

CONTRIBUTION À L'IDENTIFICATION DES SYSTÈMES À RETARDS

Mémoire

soutenu le 3 octobre 2006 dans le cadre d'une

Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université des Sciences et Technologies de Lille

par

Lotfi Belkoura

Composition du jury

<i>Président :</i>	Michel Fliess	D.R., LIX, Ecole Polytechnique
<i>Rapporteurs :</i>	Jean-François Lafay Alain Richard Hebertt Sira Ramirez	Pr., IRCCyN, Ecole Centrale de Nantes Pr., CRAN, Univ. H. Poincaré, Nancy I D.R., CINVESTAV, Mexico, Mexique
<i>Examineurs :</i>	Olivier Colot Mamadou Mboup Jean-Pierre Richard	Pr., LAGIS, Univ. Sc. et Tech. de Lille Hdr., CRIP5, Univ. R. Descartes, Paris 5 Pr., LAGIS, Ecole Centrale de Lille



TABLE DES MATIÈRES

1	Avant propos	v
2	Notice individuelle	1
3	Activités pédagogiques	5
	Principales matières enseignées	5
	L'expérience pédagogique du DEUG STPI	7
	Activités d'intérêt collectif	7
	Perspectives	8
4	Activités de Recherche	9
	Contexte	9
	Travaux antérieurs à mon intégration au Lagis	10
	Résumé de la thématique actuelle de Recherche	12
	Implication dans la communauté scientifique	14
	Encadrements de travaux de Thèse et de Master	17
	Publications	21
5	Synthèse des travaux sur l'Identifiabilité et l'Identification	25
5.1	Cadre mathématique	25
	Ordre d'une distribution	27
	Les distributions inversibles	27
	Le théorème des supports	28
	Multiplication et convolution	29
5.2	Analyse d'Identifiabilité	31
	Formulation du problème	31
	Le choix de l'entrée	33
	Du transfert vers les paramètres	34
5.3	Identification	36
	Systèmes à entrée retardée et bloquée	37
	Systèmes à entrée et état retardés	44
	Extension aux cas temps discrets	45

6 Conclusion et Perspectives	49
7 Sélection de publications	55
Bibliographie	86

*A mon épouse Ikram,
A mes enfants Inès et Iliès,
A mes parents.*

AVANT PROPOS

Ce document tente de faire une synthèse de mes principales activités d'enseignant-chercheur avec une attention plus particulière portée sur la recherche. Celle-ci étant un processus continu marqué par des périodes d'interrogations et d'autres plus productives, ce manuscrit offre l'occasion de faire le point sur l'acquis.

Ce mémoire n'a pas vocation à établir un panorama de la recherche sur l'identification, dont la spécificité des systèmes à retards ne constitue qu'un aspect. La thématique particulière des systèmes retardés ne bénéficie pas d'une grande richesse bibliographique et ce document s'efforce de dégager les aspects originaux ainsi que les points forts des activités de recherche dans ce domaine.

Après une notice individuelle suivie d'un descriptif de mes activités d'enseignement et de recherche, une synthèse de mes travaux scientifiques est présentée. Les perspectives de recherche sont enfin présentées, suivies d'un tiré à part de quelques publications apportant un complément de nature scientifique.

Remerciements

Ce document n'aurait probablement pas vu le jour si, durant une période de flottement et structuration, Jean-Pierre Richard ne m'avait offert une chance de rejoindre son groupe de chercheurs. Le dynamisme de son équipe ainsi que sa capacité de management m'ont permis de retrouver un cadre propice aux activités de recherche. Je tiens à lui exprimer ici mes plus sincères remerciements.

L'occasion de faire le point nécessite également la mise en place d'un jury aux compétences connues et largement reconnues. Pour avoir accepté, consacré de leur temps à l'évaluation de ce document, pour s'être enfin déplacés pour en débattre, j'adresse à tous les membres du jury mes plus vifs remerciements.

NOTICE INDIVIDUELLE

BELKOURA Lotfi,

né le 15-02-66 à Meknès (Maroc)
marié, deux enfants

Adresse professionnelle :

Université des Sciences et Technologies de Lille
UFR d'IEEA, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex
Tél : 03 20 33 77 86, Fax : 03 20 43 65 67
e-mail : Lotfi.belkoura@univ-lille1.fr

SITUATION PROFESSIONNELLE

Maître de Conférences à l'Université des Sciences et Technologies de Lille, UFR d'I.E.E.A. (Informatique, Electronique, Electrotechnique, Automatique) au 1^{er} septembre 1994.

Chercheur au *Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal (LAGIS)*
CNRS UMR 8146.

CURSUS UNIVERSITAIRE

A l'Université des Sciences et Technologies de Lille

Jun 86	Deug A (AB)		Jun 89	DEA Productique (B)
Jun 87	Licence EEA	Thèse	Octobre 89	Allocataire d'Enseignement Supérieur (MIES)
Jun 88	Maîtrise EEA (AB)		Octobre 92	Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche

Juillet 1993 : Doctorat de l'Université en Productique, sous la direction du Professeur Lucien Povy. Soutenue en Juillet 1993 avec la mention très honorable. Intitulé : *Identifiabilité et méthodes d'identification des paramètres inertiels minimaux de robots.*

ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT

3 années à tiers temps (60 h TD/an) dans le cadre du Monitorat d'Initiation à l'Enseignement Supérieur, suivies de 2 années d'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER, temps plein) et de 11 années d'enseignement en tant que Maître de Conférences.

- Automatique : Systèmes linéaire continus et échantillonnés, représentation d'état, commande.
- Logique : Logique combinatoire et séquentielle.
- Robotique : Modèles géométrique, cinématique et dynamique, direct et inverse, commande.

ACTIVITES ADMINISTRATIVES

- Membre élu de la Commission de Spécialistes de la 61^{ème} section de l'Université des Sciences et Technologies de Lille depuis mars 2001 (réélu en janvier 2004).
- Membre élu du Conseil de l'UFR d'IEEA de l'établissement depuis avril 2003.
- Responsable pédagogique des options Automatique des semestres S3 (Deug STPI), S6 (Licence IE) et S7 (M1 ASE entre 2003 et 2005).
- Participation à la préparation et à la rédaction du contenu de programmes de la réforme du LMD (Licence Master Doctorat), descriptif fourni en page 7.

ACTIVITES DE RECHERCHES

Equipes de Recherche

- Systèmes Non Linéaires et à Retards du LAGIS, (SyNeR, resp. J-P. Richard), <http://syner.free.fr/>.
- Intégration (en cours) de l'équipe-projet ALIEN de l'INRIA-Futurs (Algèbre pour l'Identification et l'Estimation Numérique). Cette équipe, créée en juin 2004, entre dans une phase d'élargissement à quelques membres de notre équipe SyNeR. Les compétences apportées par cette nouvelle configuration résident essentiellement dans l'élaboration d'algorithmes d'estimation en temps fini ou à entrée inconnue, ainsi que dans les techniques d'identification des retards.
<http://www.inria.fr/recherche/equipes/alien.fr.html>

Encadrement

- Contrat d'Encadrement Doctoral et de Recherche (P.E.D.R.) depuis octobre 2004.
- Encadrement de 2 stages : DEA en 2004 et Master Recherche en 2005.
- Encadrement de 2 Thèses de Doctorat :
 1. *François Veyssset* (bourse ONERA) 2003-2006. Co-encadrement à 70% avec Jean-Pierre Richard et Patricia Coton (encadrement ONERA). *Sujet* : Modélisation et identification de la dynamique du vol longitudinal d'un avion dans la turbulence par modèles à retards (2 publications en conférences internationales, CIFA 2006, MED 2006).

2. *Samer Riachy* (bourse MENRT) débutée en septembre 2005 dans le cadre du projet Robocoop de l'équipe SyNeR (<http://syner.ec-lille.fr/robocoop/>). Co-encadrement à 50% avec Jean-Pierre Richard. *Sujet* : Commande collaborative et réseaux de transmission.

Publications

- 6 publications dans des revues internationales.
- 17 publications dans des congrès internationaux avec comités de lecture.
- 1 chapitre dans un ouvrage.

