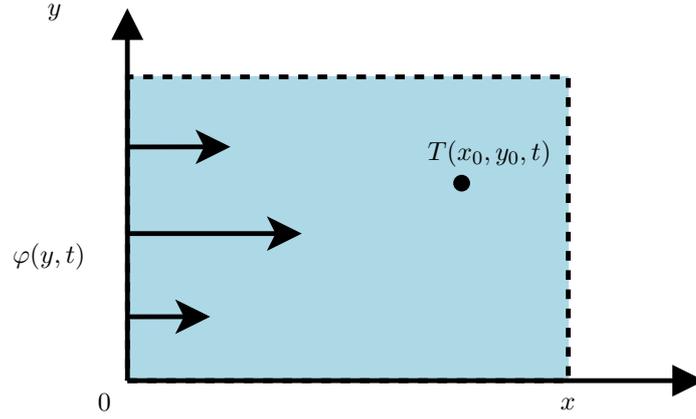


FIGURE 5.1: Plaque métallique chauffée

l'axe  $y$  pour  $y \geq 0$ . Le milieu est considéré homogène, plan, et semi-infini de diffusivité  $\alpha$  et de conductivité  $\lambda$ . L'objectif est de générer le mouvement de la température à un point donné  $(x_0, y_0)$  et d'obtenir une commande qui permet de le générer.

Comme il est connu, la diffusion de la température satisfait l'équation de la chaleur :

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial}{\partial t} \right) T(x, y, t) = 0, \quad (5.1)$$

dans le quart d'espace ouvert  $x \in ]0, \infty[$ ,  $y \in ]0, \infty[$  et  $t > 0$ , avec comme condition à l'interface

$$-\lambda \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \varphi(y, t), \quad \forall t > 0 \quad (5.2)$$

où  $\varphi$  est la variable de commande, les conditions aux limites suivantes

$$\lim_{x \rightarrow \infty} T(x, y, t) = 0, \quad \forall y > 0, \quad \forall t, \quad (5.3)$$

$$\lim_{y \rightarrow \infty} T(x, y, t) = 0, \quad \forall x > 0, \quad \forall t, \quad (5.4)$$

et la condition de Cauchy

$$T(x, y, 0) = 0 \text{ pour tout } 0 < x < \infty \text{ et } 0 < y < \infty. \quad (5.5)$$

En suivant une approche par séparation de variables (voir *e.g.* [40]), et en appliquant la transformée de Laplace à (5.1), on obtient :

$$\frac{s}{\alpha} \hat{T}(x, y, s) = \frac{\partial^2 \hat{T}(x, y, s)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{T}(x, y, s)}{\partial y^2}. \quad (5.6)$$

On peut voir que la série formelle :

$$\hat{T}(x, y, s) = \sum_{i=0}^{+\infty} L_{x,i}(s) L_{y,i}(s) e^{-\sqrt{s} \left( \frac{x}{i+1} + y \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{(i+1)^2}} \right)} \quad (5.7)$$

où  $L_{x,i}(s)$  et  $L_{y,i}(s)$  sont des fonctions arbitraires de la variable complexe  $s$ , satisfait (5.1) –(5.5) et que le flux de chaleur, défini par (5.2), est donné par

$$\hat{\varphi}(y, s) = \sum_{i=0}^{+\infty} \lambda \frac{\sqrt{s}}{i+1} L_{x,i}(s) L_{y,i}(s) e^{-\sqrt{s}y \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{(i+1)^2}}}. \quad (5.8)$$

En posant

$$\hat{\varphi}_i(s) \triangleq \frac{\lambda \sqrt{s}}{i+1} L_{x,i}(s) L_{y,i}(s), \quad \forall i, \quad (5.9)$$

la solution unique de (5.6) pour chaque densité de flux intégrable  $\hat{\varphi}$  donne :

$$\begin{aligned} \hat{T}(x, y, s) &= \sum_{i=0}^{+\infty} \frac{i+1}{\lambda \sqrt{s}} e^{-\sqrt{s} \left( \frac{x}{i+1} + y \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{(i+1)^2}} \right)} \hat{\varphi}_i(s) \\ \hat{\varphi}(y, s) &= \sum_{i=0}^{+\infty} e^{-\sqrt{s} \left( y \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{(i+1)^2}} \right)} \hat{\varphi}_i(s). \end{aligned} \quad (5.10)$$

**Remarque 5.2.1.** La suite  $(\hat{\varphi}_i)$  correspond à une décomposition d'un flux de chaleur en fréquences spatiales.

Pour tout  $i \geq 0$ , on définit les *impédances thermiques* :

$$H_i(x, y, s) \triangleq \frac{(i+1) e^{-\sqrt{s} \left( \frac{x}{i+1} + y \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{(i+1)^2}} \right)}}{\lambda \sqrt{s}}, \quad (5.11)$$

telles que, en notant  $\hat{T}_i(x, y, s) = H_i(x, y, s) \hat{\varphi}_i(s)$ , on a

$$\hat{T}(x, y, s) = \sum_{i=0}^{+\infty} H_i(x, y, s) \hat{\varphi}_i(s) = \sum_{i=0}^{+\infty} \hat{T}_i(x, y, s). \quad (5.12)$$

### 5.2.1.2 Approximation du transfert thermique par modèle non entier

En utilisant l'approximation de Padé de  $e^{-x}$  à l'ordre  $\mathbf{K}$  (voir *e.g.* [4]), l'expression (5.11) évaluée au point  $(x_0, y_0)$ , avec  $\gamma = \frac{1}{2}$ , donne :

$$\begin{aligned} H_i(x_0, y_0, s) &= \frac{(i+1)}{\lambda \sqrt{s}} e^{-\sqrt{s} \left( \frac{x_0}{i+1} + y_0 \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{(i+1)^2}} \right)} \\ &\approx \frac{\sum_{k=0}^{\mathbf{K}} \frac{(i+1)}{\lambda} a_{i,k} s^{k\gamma}}{\sum_{k=0}^{\mathbf{K}} |a_{i,k}| s^{(k+1)\gamma}} \triangleq H_{i,\mathbf{K}}(x_0, y_0, s), \end{aligned} \quad (5.13)$$

avec  $a_{i,k} = \frac{(-1)^k (2\mathbf{K}-k)! \mathbf{K}!}{2\mathbf{K}! k! (\mathbf{K}-k)!} \left( \frac{x_0}{i+1} + y_0 \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{(i+1)^2}} \right)^k$ .

Pour un point  $(x_0, y_0)$  pas très éloigné de l'origine, pour chaque  $i \geq 0$ ,  $H_{i,\mathbf{K}}$  converge rapidement vers  $H_i$  quand  $\mathbf{K}$  tend vers l'infini. Aussi, étant donné un nombre fini  $\mathbf{I}$ , la température tronquée

$$\hat{T}_{\mathbf{I},\mathbf{K}}(x_0, y_0, s) \triangleq \sum_{i=0}^{\mathbf{I}} H_{i,\mathbf{K}}(x_0, y_0, s) \hat{\varphi}_i(s) \quad (5.14)$$

peut être vue comme convergeant rapidement vers  $T(x_0, y_0, t)$  quand  $\mathbf{I}$  tend vers l'infini. On note que la suite finie  $\{\varphi_i, i = 0, \dots, \mathbf{I}\}$  joue maintenant le rôle d'un vecteur de commande.

Sous forme de pseudo-représentation d'état, le transfert (5.14) peut être représenté par :

$$AX = BU, \quad T_{\mathbf{I}, \mathbf{K}}(x_0, y_0, t) = CX, \quad (5.15)$$

où, pour  $i = 0, \dots, \mathbf{I}$  :

$$X \triangleq \begin{bmatrix} X_0 \\ \vdots \\ X_{\mathbf{I}} \end{bmatrix} \text{ avec } X_i \triangleq \begin{bmatrix} X_{i, \mathbf{K}} \\ \vdots \\ X_{i, 0} \end{bmatrix}, \quad U \triangleq \begin{bmatrix} \varphi_0 \\ \vdots \\ \varphi_{\mathbf{I}} \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

$$A \triangleq \text{diag}\{A_i\} \quad \text{avec} \quad A_i \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{D}_a^{\frac{1}{2}} + |a'_{i, \mathbf{K}-1}| & |a'_{i, \mathbf{K}-2}| & \dots & |a'_{i, 0}| & 0 \\ -1 & \mathbf{D}_a^{\frac{1}{2}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -1 & \mathbf{D}_a^{\frac{1}{2}} \end{bmatrix}, \quad (5.17)$$

$$B \triangleq \text{diag}\{B_i\} \quad \text{avec} \quad B_i \triangleq \begin{bmatrix} 1 \\ 0_{\mathbf{K} \times 1} \end{bmatrix}, \quad (5.18)$$

$$C \triangleq [C_0, \dots, C_{\mathbf{I}}] \quad \text{avec} \quad C_i \triangleq \frac{(i+1)}{\lambda} [a'_{i, \mathbf{K}}, \dots, a'_{i, 0}],$$

et où on a noté  $a'_{i, k} = a_{i, k} / |a_{i, \mathbf{K}}|$  pour tout  $k = 0, \dots, \mathbf{K}$  et pour tout  $i = 0, \dots, \mathbf{I}$ .

### 5.2.1.3 Synthèse

Les développements sur la modélisation de la diffusion thermique en 2D ont permis les publications dans une revue [E-22] et une revue internationale [A-15]. Ce modèle de diffusion a ensuite été utilisée pour l'application de la caractérisation des sorties plates et la génération de mouvement de la température en un point de la plaque chauffante.

## 5.2.2 Modélisation des transferts thermiques dans les poumons

Pendant une opération à cœur ouvert, le contrôle de la température et des échanges thermiques dans les poumons permettront de diminuer les risques de nécroses ainsi que de préserver la plus grande partie du poumon. Il est à noter que ces échanges thermiques peuvent également être considérés pour tout type d'organes et de tissus biologiques.

Les patients peuvent souffrir de dommages dans les poumons pendant un pontage cardio-pulmonaire, tels que de l'ischémie [38]. Les techniques de perfusion impliquant un contrôle indirect de température existent [70]. Certains dommages sur les poumons peuvent être traités en appliquant une légère hypothermie [148]. La précision requise pour maintenir une température

précise dans les tissus justifie l'intérêt d'établir des modèles thermiques dynamiques pour des scénarios physiologiques.

On considère les transferts thermiques dans une bronche moyenne du côté droit. Sous des conditions normales, la cavité nasale et le larynx jouent un rôle significatif vis-à-vis du réchauffement de l'air et de l'humidification (voir [48] et [45]) et des procédures altérant ce conditionnement peuvent conduire à des changements de conditions thermiques à l'intérieur des poumons. Les bronches humaines peuvent ainsi être exposées à des stress dans ces conditions. Pour l'analyse, une longueur intermédiaire,  $L = 0.0236\text{m}$ , a été choisie car elle correspond à une valeur moyenne d'une longueur de bronche moyenne d'un côté droit [85] et le rayon est de  $r \approx 1\text{mm}$  [79].

En termes de fréquences, bien que la respiration humaine n'est pas un mécanisme naturellement lent, elle peut avoir des dynamiques non-négligeables pour les transferts thermiques. La respiration humaine peut aller jusqu'à 20 respirations par minute en condition normale. Cette respiration est autour de 12 respirations par minute en moyenne pour un adulte. Une respiration lente est considéré dans la bande de fréquences  $[0.07, 0.16]$  Hz [140] et au-delà de 14 respirations par minute (ou 0.23 Hz), une telle respiration peut déjà être considéré pour certains patients comme anormale [43]. Par conséquent, l'optimisation peut être réalisée sur la bande de fréquences utile  $[0.01, 5]\text{rad/s}$  afin d'aller légèrement au-delà des conditions normales de respiration.

### 5.2.2.1 Réseau thermique à deux ports

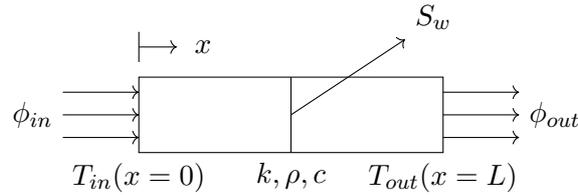


FIGURE 5.2: Système thermique en 1D

Considérons l'équation de la chaleur sur un milieu plan selon la direction longitudinale  $x$ , tel que représenté sur la figure 5.2 où  $k$ ,  $\rho$  et  $c$  sont respectivement la conductivité thermique, la densité et la capacité calorifique. La longueur total est  $L$  et la section est noté  $S_w$ . L'équation de la chaleur s'exprime selon :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T, \quad (5.19)$$

et comme la conduction est selon la direction  $x$ , on peut la réécrire par :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (5.20)$$

La transformation de Laplace de l'équation (5.20), avec des conditions initiales nulles,

conduit à :

$$sT(x, s) = \frac{k}{\rho c} \frac{\partial^2 T(x, s)}{\partial x^2}, \quad (5.21)$$

où  $s$  dénote la variable de Laplace.

En considérant une entrée de flux thermique en  $x = 0$  et une sortie de flux de chaleur en  $x = L$ , on trouve alors :

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{in}(s) &= -kS_w \left. \frac{\partial T(x, s)}{\partial x} \right|_{x=0} \\ \dot{Q}_{out}(s) &= -kS_w \left. \frac{\partial T(x, s)}{\partial x} \right|_{x=L}, \end{aligned} \quad (5.22)$$

ou encore, mise sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} T_{in}(s) \\ \dot{Q}_{in}(s) \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} T_{out}(s) \\ \dot{Q}_{out}(s) \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

où

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \cosh(\delta L) & \frac{1}{kS_w \delta} \sinh(\delta L) \\ kS_w \sinh(\delta L) & \cosh(\delta L) \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

avec  $\delta = \sqrt{\frac{s}{a}}$  et  $a = \frac{k}{\rho c}$ .

Notons que  $\delta$  implique la présence d'un opérateur d'ordre non entier. Cette équation matricielle (5.23) peut être représentée par un circuit en T (voir figure 5.3).

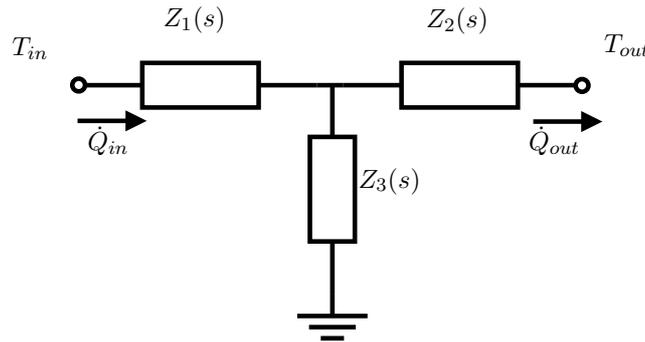


FIGURE 5.3: Réseau thermique à deux ports

Les impédances en série peuvent être exprimées par :

$$Z_1(s) = Z_2(s) = \frac{1}{kS_w \delta} [\coth(\delta L) - \operatorname{csch}(\delta L)] \quad (5.25)$$

et l'impédance en parallèle par :

$$Z_3(s) = \frac{1}{kS_w \delta} \operatorname{csch}(\delta L) \quad (5.26)$$

où  $\coth$  et  $\operatorname{csch}$  sont respectivement les fonctions cotangente hyperbolique et cosécante.

### 5.2.2.2 Approximation des impédances en séries $Z_1$ et $Z_2$

#### 5.2.2.2.1 Approximation asymptotique

Les impédances en séries  $Z_1$  et  $Z_2$  sont égales et se comportent comme une résistance en basse fréquence comme un élément à phase constante en haute fréquence. Une simple approximation, appelé *approximation asymptotique* de  $Z_1$  consiste à prendre une combinaison d'une résistance et d'une fractance, à savoir :

$$Z_{1-asympt}(s) = \frac{R}{1 + RC_s\sqrt{s}}, \quad (5.27)$$

avec  $R = \frac{L}{2kS_w} = 0.5 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1}$  et  $C_s = \frac{kS_w}{\sqrt{a}} = 1 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-0.5}$ .

Les figures 5.5a et 5.5b montrent respectivement l'approximation  $Z_{1-asympt}$  en comparaison avec la réponse exacte de  $Z_1$  ainsi que l'erreur absolue en dB sur la bande de fréquences [0.01, 5] rad/s. On voit clairement une bonne approximation aux hautes et basses fréquences, mais l'erreur est très importante aux moyennes fréquences. De plus, la fréquence transitionnelle du modèle asymptotique étant très basse, une décade plus basse, sa dynamique sera forcément bien plus lente.

#### 5.2.2.2.2 Contribution par l'approximation par pôles et zéros

Un terme de correction est rajouté à l'approximation asymptotique afin d'améliorer le comportement aux moyennes fréquences. On considère tout d'abord des cellules par pôles et zéros dans la bande de fréquence d'intérêt, à savoir :

$$Z_{1-pz}(s) = \frac{R}{1 + RC\sqrt{s}} \prod_i^{N_{cells}} \frac{1 + \frac{s}{z_i}}{1 + \frac{s}{p_i}}. \quad (5.28)$$

Le vecteur de paramètres  $\theta$  est donné par :

$$\theta = [\mathbf{p} \quad \mathbf{z}] \quad (5.29)$$

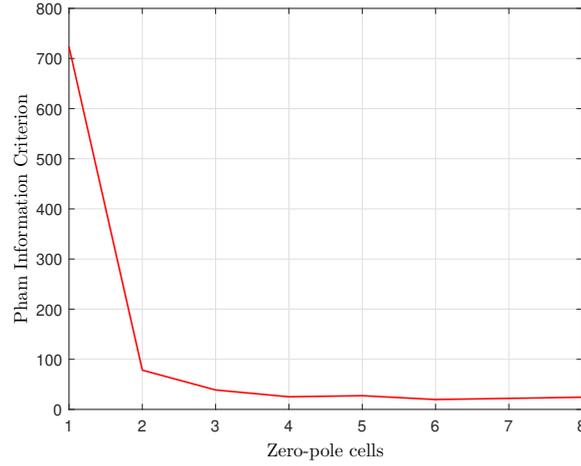
où  $\mathbf{p}$  et  $\mathbf{z}$  sont respectivement les vecteurs contenant les pôles et zéros.

Afin de déterminer le nombre de cellules optimal pour l'approximation par pôles et zéros, le critère d'erreur PIC (*Pham Information Criterion* en anglais) a été optimisé en fonction du nombre de cellules  $N_{cells}$  de pôles et zéros [134], défini par :

$$PIC = SSE + k \left[ \frac{N - 1}{N - k} \right] \quad (5.30)$$

où  $SSE$  est la somme des erreurs quadratiques,  $k$  est le nombre de paramètres et  $N$  est le nombre de données.

Au vu de l'évolution du critère PIC (voir figure 5.4), l'optimum est obtenu pour  $N_{cells} = 3$ .


 FIGURE 5.4: Critère PIC en fonction du nombre de cellules  $N_{cells}$ 

### 5.2.2.2.3 Contribution par une approximation de Butterworth

En observant la courbe de gain de la figure 5.5a, un filtre de Butterworth [39] peut être utilisé, en s'inspirant de [1], où un filtre de Butterworth fractionnaire a été utilisé, selon :

$$Z_{1-BW}(s) = \frac{d}{s^{\alpha+\beta} + as^{\alpha} + bs^{\beta} + c}. \quad (5.31)$$

Cette approximation n'est pas un terme de correction multiplié à l'approximation asymptotique, car les comportements en haute et basse fréquence sont incluses, à savoir :

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} Z_{1-BW}(j\omega) \approx \frac{d}{c} = R \quad (5.32)$$

et

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} Z_{1-BW}(j\omega) \approx \frac{d}{(j\omega)^{\alpha+\beta}}. \quad (5.33)$$

Une identification terme à terme donne :

$$\alpha + \beta = 0.5 \quad (5.34)$$

$$c = \frac{1}{RC} \quad (5.35)$$

$$d = \frac{1}{C}. \quad (5.36)$$

Le vecteur de paramètres sera alors toujours limité à 3 :

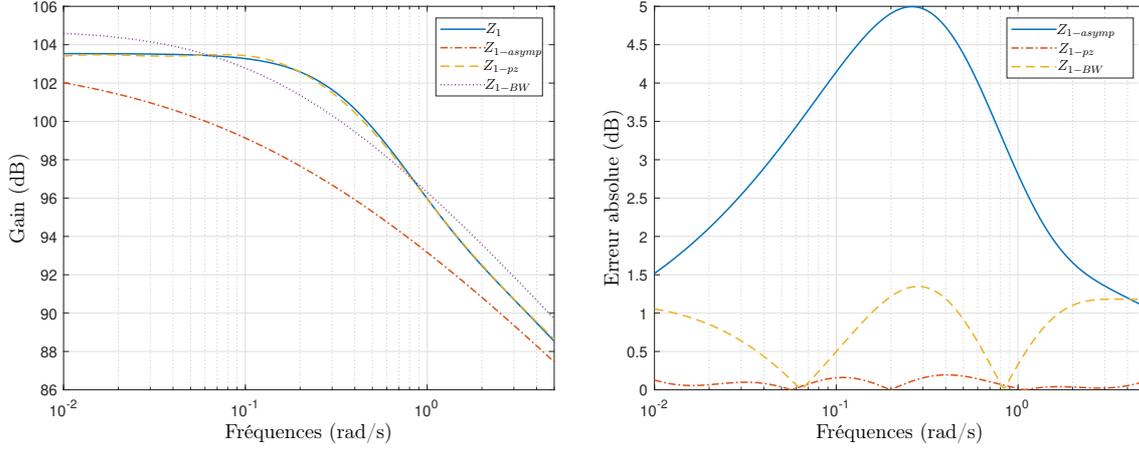
$$\theta = [\alpha \quad a \quad b]. \quad (5.37)$$

### 5.2.2.2.4 Comparaison des approximations de l'impédance en série $Z_1$

Afin de comparer les approximations précédentes, l'erreur absolue est définie selon :

$$\epsilon(j\omega) = ||Z_{1-exact}(j\omega)|_{dB} - |Z_{1-approx}(j\omega)|_{dB}|. \quad (5.38)$$

La figure 5.5a illustre les courbes de gain du modèle exact ainsi que des approximations proposées de  $Z_1$  alors que les courbes d'erreurs sont tracées sur la figure 5.5b.



(a) Diagramme de gain de  $Z_1$  et de ses approximations (b) Erreurs absolues  $\epsilon(j\omega)$  associées aux différentes approximations de  $Z_1$

FIGURE 5.5: Comparaison de  $Z_1$  et de ses approximations

Les valeurs maximale, moyenne et minimale de l'erreur sont calculées pour les 3 approximations et sont données dans le tableau 5.1.

Approximation	Max. (dB)	Moy. (dB)	Min. (dB)
Asymptotique	4.99	3.05	1.0829
Pôles-zéros	0.19	0.08	0.0018
Butterworth	1.34	0.80	0.0151

TABLE 5.1: Valeurs extrêmes et moyennes des erreurs absolues obtenues pour les approximations de  $Z_1$

Comme prévu, l'approximation asymptotique offre une erreur très significative pour toute la bande de fréquence d'intérêt, ce qui indique qu'une bronche humaine ne peut être considérée seulement en basse fréquence car les respirations humaines se situent en moyenne fréquence. L'approximation par pôles et zéros est la plus précise avec 8 paramètres. L'approximation de Butterworth est correcte alors qu'elle n'a que 3 paramètres, soit 5 paramètres en moins.

### 5.2.2.3 Approximation de l'impédance de shunt $Z_3$

#### 5.2.2.3.1 Approximation par une capacitance

L'impédance de shunt  $Z_3$  se comporte comme une pure capacitance en basse fréquence, mais son comportement en haute fréquence est plus complexe que pour celle de l'impédance en

série, à savoir :

$$Z_{3-cap}(s) = \frac{1}{C_t s}, \quad (5.39)$$

avec  $C_t = \frac{kLS_w}{a} = 1 J \cdot K^{-1}$ .

La réponse en gain de  $Z_3$  et l'approximation par une capacitance sont illustrées sur la figure 5.6a.

La pente de  $-20\text{dB/dec}$ , visible en basse fréquences, confirme le comportement d'une capacitance de  $Z_3$ . Cependant, la pente de la courbe de gain décroît quand la fréquence croît. Bien qu'une capacitance se comporte comme un court-circuit en haute fréquence, la pente de gain ne croît plus et la courbe d'erreur croît indéfiniment en haute fréquence (voir figure 5.6b).

### 5.2.2.3.2 Contribution par l'approximation d'une pente non entière

Dans une respiration se situant en moyenne fréquence, il faut ainsi modifier le modèle de capacitance en incluant une pente supplémentaire.

En observant les pentes en haute et basse fréquences de la figure 5.6a, on obtient :

$$\left. \frac{d|Z_3(j\omega)|}{d\omega} \right|_{\omega=0.01} = -20.00 \text{ dB/dec} \quad (5.40)$$

et

$$\left. \frac{d|Z_3(j\omega)|}{d\omega} \right|_{\omega=5} = -78.28 \text{ dB/dec}. \quad (5.41)$$

La différence entre les pentes initiale et finale est d'environ  $-60 \text{ dB/dec}$ . Afin de corriger cette erreur, un simple filtre non entier est rajouté au modèle de capacitance :

$$Z_{3-frac}(s) = \frac{1}{C_t s} \left[ \frac{1}{1 + (\tau s)^\phi} \right]. \quad (5.42)$$

Ce terme de correction augmente la pente de gain en haute fréquence d'un facteur  $\phi$ , à savoir  $-20\phi \text{ dB/dec}$ .  $1/\tau$  indique la fréquence transitionnelle à partir de laquelle le terme de correction démarre son influence. Une première estimation de  $\phi$  serait de 2.90 afin de se rapprocher de la pente en haute fréquence de  $-78.28 \text{ dB/dec}$ . Le vecteur de paramètre dans ce cas est :

$$\theta_{frac-slope} = [\tau \quad \phi]. \quad (5.43)$$

Le terme de correction dans l'équation (5.42) a la forme suivante :

$$G(s) = \frac{1}{1 + (\tau s)^\phi} = \frac{b}{s^\alpha + b}, \quad (5.44)$$

ce qui rappelle une fonction de transfert non entière commensurable à l'ordre  $\alpha$  et en appliquant le théorème de stabilité de Matignon A.7.4, on obtient :

$$|\arg(\lambda_i)| > \alpha \frac{\pi}{2}, \quad (5.45)$$

où, pour  $\lambda = s^\alpha$ ,  $\lambda_i$  sont les racines du polynôme caractéristique en  $\lambda$ .

Pour cette structure générale présentée en (5.44), on obtient :

$$\lambda_i = -b \Rightarrow |\arg(-b)| = \pi. \quad (5.46)$$

Ainsi, la condition de stabilité s'écrit  $\alpha < 2$  pour  $b > 0$ .

### 5.2.2.3.3 Contribution par une approximation de pôles multiples non entiers

Selon le théorème de stabilité de Matignon, l'ordre commensurable non entier  $\alpha$  étant limité à 2, il est n'est pas possible d'aller au-delà de cette limite. Afin d'avoir une pente en haute fréquence plus adaptée avec un tel modèle (5.44), il faut donc considérer des pentes multiples non entières, à savoir :

$$Z_{3-mult-frac}(s) = \frac{1}{C_t s} \prod_{i=1}^{N_m} \frac{1}{1 + (\tau_i s)^\nu}. \quad (5.47)$$

Le nombre de cellules  $N_m$  dépend de la pente additionnelle requise. Comme chaque cellule peut apporter jusqu'à  $-40$  dB/dec, dans notre cas  $N_m = 2$ .

### 5.2.2.3.4 Contribution par l'approximation par pôles réduits

En observant la courbe de gain en haute fréquence, un terme de correction alternatif serait l'ajout de pôles pour prendre en compte l'incrément de pente.

La différence de pentes dans la bande de fréquences d'intérêt, à savoir :

$$\tilde{N} = \left\lfloor \frac{|pente_{init} - pente_{final}|}{20} \right\rfloor, \quad (5.48)$$

où  $\lfloor \cdot \rfloor$  dénote l'entier le plus proche, fournit le nombre de pôles à rajouter. Une nouvelle approximation de l'impédance de shunt peut être exprimée par :

$$Z_{3-red-poles}(s) = \frac{1}{C_t s} \prod_{i=1}^{\tilde{N}} \frac{1}{1 + \tau_i s} \quad (5.49)$$

avec le vecteur de paramètre :

$$\theta_{poles} = [\boldsymbol{\tau}]. \quad (5.50)$$

Si ce nombre de pôle est suffisamment petit, on peut optimiser chaque  $\tau_i$ . Cependant, il peut y avoir des cas où le nombre de pôles soit trop grand et donc sa détermination deviendrait trop complexe pour une optimisation directe compte tenu des risques de convergence vers un minimum local. Dans ce cas, une relation arbitraire consiste à déterminer une relation de récurrence entre les pôles afin de réduire le nombre de paramètres :

$$\tau_{i+1} = \tau_1^{i\gamma} \quad (5.51)$$

où tous les pôles sont reliés au premier pôle  $\tau_1$ .

L'avantage de cette correction réside sur le vecteur de paramètres qui se résume à :

$$\theta_{red} = [\tau_1 \quad \gamma]. \quad (5.52)$$

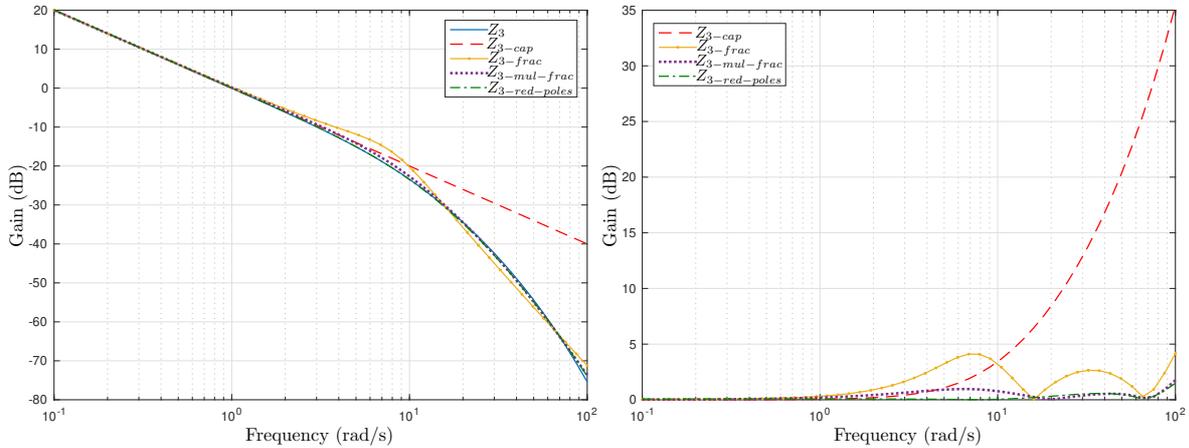
L'espace des paramètres sera alors toujours en 2D. En revanche, l'inconvénient principal est la perte de flexibilité vis-à-vis de l'addition de pôles telle que décrite en section 5.2.2.3.3.

### 5.2.2.3.5 Comparaison des approximations de l'impédance de shunt $Z_3$

Les approximations obtenues par la pente non entière, les pôles multiples non entiers et les pôles réduits sont comparés au modèle de capacitance.

La figure 5.6a illustre les courbes de gain pour le modèle exact et les approximations proposées de  $Z_3$  alors que les courbes d'erreur sont tracées en figure 5.6b.

Les valeurs maximale, moyennes et minimales des erreurs obtenues par les quatre approximations sont données dans le tableau 5.2.