Implications dans la communauté scientifique

- Rapporteur dans trois congrès et quatre revues internationales.
- Collaborations avec des laboratoires nationaux et internationaux :
 - ONERA, Office national d'études et de recherches aérospatiales.
 - CICESE Research Center, Ensenada, Mexique.
 - FORD Motor Company, Powertrain Controls Research & Advanced Engineering.
- Participation à des groupes de travail :
 - GT Identification, GT Systèmes à retards du GDR MACS.
 - Journées Nationales d'Automatique (devenu JNMACS).
 - Workshop CNRS-NSF.
 - Colloque du programme EurAid Eco-Net.
- Implication dans des projets nationaux et internationaux :
 - Programme Traction, projet AutoRiS.
 - Programme TAT T31, projets Tracteco et Procope.
 - Projet Robocoop.
 - Programme Econet, projet EuRaid.
- Conférencier invité au "Third International Conference of Pure and Applied Mathematics, Plovdiv, Bulgarie, août 2006.
- Président de la session "State Estimation and Identification Algorithms" du sixième IFAC Workshop on Time Delay Systems, l'Aquila Italie, juillet 2006.

ACTIVITÉS PÉDAGOGIQUES

Sommaire

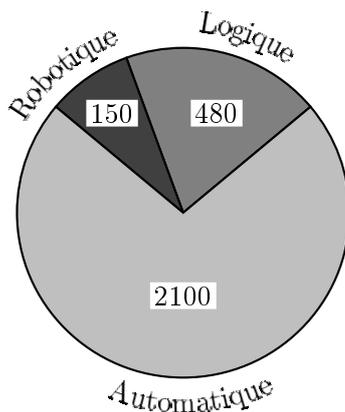
Principales matières enseignées	5
L'expérience pédagogique du DEUG STPI	7
Activités d'intérêt collectif	7
Perspectives	8

J'enseigne à l'Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL) depuis Septembre 1989. J'ai ainsi acquis quatorze années d'enseignement à temps plein, en qualité de Moniteur de l'Enseignement Supérieur durant trois années, puis Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche à temps plein durant deux années avant d'être nommé Maître de Conférences à l'UFR d'IEEA. Ce chapitre résume les heures académiques de cours, travaux dirigés et travaux pratiques, ainsi que les responsabilités et activités d'encadrement pédagogiques.

Principales matières enseignées

Le graphique ci-dessous résume les proportions (en volume d'heures équivalent TD) des principales matières enseignées, et ce sur l'ensemble des années. Les projets faisant appel à des notions nouvelles ou originales ne sont pas reportés sur cette figure.

Les enseignements de *Logique* se sont déroulés principalement sous forme de travaux dirigés et travaux pratiques, bien qu'une partie notable ait été dispensée sous forme de Cours-TD. Les enseignements de *Robotique* et d'*Automatique* sont répartis de manière inégale (en volume, mais également selon les années) en cours, travaux dirigés et travaux pratiques. Cette fluctuation au cours des années résulte essentiellement de l'évolution des cursus (nouvelles maquettes d'enseignement) ainsi que d'une prise en charge de cours suite au congé pour recherche d'un collègue.



Hormis des travaux pratiques dispensés durant mes activités d'ATER à l'Ecole Polytechnique Universitaire de Lille (Ecole d'Ingénieurs, anciennement EUDIL), ces enseignements se sont déroulés au sein de l'UFR d'IEEA. J'ai ainsi assuré de manière continue les cours d'Automatique de la Licence d'Ingénierie Electrique ainsi celui du DEUG STPI depuis 1999 et 1996 respectivement. Ce volume de cours est passé à 90h TD durant les années 2003-2004 et 2004-2005. Le bilan détaillé par année et par filière est fourni dans le tableau ci-dessous, suivi d'un descriptif des matières enseignées.

Le public concerné se compose des étudiants du semestre S3 (anciennement DEUG STPI) pour 1/3 de mon service effectué, des étudiants du semestre S6 (Licence EEA et Ingénierie Electrique) pour 1/3 de mon service et, enfin, des étudiants du Master M1 ASE (Maîtrise EEA) pour le 1/3 restant. Afin de répondre à un équilibre des charges en fonctions des compétences au sein de l'équipe pédagogique, je n'enseigne plus la *Logique* depuis 2000.

Année		93/4	94/5	95/6	96/7	97/8	98/9	99/0	00/1	01/2	02/3	03/4	04/5	05/6
DEUG	C												12	12
	TD	18	44	52	52	29	42	49	36	36	32	25	10	10
	TP		22	27	27	38	32	26	26	40	50	31		10
Licence	C							21	21	21	21	45	48	24
	TD		16	26	26	52	52	30	30	30	30	30	36	64
	TP	62	48	32	32									6
Master M1	C			8	8	6	8	8	8	8		54	30	
	TD	18	18	62	62	44	52	62	47	62	63	51	18	18
	TP	93	40	34	34	20	4	24	32	32	26	3	40	46
Total/an (h)		191	188	240	240	189	190	220	200	229	222	239	194	190

TAB. 3.1 – Bilan détaillé par filière et par année.

Automatique : Notions de modélisation et d'identification ; Structures bouclées ; Analyse temporelle et fréquentielle ; Commande PID, par avance de phase, par modèle interne ; Systèmes multivariables continus et discrets ; Analyse et commande dans l'espace d'état ; Introduction à la commande optimale.

Logique : Rappel de logique combinatoire et introduction à la logique séquentielle ; Bascules, registres, compteurs, synchrones et asynchrones ; Machines synchrones.

Robotique : Introduction à la robotique ; Modèles géométrique, cinématique, direct et inverse ; Paramétrage de Denavit-Hartenberg ; Génération de trajectoires et introduction à la commande.

Encadrement de projets

Un extrait de quelques sujets encadrés est fourni ci-dessous. Ces projets ont porté à la fois sur des approches d'Automatique non standard mais également sur des approfondissements de matières enseignées. Autant que possible, ils devaient aboutir à des applications pratiques sur du matériel existant.

- Commande polynomiale et rejet de perturbations.
- Commande optimale LQG et bang bang.
- Reconnaissance de forme par réseaux de neurones.
- Modélisation et commande d'un robot manipulateur (Mini Rover).
- Approche algébrique pour l'identification.

L'expérience pédagogique du DEUG STPI

Ma nomination à la fonction de Maître de Conférences avait pour objectif le renforcement de l'équipe pédagogique mise en place pour la création de la nouvelle filière DEUG STPI (Sciences et Technologies pour l'Ingénieur). Cette filière se distingue des parcours plus classiques par sa structure pédagogique innovante ainsi que par son public aux niveaux inhomogènes. Ainsi l'Automatique linéaire y est enseignée sans faire appel au calcul opérationnel (Transformée de Laplace non acquise), ce qui permet aux étudiants d'avoir une vision plus élargie en abordant les filières de Licence et Master. De même, les Travaux pratiques se basent sur des énoncés concis et auto-documentés leur permettant une découverte des objectifs et potentiels de la matière avant son étude sous un angle plus fondamental en cours magistral. Cette démarche réussie a pour objectif de susciter l'intérêt et la curiosité de l'étudiant pour la matière abordée.

Créé en 1993 avec 28 étudiants, le DEUG STPI, dans sa version actuelle au sein du L.M.D., est actuellement suivi par 225 étudiants.

Activités d'intérêt collectif

Depuis mon installation en 1994, mon investissement au sein des équipes pédagogiques m'a permis de bénéficier d'une confiance croissante de la part de mes collègues dans la structure et l'organisation des enseignements. Les activités significatives sont décrites ci-après :

- Responsabilité pédagogique des options Automatique en DEUG STPI et Licence IE depuis 1995 et 1999 respectivement, Licence EEA et Master M1 ASE de 2003 à 2005. J'ai également la responsabilité de l'organisation des travaux pratiques dans toutes ces matières.
- Participation au passage LMD avec notamment la définition des contenus des programmes d'Automatique des semestres S3 (DEUG STPI), S6 (Licence EEA et IE) et S7 (Master M1 ASE). J'ai également défini le contenu du module "Outils mathématiques pour l'EEA" du semestre S5 pour les étudiants de cette filière.

- Création de supports de cours pour les Licence EEA/IE, et Master M1 ASE. Les notes de cours du Master sont mises à la disposition des étudiants à l'adresse <http://www-lagis.univ-lille1.fr/ag2I/espaceM1.htm>. Afin d'éviter un fort absentéisme, les autres notes ne sont fournies qu'en fin de parcours. Création également de supports de travaux dirigés en Automatique, Logique et Robotique. Afin de mieux cadrer les enseignements dispensés, les corrigés de certains énoncés ont également été mis en forme à l'intention des (jeunes) intervenants.
- Achat de matériel, prise en main des maquettes et création de 6 travaux pratiques en DEUG STPI (lors de sa création). J'ai également mis en place de nouveaux travaux pratiques en Master ASE et participé à une réévaluation des manipulations existantes tout au long de l'évolution et de la réorganisation de la filière EEA.
- Tutorat pédagogique de jeunes enseignants chercheurs (Imed Kacem, 2000 et Saïd Lakroum, 2005) dans le cadre de leur Monitorat d'Initiation à l'Enseignement Supérieur.

Perspectives

Contrairement aux domaines de base tels que les Mathématiques ou la Physique fondamentale, les matières enseignées dans nos disciplines sont sujettes à des évolutions rapides auxquelles nous devons nous adapter, sans pour autant tomber dans des phénomènes de modes.

Du point de vue pédagogique, l'articulation (séquentielle) Cours-TD-TP pourrait être assouplie ou réorganisée. Ainsi par exemple, les Travaux Pratiques, illustrés par des parties démonstratives, peuvent aussi et pour partie avoir vocation à susciter la curiosité et l'intérêt de l'étudiant, renforçant ainsi sa motivation pour les études à caractère plus fondamental dispensées en Cours et Travaux Dirigés.

Enfin, outre les documents fournis aux étudiants, sous forme de photocopiés ou fichiers disponibles sur un site, le développement d'outils multimédias est à renforcer. Sous forme de démonstrations ou d'exercices disponibles en ligne, ces outils devraient fournir à l'étudiant (qui le souhaite) un complément de formation lui permettant de progresser de manière interactive et à un rythme adapté à ses propres moyens.

ACTIVITÉS DE RECHERCHE

Sommaire

Contexte	9
Travaux antérieurs à mon intégration au Lagis	10
Résumé de la thématique actuelle de Recherche	12
Implication dans la communauté scientifique	14
Encadrements de travaux de Thèse et de Master	17
Publications	21

Contexte

Mes activités de recherche s'effectuent au sein du Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal (LAGIS, CNRS UMR 8146), laboratoire associé au CNRS depuis janvier 2004. Il est issu de la fusion des laboratoires LAIL (UMR CNRS 8021) et I³D (FRE CNRS 2497) de Lille, et forme un laboratoire commun à l'Ecole Centrale de Lille et à l'Université des Sciences et Technologies de Lille. Sa structure scientifique est constituée de six équipes de recherche orientées vers les thématiques Bond Graphs, Ingénierie de la Décision, Systèmes à Evénements Discrets, Sûreté de Fonctionnement des Systèmes Dynamiques, Systèmes Non-linéaires et à Retards, et Vision et Image.

Membre de l'équipe SyNeR (Systèmes Non-linéaires et à Retards) animée par le Professeur Jean-Pierre Richard, mes travaux portent actuellement sur l'analyse des systèmes à retards et, plus particulièrement, sur les questions d'identification et d'identifiabilité des paramètres, incluant les retards.

Mon intégration officielle au sein de l'équipe SyNeR date de 1999 (à cette époque, équipe du LAIL), après une période probatoire d'une année, et fait suite à une période de reconversion thématique de la robotique vers l'étude des systèmes à retards. Le départ en retraite du Professeur Lucien Povy, mon directeur de recherche de doctorat, puis une structure de recherche aux contours scientifiques mal définis depuis, ont conduit à une période de flottement accompagnée d'une faible production scientifique. Cette période s'est néanmoins révélée utile par la suite dans le sens où, dégagée des contraintes de production, elle m'a fourni l'occasion d'élargir mes connaissances dans les domaines de l'Automatique et des Mathématiques.

Si l'équipe SyNeR s'intéresse aux systèmes à retards depuis 1991, les thématiques d'identifiabilité et d'identification ont été introduites en 1998 sous l'impulsion des mes travaux de recherche. Elles donnent lieu aujourd'hui à diverses publications et collaborations décrites par la suite.

Travaux antérieurs à mon intégration au Lagis

Travaux de Thèse (90-93)

Le mémoire, intitulé *Identifiabilité et Méthode d'Identification des paramètres inertiels de robots*, apporte une contribution à la modélisation dynamique et à l'identification des paramètres inertiels de robots à structure ouverte simple. Soutenu en juillet 1993 avec la mention très honorable, son jury était composé comme suit :

<i>Président :</i>	P. Vidal	Professeur à l'USTL
<i>Rapporteurs :</i>	M. Gautier	Professeur à l'Université de Nantes
	S. Tarasiewicz	Professeur à l'Université de Laval (Québec)
<i>Examineurs :</i>	D. Weichert	Professeur à L'EUDIL
<i>Directeur :</i>	L. Povy	Professeur à L'EUDIL.

Dans la modélisation dynamique de robot à structure ouverte simple, nombre de paramètres inertiels sont sans effets sur le modèle ou peuvent être regroupés en vue d'une simplification des équations. En utilisant des méthodes récursives existantes pour les paramètres standards, de nouveaux regroupements de paramètres ont été proposés. Leur intérêt est double :

- Ils permettent de généraliser à un robot quelconque la solution de base obtenue par d'autres auteurs, sans restriction aux robots à axes parallèles ou perpendiculaires.
- Ils permettent d'effectuer une étude exhaustive de tous les regroupements particuliers dépendant de la morphologie du robot.

L'avantage de ce dernier point est qu'il contribue à s'assurer de la minimalité de la solution obtenue. Les études au cas par cas ainsi que le recours à des méthodes numériques ne sont alors plus nécessaires. Le tableau ci-après illustre les regroupements de paramètres effectués sur le robot Stanford à six degrés de liberté. Chaque corps étant initialement caractérisé par dix paramètres inertiels (six pour la matrice d'inertie, trois pour le moment d'ordre un et une masse), la méthode étudiée réduit à 33 au lieu de 60 le nombre coefficients nécessaires au calcul du modèle dynamique. Dans cette description, XX_i, \dots, ZZ_i désignent les composantes de la matrice d'inertie du corps C_i , MX_i, \dots, MZ_i celles du moment d'ordre 1 et M_i la masse du corps C_i . Les paramètres notés avec l'extension R correspondent à des regroupements dépendant de la structure géométrique du robot, comme par exemple :

$$ZZR_1 = ZZ_1 + YY_2 + ZZ_3 + 2r_{02}(MZ_2 - MY_3). \quad (4.1)$$

La minimalité de la solution de base étant assurée, une méthode séquentielle d'identification des paramètres inertiels a ensuite été proposée. Celle-ci est basée sur la réalisation

art.	XX	XY	XZ	YY	YZ	ZZ	MX	MY	MZ	M
1						ZZR_1				
2	XXR_2	XYR_2	XZR_2		YZR_2	ZZR_2	MXR_2			
3							MX_3	MY_3	MZR_3	M_3
4	XXR_4	XY_4	XZ_4		YZ_4	ZZR_4	MX_4	MY_4		
5	XXR_5	XY_5	XZ_5		YZ_5	ZZR_5	MX_5	MY_5		
6	XXR_6	XY_6	XZ_6		YZ_6	ZZR_6	MX_6	MY_6		

TAB. 4.1 – Paramètres inertiels minimaux du robot six axes Stanford.

par le robot de trajectoires simples ne mettant pas en jeu plus de deux articulations simultanément. Outre l'absence des accélérations articulaires, généralement bruitées, cette approche permet d'envisager la recherche de trajectoires excitantes avec un nombre de variables d'optimisation fortement réduit.