(a) Diagramme de gain de  $Z_3$  et ses approximations (b) Erreur absolues  $\epsilon(j\omega)$  associées aux différentes approximations de  $Z_3$

FIGURE 5.6: Comparaison de  $Z_3$  et de ses approximations

Approximation	Max (dB)	Moy (dB)	Min (dB)
Capacitance (cap)	35.40	5.69	0.0004
Pente non entière (frac)	4.16	1.32	0.0100
Pôles multiples non entiers (mul-frac)	1.76	0.39	0.0137
Pôles réduits (red-poles)	1.48	0.18	0.0027

TABLE 5.2: Valeurs extrêmes et moyennes des erreurs absolues obtenues pour les approximations de  $Z_3$

Bien que l'erreur peut atteindre 4.16dB pour le modèle à pente non entière, l'erreur est clairement réduite en comparaison avec le modèle de capacitance. L'ordre non entier a été optimisé à  $\phi = 1.45$ , et non à  $\phi = 2$  compte tenu de la pente en haute fréquence malgré l'ajout d'une pondération pour mieux approcher les hautes fréquences. La valeur de  $1/\tau = 8.22\text{rad/s}$  est cohérente compte tenu de la bande de fréquences utile  $[1, 10]\text{rad/s}$  dans laquelle l'erreur devient importante (voir la figure 5.6b).

Concernant le modèle par pôles multiples non entiers, l'optimisation conduit à de meilleurs résultats. Les erreurs moyennes sont réduites d'un facteur 3 entre ce modèle et celui du modèle à pente non entière. L'ordre commensurable est de  $\nu = 1.13$ , ce qui correspond à une ordre en haute fréquence de  $2\nu = 2.26$ . Cette flexibilité additionnelle apportée par ces pôles multiples permet d'aller au-delà de la limite de 2 imposée par le théorème de stabilité de Matignon A.7.4, contrainte qui doit être respectée pour le modèle à une pente non entière.

L'approximation par pôles réduits conduit à des résultats bien plus précis. Il y a une différence majeure du point à partir duquel l'approximation commence à modifier la courbe, puisque l'optimisation du pôle récursif donne un premier pôle se situant à  $\tau_1 = 0.033\text{rad/s}$ , ce qui est deux décades en-dessous de celui obtenu par le modèle à une pente non entière.

#### 5.2.2.4 Synthèse

Les travaux de modélisation des poumons ont été développées lors de la thèse de J.-F. Duhé [89]. Ces résultats de modélisation ont conduits à un article de revue [A-4] et à 1 conférence internationale [E-4].

D'autres propositions de modélisation ont été réalisé en prenant en compte les phénomènes de perfusion dans les tissus tels que Pennes a introduit dans l'équation de la chaleur. Cette modélisation a été proposée dans [E-5], en proposant d'établir des modèles aux différents niveaux de bronches d'un poumon (jusqu'à 23 niveaux). Et enfin, une dernière contribution a été établie en considérant des échanges thermiques à la fois de gaz et de sang en proposant de modèles mixtes d'air et de perfusion sur les 23 niveaux de bronches du poumon dans [E-2].

Des méthodes d'identification en temps-réel de ces modèles sont proposées en section 5.3.3 p. 172 et sont en cours de réalisation sur des moutons.

### 5.2.3 Modélisation des perturbations de vent

Dans le cadre de la thèse de M. Hajjem avec Safran Data Systems, les nouvelles antennes nécessitent d'une très bonne précision et les rafales de vent augmentent significativement les erreurs et les risques de pertes de signaux. Afin de bien rejeter les perturbations de vent et de pouvoir garantir de bonnes performances de suivi de trajectoire de l'antenne, un générateur de vent a été synthétisé afin d'intégrer les effets du vent dans le simulateur de l'antenne.

### 5.2.3.1 Composantes des rafales de vent

Les premières analyses spectrales du vent ont été proposées par Van Der Hoven [60]. Ses résultats ont été obtenus à partir de mesures réalisées à 100m d'altitude pour des rafales horizontales sur une longue période de temps (voir Figure 5.7). Le spectre montre que la densité spectrale de puissance se décompose en deux parties : les turbulences avec des variations de périodes courtes et les variations saisonnières. Le pic de turbulence a une période de 76s et est causée par les rafales et les effets de la surface.

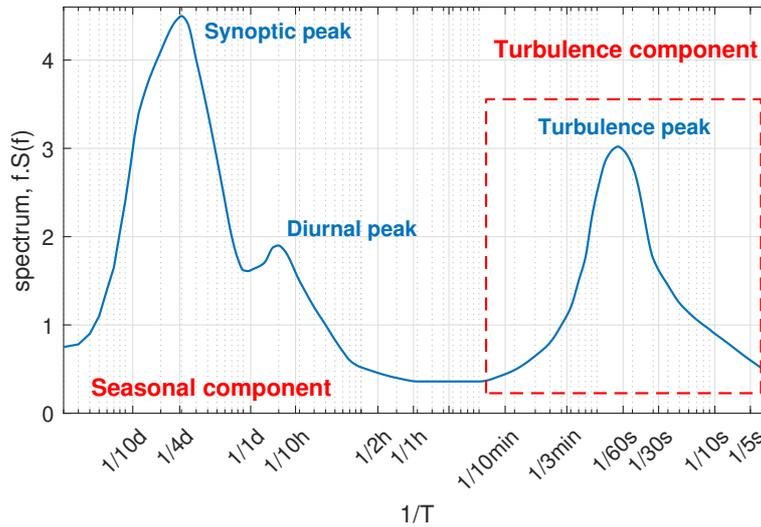


FIGURE 5.7: Spectre du vent proposé par Van der Hoven

La vitesse du vent peut être considérée comme un processus stationnaire dans l'intervalle  $[15min, 3h]$ , contrairement à la turbulence qui est processus aléatoire et non stationnaire sur l'intervalle  $[T < 10min]$ . Selon la décomposition de Reynolds pour les fluides, la vitesse du vent s'exprime comme la somme d'une composante statique représentée par la vitesse de vent moyenne et une composante fluctuante représentant la turbulence :

$$V(t) = \bar{V}(t) + V_{turb}(t) \quad (5.53)$$

où  $\bar{V}(t)$  est la composante de long-terme et  $V_{turb}(t)$  la composante de turbulence.

### 5.2.3.2 Modèle de Von Kármán

Le modèle de Von Kármán [61] est un modèle mathématique représentant la densité spectrale de puissance (DSP) de composantes linéaires et angulaires de la vitesse du vent. Ce modèle a été développé par le département de la défense des Etats-Unis, pour la conception des aéronefs et les applications en simulation. La forme de la DSP étant similaire en latéral, longitudinal et vertical, on se focalisera sur le modèle longitudinal. La DSP de la vitesse du vent s'exprime

naturellement comme un modèle non entier d'ordre 5/6, à savoir :

$$S(f) = \frac{4\sigma^2 \frac{L}{\bar{V}}}{\left(1 + 70.8\left(\frac{L}{\bar{V}}f\right)^2\right)^{5/6}}, \quad (5.54)$$

où  $f$  est la fréquence,  $\sigma$  est l'écart-type de la turbulence,  $L$  est la longueur d'échelle qui s'exprime en fonction de la rugosité du sol et de l'altitude, et  $\bar{V}$  est la vitesse moyenne.

En considérant l'entrée comme un bruit blanc  $x[n]$ , sa DSP correspond à sa variance :

$$S_{xx}(f) = \sigma_x^2. \quad (5.55)$$

La DSP du processus en sortie  $S_{yy}(f)$  s'exprime alors par :

$$S_{yy}(f) = S_{xx}(f)|H(f)|^2 = \sigma_x^2 |H(f)|^2. \quad (5.56)$$

En supposant que l'entrée est centrée et de variance unitaire ( $\sigma_x^2 = 1$ ), la DSP de la sortie se résume alors à :

$$S_{yy}(f) = |H(f)|^2 = H(jf)H^*(jf), \quad (5.57)$$

où \* représente le conjugué.

Afin de modéliser la turbulence de vent, la DSP proposé par Von Kármán s'exprime alors par :

$$S_{VK}(f) = \frac{4\sigma^2 \frac{L}{\bar{V}}}{\left(1 + 70.8\left(\frac{L}{\bar{V}}f\right)^2\right)^{5/6}} = \frac{K}{(1 + (\tau f)^2)^{5/6}}, \quad (5.58)$$

où  $K = 4\sigma^2 \frac{L}{\bar{V}}$  et  $\tau = \sqrt{70.8} \frac{L}{\bar{V}}$ , ce qui conduit à la fonction de transfert suivante :

$$H_{VK}(jf) = \frac{\sqrt{K}}{(1 + j\tau f)^{5/6}}. \quad (5.59)$$

On peut clairement vérifier que la réponse fréquentielle (5.59) satisfait l'équation (5.57), à savoir :

$$\begin{aligned} H_{VK}(jf)H_{VK}^*(jf) &= \frac{\sqrt{K}}{(1 + j\tau f)^{5/6}} \frac{\sqrt{K}}{(1 - j\tau f)^{5/6}} \\ &= \frac{K}{(1 + (\tau f)^2)^{5/6}} = S_{VK}(f). \end{aligned} \quad (5.60)$$

On obtient alors une fonction de transfert issue de la DSP de Von Kármán :

$$H_{VK}(s) = \frac{\sqrt{K}}{\left(1 + \frac{\tau}{2\pi}s\right)^{5/6}}, \quad (5.61)$$

où  $s$  représente la variable de Laplace.

### 5.2.3.3 Identification par le modèle de Von Kármán

L'algorithme non-linéaire du simplexe est utilisé sur la DSP de jeux de données de mesures du vent pour estimer les paramètres  $K$  et  $\tau$  du modèle de Von Kármán en minimisant la somme normalisée des erreurs au carré de la DSP des données mesurée,  $S$ , et de la DSP du modèle estimée,  $\widehat{S}$ , selon :

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| S_{dB}(f_i) - \widehat{S}_{dB}(f_i, K, \tau) \right|^2 \quad (5.62)$$

où  $N$  est le nombre d'échantillons et  $f_i$  sont les fréquences dans la bande de fréquences d'intérêt.

La figure 5.8 montre que le modèle de Von Kármán suit bien les données mesurées du vent, mais surtout en basse fréquence. Au-delà de  $f > 0.01Hz$ , la pente du modèle semble bien différente aux mesures. De plus, selon le spectre de Van der Hoven (figure 5.7), la bande de fréquence des turbulences se situe entre  $0.01Hz$  et  $0.1Hz$ , ce qui correspond à la bande où le modèle de Von Kármán commence à décrocher. En effet, le modèle de Von Kármán a été conçu à l'origine pour des avions, et donc pour des systèmes se mouvant à hautes altitudes. Dans le cas des antennes paraboliques, on évolue dans d'autres conditions : à basse altitude et pour des systèmes peu rapides. Il est donc nécessaire de trouver des modèles de turbulences de vent plus adaptés à ces conditions.

### 5.2.3.4 Approximations par modèles non entiers

La dérivation non entière a permis d'étendre les possibilités de l'identification en temporel et fréquentiel en relâchant la limite de l'ordre entier. D'autres fonctions élémentaires de modèles non entiers, les fonctions de Cole-Cole et Davidson-Cole, sont généralement utilisées pour modéliser les systèmes complexes avec peu de paramètres.

#### 5.2.3.4.1 Modèle de Davidson-Cole

Le modèle de Von Kármán contient un ordre non entier et conduit à une fonction de transfert (5.61) sous la forme de Davidson-Cole, avec un ordre de dérivation fixe de  $5/6$ . Cependant, ce dernier ne suit pas les mesures aux moyennes et hautes fréquences. En effet, rien n'impose d'avoir un ordre non entier de  $5/6$ . On rajoute donc une flexibilité supplémentaire en estimant l'ordre de dérivation  $\nu$ , en plus de  $K$  et  $\tau$ .

Le modèle de Davidson-Cole (DC) a une fonction de transfert de la forme suivante :

$$H_{DC}(s) = \frac{\sqrt{K}}{\left(1 + \frac{\tau}{2\pi}s\right)^\nu} \quad (5.63)$$

En utilisant l'équation (5.57), la DSP obtenue par le modèle de Davidson-Cole s'exprime par :

$$\widehat{S}_{DC}(f) = \frac{K}{(1 + (\tau f)^2)^\nu} \quad (5.64)$$

La DSP estimée à partir de modèle de Davidson-Cole (DC) est présentée en rouge sur la figure 5.8. On remarque que la pente en haute fréquence ( $f > 0.01\text{Hz}$ ) est bien estimée et est conforme aux prédictions de Van der Hoven, mais le gain en basse fréquence n'est pas conforme.

Sur 28 jeux de données, l'ordre  $\nu$  varie entre 1.30 et 1.48, ce qui est bien différent de  $5/6 \approx 0.83$  tel que fixé par le modèle de Von Kármán. Ceci confirme bien que le modèle de Von Kármán n'est pas adapté pour modéliser les turbulences dans nos conditions d'utilisation.

Le critère d'information d'Akaike normalisée (*normalized Akaike information criterion* en anglais,  $nAIC$ ) est utilisé car il considère l'erreur quadratique mais également une pénalité sur le nombre de paramètres :

$$nAIC = N \log(\det(\frac{1}{N} E^t E)) + \frac{2n_p}{N}, \quad (5.65)$$

où  $N$  est le nombre d'échantillons,  $E = (E_i)_{i=1, \dots, N}$  est le vecteur des erreurs exprimés par :

$$E_i = S_{dB}(f_i) - \widehat{S}_{dB}(f_i, K, \tau), \quad \forall i = 1, \dots, N, \quad (5.66)$$

et  $n_p$  est le nombre de paramètres.

Le modèle de Davidson-Cole à un  $nAIC$  bien inférieur au modèle de Von Kármán pour les 28 jeux de données (voir figure 5.9). Il est donc bien plus adapté pour représenter les turbulences de vent que le modèle de Von Kármán.

### 5.2.3.4.2 Modèle de Cole-Cole

Un modèle de Cole-Cole est plus direct dans sa synthèse qu'un modèle de Davidson-Cole. Le modèle de Cole-Cole (CC) s'exprime par :

$$H_{CC}(s) = \frac{\sqrt{K}}{1 + (\frac{\tau}{2\pi} s)^\nu}. \quad (5.67)$$

La DSP résultant de ce modèle est utilisée pour l'identification paramétrique afin de correspondre aux caractéristiques spectrales des turbulences de vent. La DSP se déduit de  $H_{CC}(s)$  en utilisant l'équation (5.57) :

$$\begin{aligned} \widehat{S}_{CC}(f) &= H_{CC}(jf)H_{CC}(jf)^* \\ &= \frac{\sqrt{K}}{1 + (j\tau f)^\nu} \frac{\sqrt{K}}{1 + (-j\tau f)^\nu} \\ &= \frac{K}{(1 + (j^\nu + (-j)^\nu)(\tau f)^\nu + (\tau f)^{2\nu})} \end{aligned} \quad (5.68)$$

On obtient alors la DSP d'un modèle de Cole-Cole  $\widehat{S}_{CC}(f)$ , à savoir :

$$\widehat{S}_{CC}(f) = \frac{K}{1 + 2 \cos(\nu \frac{\pi}{2})(\tau f)^\nu + (\tau f)^{2\nu}}. \quad (5.69)$$

3 paramètres sont à estimer  $K$ ,  $\tau$  et  $\nu$  tout comme le modèle DC, mais sa structure est différente et le comportement aux moyennes fréquences est différent. La figure 5.8 présente en magenta la DSP obtenue à partir du modèle CC.

Tout comme le modèle DC, le modèle CC colle bien aux hautes fréquences mais reste moins bien adapté aux moyennes et basses fréquences. De plus, le modèle CC conduit à un  $nAIC$  plus haut que pour le modèle DC (voir figure 5.9). Cette différence est perceptible aux gains en basse fréquence.

### 5.2.3.4.3 Modèle de Cole-Cole amélioré

Les modèles de Davidson-Cole et Cole-Cole permettent de bien estimer la pente en haute fréquence. Cependant, ils sous-estiment le gain statique et le gain aux moyennes fréquences relatif aux turbulences pourrait être amélioré. Une deuxième cellule à l'ordre  $2\nu$  est rajouté au modèle CC de la DSP, que l'on dénotera par Cole-Cole $\times 2$  (CC $\times 2$ ) :

$$H_{CC\times 2}(s) = \frac{\sqrt{K}}{(1 + (\frac{\tau_1}{2\pi}s)^\nu)(1 + (\frac{\tau_2}{2\pi}s)^{2\nu})}. \quad (5.70)$$

A partir du calcul de la DSP (5.68)-(5.69) pour le modèle CC, la DSP obtenue à partir du modèle CC $\times 2$  s'exprime par :

$$\hat{S}_{CC\times 2}(f) = \frac{K}{D_1(f)D_2(f)} \quad (5.71)$$

où :

$$D_1(f) = 1 + 2 \cos(\nu \frac{\pi}{2})(\tau_1 f)^\nu + (\tau_1 f)^{2\nu} \quad (5.72)$$

et

$$D_2(f) = 1 + 2 \cos(\nu \pi)(\tau_2 f)^{2\nu} + (\tau_2 f)^{4\nu}. \quad (5.73)$$

**Remarque 5.2.2.** *L'ordre non entier dans  $D_2$  aurait pu être indépendant de celui dans  $D_1$ , ce qui augmenterait le vecteur de paramètres d'une dimension. Après plusieurs essais, il s'avère que cet ordre de dérivation est très proche du double de celui de  $D_1$ .*

L'intérêt d'apporter une deuxième cellule d'ordre non entier est d'apporter une pente supplémentaire aux moyennes fréquences. La figure 5.8 présente en violet la DSP obtenue à partir du modèle CC $\times 2$ .

La deuxième pente apportée est clairement visible pour  $f < 0.01\text{Hz}$ . De plus, la DSP du modèle CC $\times 2$  approche bien mieux les basses et moyennes fréquences.

La qualité du modèle CC $\times 2$  est visible sur la figure 5.8. Les AICs des différents modèles proposés dans cette étude sont comparés sur la figure 5.9.

La figure 5.9 confirme que la DSP du modèle CC $\times 2$  approche au mieux la DSP des mesures du vent, puisque son  $nAIC$  est le plus faible. Le tableau 5.3 contient les résultats observés de la figure 5.9.

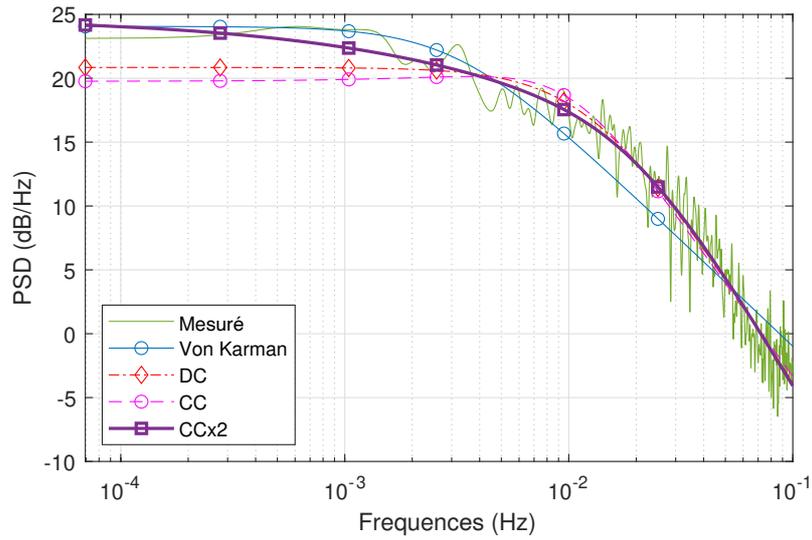


FIGURE 5.8: Comparaison entre les DSP obtenues par les modèles de Von Kármán (bleu), DC (rouge), CC (magenta), CCx2 (violet) et la DSP des mesures du vent (vert)

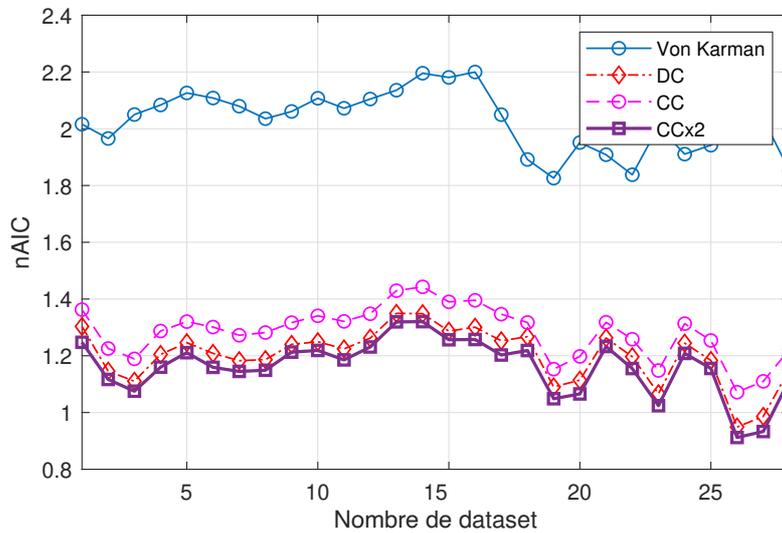


FIGURE 5.9: Comparaison entre les AICs des modèles proposés : Von Kármán (bleu), DC (rouge), CC (magenta) et CCx2 (violet) pour différents jeux de données

Modèle	Nombre de paramètres	Moyenne $nAIC$
Von Kármán	2	2.027
Davidson-Cole	3	1.200
Cole-Cole	3	1.283
Cole-Cole $\times$ 2	4	1.162

TABLE 5.3: Comparaison entre les moyennes des  $nAIC$ s des différents modèles

### 5.2.3.5 Synthèse

Les travaux de modélisation du vent ont été développés lors de la thèse de M. Hajjem [97]. Ces résultats de modélisation ont conduits à un article de revue [C-3] et à 1 conférence internationale [E-6].

De plus, une étude a été élaborée pour donner un sens physique aux paramètres du modèle CC×2 et un générateur de vent a été conçu afin de proposer des scénarios de vent réalistes qui seront incorporés dans le simulateur d'antenne parabolique afin de concevoir les lois de commande robuste qui permettront de les rejeter.

## 5.3 Contributions en identification par modèle non entier

L'identification des systèmes dynamiques est une thématique très importante dans notre communauté car elle permet de retrouver les paramètres du système quand on est dans la bonne classe de modèle et de reproduire le comportement dynamique du système pour faire de la simulation, de la surveillance, de la prédiction ou de la commande. Il est donc important de pouvoir développer des méthodes d'identification efficaces et avec une grande fiabilité sur l'estimation paramétrique qui permettront d'avoir une bonne connaissance du système à la fois dans les domaines temporel et fréquentiel.

### 5.3.1 Identification de systèmes non commensurables (ou quelconques)

Identifier les ordres de dérivation d'un système non entier n'est pas simple car, tout en estimant les ordres de dérivation, la classe du modèle change constamment et les coefficients varient également simultanément. Dans un premier temps, j'ai étudié différents critères qui permettent de fixer de manière objective l'ordre du modèle du système (critère quadratique, critère de Young, critère  $RT^2$ , critère AIC), ce qui m'a permis de publier un premier travail dans [E-23].

Une fois que le critère d'optimisation a pu être défini, j'ai cherché à généraliser l'identification des systèmes par modèles non entiers en s'affranchissant de la contrainte de commensurabilité, car un système de diffusion peut ne pas être commensurable, voir par exemple les systèmes biologiques tel que pour la modélisation des muscles [D-1] ou encore si les hypothèses d'obtention du modèle théorique du transfert thermique (milieu semi-infini et complètement isolé) ne sont pas respectées [E-23, A-13].

#### 5.3.1.1 Description du système

Soit le système SISO (*Single Input Single Output* en anglais pour monovarié (une entrée une sortie)) décrit par les équations suivantes :

$$\begin{cases} y(t) = G(p)u(t) \\ y^*(t_h) = y(t_h) + e(t_h), \end{cases} \quad (5.74)$$

où  $y^*(t_h)$  représente la sortie bruitée de la sortie non-observable non bruitée  $y(t)$  entâchée d'un bruit de mesure  $e$  supposé être une séquence blanche à distribution normale, centrée et de variance  $\sigma^2$ .  $p$  est l'opérateur différentiel et  $G$  représente la fonction de transfert (A.31) non entière décrivant l'équation différentielle (A.29), où  $B(p)$  et  $A(p)$  sont supposés premiers entre eux et le système est supposé asymptotiquement stable.

Les données sont supposées récoltées à des instants réguliers entre  $t = 0$  et  $t = t_{final}$  ( $H$  échantillons), de période d'échantillonnage  $T$ , suffisamment petite pour limiter les erreurs d'approximation du calcul numérique des dérivées non entières. De plus, le nombre d'échantillons est supposé suffisamment important pour garantir une convergence des paramètres estimés vers les vrais paramètres. Le signal d'entrée quasi-stationnaire  $\{u(t), 0 \leq t \leq t_{final}\}$  appliqué au système est supposé suffisamment persistant et conduit au signal de sortie  $\{y(t), 0 \leq t \leq t_{final}\}$ .

### 5.3.1.2 Formulation du problème

L'objectif est d'estimer les paramètres du système SISO  $\mathcal{S}$  décrit par l'équation (5.74) en utilisant  $H$  échantillons de données d'entrées/sortie  $\{u(t_h), y^*(t_h)\}_{h=1}^H$ , entre  $t_1 = 0$  et  $t_H = t_{final}$ .

Quand le modèle (A.31) est utilisé, le vecteur de paramètres

$$\theta = \begin{bmatrix} \rho \\ \mu \end{bmatrix} \quad (5.75)$$

est constitué d'un vecteur de  $N + M + 1$  coefficients,

$$\rho = [b_0, b_1, \dots, b_M, a_1, \dots, a_N]^T, \quad (5.76)$$

et d'un vecteur de  $N + M + 1$  ordres de dérivation ordonnés,

$$\mu = [\beta_0, \dots, \beta_M, \alpha_1, \dots, \alpha_N]^T. \quad (5.77)$$

Estimer tous les ordres de dérivation nécessite de déterminer  $N + M + 1$  termes en plus des  $N + M + 1$  coefficients. De plus, si  $N$  et/ou  $M$  sont grands, le risques de converger vers des minima locaux augmente et les algorithmes d'optimisation non linéaire risquent de ne pas converger vers l'optimum global.

Afin de réduire le nombre de paramètre à estimer, un modèle commensurable (A.32) peut être choisi, où seul un ordre de dérivation est estimé avec

$$\mu = \nu, \quad (5.78)$$

alors le nombre de paramètres à estimer est de  $N + M + 2$ . Dans ce cas, le domaine de recherche de l'ordre commensurable se réduit au domaine de stabilité tel que décrit dans le théorème de Matignon étendu (Théorème A.7.4).

### 5.3.1.3 Estimation des coefficients

#### 5.3.1.3.1 Algorithme srivcf pour les modèles SISO

En suivant la méthode à erreur de prédiction (*Prediction Error Method* (PEM) en anglais), une fonction d'erreur adaptée  $\varepsilon$  est donnée par l'erreur de sortie :

$$\varepsilon(t, \rho) = y^*(t) - \frac{B(p, \rho)}{A(p, \rho)} u(t), \quad (5.79)$$

qui peut se réécrire par :

$$\varepsilon(t, \rho) = A(p, \rho) \left( \frac{1}{A(p, \rho)} y^*(t) \right) - B(p, \rho) \left( \frac{1}{A(p, \rho)} u(t) \right) \quad (5.80)$$

$$= A(p, \rho) y_f^*(t) - B(p, \rho) u_f(t) \quad (5.81)$$

où  $y_f^* = \frac{1}{A(p, \rho)} y^*(t)$  et  $u_f(t) = \frac{1}{A(p, \rho)} u(t)$ .

Tel que présentée en (5.80), le préfiltre permettant de convertir l'erreur de sortie en une erreur d'équation, prend la forme suivante (voir e.g. [149]) :

$$F^{\text{opt}}(p) = \frac{1}{A(p, \rho)}. \quad (5.82)$$

En pratique,  $A(p, \rho)$  étant inconnu, une procédure itérative est appliquée selon :

$$F^{\text{iter}}(p) = \frac{1}{\hat{A}(p, \hat{\rho}^{\text{iter}})} = \frac{1}{1 + \sum_{j=1}^N \hat{a}_j p^{\alpha_j}}, \quad (5.83)$$

où  $\text{iter} = 1, 2, \dots$  représente le nombre d'itération et  $\hat{a}_j$  est l'estimé du coefficient  $a_j$  à l'itération  $\text{iter}$ .

La sortie non-bruitée pour construire les instruments est obtenue par un modèle auxiliaire mis à jour itérativement selon :

$$y_{\text{iv}}^{\text{iter}}(t) = \frac{\hat{B}(p, \hat{\rho}^{\text{iter}})}{\hat{A}(p, \hat{\rho}^{\text{iter}})} u(t). \quad (5.84)$$

Comme dans le cas rationnel pour la srivc (*Simple Refined Instrumental Variable for Continuous-time models* en anglais), si le signal d'entrée est suffisamment persistant et le bruit additif est blanc et centrée, alors l'estimateur de la srivcf (srivc pour les modèles non entiers (*fractional models*) en anglais), est asymptotiquement sans biais grâce au mécanisme de la variable instrumentale. De plus, quand le système est dans la bonne classe de modèle, la variable instrumentale conduit à des estimés convergents en probabilité selon les conditions suivantes

$$\begin{cases} \text{E} \left[ \varphi_{\text{iv},f}^{\text{iter}}(t_h) \varphi_f^{\text{T}}(t_h) \right] \text{ est non-singulière,} \\ \text{E} \left[ \varphi_{\text{iv},f}^{\text{iter}}(t_h) \xi(t_h) \right] = 0. \end{cases} \quad (5.85)$$

L'algorithme de la srivcf peut se retrouver en réadaptant celui de la version MISO (voir l'Algorithme 4) en considérant une seule entrée ( $K = 1$ ) et en remplaçant, à l'étape (b),  $x_k$  par l'expression de la sortie du modèle auxiliaire  $y_{iv}$  donnée en (5.84).

L'expression de la matrice de covariance est donnée en (5.117) et celle de la borne de Cramér-Rao en (5.121) pour  $K = 1$ .

### 5.3.1.4 Algorithme à deux étages pour les estimations des coefficients et des ordres de dérivation

En pratique, les ordres de dérivation sont inconnus, il est alors nécessaire d'estimer les ordres de dérivation en plus des coefficients. Un algorithme à deux étages a été proposé en combinant la méthode la variable instrumentale optimale, srivcf, pour l'estimation des coefficients avec un algorithme du gradient pour l'optimisation des ordres de dérivation : l'algorithme oosrivcf (*Order-Optimization with srivcf* en anglais).

Deux variantes sont proposées afin de converger progressivement vers la bonne classe de modèle et pour éviter une convergence vers une solution sous-optimale : dans la première variante, un ordre commensurable est recherché, alors le vecteur des ordres de dérivation se réduit à un seul ordre, l'ordre commensurable ; dans la seconde variante, le modèle commensurable précédent est utilisé pour initialiser l'algorithme et la contrainte de commensurabilité est relâchée afin d'estimer un modèle non entier quelconque.

Le problème d'estimation se formule selon la minimisation de la norme  $\ell_2$  :

$$J = \frac{1}{2} \|\varepsilon(t, \theta)\|^2 = \frac{1}{2} \mathbf{E}^T \mathbf{E}, \quad (5.86)$$

de l'erreur de sortie

$$\varepsilon(t, \theta) = y^*(t) - G(p, \theta)u(t), \quad (5.87)$$

selon le vecteur  $\mu$  considéré ((5.77) ou (5.150)), où

$$\mathbf{E} = \left[ \varepsilon(t_1, \hat{\theta}), \dots, \varepsilon(t_H, \hat{\theta}) \right]^T,$$

contient l'erreur de sortie  $\varepsilon(t, \hat{\theta})$  définie dans (5.87) pour tous les instants.

L'algorithme de Gauss-Newton (voir *e.g.* [68]) permet d'estimer itérativement les ordres de dérivation  $\mu^{\text{iter}}$  à l'itération  $\text{iter}$  selon :

$$\mu^{\text{iter}} = \mu^{\text{iter}-1} - \lambda \mathcal{H}^{-1} \frac{\partial J}{\partial \mu}, \quad (5.88)$$

où  $\lambda$  est un facteur d'oubli, le gradient  $\frac{\partial J}{\partial \mu}$  et le hessien approché  $\mathcal{H}$  sont respectivement exprimés par

$$\frac{\partial J}{\partial \mu} = \Upsilon^T \mathbf{E} \quad (5.89)$$

où

$$\Upsilon^T = \left[ \frac{\partial \varepsilon}{\partial \mu}(t_1, \hat{\theta}), \dots, \frac{\partial \varepsilon}{\partial \mu}(t_H, \hat{\theta}) \right] \quad (5.90)$$

et  $\mathcal{H}$  est le hessien approché défini par

$$\mathcal{H} = \Upsilon^T \Upsilon. \quad (5.91)$$

Les fonctions de sensibilités de l'erreur  $\frac{\partial \varepsilon(t, \hat{\theta})}{\partial \mu}$  sont calculées conformément au vecteur des ordres de dérivation, (5.150) pour un système commensurable ou (5.77) pour un système quelconque.

Cas 1 : Si  $\mu$  est défini comme un ordre commensurable  $\nu$  selon (5.150), alors

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mu} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial \nu} = -\frac{\partial \hat{y}}{\partial \nu}. \quad (5.92)$$

où la fonction de sensibilité de la sortie est donnée par :

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial \gamma} = \ln(p) \frac{\sum_{i=0}^M i \hat{b}_i p^{i\hat{\gamma}} + \sum_{i=0}^M \sum_{j=1}^N (i-j) \hat{b}_i \hat{a}_j p^{(i+j)\hat{\gamma}}}{\left(1 + \sum_{j=1}^N \hat{a}_j p^{j\hat{\gamma}}\right)^2} u(t). \quad (5.93)$$

Cas 2 : Si  $\mu$  est un vecteur contenant tous les ordres de dérivation selon (5.77), alors

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mu^T} = \left[ -\frac{\partial \hat{y}}{\partial \beta_0}, \dots, -\frac{\partial \hat{y}}{\partial \beta_M}, -\frac{\partial \hat{y}}{\partial \alpha_1}, \dots, -\frac{\partial \hat{y}}{\partial \alpha_N} \right] \quad (5.94)$$

et les fonctions de sensibilité de la sortie sont données par :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{y}}{\partial \beta_j} &= \frac{\ln(p) \hat{b}_j p^{\hat{\beta}_j}}{1 + \sum_{i=1}^N \hat{a}_i p^{\hat{\alpha}_i}} u(t) \quad \text{pour } j = 0, \dots, M \\ \frac{\partial \hat{y}}{\partial \alpha_\ell} &= \frac{\ln(p) \hat{a}_\ell p^{\hat{\alpha}_\ell} \sum_{j=0}^M \hat{b}_j p^{\hat{\beta}_j}}{\left(1 + \sum_{i=1}^N \hat{a}_i p^{\hat{\alpha}_i}\right)^2} u(t) \quad \text{pour } \ell = 1, \dots, N. \end{aligned} \quad (5.95)$$

La version SISO de l'algorithme global pour l'estimation du vecteur des ordres de dérivation  $\mu$  et du vecteur des coefficients  $\rho$  peut se retrouver en réadaptant celui de la version MISO l'Alg. 5. en considérant qu'une seule entrée ( $K = 1$ ).

### 5.3.1.5 Application à un banc thermique

Un barreau en aluminium est chauffé à une de ses extrémités par une résistance (voir la Fig. 5.10). Le signal d'entrée est le flux thermique généré par la résistance chauffée et la sortie est la température mesurée à une distance de  $x = 0.5\text{cm}$  de l'extrémité chauffée. Pour assurer un transfert thermique unidirectionnel, la surface du barreau est isolé par une mousse.

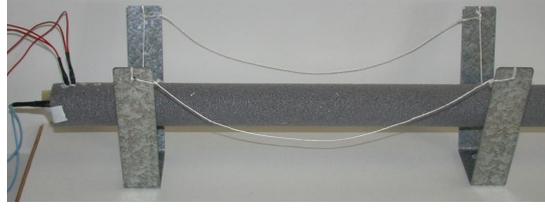


FIGURE 5.10: Barreau en aluminium chauffé par une résistance

La période d'échantillonnage est de 0.5s. Le système est amené à une température en régime permanent après application d'une densité de flux constante de  $\phi = 5\text{kWm}^{-2}$  pendant une durée suffisamment longue. Puis un signal binaire pseudo aléatoire avec une variation de flux de  $\pm 5\text{kWm}^{-2}$  est appliqué autour du flux constant de  $5\text{kWm}^{-2}$ . Un retard de quatre échantillons, soit 2s, est observé entre l'entrée et la sortie. La densité de flux et la température de sortie sont pré-traités pour éliminer la valeur moyenne ainsi que le retard.

Le modèle théorique entre la température et la densité de flux montre un ordre commensurable de 0.5 avec un intégrateur pur à condition que le milieu soit semi-infini et que le barreau soit parfaitement isolé.

Puisque le milieu atteint une température constante, le barreau n'est donc pas parfaitement isolé. Par conséquent, si on cherche un modèle commensurable, rien n'indique que l'on aurait un ordre commensurable de 0.5 ni que l'on ait un intégrateur pur. On cherche alors à identifier le modèle sous la forme suivante :

$$G_1(s) = \frac{b_0}{a_2 s^{\gamma_2} + a_1 s^{\gamma_1} + 1} \times e^{-2s}. \quad (5.96)$$

Tout d'abord, en considérant un modèle commensurable avec  $\gamma_2 = 2\gamma_1$ , et en initialisant l'algorithme oosrivcf avec un ordre commensurable à 0.5, on obtient un ordre commensurable de  $\nu_1 = 0.593$ , à savoir :

$$G_1(s) = \frac{3.09 \times 10^{-3}}{263.4s^{1.186} + 88.78s^{0.593} + 1} e^{-2s}, \quad (5.97)$$

avec une fonction coût correspondant à la norme  $\ell_2$  de l'erreur de sortie normalisée :

$$J_{\text{dB}} = -23.1\text{dB}. \quad (5.98)$$

Puis, en relâchant la contrainte de commensurabilité, l'algorithme oosrivcf a convergé vers le modèle

$$G_2(s) = \frac{5.90 \times 10^{-3}}{954.3s^{1.47} + 168.6s^{0.55} + 1} e^{-2s}, \quad (5.99)$$

avec une fonction coût de

$$J_{\text{dB}} = -25.6\text{dB}. \quad (5.100)$$

Sans la contrainte de commensurabilité, le modèle non entier quelconque  $G_2$  a une fonction coût plus faible de 2.5dB. Les réponses temporelles des modèles commensurable (5.97) et non

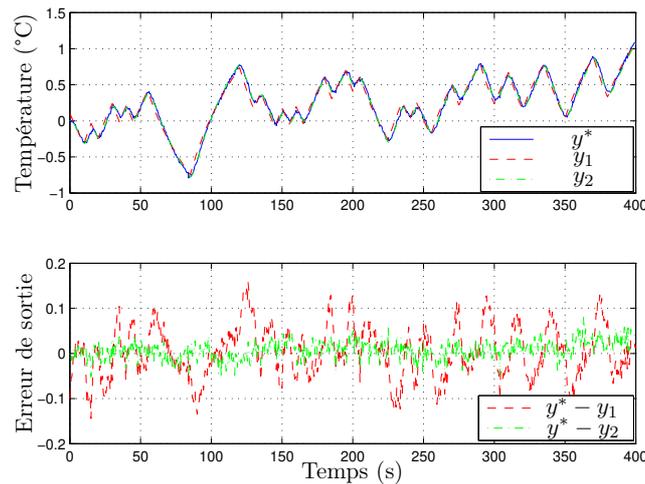


FIGURE 5.11: Réponses temporelles tracées sur les données de validation ( $y_1$  étant la réponse du modèle commensurable  $G_1$  (5.97) et  $y_2$  celle du modèle non commensurable  $G_2$  (5.99))

commensurable (5.99) sont comparées et tracées sur la figure 5.11 ainsi que leurs erreurs de sortie. Le modèle estimé (5.99) conduit à une réponse plus proche de la courbe réelle que le modèle commensurable (5.97).

### 5.3.1.6 Synthèse

Les résultats principaux de cette section ont été publiés dans [A-16] avec plus d'exemples académiques et des analyses de Monte Carlo plus poussées.

D'autre part, les algorithmes proposés ont été implantés dans la toolbox CRONE (voir paragraphe 6.9).

Cet algorithme d'identification à la fois des coefficients et des ordres de dérivation, oosrivcf, est une première approche qui m'a permis de poursuivre dans l'identification des systèmes non entiers MISO (voir paragraphe 5.3.2), l'identification des systèmes non entiers en temps-réel (voir paragraphe 5.3.3), ainsi que l'identification des systèmes rationnels en boucle fermée [E-17, C-1].

## 5.3.2 Identification de systèmes non entiers à entrées multiple et une sortie (MISO)

Depuis une vingtaine d'années, le réchauffement climatique est un sujet d'actualité. Le GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) s'intéresse au changement climatique terrestre depuis la fin des années 80. Les rapports du GIEC avertissent la communauté scientifique d'une élévation significative de la température terrestre globale, jamais atteinte depuis plus de deux millions d'années. Cette élévation est alarmante et peut conduire à des catastrophes climatiques irréversibles. De plus, ces rapports du GIEC se basent sur des Modèles de Circulation Générale du climat.

En tant qu'animateur scientifique du groupe automatique, j'organise des séminaires mensuels lors desquels j'invite des personnes extérieures. En fin décembre 2016, le Professeur Ph. de Larminat a été invité et a présenté ses travaux de recherche sur la modélisation du système climatique terrestre. Le modèle climatique terrestre étant très complexe avec d'une part des propagations de flux et d'autre part, un modèle thermique puisque la sortie est la température, il m'a semblé judicieux de lancer un travail de recherche sur la modélisation du système climatique terrestre avec des modèles non entiers.

Le système climatique terrestre est un système à entrées multiples et une sortie (*Multiple Input Single Output* en anglais (MISO)) dont les entrées sont constituées de la concentration de  $CO_2$  qui représente l'activité anthropologique, l'irradiance solaire totale qui représente l'activité solaire et l'épaisseur optique d'aérosol qui représente l'activité volcanique et enfin, la sortie correspond à la température moyenne annuelle mesurée à partir de données mensuelles couvrant à la fois la surface de la terre et la surface de la mer. Le choix des données est explicité dans la thèse de Abir Mayoufi [100, chap. 4].

Cependant, avant de pouvoir déterminer le modèle climatique terrestre, il convient de proposer des méthodes d'identification consistantes, à savoir sans biais et à variance minimale. C'est l'objet des développements proposés dans la suite de cette section.

### 5.3.2.1 Description du système non entier MISO

Soit un système non entier MISO tel que représenté sur la Fig.5.12 et décrit par les équations suivantes :

$$\mathcal{S} : \begin{cases} y_k(t) = G_k(p)u_k(t) \\ y(t) = \sum_{k=1}^K y_k(t) \\ y^*(t_h) = y(t_h) + e(t_h) \end{cases} \quad (5.101)$$

où  $K \in \mathbb{N}$  est le nombre d'entrées, et donc le nombre de sous-systèmes. Soit  $u(t) = [u_1(t), \dots, u_K(t)]$  le vecteur d'entrées non-corrélées et  $p$  l'opérateur différentiel ( $p = \frac{d}{dt}$ ). Les données d'entrée et de sortie  $(u(t), y(t))$  sont récoltées à des instants réguliers et supposés de tailles suffisamment grandes pour garantir la convergence des estimées vers les vrais paramètres. Les entrées quasi-stationnaires  $\{u_k(t), 0 \leq t \leq t_{final}, k = 1, \dots, K\}$  appliquées au système MISO sont suffisamment persistantes et conduisent à la sortie  $\{y(t), 0 \leq t \leq t_{final}\}$ . La sortie mesurée  $y(t)$  est entachée d'un bruit blanc discret  $e(t_h)$  et  $G_k$  est l'opérateur non entier reliant  $u_k(t)$  à la sortie sans bruit  $y_k(t)$  selon :

$$G_k(p, \theta) = \frac{B_k(p, \theta)}{A_k(p, \theta)} = \frac{\sum_{j=0}^{M_k} b_{j,k} p^{\beta_{j,k}}}{1 + \sum_{i=1}^{N_k} a_{i,k} p^{\alpha_{i,k}}} \quad (5.102)$$

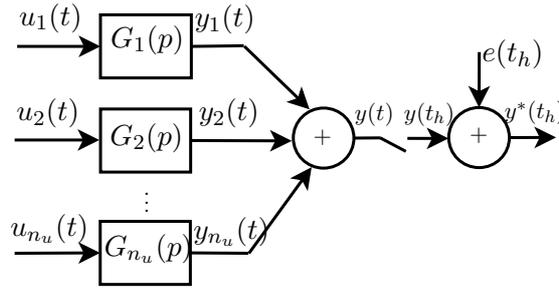


FIGURE 5.12: Structure de modèle MISO

où  $\theta$  est le vecteur de paramètres défini en (5.107) et les ordres de dérivation sont des réels positifs, ordonnés pour des raisons d'identifiabilité :

$$\begin{cases} 0 < \alpha_{1,k} < \alpha_{2,k} < \dots < \alpha_{N_k,k} \\ 0 < \beta_{0,k} < \beta_{1,k} < \dots < \beta_{M_k,k} \end{cases} \quad \forall k = 1, \dots, K.$$

On suppose également que les opérateurs  $G_k(p)$  sont strictement propres avec  $\alpha_{N_k,k} > \beta_{M_k,k}$ , pour tout  $k$ , que les polynômes  $B_k$  et  $A_k$  sont premiers entre eux, et que les fonctions de transferts  $G_k(p)$  sont asymptotiquement stables (voir le Théorème de Matignon A.7.4).

Dans le cas classique, la définition de commensurabilité à l'ordre  $\nu$  (voir la Définition A.7.1) est indépendante de la structure du modèle et peut générer une fonction de transfert avec un ordre très élevé en  $s^\nu$ . La nouvelle définition de S-commensurabilité est liée à la structure du modèle et, par conséquent, fixe le nombre de paramètres à une valeur prescrite. Afin de réduire le nombre de paramètres à identifier, et particulièrement dans le cas des systèmes MISO, de nouvelles définitions de la commensurabilité ont été introduites.

**Définition 5.3.1** (S-commensurabilité). *Un système SISO  $G_1$ , pour une structure de modèle donnée (5.102), caractérisé par le nombre de termes  $M_1$  et  $N_1$ , a un ordre commensurable structurée (ou un ordre S-commensurable)*

$$\nu = \alpha_{1,1}, \quad (5.103)$$

si tous ces ordres de dérivation sont successivement des multiples entiers de  $\nu$ , à savoir :

$$G_1(p) = \frac{\sum_{j=0}^{M_1} b_{j,1} p^{j\nu}}{1 + \sum_{i=1}^{N_1} a_{i,1} p^{i\nu}}. \quad (5.104)$$

Par exemple, soit la fonction de transfert suivante :

$$G_1(s) = \frac{1}{1 + 1.5s^{1.2} + 0.5s^{2.8}}.$$

Selon la définition classique de commensurabilité,  $G_1$  est commensurable à l'ordre 0.4 :

$$G_1(s) = \frac{1}{1 + 1.5s^{3 \times 0.4} + 0.5s^{7 \times 0.4}}$$

et conduit à un ordre du modèle de 7 en  $s^{0.4}$ , alors que selon la nouvelle définition de S-commensurabilité,  $G_1$  n'est pas S-commensurable, car les ordres de dérivation ne sont pas des multiples successifs de  $\alpha_{1,1} = 1.2$ .

**Définition 5.3.2** (S-commensurabilité locale). *Un système MISO, pour une structure de modèle donnée (5.102), a des ordres S-commensurables locaux  $\nu_k$  si chaque sous-système  $G_k$  a son propre ordre S-commensurable (voir la définition 5.3.1)*

$$\nu_k = \alpha_{1,k} \quad \text{pour } k = 1, \dots, K.$$

Ainsi, chaque fonction de transfert peut se réécrire selon :

$$G_k(p) = \frac{\sum_{j=0}^{M_k} b_{j,k} p^{j\nu_k}}{1 + \sum_{i=1}^{N_k} a_{i,k} p^{i\nu_k}}. \quad (5.105)$$

**Définition 5.3.3** (S-commensurabilité globale). *Un système MISO, pour une structure de modèle donnée (5.102), a un ordre S-commensurable global  $\nu$  si tous ces sous-systèmes ont le même ordre S-commensurable selon la Définition 5.3.2 :*

$$\nu = \alpha_{1,1} = \alpha_{1,2} = \dots = \alpha_{1,K},$$

Ainsi, chaque fonction de transfert peut se réécrire selon :

$$G_k(p) = \frac{\sum_{j=0}^{M_k} b_{j,k} p^{j\nu}}{1 + \sum_{i=1}^{N_k} a_{i,k} p^{i\nu}}. \quad (5.106)$$

Comme dans le cas rationnel (entier), si tous les sous-systèmes sont stables alors le système non entier MISO est stable.

### 5.3.2.2 Formulation du problème

L'objectif est d'estimer les paramètres du système MISO  $\mathcal{S}$  décrit par l'équation (5.101) en utilisant  $H$  échantillons de données d'entrées/sortie  $\{u_1(t_h), \dots, u_K(t_h), y^*(t_h)\}_{h=1}^H$ , entre  $t_1 = 0$  et  $t_H = t_{final}$ .

Le vecteur de paramètre,  $\theta$ , est définie par

$$\theta = \begin{bmatrix} \rho \\ \mu \end{bmatrix} \quad (5.107)$$

— où  $\rho$  contient les coefficients de toutes les sous-systèmes

$$\rho = \left[ \rho_1^T, \dots, \rho_K^T \right]^T \quad (5.108)$$

avec

$$\rho_k^T = [b_{0,k}, b_{1,k}, \dots, b_{M_k,k}, a_{1,k}, \dots, a_{N_k,k}]$$

pour  $k = 1, \dots, K$ ; ainsi,  $\rho$  a un nombre total de coefficients de  $\sum_{k=1}^K (N_k + M_k + 1)$

— et où  $\mu$  contient les ordres de dérivation de tous les sous-systèmes, qui peuvent s'exprimer selon les cas suivants :

Cas 1 : si un ordre S-commensurable global est recherché, alors le vecteur des ordres de dérivation se réduit à un seul paramètre

$$\mu = \nu; \quad (5.109)$$

Cas 2 : si des ordres S-commensurables locaux sont recherchés, alors le vecteur des ordres de dérivation s'étend à  $K$  paramètres

$$\mu = [\nu_1, \dots, \nu_K]^T; \quad (5.110)$$

Cas 3 : si le modèle MISO est non commensurable, alors  $\mu$  contient tous les ordres de dérivation

$$\mu = [\mu_1^T, \dots, \mu_K^T]^T \quad (5.111)$$

avec

$$\mu_k^T = [\beta_{0,k}, \beta_{1,k}, \dots, \beta_{M_k,k}, \alpha_{1,k}, \dots, \alpha_{N_k,k}]$$

pour  $k = 1, \dots, K$ ; ainsi,  $\mu$  a un nombre total d'ordre de dérivation de  $\sum_{k=1}^K (N_k + M_k + 1)$ .

Il est bien connu que les méthodes fondées par les moindres carrés sont biaisées en présence de bruit sur la sortie mesurée. Pour résoudre ce problème, les méthodes basées sur la variable instrumentales sont utilisées.

### 5.3.2.3 Estimation des paramètres

#### 5.3.2.3.1 Algorithme srivcf pour les modèles MISO

L'objectif principal est d'estimer le vecteur des coefficients  $\rho_k$ , pour chaque sous-système  $G_k$ ,  $k = 1, \dots, K$ , en supposant que les autres vecteurs de coefficients  $\rho_n$  (avec  $n \neq k$ ) sont connus, en appliquant la version étendue au cas MISO de la srivcf (voir l'Alg. 4).

Pour cela, une fonction d'erreur adaptée  $\varepsilon_k$ , associée au sous-modèle  $G_k$ , est défini par :

$$\varepsilon_k(t, \theta) = x_k(t, \theta) - y_k(t, \theta), \quad k = 1, \dots, K \quad (5.112)$$

où  $y_k$  est la partie non-bruitée de  $x_k$  :

$$x_k(t, \theta) = y^*(t) - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^K y_n(t, \theta). \quad (5.113)$$

La relation (5.112) peut se réécrire par :

$$\varepsilon_k(t, \theta) = A_k(p, \theta) \left( \frac{1}{A_k(p, \theta)} x_k(t, \theta) \right) - B_k(p, \theta) \left( \frac{1}{A_k(p, \theta)} u_k(t) \right), \quad (5.114)$$

qui montre bien que le préfiltre optimal, à appliquer à la fois aux entrées et à la sortie, est

$$F_{opt,k}(p) = \frac{1}{A_k(p, \theta)}, \quad (5.115)$$

une fonction de transfert qui n'est pas connu en pratique, puisque  $\theta$  ainsi que  $A_k(p, \theta)$  ne sont pas connus.

Pour résoudre ce problème, une procédure itérative est appliquée, qui consiste à estimer itérativement les paramètres jusqu'à convergence et à mettre à jour ce préfiltre à chaque itération selon :

$$F_k^{iter}(p) = \frac{1}{\hat{A}_k(p, \hat{\theta}^{iter})} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{N_k} \hat{a}_{i,k} p^{\alpha_{i,k}}}, \quad (5.116)$$

où  $iter = 1, 2, \dots$  dénote le nombre d'itération et  $\hat{a}_{i,k}$  est le coefficient estimé à l'itération  $iter$ .

La version MISO de la srivcf est décrite dans l'Alg. 4.

Quand le signal de bruit est normalement distribué, les estimées par la srivcf-MISO peuvent être interprétés en termes statistiques optimaux comme étant consistantes avec une variance minimale. Ceci peut être attesté en la comparant à la borne de Cramér -Rao

$$P_{\rho}^{CRB} = \frac{\sigma^2}{H} \text{diag} (P_{\rho_1}^{CRB}, \dots, P_{\rho_K}^{CRB}) \quad (5.121)$$

où  $\sigma^2$  est la vraie variance du bruit et

$$P_{\rho_k}^{CRB} = \left( E \left[ \varphi_{k,f}^{iv,opt}(t_h)^T \varphi_{k,f}^{iv,opt}(t_h) \right] \right)^{-1} \quad (5.122)$$

sont obtenus optimalement avec le vecteur instrumental sans bruit :

$$\varphi_{k,f}^{iv,opt}(t_h) = F_k^{opt}(p) \left[ p^{\beta_{0,k}} u_k(t_h), \dots, p^{\beta_{M_k,k}} u_k(t_h), -p^{\alpha_{1,k}} y_k(t_h), \dots, -p^{\alpha_{N_k,k}} y_k(t_h) \right]^T, \quad (5.123)$$

filtré par le préfiltre optimal :

$$F_k^{opt}(p) = \frac{1}{A_k(p, \theta)}. \quad (5.124)$$

Une analyse de Monte Carlo a été effectuée dans [A-2] montrant l'efficacité de l'algorithme proposé sur un exemple académique.

### 5.3.2.4 Algorithme à deux étages pour les estimations des coefficients et des ordres de dérivation

En pratique, les ordre de dérivation étant inconnus, il convient alors d'estimer les ordres de dérivation en plus des coefficients. Un algorithme à deux étages est alors proposé afin d'identifier

---

**Algorithme 4** Algorithme de la MISO-srivcf pour l'estimation des coefficients

---

**Etape 1 :** *Initialisation*

iter = 0 et initialiser le vecteur de paramètres  $\theta^0 = \rho^0$

**Etape 2 :** *Estimation itérative IV*

**Pour** chaque sous-système  $k = 1, \dots, K$

**faire**

(a) iter = iter + 1

Mettre à jour le modèle auxiliaire avec  $\hat{\theta}^{\text{iter}-1}$  :

$$\hat{G}_k^{\text{iter}}(p, \hat{\theta}^{\text{iter}-1}) = \frac{\hat{B}_k^{\text{iter}}(p, \hat{\theta}^{\text{iter}-1})}{\hat{A}_k^{\text{iter}}(p, \hat{\theta}^{\text{iter}-1})}$$

et générer les instruments :

$$y_k(t, \hat{\theta}^{\text{iter}-1}) = \hat{G}_k^{\text{iter}}(p, \hat{\theta}^{\text{iter}-1})u_k(t).$$

(b) Calculer la réponse  $x_k(t, \hat{\theta}_k^{\text{iter}-1})$  à  $u_k(t)$  :

$$x_k(t, \hat{\theta}_k^{\text{iter}-1}) = y^*(t) - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^K y_n(t, \hat{\theta}_n^{\text{iter}}).$$

(c) Mettre à jour le préfiltre :

$$F_k^{\text{iter}}(p) = \frac{1}{\hat{A}_k(p, \hat{\theta}_k^{\text{iter}-1})}.$$

(d) Evaluer les dérivées filtrées :

$$\begin{cases} p^{\beta_{j,k}} u_{k,f}(t) = p^{\beta_{j,k}} F_k^{\text{iter}}(p) u_k(t) \\ p^{\alpha_{i,k}} y_{k,f}(t) = p^{\alpha_{i,k}} F_k^{\text{iter}}(p) y_k(t) \\ p^{\alpha_{i,k}} x_{k,f}(t) = p^{\alpha_{i,k}} F_k^{\text{iter}}(p) x_k(t). \end{cases}$$

(e) Calculer les nouvelles estimées

$$\hat{\rho}_k^{\text{iter}} = \left( \Phi_{k,f}^{iv T} \Phi_{k,f}^* \right)^{-1} \Phi_{k,f}^{iv T} X_{k,f}$$

où la matrice instrumentale s'exprime par

$$\Phi_{k,f}^{iv} = [\varphi_{k,f}^{iv}(t_1), \dots, \varphi_{k,f}^{iv}(t_H)]^T$$

$$\varphi_{k,f}^{iv}(t) = \left[ p^{\beta_{0,k}} u_{k,f}(t), \dots, p^{\beta_{M_k,k}} u_{k,f}(t), -p^{\alpha_{1,k}} y_{k,f}^{\text{iter}}(t), \dots, -p^{\alpha_{N_k,k}} y_{k,f}^{\text{iter}}(t) \right],$$

la matrice de régression par

$$\Phi_{k,f}^* = [\varphi_{k,f}^*(t_1), \dots, \varphi_{k,f}^*(t_H)]^T,$$

$$\varphi_{k,f}^*(t) = \left[ p^{\beta_{0,k}} u_{k,f}(t), \dots, p^{\beta_{M_k,k}} u_{k,f}(t), -p^{\alpha_{1,k}} x_{k,f}^{\text{iter}}(t), \dots, -p^{\alpha_{N_k,k}} x_{k,f}^{\text{iter}}(t) \right]$$

et la sortie filtrée par

$$X_{k,f} = [x_{k,f}(t_1), \dots, x_{k,f}(t_H)]^T.$$


---

(f) Mettre à jour le vecteur de paramètre

$$\hat{\theta}^{\text{iter}} = [\hat{\rho}_1^{\text{iter}}, \dots, \hat{\rho}_k^{\text{iter}}, \dots, \hat{\rho}_K^{\text{iter}}]^T.$$

$$\text{tant que } \sum_{j=1}^{\dim \hat{\rho}_k} \left| \frac{\hat{\rho}_{k,j}^{\text{iter}} - \hat{\rho}_{k,j}^{\text{iter}-1}}{\hat{\rho}_{k,j}^{\text{iter}}} \right| > \epsilon_1$$

où  $\hat{\rho}_{k,j}^{\text{iter}}$  correspond au  $j$ -ème élément du vecteur de paramètre  $\hat{\rho}_k^{\text{iter}}$  à l'iteration iter et  $\epsilon_1$  est un scalaire qui est fixé pour une précision donnée des estimées.

**Etape 3 :** Calculer la matrice de covariance des paramètres  $P_\rho$

$$P_\rho = \hat{\sigma}^2 \text{diag}(P_{\rho_1}, \dots, P_{\rho_K}) \quad (5.117)$$

où, pour  $k = 1, \dots, K$

$$P_{\rho_k} = \left( \Phi_{k,f}^{iv}{}^T \Phi_{k,f}^{iv} \right)^{-1} \quad (5.118)$$

et  $\hat{\sigma}^2$  étant la variance de l'estimation empirique  $\varepsilon(t)$  du bruit donnée par :

$$\varepsilon(t) = y^*(t) - \hat{y}(t), \quad (5.119)$$

la sortie estimée s'exprimant par

$$\hat{y}(t) = \sum_{k=1}^K y_k(t) \quad (5.120)$$

où les  $y_k(t)$  sont calculés à la dernière itération.

tous ces paramètres : on combine alors la srivcf-MISO algorithm pour l'estimation des coefficients avec un algorithme du gradient pour l'optimisation des ordre de dérivation.

Trois variantes d'algorithmes sont proposées afin de converger progressivement vers la bonne classe de modèle et pour éviter toute convergence vers une solution sous-optimale : dans la première variante, un modèle S-commensurable global est recherché, ce modèle étant une bonne initialisation pour l'estimation de modèles S-commensurable locaux, enfin ce dernier modèle, sera également utilisé comme initialisation de la dernière variante où on relâche alors la contrainte de commensurabilité pour le cas d'une estimation d'un système MISO non-commensurable.

Le problème d'estimation se formule selon la minimisation de la norme  $\ell_2$  :

$$J(\hat{\theta}) = \frac{1}{2} \left\| \varepsilon(t, \hat{\theta}) \right\|_2^2 = \frac{1}{2} \mathbf{E}^T \mathbf{E}, \quad (5.125)$$

où

$$\mathbf{E} = \left[ \varepsilon(t_1, \hat{\theta}), \dots, \varepsilon(t_H, \hat{\theta}) \right]^T,$$

contient l'erreur de sortie  $\varepsilon(t, \hat{\theta})$  définie dans (5.119) pour tous les instants.

L'algorithme de Gauss-Newton (voir [68, chap. 10]) permet d'estimer itérativement les ordres de dérivation  $\mu^{\text{iter}}$  selon :

$$\mu^{\text{iter}} = \mu^{\text{iter}-1} - \lambda \left[ \mathcal{H}^{-1} \frac{\partial J}{\partial \mu} \right] \quad (5.126)$$

où  $\lambda$  est un facteur d'oubli,  $\frac{\partial J}{\partial \mu}$  est le gradient défini par

$$\frac{\partial J}{\partial \mu} = \Upsilon^T \mathbf{E}, \quad (5.127)$$

où

$$\Upsilon^T = \left[ \frac{\partial \varepsilon}{\partial \mu}(t_1, \hat{\theta}), \dots, \frac{\partial \varepsilon}{\partial \mu}(t_H, \hat{\theta}) \right] \quad (5.128)$$

et  $\mathcal{H}$  est le hessien approché défini par

$$\mathcal{H} = \Upsilon^T \Upsilon. \quad (5.129)$$

Le vecteur des ordres  $\mu$  est fixé à (5.109), (5.110) or (5.111), selon que l'on considère respectivement un ordre S-commensurable global, des ordres S-commensurables locaux ou encore tous les ordres sans contrainte. Les fonctions de sensibilités de l'erreur  $\frac{\partial \varepsilon(t, \hat{\theta})}{\partial \mu}$  sont calculées conformément à ce vecteur des ordres de dérivation.