Ces travaux ont fait l'objet de deux communications internationales [CSE94, ICARV92], auxquelles s'ajoute celle de mon stage de DEA portant sur la robustesse de la commande d'un moteur pas-à-pas [ISATA 90].

Etude des procédés de séparation par membrane (93-95)

Mes premières activités de post-doctorat se sont effectuées au sein de l'équipe APAB (Automatisation des Procédés Agro-Biologiques, équipe dissoute) abordant la thématique des systèmes à paramètres distribués appliquée au Génie des Procédés. Je me suis plus particulièrement attaché à la modélisation des procédés de séparation par membrane. Ce type de procédé est souvent utilisé dans les industries chimiques, dans la purification de l'eau potable et plus particulièrement dans les industries agro-alimentaires. L'objectif était de parvenir à obtenir des modèles assez représentatifs des phénomènes impliqués en évitant une trop grande complexité en vue d'une exploitation en simulation ou en contrôle.

Le procédé de pervaporation consiste en la séparation d'un mélange liquide + arôme au travers d'une membrane dense. Le processus considéré dans son ensemble forme une structure spiralee (membrane enroulée sur elle même) possédant une entrée frontière (le mélange binaire à séparer), une sortie frontière (le rétentat), et une sortie distribuée (le perméat) comme illustré sur la figure ci-après. Le transfert de matière s'effectue en trois étapes que sont la sorption au niveau de l'interface amont de la membrane, la diffusion au sein de la membrane, et enfin la désorption au niveau de l'interface aval de la membrane.

Trois équations aux dérivées partielles permettent une description assez fidèle des phénomènes de transfert. La première représente l'évolution de la concentration au sein de l'écoulement, la seconde traduisant les phénomènes de sorption, et enfin la troisième représentant l'évolution de la concentration au sein de la membrane. Des études en simulation ont permis de conforter le modèle adopté pour ce procédé de séparation et ont été publiés en conférence internationale [SystSc95].

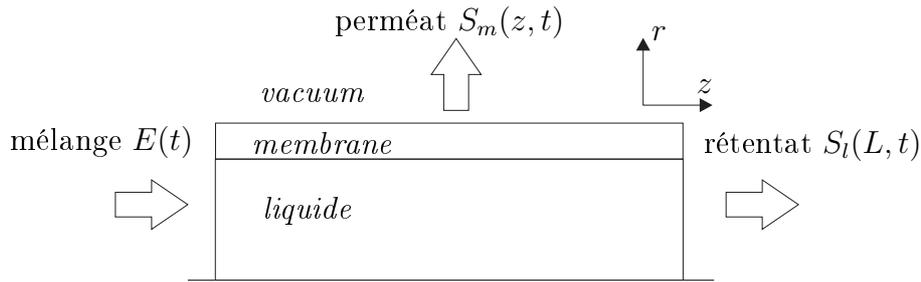


FIG. 4.1 – Représentation schématique du procédé de séparation

Cette étude a été menée en collaboration avec une unité de fabrication installée à Seclin et dont un des cadres faisait partie de l'équipe (PAST). Cette collaboration s'est mise en veille en 95 lors du départ en préretraite de notre contact. ¹

Période transitoire (95-97)

Le passage au sein de l'équipe APAB m'a fourni une première expérience dans le domaine des systèmes de dimension infinie, thématique dont j'ai poursuivi l'étude jusqu'en 97, par intérêt scientifique personnel, mais sans être rattaché à une structure de recherche.

Comme mentionné plus haut, et bien qu'improductive en termes de communications, cette période est marquée par un enrichissement scientifique personnel, dégagé des contraintes de production. C'est ainsi durant cette période qu'a débuté ma formation sur la théorie des distributions. Cet apprentissage est à la base des résultats d'identifiabilité et d'identification décrits par la suite.

La fin de cette période marque également mes premiers contacts avec l'équipe SyNeR, contacts qui donneront lieu en 1998 à une première communication internationale sur les systèmes à retards [VSS 98].

Résumé de la thématique actuelle de Recherche (depuis 97)

Les systèmes à retards représentent une classe de systèmes de dimension infinie largement utilisée pour la modélisation et l'analyse des phénomènes de transport et de propagation de matière, d'énergie ou d'informations. Du point de vue mathématique, ils sont généralement modélisés par des équations différentielles fonctionnelles (systèmes de dimension infinie) ou encore par des modèles sur anneaux (approche algébrique).

¹Par la suite, l'équipe APAB s'est séparée du LAIL. La tentative en 2001 de création d'une jeune équipe pluridisciplinaire pour l'étude des problèmes d'hétérogénéités au sein d'un réacteur n'a pas abouti.

Nous savons que l'identification des systèmes constitue un préalable quasi-incontournable à la réalisation effective de loi de commande. Cette étape consiste en une estimation numérique des différents paramètres mis en jeu dans les équations dynamiques décrivant le comportement d'un processus. L'identification se base elle-même sur le choix d'un modèle mathématique pour lequel il est nécessaire de s'assurer de l'unicité des coefficients mis en jeu. Cette unicité est assurée ou non à la suite d'une analyse d'identifiabilité. Dans certaines situations, cette dernière permet également de caractériser des entrées dites suffisamment riches permettant de distinguer différents modèles. Dans le cas des systèmes linéaires à retards, les paramètres à identifier peuvent être de nature différente : les matrices de coefficients, les différents retards ponctuels ou distribués et, pour certaines applications, la condition initiale (qui est une fonction). L'identifiabilité et l'identification des paramètres des systèmes à retards sont des thèmes de recherche récents dans lesquels notre équipe est en pointe (voir liste des publications).

Nos résultats d'identifiabilité mettent en évidence le lien étroit entre les propriétés d'identifiabilité et les diverses notions de contrôlabilité des systèmes à retards. Il s'agit notamment la contrôlabilité faible dans le cas de systèmes présentant des retards discrets [LTDS00, IEEE02, IMA02], puis de la contrôlabilité spectrale et approximative dans le cas plus général de systèmes avec retards distribués [TDS03, SysId03, AUT05]. L'approche utilisée pour aboutir à ces résultats est basée sur la description des systèmes à retards au moyen d'équations de convolution de distributions à support compact. Cette approche, de plus, est constructive car elle permet également de généraliser aux systèmes à retards les notions d'entrée suffisamment riche rencontrées en identification.

Les approches utilisées jusque récemment en identification se sont basées sur une extension aux systèmes à retard de techniques adaptatives et ce, grâce à l'introduction des fonctionnelles de Lyapunov-Krasovskii [CDC00, CDC02, IJNRC03]. Dans le cas où les retards sont à priori connus, ces méthodes sont adaptées à l'identification des matrices de coefficients. Dans le cas de retards inconnus, il demeure également possible d'en obtenir une estimation. Cette approche adaptative souffrait cependant d'une faible vitesse de convergence et s'avérait difficilement applicable en ligne (voir par exemple [Orlov et al., 2006] dans lequel plus de 100s étaient nécessaires pour obtenir la convergence des paramètres pour un système de retard pur 0,3s et de constante de temps (la plus lente) de 2s).

Les outils actuellement développés au sein de notre équipe se basent sur une extension naturelle aux systèmes à retards d'une technique algébrique développée depuis peu au sein de l'équipe ALIEN de l'INRIA-FUTURS. Des premiers résultats, en simulation mais également expérimentaux, ont permis de mettre en évidence le fort potentiel de cette approche pour l'identification et la commande en ligne des systèmes à retards [MTNS06, MED06, TDS06].