Cas 1 : Si  $\mu$  est défini comme un ordre S-commensurable global  $\nu$  pour tous les sous-systèmes selon (5.109), alors

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mu} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial \nu} = - \sum_{k=1}^K \frac{\partial \hat{y}_k}{\partial \nu}. \quad (5.130)$$

où les fonctions de sensibilité de la sortie sont données, pour  $k = 1, \dots, K$ , par :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{y}_k}{\partial \nu} &= \left[ \sum_{j=0}^{M_k} j \hat{b}_{j,k} p^{j\nu} + \sum_{j=0}^{M_k} \sum_{i=1}^{N_k} (j-i) \hat{b}_{j,k} \hat{a}_{i,k} p^{(i+j)\nu} \right] \\ &\times \frac{\ln(p)}{\left( 1 + \sum_{i=1}^{N_k} \hat{a}_{i,k} p^{i\nu} \right)^2} u_k(t). \end{aligned} \quad (5.131)$$

Cas 2 : Si  $\mu$  est défini selon un vecteur d'ordres S-commensurables locaux  $\nu_k$ , selon (5.110), alors

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \mu} &= \left[ \frac{\partial \varepsilon}{\partial \nu_1}, \dots, \frac{\partial \varepsilon}{\partial \nu_K} \right] \\ &= \left[ -\frac{\partial \hat{y}_1}{\partial \nu_1}, \dots, -\frac{\partial \hat{y}_K}{\partial \nu_K} \right]. \end{aligned} \quad (5.132)$$

où les fonctions de sensibilité de la sortie sont données, pour  $k = 1, \dots, K$ , par :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{y}_k}{\partial \nu_k} &= \left[ \sum_{j=0}^{M_k} j \hat{b}_{j,k} p^{j\nu_k} + \sum_{j=0}^{M_k} \sum_{i=1}^{N_k} (j-i) \hat{b}_{j,k} \hat{a}_{i,k} p^{(i+j)\nu_k} \right] \\ &\times \frac{\ln(p)}{\left( 1 + \sum_{i=1}^{N_k} \hat{a}_{i,k} p^{i\nu_k} \right)^2} u_k(t). \end{aligned} \quad (5.133)$$

Cas 3 : Si  $\mu$  est un vecteur contenant tous les ordres de dérivation selon (5.111), alors

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mu} = \left[ \frac{\partial \varepsilon}{\partial \mu_1^T}, \dots, \frac{\partial \varepsilon}{\partial \mu_K^T} \right]^T, \quad (5.134)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mu_k^T} = \left[ -\frac{\partial \hat{y}_k}{\beta_{0,k}}, \dots, -\frac{\partial \hat{y}_k}{\partial \beta_{M_k,k}}, -\frac{\partial \hat{y}_k}{\partial \alpha_{1,k}}, \dots, -\frac{\partial \hat{y}_k}{\partial \alpha_{N_k,k}} \right] \quad (5.135)$$

avec  $k = 1, \dots, K$  et les fonctions de sensibilité de la sortie sont données par :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{y}_k}{\partial \beta_{j,k}} &= \frac{\ln(p) \hat{b}_{j,k} p^{\hat{\beta}_{j,k}}}{1 + \sum_{i=1}^{N_k} \hat{a}_{i,k} p^{\hat{\alpha}_{i,k}}} u_k(t) \\ \frac{\partial \hat{y}_k}{\partial \alpha_{\ell,k}} &= \frac{\ln(p) \hat{a}_{\ell,k} p^{\hat{\alpha}_{\ell,k}} \sum_{j=0}^{M_k} \hat{b}_{j,k} p^{\hat{\beta}_{j,k}}}{\left( 1 + \sum_{i=1}^{N_k} \hat{a}_{i,k} p^{\hat{\alpha}_{i,k}} \right)^2} u_k(t), \end{aligned} \quad (5.136)$$

pour  $j = 0, \dots, M_k$ ,  $\ell = 1, \dots, N_k$ .

La version MISO pour l'estimation du vecteur des ordres de dérivation  $\mu$  et du vecteur des coefficients  $\rho$  est décrite dans l'Alg. 5.

Après convergence de  $\hat{\theta}$ , la matrice de covariance des paramètres peut être calculée en utilisant le hessien approché (5.129), où le vecteur approprié  $\Upsilon$  se définit par

$$\Upsilon^T = \left[ \frac{\partial \varepsilon}{\partial \theta}(t_1, \hat{\theta}), \dots, \frac{\partial \varepsilon}{\partial \theta}(t_H, \hat{\theta}) \right]. \quad (5.138)$$

Les fonctions de sensibilités,  $\frac{\partial \varepsilon(t, \hat{\theta})}{\partial \theta}$ , respectivement selon les paramètres dans  $\theta$ , sont définies par :

$$\frac{\partial \varepsilon(t, \hat{\theta})}{\partial \theta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \varepsilon(t, \hat{\theta})}{\partial \rho} \\ \frac{\partial \varepsilon(t, \hat{\theta})}{\partial \mu} \end{bmatrix} \quad (5.139)$$

où  $\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mu}$  est donnée selon que l'on considère un ordre S)commensurable global (5.130), des ordres S-commensurables locaux (5.132) ou tous les ordres de dérivation (5.134) et

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} = \left[ \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho_1^T}, \dots, \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho_K^T} \right]^T \quad (5.140)$$

où

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho_k^T} = - \left[ \frac{\partial \hat{y}_k}{\partial b_{0,k}}, \dots, \frac{\partial \hat{y}_k}{\partial b_{M_k,k}}, \frac{\partial \hat{y}_k}{\partial a_{1,k}}, \dots, \frac{\partial \hat{y}_k}{\partial a_{N_k,k}} \right]. \quad (5.141)$$

Ici  $\frac{\partial \hat{y}_k}{\partial b_{j,k}}$  et  $\frac{\partial \hat{y}_k}{\partial a_{i,k}}$  sont des fonctions de sensibilité de la sortie, données par :

$$\frac{\partial \hat{y}_k}{\partial b_{j,k}} = \frac{p^{\hat{\beta}_{j,k}}}{1 + \sum_{i=1}^{N_k} \hat{a}_{i,k} p^{\hat{\alpha}_{i,k}}} u_k(t), \quad \forall j = 0, \dots, M_k, \quad (5.142)$$

---

**Algorithme 5** Algorithme de la MISO-oosrvcf pour l'estimation de tous les paramètres

---

**Etape 1 :** *Initialisation*

iter = 0, initialiser  $\hat{\mu}^0$  et calculer  $\hat{\rho}^0$  par la MISO-srvcf selon l'Alg. 4.

Avec  $\hat{\theta}^0 = \begin{bmatrix} \hat{\rho}^0 \\ \hat{\mu}^0 \end{bmatrix}$ , calculer la fonction de coût  $J(\hat{\theta}^0)$  à partir de (5.125).

**Etape 2 :** *Estimation itérative de tous les paramètres*

**faire**

(a) iter = iter + 1

(b) *Estimation des coefficients*

Calculer le vecteur des coefficients  $\hat{\rho}^{\text{iter}}$  avec la MISO-srvcf (voir l'Alg. 4)

(c) *Estimation des ordres de dérivation*

Initialiser  $\lambda = \Lambda$  (généralement fixé à 1)

**faire**

i. Evaluer la fonction coût  $J\left(\begin{bmatrix} \hat{\rho}^{\text{iter}} \\ \hat{\mu}^{\text{iter}-1} \end{bmatrix}\right)$  à partir de (5.125)

ii. Affiner l'estimation de l'ordre  $\hat{\mu}^{\text{iter}}$  :

$$\hat{\mu}^{\text{iter}} = \hat{\mu}^{\text{iter}-1} - \lambda \left[ \mathcal{H}^{-1} \frac{\partial J}{\partial \mu} \right]_{\mu=\hat{\mu}^{\text{iter}-1}} \quad (5.137)$$

iii. Evaluer  $J\left(\begin{bmatrix} \hat{\rho}^{\text{iter}} \\ \hat{\mu}^{\text{iter}} \end{bmatrix}\right)$  à partir de (5.125)

iv. Fixer  $\lambda = \frac{\lambda}{2}$

**tant que**  $J\left(\begin{bmatrix} \hat{\rho}^{\text{iter}} \\ \hat{\mu}^{\text{iter}} \end{bmatrix}\right) > J\left(\begin{bmatrix} \hat{\rho}^{\text{iter}} \\ \hat{\mu}^{\text{iter}-1} \end{bmatrix}\right)$

(d) Former le vecteur de paramètre  $\hat{\theta}^{\text{iter}} = \begin{bmatrix} \hat{\rho}^{\text{iter}} \\ \hat{\mu}^{\text{iter}} \end{bmatrix}$

**tant que**  $\sum_{\ell=1}^{\dim \hat{\rho}_k} \left| \frac{\hat{\theta}_\ell^{\text{iter}} - \hat{\theta}_\ell^{\text{iter}-1}}{\hat{\theta}_\ell^{\text{iter}-1}} \right| > \epsilon_2$

où  $\hat{\theta}_\ell^{\text{iter}}$  correspond au  $\ell$ -ème élément du vecteur des ordres  $\hat{\theta}^{\text{iter}}$  à l'itération iter

**Etape 3 :** Calculer la matrice de covariance des paramètres  $P_\theta$  :

$$P_\theta = \hat{\sigma}^2 \mathcal{H}^{-1}$$

avec  $\hat{\sigma}^2$  étant la variance de l'estimation empirique du bruit donnée par :

$$\varepsilon(t)y^*(t) - \hat{y}(t),$$

la sortie estimée s'exprimant par

$$\hat{y}(t) = \sum_{k=1}^K y_k(t),$$

où les  $y_k(t)$  sont calculés à la dernière itération et le hessien approché  $\mathcal{H}$  est donné par (5.129).

---

$$\frac{\partial \hat{y}_k}{\partial a_{i,k}} = \frac{-\sum_{j=0}^{M_k} \hat{b}_{j,k} p^{\hat{\beta}_{j,k} + \hat{\alpha}_{i,k}}}{\left(1 + \sum_{i=1}^{N_k} \hat{a}_{i,k} p^{\hat{\alpha}_{i,k}}\right)^2} u_k(t), \forall i = 1, \dots, N_k \quad (5.143)$$

avec  $k = 1, \dots, K$ .

### 5.3.2.5 Exemple académique

Soit le système MISO suivant :

$$\mathcal{S} : \begin{cases} G_1(s) = \frac{1}{1 + 1.5s^{1.2} + 0.5s^{2.8}} \\ G_2(s) = \frac{0.5}{1 + 1.5s^{1.1} + 0.4s^{2.5}} \\ G_3(s) = \frac{1.5}{1 + 1.5s^{0.7} + 0.6s^{1.6}}. \end{cases} \quad (5.144)$$

La sortie non bruitée  $y(t)$  est entâchée d'un bruit blanc gaussien centré, avec un rapport de Bruit sur Signal RBS = -10dB, et une période d'échantillonnage de  $T = 0.2s$ .

La structure du modèle est fixée comme celle du vrai système à :

$$G_k = \frac{b_{0,k}}{1 + a_{1,k}s^{\alpha_{1,k}} + a_{2,k}s^{\alpha_{2,k}}}, \text{ for } k = 1, 2, 3. \quad (5.145)$$

L'objectif est d'estimer à la fois les ordres de dérivation et les coefficients de trois sous-systèmes.

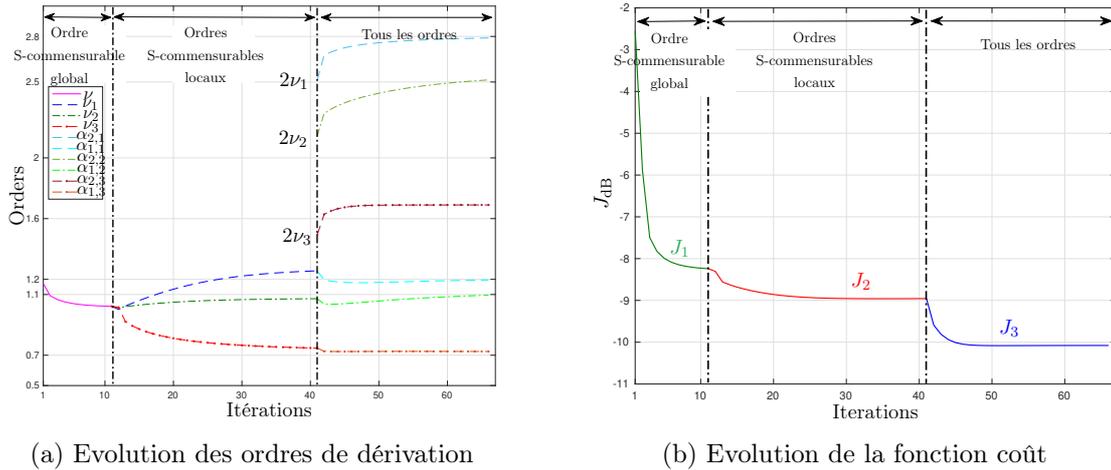


FIGURE 5.13: Résultats de l'estimation par la MISO-ooosrivcf pour l'exemple académique

La Fig. 5.13a montre l'évolution de l'estimation de tous les ordres de dérivation selon les trois variantes de l'algorithme. Lors de la première variante, un ordre S-commensurable global  $\nu$  est estimé. Puis, lors de la seconde variante, des ordres S-commensurables locaux sont estimés ( $\nu_1 = \alpha_{1,1}$  for  $G_1$  (- -),  $\nu_2 = \alpha_{1,2}$  for  $G_2$  (- -) et  $\nu_3 = \alpha_{1,3}$  for  $G_3$  (- \* -)). Enfin, à la dernière variante, la contrainte de S-commensurabilité est relâchée et tous les ordres de dérivation sont bien estimés.

La Fig. 5.13b montre que tant que l'on est pas dans la bonne classe de modèle, une erreur de modélisation sera toujours présente. Cette erreur de modélisation est quasiment nulle lors de la dernière phase d'estimation.

### 5.3.2.6 Synthèse

Les développements sur l'identification de systèmes non entiers MIMO ont été réalisés lors de la thèse de A. Mayoufi [100].

Ces travaux de recherche nous ont permis d'avoir plusieurs publications : une revue dans *Automatica* [A-2] et deux conférences [E-9, E-8] dont les principaux résultats ont été cités dans cette section. Une analyse de Monte Carlo a également été proposé dans l'article de revue avec l'étude de plusieurs exemples académiques.

Une deuxième proposition en utilisant la méthode MISO-oe (*output error* en anglais pour erreur de sortie) étendue aux systèmes non entiers MISO a également été proposée et publiée dans [A-7].

Enfin, l'utilisation et la comparaison de ces deux méthodes d'identification a été appliquée au système climatique terrestre dont les résultats sont pour l'instant décrit dans le mémoire de thèse d'A. Mayoufi avec l'identification de système non entier de première et de deuxième espèce en considérant deux périodes d'identification : [1850, 2018] pour la période de référence telle que proposée par le GIEC et [1000, 2018] pour une période plus grande telle que proposée par Ph. de Larminat [44]. De plus, des prédictions sur un horizon de 30 ans sont également développées. Tous ces résultats seront proposés pour publication dans une revue.

### 5.3.3 Identification de systèmes non entiers en temps-réel

Lors d'une première collaboration sur l'identification du modèle thermique des poumons lors d'opération chirurgicale à coeur ouvert, nous a permis de voir qu'il était important de connaître l'état des poumons [A-9]. En effet, lors de ces opérations à coeur ouvert avec circulation sanguine extracorporelle, un débit d'air froid est injecté dans les poumons pour ralentir le métabolisme. Cependant abaisser la température de manière trop significative ou encore trop longtemps peut causer des risques d'endommagement des tissus de manière irréversible.

Suite à un appel à projet pluridisciplinaire, nous avons pu entamer une collaboration avec le laboratoire IHU Liryc-INSERM U 1045 du CHU Haut-Lévêque. Avant de pouvoir estimer des modèles en temps-réel des transferts thermiques dans les poumons, il était nécessaire d'établir des méthodes d'identification en temps-réel (ou encore récursive) qui soient efficaces et dont les estimations sont consistantes afin de retrouver les constantes vitales des poumons.

Une première étude avec les méthodes classiques tels que les moindres carrés et la méthode pem (*prediction error method* en anglais), il s'avère que ces méthodes ne sont pas bien adaptées pour permettre une bonne identification des ordres de dérivation. Nous avons proposé

dans la thèse de J.F. Duhé, une première méthode fondé sur la méthode pem adapté aux systèmes non entiers, à savoir en considérant l'effet de mémoire longue des systèmes non entiers : la méthode LMRPEM (*Long Memory PEM* en anglais). Quand les ordres de dérivation sont également inconnus, il faut également considérer un algorithme à deux étages, un premier étage pour l'estimation des coefficients et un second pour l'estimation des ordres de dérivation.

### 5.3.3.1 Formulation du problème

Soit un signal d'entrée  $u(t_h)$  et sa sortie sans bruit  $y(t_h)$  reliés par le modèle non entier (A.31), où  $A(s)$  et  $B(s)$  sont supposés premiers entre eux et le système stable. Les données sont récoltées à des instants réguliers de  $t_1 = 0$  à l'instant présent  $t = t_{final}$ . De plus, le nombre de données est supposé être suffisamment important pour garantir une convergence des paramètres estimés vers les vrais paramètres. Le signal d'entrée quasi-stationnaire  $\{u(t), 0 \leq t \leq t_{final}\}$  appliqué au système est supposé suffisamment persistant et conduit au signal de sortie  $\{y(t), 0 \leq t \leq t_{final}\}$ . La sortie est entâchée d'un bruit de mesure blanc  $e(t_h)$ , normalement distribué, centré et de variance  $\sigma^2$ . Soit le système non entier décrit par :

$$\mathcal{S} : \begin{cases} y(t) = G(p)u(t) \\ y^*(t_h) = y(t_h) + e(t_h), \end{cases} \quad (5.146)$$

où  $y^*(t_h)$  est le signal de sortie bruitée de la sortie non bruitée  $y(t)$ .

Quand le modèle (A.31) est utilisé, le vecteur de paramètre  $\theta$  est défini par

$$\theta = \begin{bmatrix} \rho \\ \mu \end{bmatrix} \quad (5.147)$$

où  $\rho$  est le vecteur des  $N + M + 1$  coefficients :

$$\rho = [b_0, b_1, \dots, b_N, a_1, a_2, \dots, a_M]^T, \quad (5.148)$$

et  $\mu$  est le vecteur des  $N + M + 1$  ordres de dérivation :

$$\mu = [\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_M, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N]^T. \quad (5.149)$$

Le nombre total de paramètres à estimer est donc de  $2 \times (N + M + 1)$ . De plus, si  $N$  et/ou  $M$  sont grands, le risque de converger vers des minima locaux augmente et les algorithmes d'optimisation non linéaire risquent de ne pas converger vers un optimum global.

Afin de réduire le nombre de paramètre à estimer, un modèle commensurable (A.32) peut être choisi, où seul un ordre de dérivation est estimé avec

$$\mu = \nu, \quad (5.150)$$

alors le nombre de paramètres à estimer est de  $N + M + 2$ . Dans ce cas, le domaine de recherche de l'ordre commensurable se réduit au domaine de stabilité tel que décrit dans le théorème de Matignon étendu (Théorème A.7.4).

### 5.3.3.2 Estimation des coefficients

Dans le cas où tous les ordres de dérivation sont connus, seuls les coefficients sont estimés.

La première contribution a consisté à réadapter la méthode pem pour les systèmes non entiers. Nous avons proposé la méthode LMRPEM (*Long Memory Recursive Prediction Error Method* en anglais pour méthode PEM récursive à mémoire longue) qui permet de prendre en compte l'effet à mémoire longue des systèmes non entiers.

Les systèmes non entiers ont un effet de mémoire longue puisque toute le passé du signal est nécessaire pour définir une dérivée d'ordre non entier. Par conséquent, une fonction d'erreur adaptée  $\tilde{\epsilon}$  est donnée par :

$$\tilde{\epsilon}(t_h) = [\epsilon(t_1), \dots, \epsilon(t_h)]^T. \quad (5.151)$$

Ce signal d'erreur  $\tilde{\epsilon}$  contient les erreurs à tous les instants disponibles de  $t_1 = 0$  jusqu'à l'instant présent  $t_h = t_{final}$  et sera incrémenté d'un échantillon à chaque itération. Par conséquent, le gradient résultant  $\tilde{\psi}_\rho(h, \hat{\theta})$  est désormais une matrice :

$$\tilde{\psi}_\rho(t_h) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \epsilon(t_1)}{\partial b_0} & \dots & \frac{\partial \epsilon(t_h)}{\partial b_0} \\ \frac{\partial \epsilon(t_1)}{\partial b_1} & \dots & \frac{\partial \epsilon(t_h)}{\partial b_1} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial \epsilon(t_1)}{\partial a_N} & \dots & \frac{\partial \epsilon(t_h)}{\partial a_N} \end{bmatrix} \quad (5.152)$$

où  $h$  indique l'itération à l'instant présent.

En introduisant la sortie mesurée étendue  $\tilde{Y}^*(k)$  et la sortie estimée étendue  $\tilde{Y}(k)$  définies par :

$$\tilde{Y}^*(t_h) = [y^*(t_1), \dots, y^*(t_h)]^T \quad (5.153)$$

$$\tilde{Y}(t_h) = [\hat{y}(t_1), \dots, \hat{y}(t_h)]^T, \quad (5.154)$$

la méthode LMRPEM se traduit par :

$$\begin{cases} \tilde{\epsilon}(t_h) = \tilde{Y}^*(t_h) - \tilde{Y}(t_h) \\ \hat{\theta}(h) = \hat{\theta}(h-1) + \gamma_\rho R^{-1}(h) \tilde{\psi}_\rho(t_h) \tilde{\epsilon}(t_h) \\ R(h) = R(h-1) + \gamma_\rho [\tilde{\psi}_\rho(t_h) \tilde{\psi}_\rho^T(t_h) - R(h-1)] \end{cases} \quad (5.155)$$

où  $\gamma_\rho$  est un gain d'affinage tel que pour une descente de gradient.

### Exemple académique pour l'estimation récursive des coefficients

Soit le vrai système :

$$\begin{aligned} G(p) &= \frac{K}{1 + 2\zeta \left(\frac{p}{\omega_0}\right)^\nu + \left(\frac{p}{\omega_0}\right)^{2\nu}} \\ &= \frac{1}{1 - 1.414p^{0.5} + 2p^1} \end{aligned} \quad (5.156)$$

avec  $K = 1$ ,  $\zeta = -0.5$ ,  $\omega_0 = 0.5\text{rad/s}$  et  $\nu = 0.5$ . Une telle structure de modèle représente un système non entier de deuxième espèce A.37, et présente une résonance autour de  $\omega_r = 0.45\text{rad/s}$  (voir la figure 5.14).

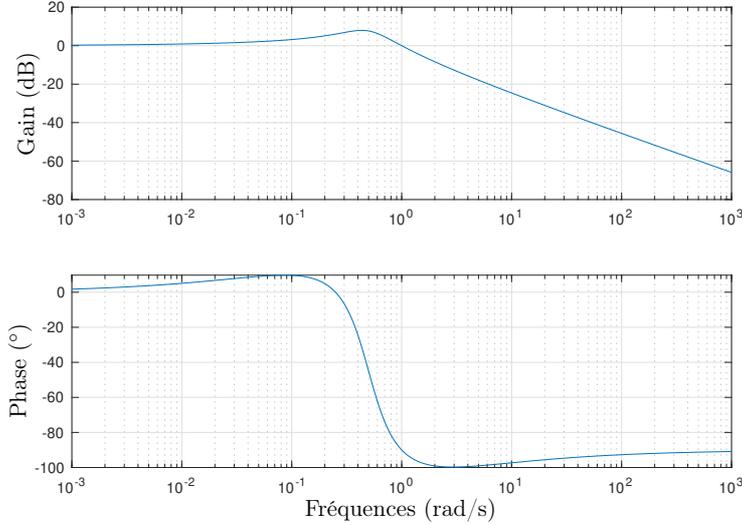


FIGURE 5.14: Diagrammes de Bode du vrai système (5.156)

La structure du modèle est choisie de manière identique au vrai système (5.156) et s'exprime par :

$$G(p) = \frac{b_0}{1 + a_1 p^\nu + a_2 p^{2\nu}}, \quad (5.157)$$

avec des ordres de dérivation supposés connus et fixés à ceux du vrai système (5.156). L'objectif est d'estimer les coefficients du modèle et de voir les propriétés statistiques proposées par notre première méthode LMRPEM à partir d'une analyse de Monte Carlo, avec  $N_{exp} = 100$  essais et différents niveaux de bruit (RBS).

Le signal d'entrée est une SBPA oscillant entre  $-5$  et  $5$  et contenant 1000 valeurs avec une période d'échantillonnage  $T = 0.01\text{s}$ . Toutes les simulations ont été initialisées avec  $\theta^T = [1, 0.5, 2.5]$  et  $\nu = 0.5$ .

De la figure 5.14, le vrai système étant résonant, le filtre de Poisson a une fréquence de coupure  $\omega_f = 10\text{rad/s}$  et comme  $\max(\beta_M, \alpha_N) = 1$ ,  $N_f = 2$ .

Les résultats de la simulation de Monte-Carlo de 100 essais sont résumés dans le tableau 5.4.

La méthode des moindres carrés avec filtre à variable d'état (RLSSVF) manque de robustesse vis-à-vis du bruit. Plus le RSB diminue, plus le biais d'estimation et la variance des estimées croissent. De plus, la RLSSVF n'est pas efficace car les paramètres ne sont pas bien estimés quelque soit le niveau de bruit.

La méthode RPEM ( $\gamma_\rho$  a été fixé à 0.01) conduit à des estimés plus consistants qu'avec ceux de la RLSSVF. Cependant, plus le RSB diminue, plus le biais et la variance des estimés

		$b_0$		$a_2$		$a_1$	
True		1.000		2.000		-1.414	
Méthode	$RSB$	$\hat{b}_0$	$\hat{\sigma}_{b_0}$	$\hat{a}_2$	$\hat{\sigma}_{a_2}$	$\hat{a}_1$	$\hat{\sigma}_{a_1}$
RLSSVF	20	0.866	0.014	1.740	0.017	-1.317	0.016
	15	0.644	0.026	1.357	0.030	-1.110	0.059
	10	0.295	0.035	0.819	0.042	-0.764	0.138
RPEM	20	1.001	0.010	1.999	0.034	-1.414	0.031
	15	0.999	0.020	1.985	0.051	-1.403	0.050
	10	1.000	0.035	1.954	0.098	-1.374	0.102
LMRPEM	20	0.999	0.004	1.999	0.006	-1.415	0.006
	15	0.999	0.009	2.001	0.011	-1.416	0.012
	10	0.998	0.016	2.001	0.019	-1.417	0.022

TABLE 5.4: Simulation de Monte Carlo (100 essais) pour l'estimation des coefficients avec différents  $RSB$ .  $\hat{\theta}$  dénote la valeur moyenne et  $\hat{\sigma}$  l'écart-type

croissent. On observe un écart-type de quasiment 3 entre les écart-types d'un  $RSB = 20\text{dB}$  et  $RSB + 10\text{dB}$ . La méthode LMRPEM ( $\gamma_\rho$  a été fixé à 0.01) a les estimés les plus consistants car ils ne présentent pas de biais et les variances sont les plus faibles.

### 5.3.3.3 Algorithme à deux étages pour les estimations des coefficients et des ordres de dérivation

En pratique, les ordres de dérivation étant inconnus, il convient d'estimer les ordres de dérivation en plus des coefficients. Un algorithme à deux étages est également proposé afin d'identifier tous ces paramètres avec une fonction de coût plus adaptée. La méthode LMRPEM produisant les meilleurs estimés, il est proposé d'utiliser cette méthode pour l'estimation des ordres de dérivation.

Dans un contexte général d'un système non entier quelconque, un vecteur d'ordres de dérivation doit être déterminé alors que dans le cas d'un système commensurable, un seul ordre de dérivation est estimé.

En suivant, la méthode de l'erreur de prédiction, une fonction d'erreur adaptée est donnée par l'erreur de sortie suivante :

$$\epsilon(t_h) = y^*(t_h) - \hat{y}(t_h), \quad (5.158)$$

et les ordres de dérivation sont estimés récursivement en ajoutant un terme de correction sur l'estimation à l'itération précédente :

$$\mu(h+1) = \mu(h) + \gamma_\mu R_\mu^{-1} \psi_\mu(t_h) \epsilon(t_h) \quad (5.159)$$

où :

$$\psi_\mu(t_h) = \frac{\partial \epsilon}{\partial \mu}(t_h) = -\frac{\partial \hat{y}}{\partial \mu}(t_h). \quad (5.160)$$

---

**Algorithme 6** Algorithme hybride LMRPEM
 

---

**Etape 1 :** *Initialisation*

$$h = 1$$

$$\text{Initialize parameter vector } \theta(1) = \begin{bmatrix} \rho(1) \\ \nu(1) \end{bmatrix}$$

**Etape 2 :** *Estimation récursive de tous les paramètres*
**Pour**  $h = 1$  : *fin*

 (a) *Estimation des coefficients*

 En supposant les ordre de dérivation  $\nu(h-1)$  connus, calculer  $\rho(k)$  à partir de (5.155)

 (b) *Estimation des ordres de dérivation*

 En supposant les coefficients  $\rho(k)$  connus, calculer  $\nu(k)$  à partir de (5.165)
 

---

De même que pour l'estimation des coefficients, une erreur étendue est utilisée pour prendre en compte l'effet à longue mémoire des systèmes non entiers :

$$\tilde{\epsilon}(t_h) = [\epsilon(t_1) \dots \epsilon(t_h)]^T, \quad (5.161)$$

ce qui amène la sensibilité de l'erreur en une matrice :

$$\tilde{\psi}_\mu(t_h) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \epsilon(t_1)}{\partial \beta_0} & \dots & \frac{\partial \epsilon(t_h)}{\partial \beta_0} \\ \frac{\partial \epsilon(t_1)}{\partial \beta_1} & \dots & \frac{\partial \epsilon(t_h)}{\partial \beta_1} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial \epsilon(t_1)}{\partial \alpha_N} & \dots & \frac{\partial \epsilon(t_h)}{\partial \alpha_N} \end{bmatrix}. \quad (5.162)$$

Pour l'estimation d'un ordre commensurable, le gradient se résume à :

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_\mu(t_h) &= \tilde{\psi}_\nu(t_h) \\ &= \begin{bmatrix} \frac{\partial \epsilon(t_1)}{\partial \nu} & \dots & \frac{\partial \epsilon(t_h)}{\partial \nu} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (5.163)$$

dont les sensibilités de la sortie 5.160 à l'ordre commensurable  $\frac{\partial \hat{y}}{\partial \nu}$  s'expriment par :

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial \nu} = \ln(p) \frac{\sum_{i=0}^M i b_i p^{i\nu} \sum_{i=0}^M \sum_{j=1}^N (i-j) b_i a_j p^{(i+j)\nu}}{\left(1 + \sum_{j=1}^N a_j p^{\alpha_j}\right)^2} u(t). \quad (5.164)$$

La méthode LMRPEM pour l'estimation des ordres de dérivation se traduit par :

$$\begin{cases} \tilde{\epsilon}(t_h) = \tilde{Y}^*(t_h) - \tilde{Y}^*(t_h) \\ \hat{\nu}(h) = \hat{\nu}(h-1) + \gamma_\nu R^{-1}(h) \tilde{\psi}_\nu(t_h) \tilde{\epsilon}(t_h) \\ R(h) = R(h-1) + \gamma_\nu \left[ \tilde{\psi}_\nu(t_h) \tilde{\psi}_\nu^T(t_h) - R(h-1) \right] \end{cases} \quad (5.165)$$

L'algorithme hybride LMRPEM pour l'estimation des coefficients et des ordres de dérivation est décrit dans l'algorithme 6.

### Exemple académique pour l'estimation de tous les paramètres

Avec  $\gamma_\rho = 0.005$  et  $\gamma_\nu = 0.05$ , et le même exemple de la section précédente décrit par le modèle (5.156).