Implication dans la communauté scientifique

Participation à des groupes de travail

Outre mes participations aux séminaires (Math-Auto 2001, Robotique au LAGIS 2005, équipes LAGIS-ALIEN INRIA-FUTURS 2006), Ecoles thématiques (Lille 1999 [Sliding modes in Automatic Control], Grenoble 2000 [Analyse et commande des systèmes à retards], Lille 2002 [Commande des systèmes régis par des équations aux dérivées partielles]), Journées Systèmes à Retards du GDR Automatique (Paris oct. 2000), j'ai effectué plusieurs présentations de mes travaux de recherche, notamment aux :

- GT3 du GRAISyHM (Groupement de Recherche en Automatisation Intégrée et Systèmes Homme-Machines) sur les systèmes biotechnologiques et systèmes à retards, intitulée : "Identifiabilité des systèmes à retards", janvier 2000, Lille.
- GT "Systèmes à retards" du GDR Automatique, intitulée : "Un critère d'Identifiabilité pour les systèmes à retards", février 2000, Paris.
- Journées Nationales d'Automatique du GDR Automatique, intitulée : "Identification auto-adaptative pour les systèmes à retards", février 2001, Autrans.
- Workshop CNRS-NSF (NSF : National Science Foundation, USA), Advances in time-delay systems, intitulée : "Identifiability and identification of linear systems with delays" janvier 2003, La Défense, Paris.
- GT Identification du GDR MACS intitulée : "Identification des systèmes à entrées retardées", novembre 2005, Paris.
- GT Systèmes à Retards du GDR MACS intitulée : "Identification des paramètres et retards des systèmes linéaires", janvier 2006, Paris.
- Colloque dans le cadre des journées Franco-PECO, programme Eco-Net, "Euraid" (Automatique & Ingénierie de la Décision) intitulée : "Une nouvelle approche d'estimation de paramètres pour les systèmes à retards", juillet 2006, Lille.

Rapporteur dans des congrès et revues internationales

- IMA Journal of Mathematical Control and Information, 2002, [revue].
- IEEE Transaction on Automatic Control, 2004 et 2005, [revue].
- DCDS-B Discrete and Continuous Dynamical Systems, 2005, [revue].
- JDCS Journal of Dynamical and Control Systems, 2005, [revue].
- JD MACS, Journées Doctorales du GDR MACS, 2005, [conférence].
- MTNS06, Int. Symp. on Math. Theory of Networks and Systems, 2006, [conférence].
- CDC06, IEEE Conference on Decision and Control, 2006, [conférence].

Collaborations nationales et internationales

- ONERA : Dans le cadre de l'analyse du comportement en vol d'un avion dans la turbulence, une collaboration est engagée avec l'Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA) depuis 2002. La problématique met en jeu les as-

pects de modélisation et d'identification de modèles dynamiques à état et entrées retardés. Cette collaboration a conduit à trois publications (ECC03, CIFA06, MED06), les deux dernières s'effectuant dans le cadre d'une thèse en co-encadrement.

- CISECE : Une collaboration soutenue avec le professeur Yuri Orlov du Cicese Research Center, Californie USA a mené à la publication de 3 articles en revue (IMA02, IEEE02, IJNRC03) ainsi que 3 articles dans des congrès internationaux avec comité de lecture (CDC01-02-03).
- FORD Motor Company : Une récente collaboration est engagée avec Ilya V. Kolmanovskiy, PhD et Technical leader du Powertrain Controls Research & Advanced Engineering, FORD Motor Company, Dearborn, MI, USA (ikolmano@ford.com). Cette coopération s'articule autour de l'identification des modèles retardés traduisant la dynamique du rapport fuel-air dans un moteur à combustion.

Implication dans des projets nationaux et internationaux

Toutes les actions citées ci-dessous, excepté la dernière qui préfigure plus généralement une structure européenne de recherche et de formation par/pour la recherche, mettent en avant le besoin en identification dans la démarche scientifique.

- Programme TRACTION du projet AutoRIS : Automatique pour la Route Intelligente et Sûre, CPER [2000-2004], TACT-T53 : L'objectif principal du projet était de proposer et de mettre en oeuvre des lois de commande destinées aux différents organes pouvant équiper une chaîne de traction et permettant principalement l'amélioration de la gestion de l'énergie au sein des véhicules de transport terrestres et/ou la réduction de leur pollution. Projet en partenariat avec le LAMIH UMR 8530 CNRS (Laboratoire d'Automatique de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines) ainsi que PSA Peugeot Citroën. Mon activité (à 30%) concernait l'identification de retards permettant l'élaboration de lois de commande robustes adaptées aux besoins des industriels.
- Programme TAT T31 [2004-2006], projet CPER et GRRT AS Tracteco [2006-2007] et PAI Procope [2007-2008](partenariat LAGIS-France et Université de Dresde, Allemagne). Les objectifs principaux du projet sont de proposer et de mettre en oeuvre des outils pour l'analyse et la synthèse de lois de commande spécifiques aux problèmes liés à la lévitation magnétique et à ses applications dans le domaine des transports. Une plate-forme expérimentale miniature dédiée au déplacement de trains à lévitation magnétique permettra de tester en temps réel les performances des lois de commande réalisées dans le volet théorique. Basés sur des méthodologies relevant de l'automatique, les développements théoriques viseront à développer des commandes robustes non linéaires et des méthodes d'identification en ligne de paramètres. Ma participation à ce projet (à 20%) porte notamment sur ce dernier point. Le laboratoire LAGIS est porteur du projet AS Tracteco en partenariat avec le LAMIH UMR 8530 CNRS.
- Projet ROBOCOOP [2003-2006] : Stratégies de coopération au sein de formations télé-opérées (EPML 68 CNRS "retards de transmission et de télé-opération" et ARCIR²)[50%]. Dans ce projet sont développées des méthodologies relevant de l'auto-

²ARCIR, Action de Recherche Concertée d'Initiative Régionale.

matique et tenant compte de la présence de retards (dûs aux communications) et des spécificités liées à la collaboration entre différentes entités autonomes. D'autre part, ces aspects seront validés sur deux bancs d'essais : l'un comportant des robots mobiles évoluant en formation et l'autre, des robots manipulateurs manipulant en collaboration des objets de nature et poids différents. Projet en partenariat avec le LAMIH, le LIRMM, le CRAN, la DGA et la société ECA.

- Programme ECONET [2006-2007], projet EuRaid : Automatique et Ingénierie de la Décision. Cette action vise à développer et mettre en commun des ressources matérielles entre des établissements universitaires représentatifs, en France, en Roumanie et en Bulgarie, dans le domaine de l'Automatique, du Génie Informatique et du Traitement du Signal et de l'Image. Au-delà, il s'agit de montrer la faisabilité et de donner la préfiguration d'une structure européenne de recherche et de formation par/pour la recherche intégrant ces partenaires (Institut Européen de Recherche en Automatique & Ingénierie de la Décision).

Autres interventions

J'ai enfin été conférencier invité au "Third International Conference of Pure and Applied Mathematics", Plovdiv, Bulgarie, en août 2006, ainsi que Président de la session "State Estimation and Identification Algorithms" du sixième IFAC Workshop on Time Delay Systems, l'Aquila Italie, en juillet 2006.

Encadrements de travaux de Thèse et de Master

Mes activités d'encadrement ont porté essentiellement sur deux thèses (dont une sera soutenue en 2006, et l'autre, en principe, en 2008), et deux stages de Master Recherche (DEA). Ces chiffres sont sensiblement inférieurs au nombre de sujets de recherche proposés, particulièrement en Master, et reflètent en partie une désaffection, de la part des étudiants, de la thématique d'identifiabilité au profit de sujets à caractère applicatif plus direct tels que ceux abordant la problématique de commande.

Travail de thèse en collaboration avec l'ONERA

Doctorant : François Veysset

Date de début : Novembre 2003. Soutenance prévue : octobre 2006.

Les travaux de cette thèse, menés par François Veysset et encadrés par Jean-Pierre Richard (LAGIS SyNeR), Patricia Coton (ONERA DCSD), et moi-même (LAGIS SyNeR), ont eu pour objectif la modélisation ainsi que l'identification des coefficients aérodynamiques d'un avion en atmosphère turbulente. Dans le cas du vol dans la turbulence atmosphérique, la représentation des phénomènes dynamiques induits par les rafales de vent est réalisée au moyen d'un modèle de mécanique du vol qui prend en compte explicitement chaque élément de l'avion (fuselage, voilure, empennages). Le modèle général traduisant le comportement d'un avion en vol longitudinal est issu du principe fondamental de la dynamique et s'exprime sous la forme :

$$\begin{aligned}
 m\dot{V} &= -mg \sin(\theta) - \frac{1}{2}\rho S V^2 C_x, \\
 mV\dot{\alpha} &= mg \cos(\theta) + mVq - \frac{1}{2}\rho S V^2 C_z, \\
 B\dot{q} &= \frac{1}{2}\rho S l V^2 C_m, \\
 \dot{\theta} &= q,
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

expressions dans lesquelles les variables V , α , q et θ représentent respectivement la vitesse, l'incidence cinématique, la vitesse de tangage et l'assiette de l'avion (voir figure 4.2). Les paramètres constants que sont m , B , g , ρ , l et S correspondent respectivement à la masse de l'avion, son inertie, la constante de gravité, la masse volumique de l'air, une longueur et une surface de référence. Enfin, C_x , C_z et C_m représentent respectivement les coefficients aérodynamiques de traînée, portance et tangage. Dans notre démarche, initiée par [Coton, 2000, 2002], des termes de retard apparaissent, liés notamment à l'action distribuée de la rafale sur ces différents éléments, ainsi qu'à un terme de déflexion permettant la prise en compte de l'influence de la voilure sur l'empennage. Cette démarche s'inscrit dans une perspective d'identification à partir d'essais réalisés dans le Laboratoire d'Analyse du Vol du DCSD de Lille (ONERA) où une maquette d'avion civil équipée d'une instrumentation embarquée est catapultée et traverse, au cours de son vol, une turbulence générée par une soufflerie verticale.

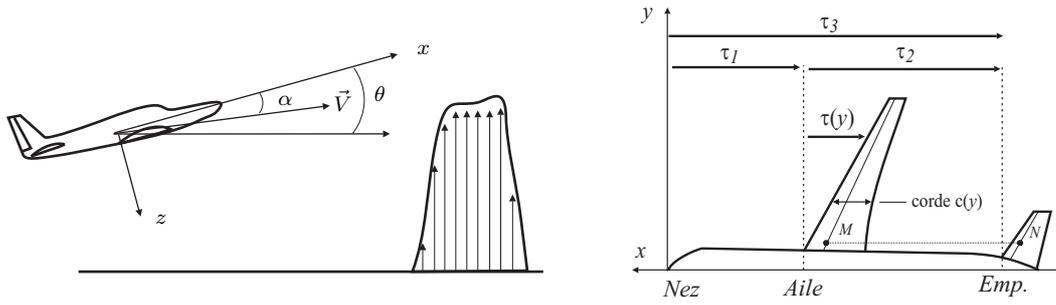


FIG. 4.2 – Description des retards pris en compte dans la modélisation.

La première phase de modélisation consiste ainsi à envisager l'action distribuée induite par la rafale sur le fuselage, à tenir compte de l'aspect réparti de la portance sur l'aile (via la corde $c(y)$, voir figure 4.2) et, enfin, à introduire l'effet de la flèche de l'aile sur l'action de la rafale (au travers du retard distribué $\tau(y)$). La prise en compte du fuselage utilise comme point de départ les travaux de [Allen, 1950] qui a mis en oeuvre une méthode simple pour déterminer la distribution de pression résultant de l'inclinaison d'un corps élancé de révolution sur la direction de l'écoulement. Dans le cas de la voilure, les travaux de modélisation des effets instationnaires induits sur un profil par sa pénétration dans un front de rafale ont été introduits par [H-G.Kussner, 1932, Theodorsen, 1935].

Dans la littérature, la prise en compte de ces phénomènes est souvent simplifiée en considérant une corde moyenne c_m , bien que dans certaines configurations de voilure, la variation de la corde puisse être plus conséquente. Toutes ces dynamiques sont reprises plus en détail et revisitées dans cette thèse pour tenir compte en particulier des retards traduisant la pénétration de l'avion dans la turbulence. Des nouvelles dynamiques avec retards sur l'entrée ainsi que sur l'état sont alors proposées [Veysset et al., 2006a], utilisant comme point de départ une description fine des différents transferts, comme par exemple celle traduisant la contribution à la portance de la rafale sur la voilure, et qui s'exprime au travers de la relation :

$$\Phi_z^w(s) = e^{-\tau_1 s} \int_0^{b/2} C_{z\alpha}^{aile}(y) \left(1 + \frac{e^{-\tau \cdot y s}}{1 + \frac{c(y)}{aV_m} s} \right) dy. \quad (4.3)$$

Dans cette expression, b est l'envergure de l'aile et $C_{z\alpha}^{aile}(y)$ est le coefficient local de portance. Différentes approximations de ces transferts sont alors réalisées, et les analyses des comportements obtenus en simulation sont confortées par leur comparaisons aux essais réels.

Dans un second temps, des algorithmes d'identification, en ligne ou différés, sont développés. Ces outils se basent sur notre extension aux systèmes à retards d'une technique algébrique développée au sein de l'équipe ALIEN [Fliess and Sira-Ramirez, 2003]. Des premiers résultats en simulation ont permis de mettre en évidence le fort potentiel de cette approche pour l'identification des coefficients aérodynamiques recherchés [Veysset et al.,

2006b]. Cette démarche est analysée plus en détail au Chapitre "Synthèse des travaux sur l'Identifiabilité et l'Identification", section "Identification".

Travail de thèse en cours dans le cadre des projets Robocoop et ALIEN

Doctorant : Samer Riachy

Date de début : Septembre 2005

Un aspect inhérent aux applications de coopération entre différentes entités est la présence de retards induits par la transmission des informations à travers des systèmes (réseaux) de communications. Ces retards sont variables et leur prise en compte dans l'élaboration de lois de commande robustes et performantes est devenue incontournable.

Dans le cadre d'une coopération inter-robots, les entités destinées à coopérer consistent en des systèmes mécaniques articulés dont la dynamique est régie par des équations différentielles non linéaires. Outre l'aspect non linéaire associé à chacune des entités, un modèle de l'ensemble de la formation permettant de définir les objectifs communs à atteindre et tenant compte des aspects inhérent aux phénomènes de transmission doit être envisagé. Sur la base du modèle ainsi obtenu, des stratégies de commande coordonnée seront développées.

Le sujet de thèse proposé porte ainsi sur l'élaboration de lois de commande collaborative entre robots. Ces lois de commande, basées sur des modèles mathématiques linéaires (dans le cas de robots manipulateurs en fonctionnement restreint) ou non linéaires (dans le cas de robots mobiles ou de fonctionnement global de robots manipulateurs), devront inclure la prise en compte des retards dans les communications.

Dans le cas non retardé, des premiers essais de commande ont été réalisés sur une plateforme expérimentale consistant en deux pendules inversés considérés pour l'heure séparément. Ces systèmes mécaniques sous actionnés se caractérisent par un comportement non linéaire ainsi que des phénomènes de frottements pouvant être conséquents. L'un d'entre eux (le frottement autour de l'axe de la tige) ne peut être directement compensé par la commande (perturbation non compatible, en anglais : "non matching"). Basée sur les travaux de [Astrom and Furuta, 2000], une première réalisation autour du balancement du pendule depuis sa position d'équilibre stable et suivie d'une commutation de la commande au voisinage de l'équilibre instable a été mise en oeuvre. En outre, une nouvelle approche de commande de systèmes non linéaires (commande quasi homogène discontinue) est établie et validée en simulation comme en pratique.

Parallèlement à ces aspects de commande, une nouvelle approche d'identification des paramètres de systèmes mécaniques en présence de frottements secs est à l'étude. La formulation du problème faisant apparaître un second membre discontinu, la technique adoptée au sein de l'équipe ALIEN pour l'identification des retards constants pourrait être utilisée avantageusement pour l'identification de systèmes en présence de frottements. Par la suite, ce travail pourrait être étendu à d'autres plateformes basées sur des moteurs li-



FIG. 4.3 – Composant de la plateforme expérimentale : Système sous actionné avec frottements le long de l'axe de translation (perturbation compatible), ainsi que sur l'axe de rotation de la tige (non compatible).

néaires, en collaboration avec l'équipe CEMODYNE (Commande des Entraînements de Machine Outils à Dynamique Elevée, [http :www.lille.ensam.fr/cemodyne](http://www.lille.ensam.fr/cemodyne)), dont les équipements sont basés à l'ENSAM de Lille. Il s'agira alors d'utiliser les techniques d'identification/compensation des frottements pour l'amélioration de la précision en usinage à très grande vitesse.