		$b_0$		$a_2$		$a_1$		$\nu$	
Vrai		1.000		2.000		-1.414		0.5	
	$RSB$	$\hat{b}_0$	$\hat{\sigma}_{b_0}$	$\hat{a}_2$	$\hat{\sigma}_{a_2}$	$\hat{a}_1$	$\hat{\sigma}_{a_1}$	$\hat{\nu}$	$\hat{\sigma}_\nu$
Algorithme	$\infty$	0.991		2.001		-1.431		0.497	
Hybrid LMRPEM	20	0.987	0.023	2.001	0.007	-1.437	0.042	0.496	0.007
	15	0.989	0.029	2.001	0.010	-1.434	0.052	0.496	0.009

TABLE 5.5: Simulation de Monte Carlo (100 essais) pour l'estimation de tous les paramètres avec différents  $RSB$ .  $\hat{\theta}$  dénote la valeur moyenne et  $\hat{\sigma}_\theta$  l'écart-type

La simulation de Monte Carlo est donnée au tableau 5.5 avec différents niveaux de bruit et 100 essais à chaque fois. Tous les essais ont convergé vers des modèles stables. Bien que le niveau de bruit augmente, l'algorithme hybride LMRPEM a bien convergé vers les vrais paramètres avec des estimés sans biais en moyenne et avec très peu de variance.

Un exemple de simulation sur des poumons a également été réalisé en attente de réaliser des essais au CHU Haut-Lévêque. L'évolution des paramètres est donné pour un  $RSB = 20\text{dB}$  sur la figure 5.15. On remarque que dès que l'algorithme hybride LMRPEM converge vers le bon ordre de dérivation, les coefficients convergent rapidement vers les bonnes valeurs.

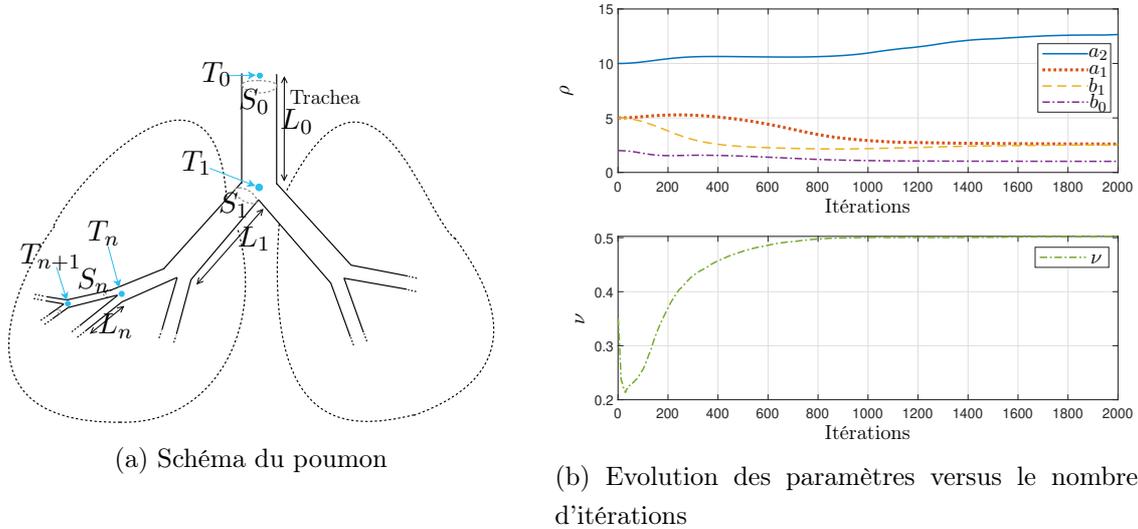


FIGURE 5.15: Estimation en temps-réel des transferts thermiques dans un poumon avec l'algorithme hybride LMRPEM

#### 5.3.3.4 Synthèse

Les développements sur l'identification récursive des systèmes non entiers sont en cours d'élaboration pendant la thèse de J.-F. Duhé [89] et nous ont permis d'avoir plusieurs publications (1 revue internationale en cours de relecture [A-1] et 1 conférence internationale [E-3]).

Une autre méthode d'identification fondée sur l'extension de la srivcf récursive pour l'estimation des coefficients combinée à la LMRPEM pour l'estimation des ordres de dérivation a été réalisé [C-2].

Enfin, dans le cas où le jeu de données augmente significativement, une étude l'erreur d'approximation de la dérivation non entière pour établir la dimension d'une fenêtre glissante est actuellement en cours et devrait être proposée dans une revue.

Pour rappel, les premiers travaux de thèse de J.-F. Duhé [89] ont également permis d'établir plusieurs types de modèle de transferts thermiques dans les poumons (voir paragraphe 5.2.2) : modèles de diffusion thermique par l'équation de la chaleur au travers d'un circuit en T, des modèles de diffusion avec la prise en compte des phénomènes de perfusion au travers de l'équation de Pennes, et enfin, des modèles de perfusion prenant en compte des échanges mixtes de gaz et de perfusion.

Après avoir répondu à un appel à projet transdisciplinaire en fin 2021, j'ai pu obtenir un financement pour l'acquisition de moutons et de kits pour réaliser des opérations à cœur ouvert sur des moutons. Ces essais vont pouvoir être réalisés en mars 2022 et permettront de tester en temps réel les développements théoriques proposés.

## 5.4 Contributions à la toolbox CRONE/Matlab®

L'équipe CRONE a développé une toolbox fonctionnelle sous Matlab®. Cette toolbox permet de manipuler les systèmes non entiers selon deux volets : d'une part, la synthèse de lois de commande robuste et d'autre part, le calcul fractionnaire et l'identification de systèmes non entiers. A l'origine, cette toolbox était réservé à des industriels (Groupe PSA et Bosch) et n'était pas divulgué au grand public. Les accords de propriétés avec ces industriels ne s'étant pas poursuivis après les années 2010, l'équipe a décidé de rendre publique cette toolbox.

Depuis sa mise en ligne au 1er novembre 2011 sur <http://archive.ims-bordeaux.fr/CRONE/-toolbox/>, la toolbox a été téléchargé plus de 2900 fois.

La partie sur la synthèse de commande robuste ne manipulant pas directement le calcul fractionnaire, les développements algorithmiques devenaient obsolètes en ce qui concerne le calcul fractionnaire et l'identification des systèmes non entiers, il a donc été décidé de développer une version orientée objet pour la partie calcul fractionnaire et identification. Avec mon collègue, Rachid Malti, je contribue à développer des fonctions spécifiques sur l'identification par modèles

```

-----
                    Test report for the CRONE Toolbox
-----
frac_poly_exp class      number of functions tested: 122
frac_poly_imp class     number of functions tested: 88
frac_lti class          number of functions tested: 38
frac_tf class           number of functions tested: 42
frac_ss class           number of functions tested: 40
frac_zpk class          number of functions tested: 4
frac_idtf class         number of functions tested: 3
-----

Total number of functions tested: 337
Total time spent running tests: 3 min 48 sec

-----
                    No errors found - The CRONE Toolbox is fully functional
-----
>>

```

FIGURE 5.16: Rapport des nouveaux tests au 1er octobre 2021

non entiers et j’ai également développé un tutoriel avec un démonstrateur pour utiliser toutes les fonctions développées en identification [E-21].

Depuis la version 2020 de Matlab®<sup>®</sup>, certaines fonctionnalités de la toolbox sont devenues obsolètes et il était nécessaire de réaliser une mise à jour importante des fonctions, des classes et des fonctions de tests.

Nous avons pris D. Loo en stage de fin d’étude en 2021 pour corriger toutes les erreurs liées à la nouvelle version de Matlab®<sup>®</sup>, créer de nouvelles fonctions de test, et créer une interface graphique similaire à la toolbox “System Identification” qui a été développée par Ljung. Ce stage nous a permis

- de fiabiliser les classes de la toolbox par la réécriture des classes selon la nouvelle programmation proposée par Matlab®<sup>®</sup> et la réécriture des tests unitaires selon ces nouvelles classes (voir figure 5.16),
- d’ajouter de nouvelles fonctionnalités comme la nouvelle classe *frac\_idtf*, l’utilisation de la variable ‘s’ ou encore la surcharge de la méthode *frd()* (voir figure 5.17)
- et de concevoir une application d’interface homme-machine (IHM) (voir figure 5.18); cette interface permet d’utiliser toutes les méthodes d’identification par modèle non entier via l’utilisation de signaux temporels.

Ces résultats majeurs vont faire l’objet d’une publication dans une revue.

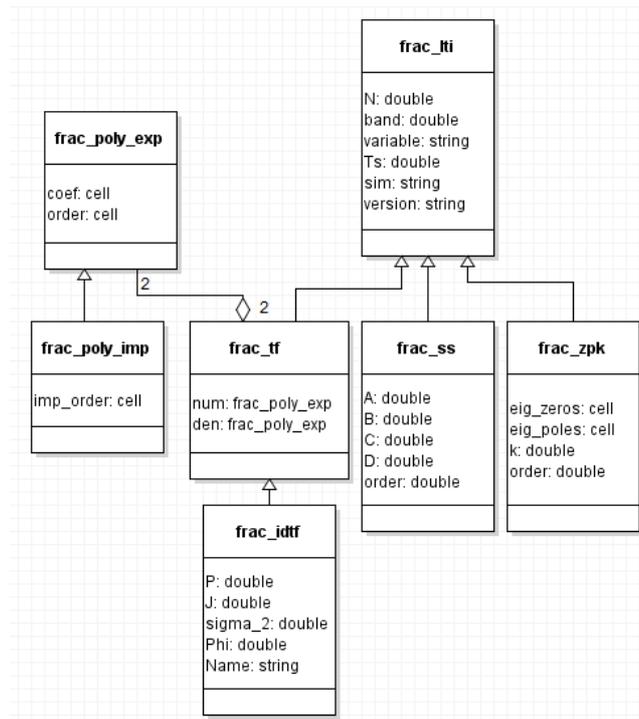


FIGURE 5.17: Diagramme de classe de la nouvelle version de la toolbox CRONE/Identification

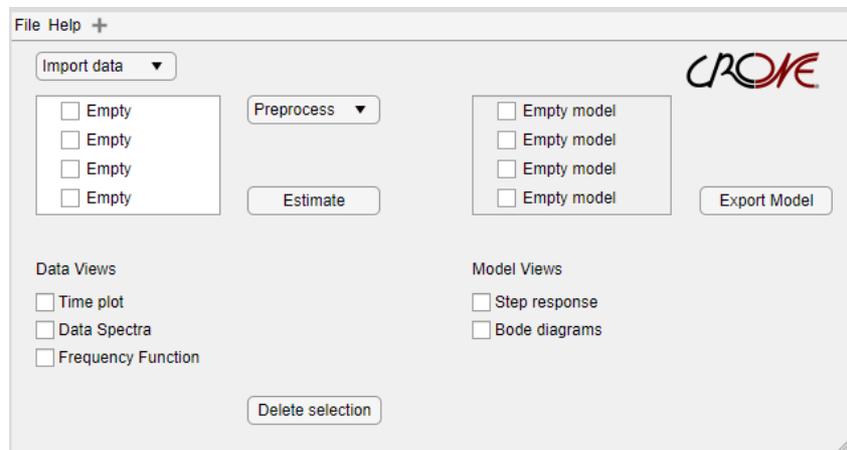


FIGURE 5.18: Création de l'IHM pour l'application CRONE

## 5.5 Conclusion et autres contributions

Les contributions que j'ai apportées dans ce chapitre permettent de mettre en exergue l'application de l'opérateur de dérivation non entière dans la modélisation des systèmes de diffusion (diffusion thermique dans un matériau en 2D, diffusion thermique dans les poumons et perturbations de vent), et également de proposer de nouveaux développements dans l'identification des systèmes non entiers (en identification des systèmes quelconques, identification des systèmes MISO et identification en temps-réel). Enfin, les contributions théoriques proposées ont fait l'objet de développements de fonctions qui seront intégrés dans la toolbox CRONE dédiée au calcul fractionnaire et à l'identification des systèmes non entiers (création d'un tutoriel, développement de nouvelles fonctions, création d'une IHM).

### Modélisation de la propagation d'une épidémie virale

Compte-tenu du contexte sanitaire lié au COVID-19, il nous a semblé nécessaire de proposer des modèles de prédiction sur la propagation virale en épidémiologie et plus particulièrement celle liée au COVID-19. Un modèle mathématique déterministe très simple a été proposée, à partir d'une loi de puissance non entière (ou *fractional power model* (FPM) en anglais). Un tel modèle, non entier en la puissance du temps,  $t^m$  à une constante près, permet de représenter la totalité des contaminés à chaque jour, avec une très bonne précision. Ce modèle ne contient que 3 paramètres, dont la puissance non entière  $m$  et détermine à lui seul, selon sa valeur, une aggravation ou une amélioration de la propagation virale. Sa simplicité vient de la loi de puissance  $t^m$ , qui exprime simplement des dynamiques singulières de l'opérateur de dérivation ou d'intégration non entière. En effet, il est connu que cet opérateur permet de modéliser avec une grande compacité paramétrique les phénomènes de diffusion, et donc plus particulièrement les phénomènes de diffusion, dont ceux de la propagation virale par contamination. La représentativité du modèle proposé a été validée par les données officielles du Ministère de la Santé en France. La prédictivité a été validée en phases de confinement et de vaccination. Une action d'auto-filtrage permet de montrer la compatibilité entre la complexité interne (son comportement stochastique et sa structure interne) et la simplicité globale (de son caractère déterministe). Les travaux portant sur la modélisation de la propagation virale ont été publiés dans la revue [A-8] et ont été présentés au Workshop Epidemics proposé dans le GdR MACS [F-4]. Il est également proposé une prédictivité des modèles FPM : sur une identification réalisée sur 2 semaines, le modèle FPM peut prédire avec une très bonne précision jusqu'à 5 semaines la propagation virale : à 5 semaines de l'erreur relative est autour de  $7.98 \cdot 10^{-5}$ .

Une étude complémentaire et en cours de rédaction pour comparer ce modèle FPM composés de 3 paramètres à des modèles exponentiels également à 3 paramètres.

## Planification d'expériences pour l'identification des systèmes non entiers de seconde espèce

La planification d'expériences est une thématique très importante en identification. Elle permet de choisir le meilleur signal d'excitation permettant d'estimer les paramètres avec peu de variance. En considérant les modèles non entiers de deuxième espèce (A.37), on choisit les meilleures fréquences d'une entrée multi-sinusoïdale afin d'estimer le vecteur de paramètre  $\theta$  avec le maximum de précision possible, précision que l'on peut quantifier en minimisant le critère de D-optimalité, ou encore en minimisant la norme de la matrice de covariance calculée à partir de l'inverse de la matrice d'information de Fisher (*Fisher Information Matrix* en anglais (FIM)) [58] :

$$\bar{P}^{-1}(\Phi_u(\omega)) = P^{-1}(\Phi_u(\omega)) + R_0, \quad (5.166)$$

avec

$$P^{-1}(\Phi_u(\omega)) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \int_{-\infty}^{\infty} \Re \left( \left[ \frac{\partial F(j\omega)}{\partial \theta} \right]^T \Phi_u(\omega) \left[ \frac{\partial F(-j\omega)}{\partial \theta} \right] \right) d\omega, \quad (5.167)$$

où  $\sigma^2$  est la variance du bruit,  $\Phi_u(\omega)$  est le spectre du signal d'entrée  $u(t)$ , et  $R_0$  est une constante indépendante de  $\Phi_u(\omega)$ . L'objectif de ce travail a été de bien synthétiser le signal d'excitation pour pouvoir estimer jusqu'à quatre paramètres : le gain statique  $K$ , la pseudo-pulsation propre  $\omega_0$ , le pseudo-facteur d'amortissement  $\xi$  ou encore l'ordre commensurable  $\nu$ . Ce travail a pu être mené lors du stage de A. Mayoufi où seuls les cas de 1 ou 2 paramètres à estimer ont été abordés. Les études pour le cas de 3 ou 4 paramètres à estimer ont été abordées lors de sa poursuite en thèse et on fait l'objet de 2 publications [E-14, A-5].

Dans les cas de un ou deux paramètres inconnus, les expressions de la FIM et de son déterminant sont données. De plus, des solutions numériques sont proposées en explicitant le cas entier en plus du cas plus général d'un ordre commensurable.

## Identification en boucle fermée d'un système rationnel

J'ai également commencé à m'intéresser à l'identification en boucle fermée pour des systèmes monovariables. De premiers résultats ont été publiés pour le cas des systèmes rationnels (entiers) [E-17] avec une présentation lors du GT identification [F-10] avec l'application sur un banc d'essai d'un turbofan DGEN 360 [C-1]. L'extension de l'identification des systèmes non entiers en boucle fermée est une des perspectives que je souhaite développer et est détaillée au paragraphe 6.7.



## Chapitre 6

# Perspectives de recherche

---

<b>6.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>187</b>
<b>6.2</b>	<b>Génération de consigne et génération de commande sur des robots volants</b>	<b>187</b>
<b>6.3</b>	<b>Modélisation et commande d'un tracteur autonome</b>	<b>188</b>
<b>6.4</b>	<b>Identification en temps réel en santé</b>	<b>190</b>
6.4.1	Modélisation des transferts thermiques dans les poumons	190
6.4.2	Modélisation et identification des fractales musculaires dans le cœur	190
<b>6.5</b>	<b>Identification des systèmes dynamiques non linéaires non entiers par Deep Learning</b>	<b>191</b>
<b>6.6</b>	<b>Identification en temps réel et commande optimale dans les processus de fabrication dans l'industrie du futur</b>	<b>192</b>
<b>6.7</b>	<b>Modélisation et identification en boucle fermée d'une pile à combustible</b>	<b>194</b>
<b>6.8</b>	<b>Modélisation et identification de cellules Lithium-Ion</b>	<b>195</b>
<b>6.9</b>	<b>Développement d'algorithme dans la toolbox CRONE</b>	<b>196</b>
<b>6.10</b>	<b>Caractérisation et identification de capteurs de flux en couches minces pour les applications de rentrée atmosphérique</b>	<b>196</b>

---



## 6.1 Introduction

Mes projets de recherche portent sur l'identification des systèmes non entiers ainsi que sur la planification de trajectoire. Etant très dynamique dans ma communauté ainsi qu'au sein de mon laboratoire, j'ai plusieurs perspectives qui viendront compléter et enrichir mes activités de recherche actuelles.

Les systèmes étant de plus en plus connectés, il est nécessaire d'avoir une connaissance précise de leur état en temps réel, d'une part pour faire de la surveillance et du diagnostic, voire faire du pronostic ou de la maintenance prédictive, et d'autre part, pour mieux les contrôler pour éviter tout endommagement, pour améliorer leurs performances dynamiques ainsi que gagner en autonomie car l'énergie est un secteur qui prend de plus en plus de son importance dans les nouvelles technologies. Par conséquent, l'identification des systèmes dynamiques est une spécialité qui va prendre encore plus d'importance dans les systèmes connectés de demain.

Dans les systèmes autonomes, il est nécessaire de bien gérer l'autonomie de ces systèmes. En effet, les missions confiées ne pourront être effectués que si les ressources disponibles sont utilisées de manière optimale. Par conséquent, il sera toujours nécessaire de bien concevoir la génération de consigne, puis à partir du modèle du système, d'en faire de l'inversion de modèle afin de bien générer les commandes optimales pour le bon fonctionnement du système. Ensuite, compte tenu des incertitudes paramétriques du modèle, de ses points de fonctionnement et des incertitudes de l'environnement (perturbations, condition de travail,...), une synthèse de lois de commande robuste est nécessaire pour le bon fonctionnement du système. En effet, la conception de loi de commande robuste permet d'améliorer les performances dynamiques du système pour un bon suivi de trajectoire, un bon rejet de perturbation et notamment gagner en autonomie.

## 6.2 Génération de consigne et génération de commande sur des robots volants

Tout d'abord, j'ai été impliqué dans le cluster SYSNUM (2016-2021) et tout particulièrement dans le Workpackage 7 portant sur la robotique. J'ai démarré cette collaboration avec le LaBRI dans l'encadrement de thèse de K. Ruiz, ainsi que sur les encadrements de stage recherche de M2 de S. Abellaoui et H. Ould Lahsen portant sur les drones.

Suite à cette implication, un projet Région Nouvelle-Aquitaine a été déposé avec la société ICARE pour concevoir des robots volants de livraison avec des masses transportées pouvant être très importantes (voir figure 6.1). Ce projet région a été accepté et nous sommes dans la deuxième phase du projet en attente de l'acceptation du financement par la BPI.

L'expérience obtenue lors de la thèse de M. Hajjem va nous permettre d'obtenir un modèle de vent réaliste à haute altitude. D'autre part, les générations de consigne et de commande réalisées pendant sa thèse nous permettront d'étendre ces méthodologies dans le domaine des robots volants. Enfin, les travaux de recherche réalisés dans les thèses de J.B. Receveur [114]

et de K. Ruiz [123] me permettront de combiner les nouveaux champs de potentiel attractif et répulsif pour élaborer une génération de consigne optimale pour la trajectoire du robot volant avec une méthodologie telle qu'élaborée dans la thèse de M. Hajjem sur les non-linéarités du modèle du robot volant et les perturbations de vent avec poursuite robuste de trajectoire.



FIGURE 6.1: Modèle de drones

L'objectif du projet est :

- de prendre en compte les incertitudes paramétriques du systèmes (variations de masses de chargement, de conditions de vol, température, pression, vitesse...), les incertitudes de l'environnement (météo, vent, pluie, ensoleillement,...) pour faire de la génération de trajectoire ;
- d'établir le modèle dynamique du robot volant afin de faire de la génération de commande ;
- d'identifier les paramètres inconnus du système à savoir ses coefficients aérodynamiques.

Il est également prévu de récupérer des cartographies de la topologie de l'environnement et des conditions météorologiques afin de faire de la commande prédictive pour profiter des courants ascendants si l'ensoleillement est suffisant afin d'augmenter significativement l'autonomie du robot volant.

### 6.3 Modélisation et commande d'un tracteur autonome

Egalement suite au travail effectué dans le Workpackage 7 du cluster SYSNUM (2016-2021), Le cluster SYSNUM (2016-2021) se recentre sur la robotique agricole sous forme du Réseau Impulsion ROBOSYS de l'Université de Bordeaux. Ce projet a été accepté à hauteur de 990k€ en décembre 2021. Nous avons déposé un projet de recherche sur la planification de trajectoire d'un tracteur agricole autonome.

Je suis actuellement en collaboration avec H. Gimbert du LaBRI et nous avons entamé un stage de recherche avec L. Mizgalski (février-juillet 2021) sur la modélisation d'un tracteur autonome (voir figure 6.2).



FIGURE 6.2: Tracteur autonome agricole élaborée par la société Elatech

Ce stage nous a permis de voir que la modélisation des pneumatiques est à réadapter dans le cadre d'un tracteur. Nous avons lancé un stage de M2 Recherche avec Youcef Ferradji (mars-juillet 2022) pour établir des modèles de pneumatiques plus adaptés à partir des modèles de Bekker-Wong et de Burckhardt car ils prennent en compte l'enfoncement des pneumatiques et de la diversité des sols considérés (terreau, argile, sable).

Le projet de recherche permettra de développer la génération de consigne afin de définir des profils de chemin optimaux dans les champs à partir d'une optimisation multi-critère (temps, distance, pente du terrain, charges embarquées en fonction des outils du tracteur, condition de route, points de fonctionnement du tracteur) afin d'augmenter l'autonomie du tracteur et d'éviter les obstacles environnants, puis de la génération de commande afin d'être optimal dans le suivi de trajectoire, et enfin dans la synthèse des lois de commande robuste afin de bien rejeter les perturbations de l'environnement et de suivre le plus efficacement possible la trajectoire de référence (extension des travaux de J.B. Receveur et du stage de Master Recherche de J.F. Duhé réalisé en 2019)).

## 6.4 Identification en temps réel en santé

### 6.4.1 Modélisation des transferts thermiques dans les poumons

La collaboration entamée avec le CHU Haut-Lévêque pour la thèse pluridisciplinaire de J.-F. Duhé, nous a montré que le Liryç est très intéressé par les développements théoriques en modélisation et en identification. Plusieurs perspectives pourraient être envisagées. D'une part sur la modélisation et l'identification de l'impédance thermique du poumon en 3D (voir figure 6.3), mais également remonter à des essais cliniques plus avancées. Dans un premier temps, nous allons faire des essais sur des moutons (mars 2022) ; l'étape suivante serait de valider l'identification en temps-réel sur des animaux plus proches de la morphologie de l'homme, tels que sur des singes.

Dans la deuxième étape, l'estimation des modèles de poumons pourrait être appliquée sur des patients afin d'étendre nos méthodes d'identification en temps-réel afin de diagnostiquer des pathologies liées aux poumons.

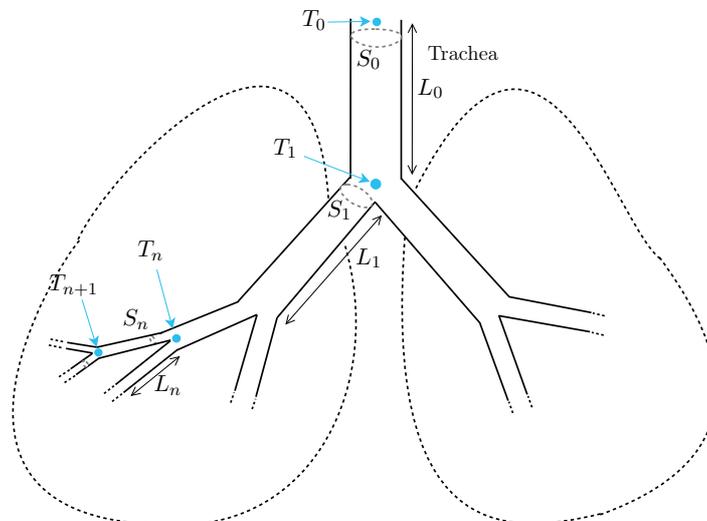


FIGURE 6.3: Schéma du poumon

### 6.4.2 Modélisation et identification des fractales musculaires dans le cœur

Les fibres musculaires qui tapissent l'intérieur des ventricules cardiaques sont des trabécules charnues et qui permettent de connaître la performance du cœur et de déterminer d'éventuelles maladies cardiaques. Léonard de Vinci avait décrit une structure géométrique dans le cœur dès le XVI<sup>ème</sup> siècle.

La fractalité étant naturellement présente dans la médecine cardiovasculaire, modéliser et identifier le modèle du cœur par des fractales musculaires est une des perspectives de recherche dans la continuité de la collaboration avec le service de cardiologie du CHU Haut-Lévêque (voir figure 6.4). De plus, les spectres de puissance du pouls cardiaque et de la pression sanguine montrent plusieurs composantes fréquentielles en très basse, moyenne et en haute fréquence

cette dernière étant liée à la respiration. L'analyse de ces spectres permettrait de diagnostiquer, caractériser, voire classer des pathologies et notamment prévenir des risques éventuels. Une des difficultés en médecine est d'être capable de déterminer des éventuelles pathologies avec des moyens de mesures peu invasifs pour faire du préventif ou du pathologique.

Les perspectives sont nombreuses notamment en microcirculation de patients normaux et atteints de pathologies. Il faudrait pouvoir explorer et faire des analyses par micro-scanner pour détecter le remodelage cardiaque (REM) et notamment de manière plus fine la myocardiopathie atteinte de la microcirculation pathologique ainsi que l'hypertension artérielle.

De plus, le réseau sanguin (voir figure 6.4) présente également une structure fractale qui pourrait être modélisé par un modèle non entier. La première phase serait de faire de l'identification en temps-réel pour une représentation en 3D puis de poursuivre cette étude pour détecter des anomalies du coeur chez des patients avec des méthodes de mesures qui seraient non invasives et non destructives pour les patients.

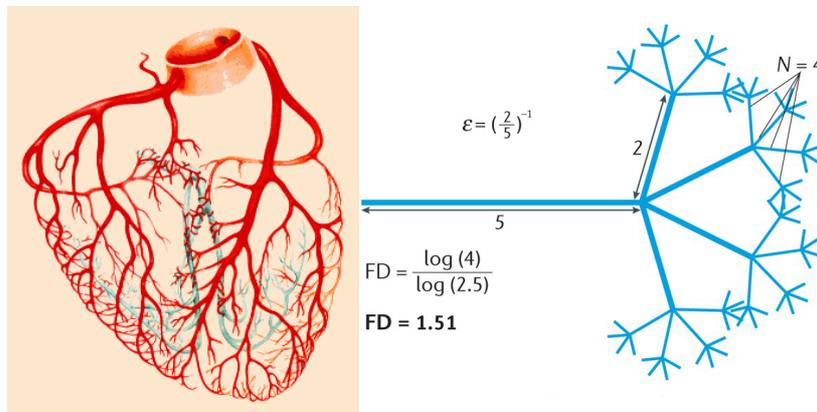


FIGURE 6.4: Fractalité du coeur

## 6.5 Identification des systèmes dynamiques non linéaires non entiers par Deep Learning

La théorie de l'identification des systèmes dynamiques linéaires est fonctionnelle et de nombreux développements existent dans la littérature. En ce qui concerne l'identification des systèmes linéaires non entiers, les premiers développements ont démarré à la fin des années 90. L'identification des systèmes non linéaires est une thématique nouvelle sur laquelle les approches classiques n'apportent pas de résultats très concluants. Il a été montré très récemment que l'intelligence artificielle, et plus spécifiquement l'apprentissage profond (Deep Learning) apportent significativement dans l'estimation des paramètres du systèmes dynamiques non linéaires [52, 53]. Le premier objectif est de développer de nouvelles méthodes d'identification par modèle non entier pour les systèmes non linéaires non entiers en y associant du Deep Learning.

L'opérateur de dérivation non entière est un outil mathématique particulièrement bien adapté pour la modélisation des phénomènes de diffusion, tels que la diffusion thermique [135, 6], la diffusion des particules électrochimiques dans les batteries [146], la diffusion dans les systèmes biologiques [A-9], la propagation d'une épidémie tel que le COVID-19 [A-8], etc. En effet les systèmes non entiers possèdent des atouts indéniables compte tenu de sa compacité paramétrique (peu de paramètres) et de sa propriété de mémoire longue.

Dans le cas de l'usinage à grande vitesse (UGV), les caractéristiques thermiques, telles que la capacité calorifique et la conductivité, varient en fonction de la température (jusqu'à 650°C) ce qui montre effectivement qu'à partir d'un niveau de température suffisamment élevé, la diffusion thermique devient non linéaire [69]. Il est donc justifié d'utiliser de nouvelles méthodes d'identification pour les systèmes non linéaires non entiers en utilisant de nouvelles techniques de l'intelligence artificielle, et plus particulièrement du Deep Learning car cette méthodologie est bien adaptée pour les séries temporelles. De plus, l'application visée concerne la rentrée atmosphérique d'un engin spatial à basse orbite où la température à la surface de contact entre l'atmosphère et l'engin peut atteindre plus de 800°C.

Les applications en lien avec ces travaux de recherche sont multiples et pourront être appliqués pour la rentrée atmosphérique d'engins spatiaux (voir paragraphe 6.10) où des modèles des transferts multivariables (MISO et MIMO) seront établis entre le flux de chaleur distribué et de la température mesurée. De plus, de nouvelles méthodes d'identification adaptés pour des modèles non linéaires non entiers, compte tenu des fortes variations de température, seront développées en y incluant des outils du Deep Learning plus adaptés et plus performants. Dans le stockage d'énergie, l'identification en SISO des impédances thermiques dans les batteries (voir au paragraphe 6.8) serait d'utiliser directement un modèle non linéaire non entier en utilisant nos nouveaux outils d'identification avec du Deep Learning afin de connaître rapidement le SOC (*state of charge* en anglais pour état de charge) et le SOH (*state of health* en anglais pour état de santé) de la batterie. Ou encore dans le domaine de l'énergie, l'identification des impédances thermiques dans les piles à combustible en boucle fermée (voir paragraphe 6.7) permettrait de connaître les performances énergétiques de la pile ainsi que son état de santé. Enfin, en médecine et plus particulièrement en cardiologie, à partir de mesures significatives (pouls cardiaque et pression sanguine), des pathologies pourraient être mieux diagnostiquées et caractérisées.

## 6.6 Identification en temps réel et commande optimale dans les processus de fabrication dans l'industrie du futur

Dans le cadre du Réseau Impulsion BEST (projet de recherche sur l'industrie du futur), je suis coresponsable avec M. Sbartai (I2M) du Workpackage 1 sur l'"évaluation non destructive et le contrôle optimal". Nous travaillons depuis 2018 sur cette thématique de l'industrie du futur, et le projet BEST a fait émerger de fortes synergies entre ces 2 laboratoires I2M et IMS.

Un des challenges de l'industrie du futur est de garantir l'intégrité des processus de fabrication ou des systèmes opérationnels. Pour atteindre cet objectif, les mesures des propriétés du matériau et les détections de défauts doivent être conduites *in situ* et doivent être utilisés en temps-réel pour l'aide à la décision et le contrôle du processus en cours de fabrication. Dans le contexte de l'industrie du futur, l'environnement considéré peut être perturbé et contraint avec une grande variété des systèmes ou de matériaux multi-échelles et multi-couches.

En collaboration avec l'I2M, nous avons développé un projet dans ce Workpackage sur l'identification en temps-réel et le contrôle optimal en collaboration avec la société VLM Robotics (solution partenaire de Siemens dans la région Nouvelle-Aquitaine). Dans un contexte de grande variabilité de l'environnement, des matériaux et des états du système (points de fonctionnement, usure, vieillissement) et d'optimisation énergétique, l'objectif de ce projet de recherche est de proposer, lors d'une opération d'usinage à commande numérique, des innovations à trois niveaux : (i) en modélisation du processus de fabrication en vue de la génération des consignes optimales, (ii) en identification en temps-réel pour connaître les variables cinématiques et les paramètres du système et (iii) en synthèse de lois de commande robuste pour la régulation optimale de la machine-outil lors du processus d'usinage.

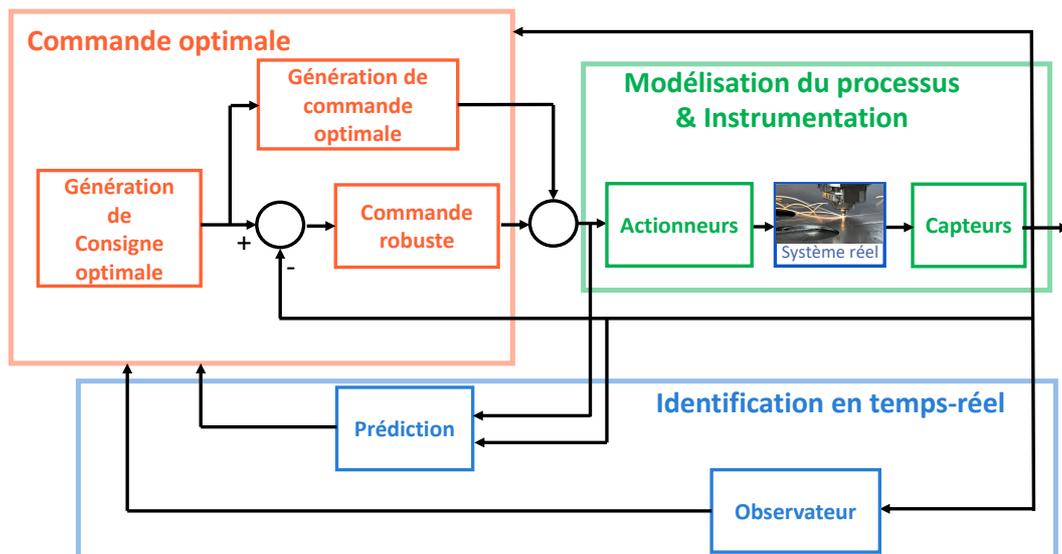


FIGURE 6.5: Contrôle intelligent en temps-réel pour l'usinage

La première étape concerne l'instrumentation de la machine-outil (voir le bloc 1 sur la figure 6.5) disponible à l'I2M, afin de comprendre et de mesurer toutes les variables cinématiques utiles pour la maîtrise de toutes les étapes lors du processus de fabrication. Ensuite, il sera nécessaire de réaliser toute la modélisation dynamique de la machine-outil afin de bien comprendre toutes les variables (paramètres, entrées et sorties) en jeu lors de la fabrication. Cette étape de modélisation permettra de dimensionner les structures de modèle pour la prédiction (voir le bloc 2 sur la figure 6.5) et de synthétiser des observateurs d'état en vue de s'affranchir de capteurs (voir le bloc 3 sur la figure 6.5). De plus, ces modèles seront nécessaires pour définir l'étape de planification d'expérience en vue de déterminer les paramètres inconnus à partir de signaux d'excitation optimaux (voir le bloc 4 sur la figure 6.5). Dans un contexte où le système sera changeant avec de fortes variabilités, des algorithmes d'identification en temps-réel (voir le bloc 4 sur la figure 6.5) permettront de définir les états du système à différents points de fonctionnement et notamment de réadapter, si nécessaire, et en temps-réel, toute la commande afin de la rendre optimale vis-à-vis de l'objectif énergétique fixé. Les modèles élaborés à l'étape 2 permettront de réaliser, à partir de l'inversion de modèle, la planification de références (voir les blocs 5 sur la figure 6.5) pour la génération des nouvelles consignes et de commandes (en feedforward), toutes deux optimales en termes énergétiques, afin de respecter les points de fonctionnement (en boucle ouverte). Pour finir, dans un contexte d'usure, de vieillissement, fortement perturbé avec des changements de points de fonctionnement, l'élaboration de lois de commandes robustes (voir le bloc 6 sur la figure 6.5) seront nécessaires afin de respecter, de manière optimale, le cahier de charges (en boucle fermée) élaboré pour le processus de fabrication et la cinématique de la machine-outil. Au-delà des machines-outils à structures parallèle, il sera demandé au candidat de challenger les modèles sur des robots d'usinage pilotés par NX.

Les retombées de ce projet seront bénéfiques sur plusieurs points de vue :

- une meilleure productivité vis-à-vis de l'efficacité énergétique
- un gain considérable sur le cycle de vie de l'outil, de la machine-outil et du matériau
- une meilleure connaissance des efforts résiduels générés en thermique et en mécanique ce qui permettra une meilleure qualité des pièces fabriquées.

## 6.7 Modélisation et identification en boucle fermée d'une pile à combustible

Une autre perspective de recherche concerne l'identification des systèmes par modèle non entier en boucle fermée. Dans les systèmes à stockage d'énergie tels que la pile à combustible, la résolution de l'équation de Fick fait apparaître une impédance de Warburg qui se représente comme un système non entier [144]. Le système dépend de plusieurs conditions : la température, l'état de charge, le point de fonctionnement (puissance à fournir)... Il sera donc nécessaire de développer des méthodes d'identification en temps réel (récurives) en boucle fermée car la

régulation de la puissance est régulée par un asservissement en dihydrogène. Ces algorithmes d'identification permettront d'estimer l'évolution des paramètres au cours du temps ce qui nous permettra de connaître les états du système, de diagnostiquer les dysfonctionnements du système, et de réaliser la commande en temps-réel. D'un point de vue pratique, l'équipe CRONE dispose d'un banc d'essai d'une pile à combustible PEMFC qui a été acquis en 2009 suite à un projet Région Aquitaine qui se trouve sur la "Plateforme du Véhicule du Futur" de l'IMS. Cette énergie verte présente de nombreux challenges aussi bien au niveau scientifique, économique que sociétal. En effet, les aspects environnementaux dans la production et la gestion d'énergie tendent à être plus verte, plus sobre et plus efficace. Les actions de recherche concernent la modélisation de la production d'énergie par pile à combustible, la conception et l'intégration des appareils électroniques pour la mesure et le traitement des données, la détermination des performances énergétiques, la quantification de l'état de santé et de l'état de charge de la pile et enfin les stratégies de management de l'énergie avec la considération des lois de vieillissement des cellules de la pile à combustible.

## 6.8 Modélisation et identification de cellules Lithium-Ion

Dans le cadre de l'OpenLab, le groupe PSA est devenu Stellantis en janvier 2021, et leurs orientations de recherche se sont détournées du moteur thermique et de la planification de trajectoire des véhicules autonomes pour s'orienter vers le stockage et la gestion de l'énergie et plus précisément sur les cellules Lithium-Ion. Dans le cadre des études portant sur les batteries Lithium-Ion, Stellantis souhaite identifier le comportement de cellules ayant des états de santé différents, en se basant sur des modèles à dérivées non entières. L'objectif de cette étude est :

- d'identifier des modèles non entiers compacts, comparés à des modèles de type circuit électrique équivalent ou des modèles physiques comme par exemple Single Particule Models (SPM) ;
- d'étudier la variation des paramètres du modèle non entier en fonction de l'état de santé de la batterie.
- de transformer les modèles non entiers en modèle entier (réseau de cellules RC) et de les valider dans le domaine temporel ;
- de proposer une méthode non basée sur les modèles entiers pour repasser dans le domaine temporel.

L'objectif sera de développer des méthodes d'identification en temps réel par modèle non entier à la fois dans les domaines fréquentiel et temporel, d'élaborer des modèles pour la décharge et en charge, d'estimer l'état de charge et de santé de la batterie en fonction de la puissance demandée, de la température et des courants débités en courant d'utilisation. Compte tenu de l'ensemble des variations paramétriques, il sera nécessaire de développer des méthodes d'identification de modèles Linéaires à Paramètres Variants (LPV), voire des modèles non linéaires à

paramètres variants, sachant que jusqu'à présent, je n'ai développé que des méthodes d'identification à paramètres linéaires.

## 6.9 Développement d'algorithme dans la toolbox CRONE

Le stage de PFE de Darren Loo nous a permis de proposer une version de la toolbox CRONE qui soit plus fonctionnelle, plus fiable avec un tutoriel et une application avec interface IHM pour la partir identification. Les perspectives vis-à-vis des développements de cette toolbox sont nombreuses, à savoir :

- d'intégrer les derniers algorithmes d'identification par modèle non entier : algorithmes MISO-srivcf et MISO-oe, algorithmes hybrides récursifs LMRPEM et LMRPEM avec RS-RIVCF
- développer des outils de manipulation des polynômes non entiers sous forme implicites, des matrices de transfert avec objets implicites, avec simulation dans les domaines temporel et fréquentiel ;
- de développer des méthodes d'identification en fréquentiel ;
- de développer et d'intégrer des méthodes d'identification pour les systèmes non entiers multivariables ;
- d'intégrer les nouveaux outils dans l'application IHM.

## 6.10 Caractérisation et identification de capteurs de flux en couches minces pour les applications de rentrée atmosphérique

En collaboration avec l'I2M et l'IMS, nous souhaitons commencer une collaboration pour des applications de rentrée atmosphérique d'engin spatiaux. Les rentrées atmosphériques depuis l'orbite basse terrestre (<2000km) sont un réel défi technique, marqué par une importante contrainte thermique. Une rentrée atmosphérique depuis une orbite définit la période pendant laquelle l'objet se rapproche suffisamment de l'atmosphère pour être ralenti à son contact et finalement perdre en altitude jusqu'à soit s'y consumer, soit atteindre le sol. Un objet en orbite basse pénètre l'atmosphère terrestre à une vitesse comprise entre 7000m/s et 8000m/s à une altitude d'environ 100km à 120km (voir figure 6.6).

La mesure de flux de chaleur sur les corps dans des opérations de rentrée atmosphérique reste un domaine encore en plein développement à ce jour. La raison principale est le niveau de température très élevé à la surface des corps et la modification structurelle des matériaux durant la rentrée.

L'étude des flux de chaleur à l'intrados des engins spatiaux passe par l'étude de l'ensemble des phénomènes physico-chimiques qui régissent l'état thermo-chimique des particules dans la

couche de choc : évolution de la composition chimique de l'écoulement, quantité d'énergie transportée par les particules, interactions avec la paroi... Trois approches sont possibles pour étudier un écoulement hypersonique au cours d'une rentrée atmosphérique :

- réaliser des mesures en vol,
- réaliser des expériences en soufflerie,
- réaliser une étude théorique en s'appuyant sur des résultats analytiques ou des simulations numériques.

La réalisation de mesures en vol permet d'étudier les phénomènes physico-chimiques en conditions réelles et demeure extrêmement complexe à mettre en place. Par ailleurs, les mesures effectuées peuvent être difficiles à analyser du fait de l'absence d'un environnement contrôlé et de l'aspect intrusif des capteurs. Sur les engins équipés qui ont déjà effectué des opérations de rentrée, des thermocouples sont placés à l'intérieur des coques. De récentes avancées ont vu le jour par l'utilisation de caméras thermiques intégrées au corps de rentrée. Néanmoins cette possibilité représente un coût élevé et des conditions d'implantation très particulières que l'on ne peut donc pas généraliser à n'importe quel type d'engin spatial. C'est donc sur cet aspect métrologique que des progrès considérables restent à accomplir.

Il a été montré que la résolution de l'équation de chaleur fait apparaître un modèle non entier (voir [135, 5, A-13]). De plus, en rentrée atmosphérique, les températures sont très importante (au-delà de  $800^{\circ}\text{C}$ ), et on ne peut alors plus considérer des modèles linéaires. Il est donc nécessaire de développer de nouvelles méthodes d'identification de l'impédance thermique par des modèles non entiers et non linéaires.

Nous proposons dans ce projet une alternative basée sur l'utilisation d'une source laser et d'une méthode d'identification de la fonction de transfert du capteur. Le flux de photons est appliqué de manière transitoire à la surface du capteur. Dans le cadre de cette expérience, ce flux est parfaitement connu et contrôlable. Le capteur donne une information proportionnelle à l'évolution de la température. Une méthode d'identification d'un modèle à dérivées d'ordre non entier, liant le flux de chaleur au signal mesuré par le capteur, est mise en œuvre. Ce modèle peut alors être utilisé lors du processus de rentrée par la mise en œuvre d'une méthode inverse. Les travaux de modélisation d'un flux distribué [A-15] pourront être utilisés pour élaborer des modèles de diffusion. De plus, les travaux de thèse avec A. Mayoufi sur l'identification MISO pourrait être étendu au cas multivariable avec une source de chaleur distribuée et plusieurs points de mesure de température.

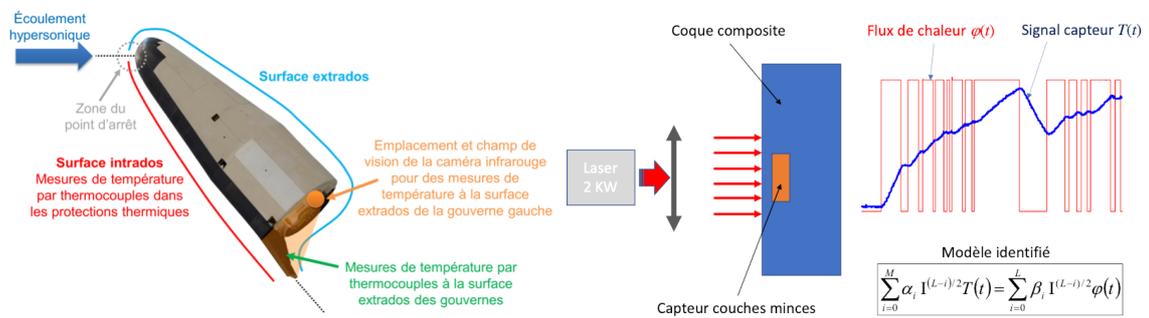


FIGURE 6.6: Configuration d'un engin spatial d'essai lors de la rentrée dans l'atmosphère terrestre

# Annexe A

## Rappels sur la dérivation non entière

La spécificité de l'équipe CRONE (Commande Robotique d'Ordre Non Entier) porte sur les systèmes non entiers (ou fractionnaires), ou plus particulièrement sur la dérivation non entière.

La première idée de dérivation à des ordres non entiers remonte à Leibniz en 1696 [139]. Cet outil mathématique a émergé au XVIII<sup>ème</sup> [46, 65, 59, 137, 67] et est resté un opérateur mathématique pendant de nombreuses années avant de pouvoir trouver un intérêt sur des applications à partir de la seconde moitié du XX<sup>ème</sup> [138, 127, 141, 130]. En effet, cet outil permet de particulièrement bien modéliser les phénomènes de diffusion et de propagation avec très peu de paramètres. On parle de compacité paramétrique.

### A.1 Intégrale d'ordre non entier

Soit  $f(t)$  une fonction temporelle de  $\mathbb{R}$  dans  $\mathbb{C}$  continue par morceaux sur  $]a; +\infty[$  et intégrable sur  $[a; t]$  pour tout  $t > a$ . La formule de Cauchy permet d'exprimer l'intégrale entière d'ordre  $n \in \mathbb{N}^*$  de  $f(t)$  par :

$$\mathbf{I}_a^n f(t) = \frac{1}{(n-1)!} \int_a^t (t-\tau)^{n-1} f(\tau) d\tau. \quad (\text{A.1})$$

**Définition A.1.1** (Intégrale d'ordre non entier de Riemann-Liouville). *En s'inspirant de la formule de Cauchy, Riemann-Liouville a défini en 1876 [137], l'intégrale de Riemann-Liouville d'ordre non entier  $\gamma \in \mathbb{R}^{*+}$  de  $f(t)$  selon :*

$$\mathbf{I}_a^\gamma f(t) \triangleq \frac{1}{\Gamma(\gamma)} \int_a^t (t-\tau)^{\gamma-1} f(\tau) d\tau, \quad (\text{A.2})$$

où  $\Gamma(\cdot)$  est la fonction d'Euler Gamma définie par :

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty e^{-t} t^{x-1} dt, \quad \forall x \in \mathbb{C}^* \setminus \mathbb{Z}^-. \quad (\text{A.3})$$

La fonction  $\Gamma$  prolonge la fonction factorielle aux nombres réels positifs ( $\Gamma(n) = (n-1)!$ ), et est généralisée par continuité analytique aux nombres réels négatifs :

$$\text{gamma}\Gamma(\gamma) = \Gamma(\gamma + 1).$$

**Définition A.1.2** (Intégrale d'ordre non entier de Grünwald-Letnikov). *L'intégrale à l'ordre  $\gamma$  de la fonction  $f$  au sens de Grünwald-Letnikov est définie de la même manière que pour la dérivée à l'ordre  $\gamma$  donnée en Définition A.2.2 avec  $\gamma \in \mathbb{R}^-$ .*

## A.2 Dérivée d'ordre non entier

Soient un réel positif  $\gamma \in \mathbb{R}^+$  et une fonction  $f(t)$  continue par morceau sur  $]a, +\infty[$  et intégrable sur tout sous-intervalle de  $[a, +\infty[$ ,  $\forall a \in \mathbb{R}$  et  $\forall t > 0$ .

**Définition A.2.1** (Dérivée d'ordre non entier de Riemann-Liouville). *La dérivée de Riemann-Liouville d'ordre  $\gamma \in \mathbb{R}^+$  de  $f(t)$  se définit par une dérivée entière d'une intégrale non entière :*

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_a^\gamma f(t) &\triangleq p^{\lfloor \gamma \rfloor + 1} \left( \mathbf{I}_a^{\lfloor \gamma \rfloor + 1 - \gamma} \right) \\ &= \frac{1}{\Gamma(\gamma)} \mathbf{D}^{\lfloor \gamma \rfloor + 1} \int_a^t (t - \tau)^{\gamma - 1} f(\tau) d\tau. \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

où  $[\cdot]$  définit la partie entière et  $\mathbf{D} = \frac{d}{dt}$  est l'opérateur différentielle.

Une des définitions de la dérivation non entière les plus utilisées repose sur la définition de Grünwald-Letnikov [135]. La dérivée de Grünwald-Letnikov d'ordre non entier découle de la généralisation de la définition de *Cauchy* de la dérivée entière, à savoir :

$$\mathbf{D}^n f(t) \triangleq \lim_{\ell \rightarrow 0} \frac{1}{\ell^n} \sum_{k=0}^n (-1)^k \binom{n}{k} f(t - k\ell), \quad (\text{A.5})$$

où  $\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$  est le coefficient binomial de Newton.

**Définition A.2.2** (Dérivée d'ordre non entier de Grünwald-Letnikov). *La dérivée à l'ordre  $\gamma \in \mathbb{R}^+$  de la fonction  $f$  au sens de Grünwald-Letnikov est alors définie par :*

$$\mathbf{D}^\gamma f(t) \triangleq \lim_{\ell \rightarrow 0} \frac{1}{\ell^\gamma} \sum_{k=0}^{\lfloor \frac{t}{\ell} \rfloor} (-1)^k \binom{\gamma}{k} f(t - k\ell) \quad (\text{A.6})$$

où  $\binom{\gamma}{k}$  est le binôme de Newton généralisé aux ordres non entiers selon :

$$\binom{\gamma}{k} = \frac{\Gamma(\gamma + 1)}{\Gamma(k + 1)\Gamma(\gamma - k + 1)} = \begin{cases} 1 & \text{si } k = 0 \\ \frac{\gamma(\gamma - 1)\dots(\gamma - k + 1)}{k!}, & \forall k \in \mathbb{N}. \end{cases} \quad (\text{A.7})$$

La fonction Gamma d'Euler  $\Gamma$  possède des singularités pour tout nombre relatif négatif qui conduisent à :

$$\binom{\gamma}{k} = 0 \quad \text{pour } \gamma - k = -1, -2, -3, \dots$$

Si  $\gamma = 1$ , tous les termes du binôme de Newton sont nuls excepté pour un seul, et on retombe alors sur la définition classique d'une dérivée d'ordre entier :

$$\mathbf{D}^\gamma f(t) \triangleq \lim_{\ell \rightarrow 0} \frac{f(t) - f(t - \ell)}{\ell}. \quad (\text{A.8})$$

Par conséquent, la définition (A.6) montre bien que la dérivation non entière a une caractérisation globale puisque tout le passé de la fonction est utilisée. On comprend alors l'intérêt d'un tel opérateur pour décrire les phénomènes de diffusion et de propagation.

**Remarque A.2.3.** Si  $\gamma \in \mathbb{N}$ , les dérivées fractionnaires et entières coïncident :

$$\mathbf{D}_a^\nu f(t) = \mathbf{D}^n f(t)$$

et si  $\nu < 0$  :

$$\mathbf{D}^\gamma \mathbf{a} f(t) = \mathbf{I}_a^{-\gamma} f(t).$$

**Remarque A.2.4.** Il est à noter que  $\mathbf{a}$  n'est pas nécessairement égal à 0 dans les définitions A.2.2 et A.2.1, ce qui montre que le passé de  $f$  est requis.

## A.3 Propriétés sur le calcul fractionnaire

Soient  $\gamma \in \mathbb{R}^+$ , sa partie entière supérieure  $n = \lfloor \gamma \rfloor + 1 = \min\{k \in \mathbb{N} | k > \gamma\}$  et  $\nu \in [0, 1[$  de sorte que  $\gamma = n - \nu$ .

Soit  $f$  une fonction définie dans  $\mathcal{C}^\infty([a, +\infty[)$ , l'ensemble des fonctions infiniment continues et différentiables de  $[a, +\infty[$  à  $\mathbb{R}$ . On note par  $f^{(k)}(t)$  la dérivée à l'ordre  $k$  de  $f$  selon  $t$  pour tout  $k \in \mathbb{N}$ .

Les définitions et propriétés qui suivent sont rappelées afin de définir le cadre d'étude pour l'extension des principes de la platitude aux systèmes non entiers [A-14].

### 1.3.1 Intégrabilité non entière

On rappelle que  $\nu \in [0, 1[$ , et  $t \in [a, +\infty[$ . Soit

$$g_t^\nu(\tau) = \frac{1}{\Gamma(\nu + 1)} (t^\nu - (t - \tau)^\nu), \quad (\text{A.9})$$

la mesure de Stieltjes  $dg_t^\nu(\tau) \triangleq \frac{\partial g_t^\nu}{\partial \tau}(\tau) d\tau = \frac{1}{\Gamma(\nu)} (t - \tau)^{\nu-1} d\tau$  est en effet absolument continue selon la mesure de Lebesgue  $d\tau$ , et sa densité  $\frac{\partial g_t^\nu}{\partial \tau}$  est dans  $L^1(\mathbf{a}, t)$  puisque

$$\left\| \frac{\partial g_t^\nu}{\partial \tau} \right\|_{L^1(\mathbf{a}, t)} = \int_{\mathbf{a}}^t \left| \frac{\partial g_t^\nu}{\partial \tau}(\tau) \right| d\tau = g_t^\nu(t) - g_t^\nu(\mathbf{a}) = \frac{|t - \mathbf{a}|^\nu}{\Gamma(\nu + 1)} < +\infty,$$

pour tout  $t \geq \mathbf{a}$ . De plus, avec ces notations, la primitive fractionnaire  $\mathbf{I}_a^\nu f(t)$  s'écrit

$$\mathbf{I}_a^\nu f(t) = \int_a^t f(\tau) dg_t^\nu(\tau). \quad (\text{A.10})$$

Puisque

$$|\mathbf{I}_a^\nu f(t)| \leq \left\| \frac{\partial g_t^\nu}{\partial \tau} \right\|_{L^1(\mathbf{a}, t)} \cdot \|f\|_{L^\infty(\mathbf{a}, t)} < +\infty, \quad (\text{A.11})$$

on en déduit immédiatement que la primitive fractionnaire est bien définie pour tout  $f \in L^\infty(\mathbf{a}, t)$ , et *a fortiori*  $f \in \mathbb{C}^\infty([\mathbf{a}, +\infty[)$ , pour tout  $\nu \in [0, 1[$  et tout  $t$  tel que  $t \geq \mathbf{a}$ .

La définition (A.10) peut être étendue à tout  $\nu + k$  pour un entier arbitraire  $k$  :

$$\mathbf{I}_a^{\nu+k} f(t) = \int_a^t f(\tau) dg_t^{\nu+k}(\tau), \quad (\text{A.12})$$

puisque  $dg_t^{\nu+k} = \frac{1}{\Gamma(\nu+k)} (t-\tau)^{\nu+k-1} d\tau$  définit proprement une mesure de Stieltjes.

**Théorème A.3.1.** *Pour tout  $\nu + k - n \geq 0$  :*

$$\mathbf{D}^n \mathbf{I}_a^{\nu+k} f(t) = \mathbf{I}_a^{\nu+k-n} f(t). \quad (\text{A.13})$$

■

*Démonstration.* La démonstration est par induction et est décrite dans [A-14]. □

### 1.3.2 Différentiabilité non entière

Soit un entier  $n$  positif ( $n > 0$ ). Afin de prouver que la définition (A.4) est bien définie pour tout  $n$  et  $f \in \mathbb{C}^\infty([\mathbf{a}, +\infty[)$ , on note que  $\nu - 1 < 0$  implique que  $g_t^{\nu-1}$  et ses dérivées par rapport à  $\tau$  sont non finies autour de  $\tau = t$ , et donc il n'est pas possible de dériver directement  $\mathbf{I}_a^\nu f(t)$  par rapport à  $t$ . On démontre donc le lemme suivant.

**Lemme A.3.2.**

$$\mathbf{I}_a^\nu f(t) = \mathbf{I}_a^{\nu+k} f^{(k)}(t) + \sum_{j=0}^{k-1} \frac{(-1)^j (t-\mathbf{a})^{\nu+j}}{\Gamma(\nu+j+1)} \delta_a^{(j)} f \quad (\text{A.14})$$

pour tout  $k \in \mathbb{N}$ , pour tout  $f \in \mathbb{C}^\infty([\mathbf{a}, t])$  et pour tout  $t \geq \mathbf{a}$ , où la distribution  $\delta_a^{(j)}$  est la  $j$ -ème dérivée de la mesure de Dirac mesure à  $\mathbf{a}$ , à savoir  $\delta_a^{(j)} f = (-1)^j f^{(j)}(\mathbf{a})$ . ■

*Démonstration.* La démonstration de ce lemme est effectuée pour  $k = 1$ , la généralisation pour  $k > 1$  suit exactement le même raisonnement et est donc laissé au lecteur.

En utilisant (A.10) et la intégration par parties, on obtient

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_a^\nu f(t) &= f(t)g_t^\nu(t) - f(\mathbf{a})g_t^\nu(\mathbf{a}) - \int_a^t f'(\tau)g_t^\nu(\tau)d\tau \\ &= \left( f(t) - f(\mathbf{a}) - \int_a^t f'(\tau)d\tau \right) \frac{t^\nu}{\Gamma(\nu+1)} + f(\mathbf{a}) \frac{(t-\mathbf{a})^\nu}{\Gamma(\nu+1)} + \int_a^t f'(\tau) \frac{(t-\tau)^\nu}{\Gamma(\nu+1)} d\tau \\ &= \frac{(t-\mathbf{a})^\nu}{\Gamma(\nu+1)} \delta_a f + \mathbf{I}_a^{\nu+1} f'(t), \end{aligned}$$

en remarquant que  $f(t) - f(\mathbf{a}) - \int_{\mathbf{a}}^t f'(\tau) d\tau = 0$  et que  $dg_t^{\nu+1}(\tau) = \frac{(t-\tau)^\nu}{\Gamma(\nu+1)} d\tau$ , ce qui conduit à l'expression (A.14).  $\square$

**Corollaire A.3.3.** *L'opérateur  $\mathbf{D}_a^\gamma$  est définie de  $\mathbb{C}^\infty([\mathbf{a}, +\infty])$  à  $\mathbb{C}^\infty([\mathbf{a}, +\infty])$  et*

$$\mathbf{D}_a^\gamma f(t) = \mathbf{I}_a^\nu f^{(n)}(t) + \sum_{j=0}^{n-1} \frac{(t-\mathbf{a})^{\nu-n+j}}{\Gamma(\gamma-n+j+1)} \delta_a^{(j)} f. \quad (\text{A.15})$$

■

*Démonstration.* En différenciant l'équation (A.14)  $n$  fois, et en appliquant le théorème A.3.1, on obtient :

$$\mathbf{D}_a^\gamma f(t) = \mathbf{I}_a^{\nu+k-n} f^{(k)}(t) + \sum_{j=0}^{k-1} \mathbf{D}^n \left( \frac{(-1)^j (t-\mathbf{a})^{\nu+j}}{\Gamma(\nu+j+1)} \delta_a^{(j)} f \right).$$

On obtient alors la relation (A.15) avec  $k = n$ .  $\square$

**Remarque A.3.4.** *En théorie des systèmes, l'espace des signaux naturels qui est généralement considéré est l'espace des fonctions  $f : \mathbb{R} \mapsto \mathbb{R}$ , qui est infiniment différentiable et tel que  $f(t) = 0$  pour tout  $t \in ]-\infty, \mathbf{a}]$ . Pour de tels signaux,  $f(\mathbf{a}) = 0$  et  $f^{(k)}(\mathbf{a}) = 0$ , pour tout  $k \geq 1$ . On se restreindra donc à cette classe de fonctions.*

L'espace des signaux est donc définie par

$$\mathfrak{H}_a \triangleq \{f : \mathbb{R} \mapsto \mathbb{R} \mid f \in \mathbb{C}^\infty([\mathbf{a}, +\infty]), f(t) = 0, \forall t \leq \mathbf{a}\}. \quad (\text{A.16})$$

On obtient alors  $f^{(k)}(\mathbf{a}) = 0$  pour tout  $f \in \mathfrak{H}_a$  et pour tout  $k \in \mathbb{N}$ . Par conséquent, on obtient alors le théorème suivant.