Projets de Master Recherche

- Systèmes à retards et commande en temps fini. Projet mené par Laraba Khaled, soutenu en juin 2004, mention Assez Bien.
- Pendule inversé : Identification et commande. Projet mené par Samer Riachy, soutenu en juin 2005, mention Très Bien.

Publications

Dans des revues internationales avec comité de lecture

[IJPAM06] L. Belkoura : "Identification of Delay Systems", International Journal of Pure and Applied Mathematics (IJPAM, ISSN 1311-8080), 2006.

[MathCom06] L. Belkoura, J-P. Richard and M. Fliess : "A fast identification algorithm for systems with delayed inputs", numéro spécial "Mathematical aspects of modelling and control", Mathematics & Computers in Simulation (IMACS journal), 2006.

[AUT05] L. Belkoura : "Identifiability of a class of systems described by convolution equations", Automatica, vol 41, pp 505-512, mars 2005.

[IJNRC03] Y. Orlov, L. Belkoura, J.P. Richard, M. Dambrine : "Adaptive Identification of Linear Time-Delay Systems", Int. Journal of Robust and Nonlinear Control, Special issue on Time-Delay Systems. vol 13 no 9, Juillet 2003.

[IEEE02] Y. Orlov, L. Belkoura, J.P. Richard, M. Dambrine : "On Identifiability of Linear Time-Delay Systems", IEEE Trans. on Automatic Control. vol 47 no 8, août 2002.

[IMA02] L. Belkoura, Y. Orlov : "Identifiability analysis of Linear delay-differential systems", IMA Journal of Math. Control and Information. vol 19 no 8, pp 73-81, 2002.

Dans des congrès internationaux avec comité de lecture

[MTNS06] L. Belkoura, Michel Fliess, and J-P. Richard, "On line identification of systems with delayed inputs", 17th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems, july 2006, Kyoto, Japan.

[CIFA06] F. Veysset, L. Belkoura, P. Coton et J.-P. Richard, "Modélisation de la dynamique du vol longitudinal d'un avion dans la turbulence par modèles à retards", 4^{ème} Conférence Internationale Francophone d'Automatique, CIFA06, Bordeaux, juin 2006.

[MED06] F. Veysset, L. Belkoura, P. Coton and J.P. Richard, "Delay system identification applied to the longitudinal flight of an aircraft through a vertical gust", 14th Mediterranean Conference on Control and Automation MED06, Ancona, Italy, june 2006.

[TDS06] L. Belkoura and J-P. Richard, "A distribution framework for the fast identification of linear systems with delays", 6th IFAC Workshop on Time Delay Systems, l'Aquila, Italy, july 2006.

[TDS03] L. Belkoura : " Parameters and initial function identifiability of linear delay differential equations", 4th IFAC Workshop on Time Delay Systems, France, Rocquencourt, septembre. 2003.

- [SysId03] L. Belkoura : "Identifiability analysis of a class of systems described by convolution equations", 13th IFAC Symposium on System Identification, Rotterdam, Netherlands, septembre 2003.
- [ECC03] C. Jauberthie, L. Belkoura, L. Denis-Vidal : "Aircraft parameter and delay Identifiability", European Control Conference, Cambridge, UK, août 2003.
- [CDC02] Y. Orlov, L. Belkoura, J.P. Richard, M. Dambrine : "On-Line Identification of Linear Time-Delay Systems", 41st IEEE Conf. On Decision and Control, Las Vegas, décembre 2002.
- [CDC01] Y. Orlov, L. Belkoura, J.P. Richard, M. Dambrine : "Identifiability analysis of Linear Time-Delay Systems", 40th IEEE Conf. On Decision and Control, Florida , USA, décembre 2001.
- [CDC00] Y. Orlov, L. Belkoura, J.P. Richard : "Adaptive Linear Time Delay Systems Identification with Verifiable Identifiability Conditions", 39th IEEE Conf. on Decision and Control, Sydney, Australie, décembre 2000.
- [MTNS00] L. Belkoura, J.P. Richard, M. Dambrine : "Identifiability of delay systems : A distribution approach", 14th Int. Symposium of Mathematical Theory of Networks and Systems, Perpignan, juin 2000.
- [LTDS00] L. Belkoura, J.P. Richard : "Identifiability of linear time delay systems", IFAC Workshop on Linear Time Delay Systems, Ancona, Italie septembre 2000.
- [VSS98] L. Belkoura, M. Dambrine, Y. Orlov, J-P. Richard : "Sliding mode on-line identification of delay systems", 5th Int. Workshop on Variable Structure Systems, Longboat Key (Florida), pp11-13, décembre 1998.
- [SystSc95] A. Nakrachi, P. Hus, L. Belkoura, I. Souchon, A. Voilley : "Modelling and Simulation of a membrane process. Case study : the pervaporation", Int. Conf. on Systems Science, Wroclaw (Poland), septembre 1995.
- [CSE94] L. Belkoura, A. Nakrachi, L. Povy : "Minimum Inertial parameters of robots", Int. Conf. on Systems Engineering, septembre 1994.
- [ICARV92] L. Belkoura, L. Povy : "The use of the augmented link notion to determine the minimum inertial parameters of robots", Int. Conf. on Automation, Robotics and Computer Vision, Singapoure, septembre 1992.
- [ISATA90] L. Belkoura, L. Povy : "Open loop control reliability of a step motor", Int. Symp. on Automotive Technology and Automation, , Vienne, Autriche, décembre 1990.

Contribution à un ouvrage de synthèse

"Identifiability and identification of linear systems with delays" Advances in time-delay systems, Part III : Control, Identification and Observer Design (LNCSE), Springer, K. Gu and S.I. Niculescu, Vol.38, Chap.4, pp123-136, 2004.

SYNTHÈSE DES TRAVAUX SUR L'IDENTIFIABILITÉ ET L'IDENTIFICATION

Sommaire

5.1 Cadre mathématique	25
Ordre d'une distribution	27
Les distributions inversibles	27
Le théorème des supports	28
Multiplication et convolution	29
5.2 Analyse d'Identifiabilité	31
Formulation du problème	31
Le choix de l'entrée	33
Du transfert vers les paramètres	34
5.3 Identification	36
Systèmes à entrée retardée et bloquée	37
Systèmes à entrée et état retardés	44
Extension aux cas temps discrets	45

5.1 Cadre mathématique

Les travaux d'identifiabilité et d'identification des systèmes à retards présentés dans ce mémoire se situent dans un cadre essentiellement linéaire et stationnaire (au moins en ce qui concerne la façon dont interviennent les paramètres à identifier). Dans ce contexte, le formalisme des distributions offre une large souplesse et un cadre unifié dans l'énoncé et le traitement des différentes questions abordées. Ainsi, toute fonction y , vue comme une distribution, est indéfiniment dérivable. Les principales transformations que constituent la dérivation, l'intégration et le retard s'expriment au travers des simples produits de convolution ci-dessous, notés $*$, et dans lesquels l'impulsion de Dirac δ joue le rôle de

l'unité dans le produit de convolution, δ_τ est l'impulsion retardée $\delta(t - \tau)$, et H représente l'échelon unitaire. Tous les signaux considérés par la suite étant à support borné à gauche, on se situe ainsi dans une algèbre de convolution avec unité δ .

$$\dot{y} = \delta^{(1)} * y, \quad \int y = H * y, \quad y(t - \tau) = \delta_\tau * y. \quad (5.1)$$

L'algèbre de convolution des distribution à support compact est isomorphique, via la transformée de Laplace, à l'algèbre multiplicative des fonctions dites de Paley-Wiener, fonctions entières vérifiant certaines conditions de croissance. Ainsi, les développements présentés par la suite peuvent, pour une grande partie, être reformulés dans un cadre opérationnel. Nous maintiendrons cependant le formalisme des distributions pour les équations différentielles avec retards, comme décrit dans [Kamen, 1975] et [Yamamoto, 1989], ce choix étant principalement motivé par les observations suivantes :