**Théorème A.3.5.** *Pour tout  $f \in \mathfrak{H}_a$  et  $\gamma = n - \nu$ , on a*

$$\mathbf{D}_a^\gamma f(t) = \mathbf{I}_a^\nu \mathbf{D}^n f(t). \quad (\text{A.17})$$

■

## A.4 Commutativité

### 1.4.1 Commutativité des intégrales non entières

**Théorème A.4.1.** *Pour tout  $\gamma, \kappa > 0$ , et tout  $f \in \mathbb{C}^\infty([\mathbf{a}, \infty])$ , on a :*

$$\mathbf{I}_a^\gamma \mathbf{I}_a^\kappa f(t) = \mathbf{I}_a^\kappa \mathbf{I}_a^\gamma f(t) = \mathbf{I}_a^{\gamma+\kappa} f(t). \quad (\text{A.18})$$

■

*Démonstration.* La démonstration est décrite dans [A-14].  $\square$

### 1.4.2 Commutativité des dérivées non entières :

**Théorème A.4.2.** *Si  $f \in \mathfrak{H}_a$  et  $\gamma = n - \nu$ , avec  $n \in \mathbb{N}$  et  $\nu \in [0, 1[$ , on obtient :*

$$\mathbf{D}_a^\gamma (\mathbf{I}_a^\gamma f(t)) = \mathbf{I}_a^\gamma (\mathbf{D}_a^\gamma f(t)) = f(t). \quad (\text{A.19})$$

■

*Démonstration.* La démonstration est décrite dans [A-14] et correspond à une adaptation de [135] dans notre espace de signaux  $\mathfrak{H}_a$ . □

Le Théorème A.4.2 permet de définir des intégrales d'ordre non entier négatif comme des dérivées d'ordres non entiers positifs et inversement :

**Définition A.4.3.** *Pour tout  $f \in \mathfrak{H}_a$  et  $\gamma > 0$ , on définit :*

$$\mathbf{I}_a^{-\gamma} f(t) = \mathbf{D}_a^\gamma f(t), \quad \mathbf{D}_a^{-\gamma} f(t) = \mathbf{I}_a^\gamma f(t). \quad (\text{A.20})$$

Soient deux nombres non entiers  $\gamma, \kappa > 0$ , où  $\gamma = n - \nu$  et  $\kappa = m - \mu$  avec  $\nu, \mu \in [0, 1[$  et  $n, m \in \mathbb{N}$ . La composition des opérateurs de dérivée non entière de Riemann-Liouville  $\mathbf{D}_a^\nu$  et  $\mathbf{D}_a^\kappa$  n'ont pas de sens en dehors de l'espace  $\mathfrak{H}_a$ . Néanmoins, cette composition, restreinte à  $\mathfrak{H}_a$ , est commutative.

**Théorème A.4.4.** *Si  $f \in \mathfrak{H}_a$ , la propriété de commutativité tient :*

$$\mathbf{D}_a^\kappa (\mathbf{D}_a^\gamma f(t)) = \mathbf{D}_a^\gamma (\mathbf{D}_a^\kappa f(t)) = \mathbf{D}_a^{\gamma+\kappa} f(t). \quad (\text{A.21})$$

■

*Démonstration.* En suivant le même raisonnement que dans la preuve du Théorème A.4.2, on obtient :

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_a^\gamma \mathbf{D}_a^\kappa f(t) &= \mathbf{D}^n \mathbf{I}_a^\nu (\mathbf{I}_a^\mu \mathbf{D}^m) f(t) = \mathbf{D}^n \mathbf{I}_a^{\nu+\mu} \mathbf{D}^m f(t) \\ &= \mathbf{I}_a^{\nu+\mu-n-m} f(t) = \mathbf{D}_a^{\gamma+\kappa} f(t). \end{aligned}$$

L'inverse est prouvé de la même manière. □

## A.5 Transformée de Laplace d'un intégrateur/dérivateur non entier

Soient  $\gamma \in \mathbb{R}^+$ , sa partie entière supérieure  $n = \lfloor \gamma \rfloor + 1 = \min\{k \in \mathbb{N} | k > \gamma\}$  et  $\nu \in [0, 1[$  de sorte que  $\gamma = n - \nu$ .

La transformée de Laplace  $\mathcal{L}$  de l'intégrale d'ordre  $\gamma \in \mathbb{R}^{*+}$  de  $f(t)$  de la définition de Riemann-Liouville (A.2) est donnée par [135] :

$$\mathcal{L}\{\mathbf{I}_a^\gamma f(t)\} = \frac{1}{\Gamma(\gamma)} \mathcal{L}\{t^{\gamma-1}\} * \mathcal{L}\{f(t)\} = \frac{1}{s^\gamma} F(s) \quad (\text{A.22})$$

avec  $F(s) = \mathcal{L}\{f(t)\}$ .

Compte tenu de la définition de Riemann-Liouville (voir la relation (A.4)), la transformée de Laplace de la dérivée d'ordre  $\gamma \in \mathbb{R}^+$  de  $f$  s'écrit [127] :

$$\mathcal{L}\{\mathbf{D}_a^\gamma f(t)\} = \mathcal{L}\{\mathbf{D}^n \mathbf{I}_a^{n-\gamma} f(t)\} \quad (\text{A.23})$$

$$= s^n \mathcal{L}\{\mathbf{I}_a^{n-\gamma} f(t)\} - \sum_{k=0}^{n-1} s^{n-1-k} \mathbf{D}^k [\mathbf{I}_a^{n-\gamma} f(t)]|_{t=a} \quad (\text{A.24})$$

$$= s^n s^{-(n-\gamma)} F(s) - \sum_{k=0}^{n-1} s^{n-1-k} \mathbf{D}^k [\mathbf{I}_a^{n-\gamma} f(t)]|_{t=a} \quad (\text{A.25})$$

$$= s^\gamma F(s) - \sum_{k=0}^{n-1} s^{n-1-k} \mathbf{D}^k [\mathbf{I}_a^{n-\gamma} f(t)]|_{t=a} \quad (\text{A.26})$$

Si  $f \in \mathfrak{H}_a$ , la transformée de Laplace de la dérivée non entière au sens de Riemann-Liouville<sup>1</sup> est donnée par [135] :

$$\mathcal{L}\{\mathbf{D}_a^\gamma f(t)\} = s^\gamma F(s). \quad (\text{A.27})$$

## A.6 Algèbre des polynômes en $\mathbf{D}_a^\gamma$

Pour un ordre non entier positif  $\gamma$ , l'opérateur non entier  $\mathbf{D}_a^\gamma$  est un endomorphisme allant de  $\mathfrak{H}_a$  vers lui-même et  $\mathfrak{H}_a$  peut être considéré comme le domaine de  $\mathbf{D}_a^\gamma$ . Par simplicité, on notera  $\mathbf{D}_a^\gamma$  au lieu de  $\mathbf{D}_a^\gamma|_{\mathfrak{H}_a}$ .

On considère des polynômes arbitraires de l'indéterminé  $\mathbf{D}_a^\gamma$  à coefficients réels, de la forme  $\sum_{k=0}^K a_k \mathbf{D}_a^{k\gamma}$ , dénommés polynômes en  $\mathbf{D}_a^\gamma$ . Le degré est défini comme usuellement.

$\mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]$  dénote l'ensemble des polynômes en  $\mathbf{D}_a^\gamma$ , dont le domaine est restreint à  $\mathfrak{H}_a$ , doté de l'addition  $+$  et de la multiplication  $\times$  de ces polynômes. On vérifie immédiatement que  $(\mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma], +, \times)$  est un anneau principal (commutatif) (voir le Théorème A.4.4).

**Définition A.6.1.** *Si  $\gamma$  est un nombre réel positif, tel qu'il existe  $\mu > 0$  et  $r \in \mathbb{N}$  satisfaisant  $\gamma = r\mu$ , on dit que  $\gamma$  est commensurable d'ordre  $\mu$ .*

Aussi, tout polynôme en  $\mathbf{D}_a^\gamma$  peut être exprimé comme un polynôme en  $\mathbf{D}_a^\mu$ . Par conséquent, si  $\gamma$  est commensurable d'ordre  $\mu$ , l'anneau  $\mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]$  est homomorphique à  $\mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\mu]$ .

**Théorème A.6.2** (Equivalence). *Si  $P \in \mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]$ ,  $Q \in \mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\mu]$  et s'il existe  $\mu$  tel que  $\gamma$  et  $\mu$  sont commensurables d'ordre  $\mu$ , alors  $P = Q$  est équivalent à :*

(i)  $P \in \mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\mu]$ ,  $Q \in \mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\mu]$ ,

(ii) les coefficients de  $P$  et  $Q$  exprimés comme des polynômes en  $\mathbf{D}_a^\mu$  sont égaux. ■

1. Toutes les définitions d'intégration ou de dérivation de Riemann-Liouville, Grünwald-Letnikov ou Caputo se rejoignent quand les signaux considérés sont dans  $\mathfrak{H}_a$  et notamment dans le domaine de Laplace puisque les conditions initiales sont nulles.

**Remarque A.6.3.** Dans  $\mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]$ , les propriétés de division polynomiale et d'identité de Bézout, ainsi que les définitions de plus grand commun diviseur, plus petit commun multiple et de polynômes irréductibles sont les mêmes que dans l'anneau principal des polynômes réels.

Le calcul fractionnaire peut être interprété comme calcul opérationnel de Mikusiński tel que décrit dans [7]. Une approche théorique des systèmes a été développée dans [51] où le champ des opérateurs de Mikusiński's  $\mathcal{M}$  est défini comme un champ de fractions d'un anneau principal commutatif  $\mathcal{C}$  de fonctions continues définies sur  $[0, \infty[$  doté de l'addition et du produit de convolution [86, 51].  $\mathcal{M}$  peut être considéré comme un module de  $\mathbb{R}[s^\gamma]$ , où  $s$  est l'opérateur de Laplace associé à  $\mathbf{D}_a^\gamma$ .

On note que pour tout  $A \in \mathcal{M}$  et pour tout  $f \in \mathcal{C}$ , le résultat  $Af$  est défini au sens des distributions, alors que dans l'approche précédente, à savoir dans  $\mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]$ , l'action d'un polynôme en  $\mathbf{D}_a^\gamma$  appliqué à une fonction dans  $\mathfrak{H}_a$  est toujours bien définie dans  $\mathfrak{H}_a$ . Cependant, les résultats énoncé par la suite sont également bien établis dans les deux approches. On ne les énoncera que dans le cadre de  $\mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]$ . Leur adaptation directe à  $\mathcal{M}$  est laissée au lecteur .

Si  $p, q \in \mathbb{N}$ ,  $\mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]^{p \times q}$  est appelé l'ensemble des matrices polynomiales en  $\mathbf{D}_a^\gamma$  de taille  $p \times q$ , dont les entrées sont des polynômes en  $\mathbf{D}_a^\gamma$ .

Quand  $p = q$ , on note par  $GL_p(\mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma])$  le groupe des matrices polynomiales en  $\mathbf{D}_a^\gamma$  unimodulaires, i.e. l'ensemble des matrices polynomiales en  $\mathbf{D}_a^\gamma$  inversibles (carrées) dont l'inverse est aussi une matrice polynomiale en  $\mathbf{D}_a^\gamma$ .

Les matrices polynomiales en  $\mathbf{D}_a^\gamma$  bénéficient de la propriété très importante suivante [42, Chap. 8], [147] :

**Théorème A.6.4** (Décomposition diagonale de Smith). *Soit  $A$  une matrice polynomiale en  $\mathbf{D}_a^\gamma$  de dimension  $(p \times q)$ , avec  $p \leq q$  (respectivement  $p \geq q$ ), alors il existe deux matrices  $S \in GL_p(\mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma])$  et  $T \in GL_q(\mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma])$  telle que :*

$$SAT = \begin{bmatrix} \Delta & 0_{p, q-p} \\ 0_{p-q, q} & \end{bmatrix} \quad (\text{respectivement } = \begin{bmatrix} \Delta \\ 0_{p-q, q} \end{bmatrix}), \quad (\text{A.28})$$

où  $\Delta = \text{diag}\{\delta_1, \dots, \delta_\sigma, 0, \dots, 0\} \in \mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]^{p \times p}$  (resp.  $\mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]^{q \times q}$ ). Dans  $\Delta$ , l'entier  $\sigma \leq \min(p, q)$  est le rang de  $A$  et chaque polynôme en  $\mathbf{D}_a^\gamma$  non nul,  $\delta_i$ , pour  $i = 1, \dots, \sigma$ , est un diviseur de  $\delta_j$  pour tout  $\sigma \geq j \geq i$ . ■

Cette décomposition sur  $\mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]$  est réalisée en pratique par le même algorithme que celui sur  $\mathbb{R}[s]$ ,  $s$  étant la variable complexe. Elle consiste à calculer une forme diagonale en utilisant successivement le plus grand commun diviseur (voir e.g. [54, 147]).

**Définition A.6.5** (Hyper-régularité [66]). *Soit une matrice polynomiale en  $\mathbf{D}_a^\gamma$ ,  $A$ , de dimension  $p \times q$ , on dit que  $A$  est hyper-régulière si et seulement si, dans (A.28), on a  $\Delta = I$ .*

**Remarque A.6.6.** Une matrice carrée  $A$  de dimension  $p \times p$  est hyper-régulière si, et seulement si, elle est unimodulaire.

Une adaptation directe de [3, Section II.C] aux matrices polynomiales en  $\mathbf{D}_a^\gamma$  donne :

**Propriété A.6.7.** (i) Une matrice  $A \in \mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]^{p \times q}$ , avec  $p < q$  est hyper-régulière si, et seulement si, elle possède une inverse à droite, i.e. il existe  $T$  dans  $GL_q(\mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma])$  telle que  $AT = [I_p \quad 0_{p \times (q-p)}]$ .

(ii) Une matrice  $A \in \mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma]^{p \times q}$ , avec  $p \geq q$  est hyper-régulière si, et seulement si, elle possède une inverse à gauche, i.e. il existe  $S$  dans  $GL_p(\mathbb{R}[\mathbf{D}_a^\gamma])$  telle que  $SA = \begin{bmatrix} I_q \\ 0_{(p-q) \times q} \end{bmatrix}$ . ■

## A.7 Systèmes non entiers

### 1.7.0.1 Représentation des systèmes non entiers

Un système non entier peut être décrit par une équation différentielle de la forme :

$$y(t) + a_1 \mathbf{D}^{\alpha_1} y(t) + \dots + a_N \mathbf{D}^{\alpha_N} y(t) = b_0 \mathbf{D}^{\beta_0} u(t) + b_1 \mathbf{D}^{\beta_1} u(t) + \dots + b_M \mathbf{D}^{\beta_M} u(t), \quad (\text{A.29})$$

où  $u(t)$  et  $y(t)$  sont respectivement l'entrée et la sortie du système non entier,  $(a_j, b_i) \in \mathbb{R}^2$   $\forall i \in \{0, 1, \dots, M\}$ ,  $\forall j \in \{1, \dots, N\}$ , et où les ordres de dérivation non entiers

$$0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_N, \quad 0 \leq \beta_0 < \beta_1 < \dots < \beta_M, \quad (\text{A.30})$$

sont ordonnés pour des raisons d'identifiabilité.

La transformée de la Laplace de l'équation différentielle (A.29) conduit à la représentation par fonction de transfert suivante :

$$G(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{\sum_{i=0}^M b_i s^{\beta_i}}{1 + \sum_{j=1}^N a_j s^{\alpha_j}}. \quad (\text{A.31})$$

**Définition A.7.1** (Commensurabilité). Si les ordres de dérivation sont tous multiples entiers d'un même réel positif  $\nu$ , on dit que le système est commensurable à l'ordre  $\nu$  et la fonction de transfert (A.31) s'écrit alors :

$$G(s) = \frac{\sum_{i=0}^m b_i s^{i\nu}}{1 + \sum_{j=1}^n a_j s^{j\nu}}, \quad (\text{A.32})$$

où  $m = \frac{\beta_M}{\nu}$  et  $n = \frac{\alpha_N}{\nu}$  sont des entiers.

**Remarque A.7.2.** Pour les systèmes entiers classiques, l'ordre commensurable vaut 1.

### 1.7.1 Stabilité et résonance des systèmes non entiers

**Définition A.7.3.** *Stabilité BIBO [78]* Un système linéaire d'ordre non entier d'entrée  $u$ , de sortie  $y$  et de réponse impulsionnelle  $g$  est stable dans le sens entrée-bornée sortie-bornée (BIBO : Bounded Input Bounded Output en anglais) si et seulement si :

$$\forall u \in L_\infty(\mathbb{R}^+, \mathbb{R}), \quad y(t) = g(t) * u(t) \in L_\infty(\mathbb{R}^+, \mathbb{R}).$$

Le théorème de stabilité le plus couramment utilisé pour les systèmes non entiers commensurables est celui de Matignon [78] étendu suivant.

**Théorème A.7.4.** *Matignon étendu [78, Théorème 2.21]* Une fonction de transfert commensurable d'ordre  $\nu$ ,  $G(s) = \frac{T(s^\nu)}{R(s^\nu)}$  où  $T$  et  $R$  sont des polynômes en  $s^\nu$  premiers entre eux, est BIBO stable si et seulement si

$$0 < \nu < 2, \tag{A.33}$$

et pour tout  $s_k \in \mathbb{C}$  tel que  $R(s_k) = 0$

$$|\arg(s_k)| > \nu \frac{\pi}{2}. \tag{A.34}$$

Les fonctions de transfert de première espèce n'impliquent qu'un seul  $s^\nu$ -pole simple réel :

$$F_1(s) = \frac{K}{1 + (\tau s)^\nu}, \tag{A.35}$$

qui ne sont qu'une généralisation directe des fonctions de transfert de premier ordre, quand  $\nu = 1$ . Leurs conditions de stabilité s'écrivent par :

$$\begin{cases} \tau > 0, \\ 0 < \nu < 2. \end{cases} \tag{A.36}$$

Quand deux  $s^\nu$ -poles complexes conjugués sont impliqués, les fonctions de transfert de deuxième espèce sont utilisées, puisqu'elles ont des coefficients réels, à savoir :

$$F_2(s) = \frac{K}{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^{2\nu} + 2\zeta\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^\nu + 1}. \tag{A.37}$$

Elle généralisent les fonctions de transfert de second ordre aux ordres non entiers. Leurs conditions de stabilité sont données par (voir [75]) :

$$\begin{cases} \omega_0 > 0, \\ 0 < \nu < 2, \\ \zeta > -\cos(\nu \frac{\pi}{2}). \end{cases} \tag{A.38}$$

Ce résultat a été établi en appliquant le Théorème A.7.4 aux systèmes (A.37).

Les conditions de stabilité d'un système de deuxième espèce (A.37) sont résumées en figure A.1.

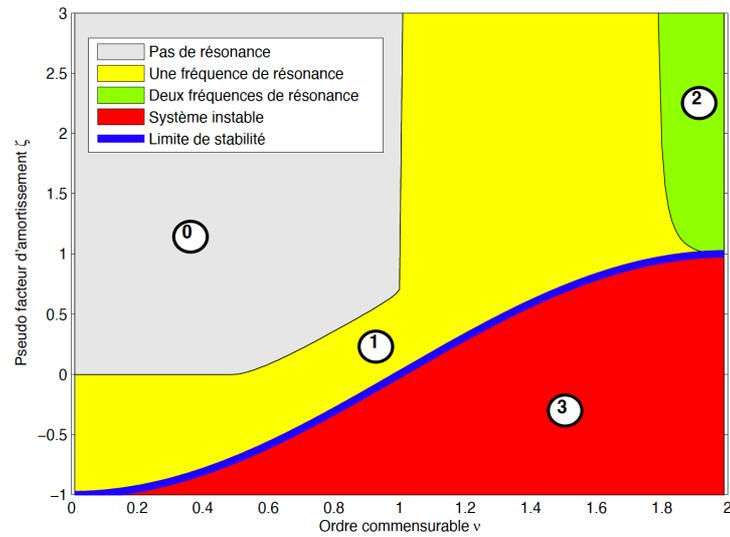


FIGURE A.1: Régions de stabilité et de résonance de la fonction de transfert (A.37)



# Références bibliographiques

- [1] A. S. ALI, A. G. RADWAN et A. M. SOLIMAN. “Fractional Order Butterworth Filter : Active and Passive Realizations”. In : *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems* 3.3 (2013), p. 346-354. DOI : [10.1109/JETCAS.2013.2266753](https://doi.org/10.1109/JETCAS.2013.2266753).
- [2] F. ANTRITTER, F. CAZAURANG, J. LÉVINE et J. MIDDEKE. “On the computation of  $\pi$ -flat outputs for differential-delay linear systems”. In : *Systems & Control Letters* 71 (2014), p. 14-22. DOI : [10.1016/j.sysconle.2014.07.002](https://doi.org/10.1016/j.sysconle.2014.07.002).
- [3] F. ANTRITTER et J. MIDDEKE. “A toolbox for the analysis of linear systems with delays”. In : *CDC/ECC 2011*. Orlando, USA, 2011, p. 1950-1955.
- [4] G.A. BAKER et P.R. GRAVES-MORRIS. *Padé Approximants*. Cambridge University Press, 1996.
- [5] J.-L. BATTAGLIA, O. COIS, L. PUIGSEGUR et A. OUSTALOUP. “Solving an inverse heat conduction problem using a non-integer identified model”. In : *International Journal of Heat and Mass Transfer* 44.14 (2001), p. 2671-2680. DOI : [10.1016/S0017-9310\(00\)00310-0](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(00)00310-0).
- [6] J.-L. BATTAGLIA, L. LE LAY, J.-C. BATSALE, A. OUSTALOUP et O. COIS. “Heat flux estimation through inverted non integer identification models”. In : *International Journal of Thermal Science* 39.3 (2000), p. 374-389. DOI : [10.1016/S1290-0729\(00\)00220-9](https://doi.org/10.1016/S1290-0729(00)00220-9).
- [7] A. BATTIG et S.L. KALLA. “On Mikusinski’s operators of fractional integration”. In : *Revista Colombiana de Matemáticas* IX (1975), p. 155-160.
- [8] S. VICTOR, A. DIUDICHI et P. MELCHIOR. “Closed-loop continuous-time model identification with noisy input-output”. In : *20th IFAC World Congress (IFAC WC 2017)*. T. 50. 1. Toulouse, France, juil. 2017, p. 12853-12858. DOI : [10.1016/j.ifacol.2017.08.1936](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1936).
- [9] S. VICTOR, A. DIUDICHI et P. MELCHIOR. “Identification de modèles à temps continu en boucle fermée avec entrée et sortie bruitées”. In : *Groupe de Travail Identification*. Paris, France, nov. 2017.
- [10] S. VICTOR et R. MALTI. “Model order identification for fractional models”. In : *2013 European Control Conference (ECC)*. Zurich, Switzerland, 2013, p. 3470-3475. DOI : [10.23919/ECC.2013.6669589](https://doi.org/10.23919/ECC.2013.6669589).

- [11] **S. VICTOR**, R. MALTI, H. GARNIER et A. OUSTALOUP. “Parameter and differentiation order estimation in fractional models”. In : *Automatica* 49.4 (2013). IF2021 : 5.944, p. 926-935. DOI : [10.1016/j.automatica.2013.01.026](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2013.01.026).
- [12] **S. VICTOR**, R. MALTI, P. MELCHIOR et A. OUSTALOUP. “From system identification to path planning using fractional approach : a thermal application example”. In : *21th ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE'09*. San Diego, USA, 2009, p. 235-242. DOI : [10.1115/DETC2009-87014](https://doi.org/10.1115/DETC2009-87014).
- [13] **S. VICTOR**, R. MALTI, P. MELCHIOR et A. OUSTALOUP. “Instrumental variable identification of hybrid fractional Box-Jenkins models”. In : *18th IFAC World Congress (IFAC'11)*. T. 44. 1. Milan, Italy, 2011, p. 4314-4319. DOI : [10.3182/20110828-6-IT-1002.01107](https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.01107).
- [14] **S. VICTOR**, R. MALTI et A. OUSTALOUP. “Instrumental variable method for identifying fractional Box-Jenkins models”. In : *21th ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE'09*. San Diego, USA, 2009, p. 1197-1204. DOI : [10.1115/DETC2009-86984](https://doi.org/10.1115/DETC2009-86984).
- [15] **S. VICTOR**, R. MALTI et A. OUSTALOUP. “Instrumental variable method with optimal fractional differentiation order for continuous-time system identification”. In : *15th IFAC Symposium on System Identification (SYSID'2009)*. T. 42. 10. Saint Malo, France, 2009, p. 904-909. DOI : [10.3182/20090706-3-FR-2004.00150](https://doi.org/10.3182/20090706-3-FR-2004.00150).
- [16] **S. VICTOR**, R. MALTI, A. OUSTALOUP et H. GARNIER. “Variable instrumentale optimale pour l'identification de systèmes à dérivées fractionnaires”. In : *Groupe de Travail Identification*. Paris, France, 2007.
- [17] **S. VICTOR** et P. MELCHIOR. “Improvements on flat output characterization for fractional systems”. In : *Fractional Calculus & applied analysis* 18.1 (2015). IF2021 : 3.126, p. 238-260. DOI : [10.1515/fca-2015-0016](https://doi.org/10.1515/fca-2015-0016).
- [18] **S. VICTOR**, P. MELCHIOR et A. DIUDICHI. “Improved instrumental variable methods for closed-loop continuous-time model identification with input and output noise”. In : *Non-linear Dynamics* submitted (2022). IF2021 : 5.022.
- [19] **S. VICTOR**, P. MELCHIOR, J. LÉVINE et A. OUSTALOUP. “Flat output computation for fractional linear systems : application to a thermal system”. In : *19th IFAC World Congress (IFAC'14)*. T. 47. 3. Cape Town, South Africa, 2014, p. 2891-2896. DOI : [doi:10.3182/20140824-6-ZA-1003.01911](https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.01911).
- [20] **S. VICTOR**, P. MELCHIOR, J. LÉVINE et A. OUSTALOUP. “Flatness for linear fractional systems with application to a thermal system”. In : *Automatica* 57 (2015). IF2021 : 5.944, p. 213-221. DOI : [10.1016/j.automatica.2015.04.021](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2015.04.021).

- 
- [21] **S. VICTOR**, P. MELCHIOR, R. MALTI et A. OUSTALOUP. “Path tracking with flatness and CRONE control for fractional systems : thermal application”. In : *18th IFAC World Congress (IFAC'11)*. T. 44. 1. Milan, Italy, 2011, p. 10818-10823. DOI : [10.3182/20110828-6-IT-1002.02002](https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.02002).
- [22] **S. VICTOR**, P. MELCHIOR, R. MALTI et A. OUSTALOUP. “Robust motion planning for a heat rod process”. In : *Journal of Nonlinear Dynamics* 86.2 (2016). IF2021 : 4.867, p. 1271-1283. DOI : [10.1007/s11071-016-2963-2](https://doi.org/10.1007/s11071-016-2963-2).
- [23] **S. VICTOR**, P. MELCHIOR, R. MALTI, J. SABATIER et A. OUSTALOUP. “Identification par modèles non entiers pour la poursuite de trajectoire par platitude : application à un barreau thermique”. In : *Journées de la Section Automatique du Club EEA, Démonstrateurs en Automatique à vocation recherche*. Angers, France, 2010.
- [24] **S. VICTOR**, P. MELCHIOR, D. NELSON-GRUEL et A. OUSTALOUP. “Flatness control for linear fractional MIMO systems : thermal application”. In : *3rd IFAC Workshop on Fractional Differentiation and Its Applications (FDA'08)*. Ankara, Turkey, 2008, p. 82-88.
- [25] **S. VICTOR**, P. MELCHIOR et A. OUSTALOUP. “Flatness principle extension to linear fractional MIMO systems : thermal application”. In : *14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON'08)*. doi : [10.1109/MELCON.2008.4618415](https://doi.org/10.1109/MELCON.2008.4618415). Ajaccio, France, 2008, p. 82-88. DOI : [10.1109/MELCON.2008.4618415](https://doi.org/10.1109/MELCON.2008.4618415).
- [26] **S. VICTOR**, P. MELCHIOR et A. OUSTALOUP. “Flatness Necessary and Sufficient Conditions for Non Linear Fractional Systems using fractional differential forms”. In : *2009 European Control Conference (ECC), 2009*. Budapest, Hongrie, 2009, p. 898-903. DOI : [10.23919/ECC.2009.7074518](https://doi.org/10.23919/ECC.2009.7074518).
- [27] **S. VICTOR**, P. MELCHIOR et A. OUSTALOUP. “Robust Path Tracking using Flatness for Fractional Linear MIMO Systems : a Thermal Application”. In : *Computers & Mathematics with Applications (CAMWA)* 59.5 (2010). IF2021 : 3.476, p. 1667-1678. DOI : [10.1016/j.camwa.2009.08.008](https://doi.org/10.1016/j.camwa.2009.08.008).
- [28] **S. VICTOR**, P. MELCHIOR et A. OUSTALOUP. “Computation of flat outputs for fractional systems : a Thermal Application”. In : *6th IFAC Workshop on Fractional Differentiation and Its Applications (FDA'13)*. T. 46. 1. Grenoble, France, 2013, p. 42-47. DOI : [10.3182/20130204-3-FR-4032.00171](https://doi.org/10.3182/20130204-3-FR-4032.00171).
- [29] **S. VICTOR**, P. MELCHIOR, M. PELLET et A. OUSTALOUP. “Lung thermal transfer system identification with fractional models”. In : *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 28.1 (2020). IF2021 : 5.485, p. 172-182. DOI : [10.1109/TCST.2018.2877606](https://doi.org/10.1109/TCST.2018.2877606).
- [30] **S. VICTOR**, P. MELCHIOR, J. SABATIER et A. OUSTALOUP. “Extension de la platitude aux systèmes fractionnaires MIMO : application à un système thermique”. In : *5ème Conférence Internationale Francophone d'Automatique (IEEE CIFA 2008)*. Bucarest, Roumanie, 2008.

- [31] **S. VICTOR**, **J.-F. DUHÉ**, P. MELCHIOR, Y. ABDELMOUMEN et F. ROUBERTIE. “Long memory recursive prediction error method for identification of continuous-time fractional models”. In : *Nonlinear Dynamics* Accepted (2022). IF2021 : 5.022.
- [32] **S. VICTOR**, **A. MAYOUFI**, R. MALTI, M. CHETOUI et M. AOUN. “System identification of MISO fractional systems : parameter and differentiation order estimation”. In : *Automatica* 141 (juil. 2022). IF2021 : 5.944. DOI : [10.1016/j.automatica.2022.110268](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2022.110268).
- [33] **S. VICTOR**, **J.-B. RECEVEUR**, P. MELCHIOR et P. LANUSSE. “Optimal trajectory planning and robust tracking using vehicle model inversion”. In : *Transactions on Intelligent Transportation Systems* (2020). IF2021 : 6.492, p. 1-14. DOI : [10.1109/TITS.2020.3045917](https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3045917).
- [34] **S. VICTOR**, **K. RUIZ**, P. MELCHIOR et S. CHAUMETTE. “Dynamical repulsive fractional potential fields in 3D environment”. In : *Fractional Calculus & Applied Analysis* (2022). IF2021 : 3.126. DOI : [10.1007/s13540-022-00015-5](https://doi.org/10.1007/s13540-022-00015-5).
- [35] **S. VICTOR**, A. TAYMANS et P. MELCHIOR. “Robust control system design of a turbofan engine”. In : *International Conference on Fractional Differentiation and Its Applications (ICFDA 2016)*. Novi Sad, Serbia, juil. 2016.
- [36] N. BOURBAKI. *Algèbres, éléments de Mathématiques*. Paris : Hermann, 1970.
- [37] P. BRUNOVSKÝ. “A classification of linear controllable systems”. In : *Kybernetika* 6 (1970), p. 176-178.
- [38] K. B. BUGGESKOV, R. G. MALTESEN, B.S. RASMUSSEN, M. A. HANIFA, M.A.V. LUND, R. WIMMER et H.B. RAVN. “Lung Protection Strategies during Cardiopulmonary Bypass Affect the Composition of Blood Electrolytes and Metabolites-A Randomized Controlled Trial”. In : *Journal of clinical medicine* 7.11 (nov. 2018), p. 462. DOI : [10.3390/jcm7110462](https://doi.org/10.3390/jcm7110462).
- [39] S. BUTTERWORTH. “Theory of filter amplifier”. In : *Experimental Wireless and the Wireless Engineer* 7 (1930), p. 536-541.
- [40] G. CAIN et G. H. MEYER. *Separation of Variables for Partial Differential Equations : an Eigenfunction Approach*. Chapman & Hall/CRC, 2005.
- [41] S. CHAUMETTE, P. MELCHIOR, **S. VICTOR** et H. OULD LAHSEN. “Trajectory path tracking of a drone in a disturbed environment”. In : *6th International Workshop on Unmanned and Swarming Conference*. 2021.
- [42] P. M. COHN. *Free rings and Their relations*. London, Academic Press, 1985.
- [43] M.A. CRETIKOS, R. BELLOMO, K. HILLMAN, J. CHEN, S. FINFER et A. FLABOURIS. “Respiratory rate : the neglected vital sign”. In : *Medical Journal of Australia* 188.11 (2008), p. 657-659. DOI : [10.5694/j.1326-5377.2008.tb01825.x](https://doi.org/10.5694/j.1326-5377.2008.tb01825.x).
- [44] Ph. DE LARMINAT. “Earth climate identification vs. anthropic global warming attribution”. In : *Annual Reviews in Control* 42 (2016), p. 114-125. ISSN : 1367-5788. DOI : [j.arcontrol.2016.09.018](https://doi.org/j.arcontrol.2016.09.018). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578816300931>.

- [45] N. H. DIAS, BRAZ J. R. C., R.H.G. MARTINS et L.R. CARVALHO. “Larynx and Cervical Trachea in Humidification and Heating of Inhaled Gases”. In : *Annals of Otolaryngology, Rhinology & Laryngology* 114.5 (2005), p. 411-415. DOI : [10.1177/000348940511400514](https://doi.org/10.1177/000348940511400514).
- [46] S. DUGOWSON. “Les différentielles métaphysiques : histoire et philosophie de la généralisation de l’ordre de dérivation”. Thèse de doct. Université Paris XIII, déc. 1994.
- [47] J.-F. DUHÉ, S. VICTOR, P. MELCHIOR, Y. ABDELMOUMEN et F. ROUBERTIE. “Modeling thermal systems with fractional models : human bronchus application”. In : *Nonlinear Dynamics* 108 (2022). IF2021 : 5.022, p. 579-595. DOI : [10.1007/s11071-022-07239-3](https://doi.org/10.1007/s11071-022-07239-3).
- [48] D. ELAD, M. WOLF et T. KECK. “Air-conditioning in the human nasal cavity”. In : *Respiratory Physiology & Neurobiology* 163.1 (2008), p. 121-127. DOI : [10.1016/j.resp.2008.05.002](https://doi.org/10.1016/j.resp.2008.05.002).
- [49] M. FLIESS. “Some basic structural properties of generalized linear systems”. In : *Systems Control Letters* 15 (1990), p. 391-396. DOI : [10.1016/0167-6911\(90\)90062-Y](https://doi.org/10.1016/0167-6911(90)90062-Y).
- [50] M. FLIESS. “A remark on Willem’s trajectory characterization of linear controllability”. In : *Systems Control Letters* 19 (1992), p. 43-45.
- [51] M. FLIESS et R. HOTZEL. “Sur les systèmes linéaires à dérivation non entière”. In : *Comptes Rendus de l’Académie des Sciences - Series IIB - Mechanics-Physics-Chemistry-Astronomy* 324.2 (1997), p. 99-105. ISSN : 1251-8069. DOI : [10.1016/S1251-8069\(99\)80013-X](https://doi.org/10.1016/S1251-8069(99)80013-X).
- [52] MARCO FORGIONE et DARIO PIGA. “Model Structures and Fitting Criteria for System Identification with Neural Networks”. In : *2020 IEEE 14th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*. 2020, p. 1-6. DOI : [10.1109/AICT50176.2020.9368834](https://doi.org/10.1109/AICT50176.2020.9368834).
- [53] MARCO FORGIONE et DARIO PIGA. “Continuous-time system identification with neural networks : Model structures and fitting criteria”. In : *European Journal of Control* 59 (2021), p. 69-81. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2021.01.008>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0947358021000169>.
- [54] F.R. GANTMACHER. *Theory of Matrices*. T. 1. New York : Chelsea Publishing Company, 1960.
- [55] S.S. GE et Y.J. CUI. “Dynamic Motion Planning for Mobile Robots Using Potential Field Method”. In : *Autonomous Robots* 13.3 (nov. 2002), p. 207-222. DOI : [10.1023/A:1020564024509](https://doi.org/10.1023/A:1020564024509).
- [56] T.D. GILLESPIE. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Society of Automotive Engineers, 1992.
- [57] DAVID GONZÁLEZ, JOSHUÉ PÉREZ, VICENTE MILANÉS et FAWZI NASHASHIBI. “A review of motion planning techniques for automated vehicles”. In : *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 17.4 (2016), p. 1135-1145. DOI : [10.1109/TITS.2015.2498841](https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2498841).
- [58] G.C. GOODWIN et R.P. PAYNE. *Dynamic system identification. Experiment design and data analysis*. Academic Press, 1977.

- [59] A.K. GRÜNWARD. “Über begrenzte Derivationen und deren Anwendung”. In : *Zeitschrift für Mathematik und Physik* (1867), p. 441-480.
- [60] Isaac van der HOVEN. “Power Spectrum of Horizontal Wind Speed in the Frequency Range from 0.0007 to 900 Cycles Per Hour.” In : *Journal of Atmospheric Sciences* 14.2 (1957), p. 160-164. DOI : [10.1175/1520-0469\(1957\)014<0160:PSOHWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1957)014<0160:PSOHWS>2.0.CO;2).
- [61] Theodore von KÁRMÁN. “Progress in the Statistical Theory of Turbulence”. In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 34.11 (nov. 1948), 530 LP -539.
- [62] O. KHATIB. “Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots”. In : *Proceedings. 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. T. 2. Mar. 1985, p. 500-505. DOI : [10.1109/ROBOT.1985.1087247](https://doi.org/10.1109/ROBOT.1985.1087247).
- [63] Patrick LANUSSE, Rachid MALTI et Pierre MELCHIOR. “CRONE control system design toolbox for the control engineering community : tutorial and case study”. In : *Philosophical Transactions of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 371.1990 (2013). DOI : [10.1098/rsta.2012.0149](https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0149).
- [64] J-C. LATOMBE. *Robot motion planning*. T. 124. New York : Springer, 1991.
- [65] A. V. LETNIKOV. “Développement historique de la théorie de la différentiation d’ordre arbitraire”. In : *Matematicheskij Sbornik (Moscou)* 3 (1868), p. 85-119.
- [66] J. LÉVINE. *Analysis and Control of Nonlinear Systems A Flatness-based Approach*. Springer Berlin Heidelberg, 2009. DOI : [10.1007/978-3-642-00839-9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-00839-9).
- [67] J. LIOUVILLE. “Mémoire sur quelques questions de géométrie et de mécanique et sur un nouveau genre de calcul pour résoudre ces équations”. In : *Journal de l’Ecole Polytechnique* 13 (1832), p. 71-162.
- [68] L. LJUNG. *System identification – Theory for the user*. 2<sup>e</sup> éd. Upper Saddle River, N.J., USA : Prentice-Hall, 1999.
- [69] A. MAACHOU, R. MALTI, P. MELCHIOR, J.-L. BATTAGLIA, A. OUSTALOUP et B HAY. “Nonlinear thermal system identification using fractional Volterra series”. In : *Control Engineering Practice* 29 (2014), p. 50-60. DOI : [10.1016/j.conengprac.2014.02.023](https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2014.02.023).
- [70] R.G. MALTESEN, K. B. BUGGESKOV, C. B. ANDERSEN, R. PLOVSING, R. WIMMER, H.B. RAVN et B.S. RASMUSSEN. “Lung Protection Strategies during Cardiopulmonary Bypass Affect the Composition of Bronchoalveolar Fluid and Lung Tissue in Cardiac Surgery Patients”. In : *Metabolites* 8.4 (sept. 2018), p. 54. DOI : [10.3390/metabo8040054](https://doi.org/10.3390/metabo8040054).
- [71] R. MALTI et S. VICTOR. “CRONE Toolbox for system identification using fractional order models”. In : *17th IFAC Symposium on System Identification (SYSID 2015)*. T. 48. 28. Beijing, China, oct. 2015, p. 769-774. DOI : [10.1016/j.ifacol.2015.12.223](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.12.223).

- [72] R. MALTI, S. VICTOR, O. NICOLAS et A. OUSTALOUP. “System identification using fractional models : state of the art”. In : *21th ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE'07*. Sous la dir. d'ASME. doi : 10.1115/DETC2007-35332. Las Vegas, USA, 2007. DOI : [10.1115/DETC2007-35332](https://doi.org/10.1115/DETC2007-35332).
- [73] R. MALTI, S. VICTOR et A. OUSTALOUP. “Advances in System Identification using Fractional Models”. In : *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics* 3 (2008). IF2021 : 1.661, p. 021401.1-021401.7. DOI : [10.1115/1.2833910](https://doi.org/10.1115/1.2833910).
- [74] R. MALTI, S. VICTOR, A. OUSTALOUP et H. GARNIER. “An optimal instrumental variable method for continuous-time fractional model identification”. In : *The 17th IFAC World Congress (IFAC'08)*. Seoul, Korea, 2008, p. 14379-14384. DOI : [10.3182/20080706-5-KR-1001.02436](https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.02436).
- [75] R. MALTI, X. MOREAU, F. KHEMANE et A. OUSTALOUP. “Stability and resonance conditions of elementary fractional transfer functions”. In : *Automatica* 47.11 (2011), p. 2462-2467. DOI : [10.1016/j.automatica.2011.08.029](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2011.08.029).
- [76] R. MALTI, A. MAYOUFI et S. VICTOR. “Experiment design for system identification using fractional models of the second kind”. In : *18th IFAC Symposium on System Identification (SYSID 2018)*. T. 51. 15. Stockholm, Sweden, 2018, p. 371-376. DOI : [10.1016/j.ifacol.2018.09.173](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.173).
- [77] R. MALTI, A. MAYOUFI et S. VICTOR. “Experiment design for elementary fractional models”. In : *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* (2022). IF2021 : 4.260. DOI : [10.1016/j.cnsns.2022.106337](https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2022.106337).
- [78] D. MATIGNON. “Stability properties for generalized fractional differential systems”. In : *ESAIM proceedings - Systèmes Différentiels Fractionnaires - Modèles, Méthodes et Applications* 5 (1998). DOI : [10.1051/proc:1998004](https://doi.org/10.1051/proc:1998004).
- [79] PK McFAWN et HW MITCHELL. “Bronchial compliance and wall structure during development of the immature human and pig lung”. In : *European Respiratory Journal* 10.1 (1997), p. 27-34.
- [80] P. MELCHIOR et S. VICTOR. “Fractional Approaches in Path Tracking Design (or Motion Control) : Prefiltering, Shaping, and Flatness”. In : *Fractional Order Differentiation and Robust Control Design : CRONE, H-infinity and Motion Control*. Sous la dir. de J. SABATIER, P. LANUSSE, P. MELCHIOR et A. OUSTALOUP. Dordrecht : Springer Netherlands, 2015. Chap. 5, p. 237-323. DOI : [10.1007/978-94-017-9807-5\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-017-9807-5_5).
- [81] P. MELCHIOR, S. VICTOR, M. PELLET, J. PETIT, J.-M. CABELGUEN et A. OUSTALOUP. “Handbook of Fractional Calculus with Applications. Applications in Engineering, Life and Social Sciences, Part A”. In : sous la dir. de D. BALEANU et A.M. LOPES. T. 7. De Gruyter, 2019. Chap. Skeletal muscle modeling by fractional multi-models : analysis of length effect. DOI : [10.1515/9783110571905-006](https://doi.org/10.1515/9783110571905-006).

- [82] P. MELCHIOR, Ch. IRNAN, B. METOUI et A. OUSTALOUP. “Robust Path Planning for Mobile Robot Based on Fractional Attractive Force in 3-Dimension Space”. In : *IFAC Proceedings Volumes* 45.2 (2012). 7th Vienna International Conference on Mathematical Modelling, p. 577-582. ISSN : 1474-6670. DOI : [10.3182/20120215-3-AT-3016.00102](https://doi.org/10.3182/20120215-3-AT-3016.00102).
- [83] P. MELCHIOR, B. METOUI, A. POTY, S. NAJAR, A. OUSTALOUP et M. N. ABDELKRIM. “Attractive Force Based on Fractional Potential in Dynamic Motion Planning for Mobile Robot”. In : *ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Volume 5 : 6th International Conference on Multibody Systems, Nonlinear Dynamics, and Control, Parts A, B, and C*. Las Vegas, USA, 2007, p. 1423-1430. DOI : [10.1115/DETC2007-35495](https://doi.org/10.1115/DETC2007-35495).
- [84] B. METOUI, P. MELCHIOR, S. NAJAR, M. N. ABDELKRIM et A. OUSTALOUP. “Robust path planning for dynamic environment based on fractional attractive force”. In : *2009 6th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*. Mar. 2009, p. 1-8. DOI : [10.1109/SSD.2009.4956793](https://doi.org/10.1109/SSD.2009.4956793).
- [85] Weidong MI, Changsheng ZHANG, Hong WANG, Jiangbei CAO, Changtian LI, Li YANG, Fang GUO, Xianwang WANG et Tie YANG. “Measurement and Analysis of the Tracheobronchial Tree in Chinese Population Using Computed Tomography”. In : *PLOS ONE* 10.4 (avr. 2015), p. 1-14. DOI : [10.1371/journal.pone.0123177](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0123177).
- [86] J. MIKUSIŃSKI. *Operational Calculus*. Varsovie : Pergamon, Oxford & PWN, 1983.
- [87] L. MIZGALSKI, S. VICTOR, P. MELCHIOR, H. GIMBERT et S. NGUYEN. “Modeling and Control of an Autonomous Tractor”. In : *Workshop Réseau Régional de Recherche en Robotique*. 2021.
- [88] Xavier MOREAU, Audrey RIZZO, Jean-Luc MERMOZ, Aurore LETÉVÉ, Audrey MORAND et Pierre MELCHIOR. “Etude de l’influence de la dissymétrie du chargement sur de la tenue de route. Partie 1 : du modèle de validation au modèle d’analyse”. In : *7ème Conférence Internationale Francophone d’Automatique (IEEE CIFA 2012)*. Grenoble, France, 2012.
- [89] J.-F. DUHÉ. “Modélisation d’ordre non entier des transferts thermiques dans les poumons pour des opérations de chirurgie cardiaque”. Thèse de doct. Bordeaux, France : Université de Bordeaux, 2022.
- [90] J.-F. DUHÉ, S. VICTOR et P. MELCHIOR. “Contributions on artificial potential field method for effective obstacle avoidance”. In : *Fractional Calculus & Applied Analysis* 24.2 (2021). IF2021 : 4.867, p. 421-446. DOI : [10.1515/fca-2021-0019](https://doi.org/10.1515/fca-2021-0019).
- [91] J.-F. DUHÉ, S. VICTOR, P. MELCHIOR, Y. ABDELMOUMEN et F. ROUBERTIE. “Global thermal modeling of lung heat transfer with blood perfusion”. In : *International Conference on Fractional Differentiation and its Applications ICFDA 2021*. Sous la dir. de SPRINGER. T. 452. Warsaw, Poland, 2021.

- [92] J.-F. DUHÉ, S. VICTOR, P. MELCHIOR, Y. ABDELMOUMEN et F. ROUBERTIE. “Recursive system identification for coefficient estimation of continuous-time fractional order systems”. In : *19th IFAC Symposium on System Identification (SYSID 2021)*. T. 54. 7. Padova, Italy, 2021, p. 114-119. DOI : [10.1016/j.ifacol.2021.08.344](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.344).
- [93] J.-F. DUHÉ, S. VICTOR, P. MELCHIOR, Y. ABDELMOUMEN et F. ROUBERTIE. “Thermal modeling using two-port network impedance fractional order approximations”. In : *17th ASME/IEEE MESA International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE 2021*. T. 7. virtual, USA, août 2021. DOI : [10.1115/DETC2021-69968](https://doi.org/10.1115/DETC2021-69968).
- [94] J.-F. DUHÉ, S. VICTOR, P. MELCHIOR, Y. ABDELMOUMEN et F. ROUBERTIE. “Two-port network modeling for bio-heat transfers in lungs”. In : *11th IFAC Symposium on Biological and Medical Systems (BMS 2021)*. T. 54. 15. Ghent, Belgium, 2021, p. 169-174. DOI : [10.1016/j.ifacol.2021.10.250](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.250).
- [95] J.-F. DUHÉ, S. VICTOR, P. MELCHIOR, Y. ABDELMOUMEN et F. ROUBERTIE. “Recursive system identification for continuous-time fractional models”. In : *IEEE Transactions on Control Systems Technology* submitted (2022). IF2021 : 6.091.
- [96] J.-F. DUHÉ, S. VICTOR, K. RUIZ et P. MELCHIOR. “Study on obstacle avoidance for fractional artificial potential fields”. In : *21st IFAC World Congress*. T. 53. 2. Berlin, Germany, 2020, p. 3725-3730. DOI : [10.1016/j.ifacol.2020.12.2059](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2059).
- [97] H. HAJJEM. “Optimisation de la commande d’antennes mobiles 2 axes et 3 axes”. Thèse de doct. Bordeaux, France : Université de Bordeaux, 2023.
- [98] H. HAJJEM, S. VICTOR, P. MELCHIOR, P. LANUSSE et L. THOMAS. “Wind fractional modeling by spectral analysis”. In : *2021 9th International Conference on Systems and Control (ICSC)*. 2021, p. 436-441. DOI : [10.1109/ICSC50472.2021.9666651](https://doi.org/10.1109/ICSC50472.2021.9666651).
- [99] H. HAJJEM, S. VICTOR, P. MELCHIOR, P. LANUSSE et L. THOMAS. “Wind turbulence modeling for real-time simulation”. In : *Nonlinear Dynamics* submitted (2022). IF2021 : 5.022.
- [100] A. MAYOUFI. “Identification du système climatique terrestre”. Thèse de doct. Bordeaux, France : Université de Bordeaux et ENIG Gabès, 2022.
- [101] A. MAYOUFI, S. VICTOR, R. MALTI, M. CHETOUÏ et M. AOUN. “An optimal instrumental variable approach for continuous-time multiple input-single output fractional model identification”. In : *21st IFAC World Congress*. T. 53. 2. Berlin, Germany, 2020, p. 3701-3706. DOI : [10.1016/j.ifacol.2020.12.2055](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2055).
- [102] A. MAYOUFI, S. VICTOR, R. MALTI, M. CHETOUÏ et M. AOUN. “Multivariable fractional system identification”. In : *Groupe de Travail Identification - Journées de la SAGIP*. 2021.
- [103] A. MAYOUFI, S. VICTOR, R. MALTI, M. CHETOUÏ et M. AOUN. “Output error MISO system identification using fractional models”. In : *Fractional Calculus & Applied Analysis* 5.24 (2021). IF2021 : 4.867, p. 1601-1618. DOI : [10.1515/fca-2021-0067](https://doi.org/10.1515/fca-2021-0067).

- [104] A. MAYOUFI, M. CHETOUI, S. VICTOR, M. AOUN et R. MALTI. “A comparison between two methods for MISO fractional models estimation”. In : *2020 17th International Multi-Conference on Systems, Signals Devices (SSD)*. 2020, p. 446-451. DOI : [10.1109/SSD49366.2020.9364187](https://doi.org/10.1109/SSD49366.2020.9364187).
- [105] A. MAYOUFI, S. VICTOR, R. MALTI et M. AOUN. “Dynamic Harmonic Regression approach for global terrestrial temperature system identification”. In : *Journées Doctorales et Journées Nationales du GDR MACS du CNRS (JDMACS-JNMACS) à l'invitation du Groupe de Travail Identification du GDR MACS*. submitted. Bordeaux, France, 2019.
- [106] J. MOREAU. “Aide à la conduite et véhicule autonome en intersection”. Thèse de doct. Univ. Bordeaux, déc. 2020.
- [107] J. MOREAU, S. VICTOR, P. MELCHIOR, M. MOZE, F. AIOUN et F. GUILLEMARD. *Replanification du chemin d'un véhicule autonome en fonction des obstacles statiques sur le chemin initialement planifié*. Patent no. FR1905555. Avr. 2019. DOI : [FR1905555](https://doi.org/FR1905555).
- [108] J. MOREAU, S. VICTOR, P. MELCHIOR, M. MOZE, F. AIOUN et F. GUILLEMARD. “Reactive Path Planning for Autonomous Vehicle”. In : *Transactions on Vehicular Technology* submitted (2022). IF2021 : 5.978.
- [109] J. MOREAU, P. MELCHIOR, S. VICTOR, F. AIOUN et F. GUILLEMARD. “Path planning with fractional potential fields for autonomous vehicles”. In : *20th IFAC World Congress (IFAC WC 2017)*. T. 50. 1. Toulouse, France, 2017, p. 14533-14538. DOI : [10.1016/j.ifacol.2017.08.2076](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2076).
- [110] J. MOREAU, P. MELCHIOR, S. VICTOR, L. CASSANY, M. MOZE, F. AIOUN et F. GUILLEMARD. “Reactive path planning in intersection for autonomous vehicle”. In : *9th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control AAC 2019*. T. 52. 5. 2019, p. 109-114. DOI : [10.1016/j.ifacol.2019.09.018](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.09.018).
- [111] J. MOREAU, P. MELCHIOR, S. VICTOR, M. MOZE, F. AIOUN et F. GUILLEMARD. “Planification de trajectoire par champs de potentiel fractionnaires appliquée au véhicule autonome”. In : *Open Science Automatique 2.1* (2018). DOI : [10.21494/ISTE.OP.2018.0282](https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2018.0282).
- [112] J. MOREAU, P. MELCHIOR, S. VICTOR, M. MOZE, F. AIOUN et F. GUILLEMARD. “Planification de trajectoire par la méthode des champs de potentiels : application au véhicule autonome”. In : *Groupe de Travail Automatique et Automobile*. Bordeaux, France, 2018.
- [113] J. MOREAU, P. MELCHIOR, S. VICTOR, M. MOZE, F. AIOUN et F. GUILLEMARD. “Reactive Path Planning for Autonomous Vehicle Using Bézier Curve Optimization”. In : *2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. 2019, p. 1048-1053. DOI : [10.1109/IVS.2019.8813904](https://doi.org/10.1109/IVS.2019.8813904).
- [114] J.-B. RECEVEUR. “Optimisation de trajectoire en environnement 2D : application au véhicule autonome”. Thèse de doct. Univ. Bordeaux, déc. 2018.
- [115] J.-B. RECEVEUR, S. VICTOR et P. MELCHIOR. “Multi-criteria trajectory optimization for autonomous vehicles”. In : *20th IFAC World Congress (IFAC WC 2017)*. T. 50. Toulouse, France, 2017, p. 12520-12525. DOI : [10.1016/j.ifacol.2017.08.2063](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2063).

- 
- [116] J.-B. RECEVEUR, S. VICTOR et P. MELCHIOR. “New Definitions of Attractive and Repulsive Fractional Potential Fields for Robust Path Planning”. In : *International Conference on Fractional Differentiation and its Applications (ICFDA) 2018*. Amman, Jordan, 2018. DOI : [10.2139/ssrn.3277551](https://doi.org/10.2139/ssrn.3277551).
- [117] J.-B. RECEVEUR, S. VICTOR et P. MELCHIOR. “Trajectory optimization for autonomous vehicles on crossroads with mobile obstacles”. In : *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Changsu, China, 2018, p. 556-561. DOI : [10.1109/IVS.2018.8500379](https://doi.org/10.1109/IVS.2018.8500379).
- [118] J.-B. RECEVEUR, S. VICTOR et P. MELCHIOR. “New interpretation of fractional potential fields for robust path planning”. In : *Fractional Calculus & Applied Analysis* 22.1 (2019). IF2021 : 3.126, p. 113-127. DOI : [10.1515/fca-2019-0007](https://doi.org/10.1515/fca-2019-0007).
- [119] J.-B. RECEVEUR, S. VICTOR et P. MELCHIOR. “Robust longitudinal motion planning using vehicle model inversion”. In : *9th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control AAC 2019*. T. 52. 5. 2019, p. 103-108. DOI : [10.1016/j.ifacol.2019.09.017](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.09.017).
- [120] J.-B. RECEVEUR, S. VICTOR et P. MELCHIOR. “Autonomous car decision making and trajectory tracking based on genetic algorithms and fractional potential fields”. In : *Intelligent Service Robotics* 13 (2020). IF2021 : 2.246, p. 315-330. DOI : [10.1007/s11370-020-00314-x](https://doi.org/10.1007/s11370-020-00314-x).
- [121] J.-B. RECEVEUR, P. MELCHIOR et S. VICTOR. “Optimisation multi-critère pour véhicules autonomes en environnement dynamique”. In : *Automatique, Open Science, ISTE* 2.1 (2018). DOI : [10.21494/ISTE.OP.2018.0283](https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2018.0283).
- [122] J.-B. RECEVEUR, P. MELCHIOR et S. VICTOR. “Planification de trajectoire dans le contexte du véhicule autonome”. In : *Groupe de Travail Automatique et Automobile*. Bordeaux, France, 2018.
- [123] K. RUIZ. “Planification de trajectoire robuste en environnement 3D perturbé”. Thèse de doct. Bordeaux, France : Université de Bordeaux, 2020.
- [124] K. RUIZ, S. VICTOR, P. MELCHIOR et S. CHAUMETTE. “A new dynamical repulsive fractional potential for UAVs in 3D dynamical environments”. In : *21st IFAC World Congress*. T. 53. 2. Berlin, Germany, 2020, p. 3719-3724. DOI : [10.1016/j.ifacol.2020.12.2058](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2058).
- [125] K. RUIZ, S. CHAUMETTE, P. MELCHIOR et S. VICTOR. “Obstacle avoidance in 3D dynamic environment”. In : *5th International Workshop on Unmanned and Swarming Conference*. 2018.
- [126] K. RUIZ, P. MELCHIOR, S. VICTOR et S. CHAUMETTE. “Robustesse de la planification de trajectoire d’un drone en environnement 3D”. In : *Journées Doctorales et Journées Nationales du GDR MACS du CNRS (JDMACS-JNMACS) à l’invitation du Groupe de Travail Identification du GDR MACS*. Bordeaux, France, 2019.
- [127] K.B. OLDDHAM et J. SPANIER. *The fractional calculus - Theory and Applications of Differentiation and Integration to Arbitrary Order*. Academic Press, New-York et London, 1974.

- [128] H. OULD LAHSEN, **S. VICTOR**, P. MELCHIOR et S. CHAUMETTE. “Trajectory path tracking of a drone in a disturbed environment”. In : *Workshop Réseau Régional de Recherche en Robotique*. 2021.
- [129] A. OUSTALOUP. *La commande CRONE : commande robuste d'ordre non entier*. Paris : Hermès, 1991.
- [130] A. OUSTALOUP. *La dérivation non-entière : théorie, synthèse et applications*. Paris : Hermès, 1995.
- [131] A. OUSTALOUP et **S. VICTOR**. “Approche non entière de la dynamique d’une épidémie : le modèle FPM”. In : *Workshop Epidemics : modeling, identification, control*. 2021.
- [132] A. OUSTALOUP, F. LEVRON, **S. VICTOR** et L. DUGARD. “Non-integer (or fractional) power model of a viral spreading : application to the COVID-19”. In : *Annual reviews in Control* (2021). IF2021 : 6.091. DOI : [10.1016/j.arcontrol.2021.09.003](https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2021.09.003).
- [133] N. PETIT et A. SCIARRETTA. “Optimal drive of electric vehicles using an inversion-based trajectory generation approach”. In : *18th IFAC World Congress*. Milan, Italy, 2011, p. 14519-14526. DOI : [10.3182/20110828-6-IT-1002.01986](https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.01986).
- [134] H. PHAM. “A New Criterion for Model Selection”. In : *Mathematics* 7.12 (2019). DOI : [10.3390/math7121215](https://doi.org/10.3390/math7121215).
- [135] I. PODLUBNY. *Fractional Differential Equations : An Introduction to Fractional Derivatives, Fractional Differential Equations, to Methods of Their Solution and Some of Their Applications*. San Diego : Academic Press, 1999.
- [136] A. POTY, P. MELCHIOR et A. OUSTALOUP. “Dynamic path planning for mobile robots using fractional potential field”. In : *First International Symposium on Control, Communications and Signal Processing, 2004*. Mar. 2004, p. 557-561. DOI : [10.1109/ISCCSP.2004.1296443](https://doi.org/10.1109/ISCCSP.2004.1296443).
- [137] B. RIEMANN. “Versuch einer allgemeinen Auffassung der Integration und Differentiation”. In : *Gesammelte Mathematische Werke und Wissenschaftlicher* (Leipzig 1876), p. 331-344.
- [138] B. ROSS. “A brief history and exposition of the fundamental theory of fractional calculus”. In : *Fractional calculus and its applications* 457 (1974), p. 1-37.
- [139] B. ROSS. “The development of fractional calculus 1695–1900”. In : *Historia Mathematica* 4.1 (1977), p. 75-89. DOI : [10.1016/0315-0860\(77\)90039-8](https://doi.org/10.1016/0315-0860(77)90039-8). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0315086077900398>.
- [140] Marc A RUSSO, Danielle M SANTARELLI et Dean O’ROURKE. “The physiological effects of slow breathing in the healthy human”. In : *Breathe (Sheffield, England)* 13.4 (déc. 2017), p. 298-309. DOI : [10.1183/20734735.009817](https://doi.org/10.1183/20734735.009817).
- [141] S.G. SAMKO, A.A. KILBAS et O.I. MARICHEV. *Fractional integrals and derivatives : theory and applications*. Gordon et Breach Science, 1993.

- 
- [142] Wilko SCHWARTING, Javier ALONSO-MORA et Daniela RUS. “Planning and Decision-Making for Autonomous Vehicles”. In : *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems* 1.1 (2018), p. 187-210. DOI : [10.1146/annurev-control-060117-105157](https://doi.org/10.1146/annurev-control-060117-105157).
- [143] J. SFEIR, M. SAAD et H. SALIAH-HASSANE. “An improved Artificial Potential Field approach to real-time mobile robot path planning in an unknown environment”. In : *2011 IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments (ROSE)*. Sept. 2011, p. 208-213. DOI : [10.1109/ROSE.2011.6058518](https://doi.org/10.1109/ROSE.2011.6058518).
- [144] M.A. TALEB, O. BÉTHOUX et E. GODOY. “Identification of a PEMFC fractional order model”. In : *International Journal of Hydrogen Energy* 42.2 (2017), p. 1499-1509. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.056>.
- [145] L. WANG. *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB*. 1. Springer-Verlag London, 2009. DOI : [10.1007/978-1-84882-331-0](https://doi.org/10.1007/978-1-84882-331-0).
- [146] Y. WANG, M. LI et Z. CHEN. “Experimental study of fractional-order models for lithium-ion battery and ultra-capacitor : Modeling, system identification, and validation”. In : *Applied Energy* 278 (2020), p. 115736. ISSN : 0306-2619.
- [147] W. A. WOŁOVICH. “Series in Applied Mathematical Systems”. In : t. 11. New York : Springer, 1974. Chap. Linear Multivariable Systems.
- [148] C. WU, J. XU, X. JIN, Q. CHEN, Z. LI et M. ZHANG. “Effect of mild hypothermia on lung injury after cardiac arrest in swine based on lung ultrasound”. In : *BMC Pulmonary Medicine* 19.1 (2019), p. 198. DOI : [10.1186/s12890-019-0958-8](https://doi.org/10.1186/s12890-019-0958-8).
- [149] P.C. YOUNG. *Recursive estimation and Time-Series Analysis*. 2nd. Berlin : Springer-Verlag, 2011.