- Les phénomènes de retards ainsi que la "mémoire" d'un système sont naturellement et étroitement liés à la notion de support d'une distribution. Nous adapterons par la suite au cas multivariable le Théorème des supports de Titchmarsh-Lions [Hormander, 1990a, Chp. IV] qui généralise les résultats obtenus via les calculs de type exponentiel pour les fonctions entières [O.Diekmann et al., 1995].
- La définition d'entrée suffisamment riche utilisée pour l'analyse d'identifiabilité est formulée dans le domaine temporel et non fréquentiel, et se base sur le caractère non régulier (nonsmooth) des signaux considérés. Les propriétés de ces signaux, et plus particulièrement les singularités de leurs dérivées, apparaissent directement dans le formalisme adopté.
- La condition initiale (de dimension infinie) apparaît de manière explicite dans les équations de fonctionnement décrivant le comportement d'un système, et ce grâce à l'opérateur de troncature défini dans [Yamamoto, 1989]. Des résultats d'identifiabilité de la condition initiale peuvent ainsi être obtenus [Belkoura, 2003]. Cette opération de troncature, différente à son tour de la notion de restriction d'une distribution, n'admet pas d'analogue (à ma connaissance) dans le domaine opérationnel.
- Enfin, dans le cadre de l'identification des paramètres, le formalisme adopté offre une alternative à la formulation opérationnelle ainsi que la possibilité d'envisager directement la multiplication par des fonctions autres que des polynômes en t .

Les sections qui suivent ont pour objet de regrouper les définitions, outils et résultats spécifiques auxquels nous avons fait appel pour l'analyse d'identifiabilité et l'identification.

Notations : L'espace des fonctions C^∞ à support dans un ouvert Ω est noté $C_0^\infty(\Omega)$, et on appelle distribution toute forme linéaire et continue sur $C_0^\infty(\Omega)$. Les distributions forment un espace vectoriel noté $\mathcal{D}'(\Omega)$. Le complémentaire du plus grand ouvert dans lequel une distribution T est nulle est par définition le support de T , noté $\text{supp } T$. Lorsque T est à valeur vectorielle, $\text{supp } T$ sera l'union des supports de chacune de ses entrées. \mathcal{D}'_+ (respectivement \mathcal{E}') est l'espace des distributions à support borné à gauche (respectivement

compact). Tous les signaux considérés par la suite seront vus comme des éléments de \mathcal{D}'_+ . Ce dernier forme une algèbre de convolution avec identité δ . Sans risque de confusion, si $T \in (\mathcal{E}')^{n \times m}$, on notera $T(s)$, $s \in \mathbb{C}$, la matrice $n \times m$ de fonctions entières obtenue par transformée de Laplace.

Ordre d'une distribution

La notion d'ordre d'une distribution peut être introduite en faisant appel à l'entier k pour lequel une distribution est également identifiable à un élément du dual de $C_0^k(\Omega)$. Nous utiliserons ici une définition d'interprétation plus simple mais également plus générale dans le sens où elle introduit la notion d'ordre négatif. Ces définitions sont dues à [Zemanian, 1965, p162] et [Yamamoto, 1984].

Une distribution sera dite d'ordre r (> 0) si elle agit continûment sur les fonctions de classe C^r mais non sur les fonctions de classe C^{r-1} . Ainsi, les mesures qui ne seraient pas des fonctions sont d'ordre 0. À l'inverse, une fonction ψ sera dite d'ordre $-r$, et on notera $\text{ord } \psi = -r$, si r est le plus petit entier tel que $d^r \psi / dt$ est une mesure. La définition ci-après, due à [Yamamoto, 1984] et dans laquelle P^{-1} désigne l'inverse de convolution, est étendue au cas matriciel en posant $\text{ord } P := \max \text{ord } p_{ij}$.

Définition 1 Une distribution P sera dite de type normal lorsque $\text{ord } P^{-1} = -\text{ord } P$.

De part l'effet régularisant du produit de convolution, et pour une distribution Q de dimensions compatibles, la relation $\text{ord}(P * Q) \leq \text{ord } P + \text{ord } Q$ sera toujours satisfaite. À l'inverse, si P est de type normal, la réciproque est aisément établie en considérant $Q = P^{-1} * (P * Q)$. Il en résulte ainsi :

$$\text{ord}(P * Q) = \text{ord } P + \text{ord } Q, \quad \text{pour } P \text{ de type normal.} \quad (5.2)$$

Les distributions d'ordre r de la forme $\delta^{(r)}$ + termes de plus bas degré sont toutes de type normal [Yamamoto, 1984]. Cette propriété sera exploitée en identifiabilité et permettra notamment de s'affranchir d'une formulation explicite des opérateurs à identifier.

Les distributions inversibles

Les résultats de cette section sont pour l'essentiel extraits des travaux de [Ehrenpreis, 1955, 1956, 1960] dans lesquels le problème de la division dans divers espaces est étudié. Le résultat principal utilisé pour l'analyse d'identifiabilité permet d'établir si une fonction entière correspond effectivement à la transformée de Laplace d'une distribution à support compact.

Définition 2 Une distribution $u \in \mathcal{E}'$ est dite inversible dans \mathcal{D}' (dans le sens de Ehrenpreis) si l'application $\mathcal{D}' \ni v \rightarrow u * v \in \mathcal{D}'$ est surjective.

De telles distributions sont parfois qualifiées de complètement inversibles et, en particulier, si u admet une inverse de convolution dans \mathcal{D}' , alors elle est inversible au sens de cette définition. On note pour cela \mathcal{O} l'espace de toutes les fonctions entières et $E' \subset \mathcal{O}$ la

transformée de Laplace de \mathcal{E}' . E' est ainsi l'espace des fonctions entières (de la variable s) de type exponentiel et à croissance polynomiale en $\Re(s)$. On notera également dans ce paragraphe $\tilde{u} \in E'$ la transformée de Laplace de $u \in \mathcal{E}'$.

Théorème 3 [Ehrenpreis, 1960] *les propositions suivantes sont équivalentes :*

1. $u \in \mathcal{E}'$ est inversible.
2. Pour toute fonction entière $g \in \mathcal{O}$, si $\tilde{u}g \in E'$, alors $g \in E'$.

Il est par exemple établi que toute distribution à support discret (sans terme distribué) est inversible. A l'inverse, un exemple de distribution non inversible est donné par les éléments de $u \in C_0^\infty$ (voir aussi [Hormander, 1990b]). Ces derniers n'admettent par ailleurs pas d'inverse de convolution car quelque soit v , $u * v$ est une fonction indéfiniment dérivable qui ne saurait être égale à δ .

Le Théorème des supports

Comme mentionné précédemment, les phénomènes de retards sont étroitement liés à la notion de support d'une distribution et ce paragraphe montre comment les supports s'articulent dans le cadre de la convolution. Le théorème de Titchmarsh-Lions [Hormander, 1990a, Chp. IV] établit que pour deux distributions $u, v \in \mathcal{E}'$,

$$\text{conv } u * v = \text{conv } u + \text{conv } v, \quad (5.3)$$

expression dans laquelle $\text{conv } w$ désigne l'enveloppe convexe du support de w , tandis que la somme du membre de droite représente l'ensemble

$$\{x + y; x \in \text{conv } u, y \in \text{conv } v\}. \quad (5.4)$$

Ce résultat est adapté aux distributions à valeurs vectorielles et permet d'établir un lien étroit entre les propriétés d'identifiabilité obtenues et certaines notions relatives à la controllabilité des systèmes.

Théorème 4 [Belkoura, 2005] *Pour $A \in (\mathcal{E}')^{n \times n}$, les propositions suivantes sont équivalentes :*

1. $\text{conv det } A = n \text{ conv } A$,
2. $\text{conv } A * B = \text{conv } A + \text{conv } B$, $B \in (\mathcal{E}')^{n \times \bullet}$.

Le point 2 ci-dessus permet notamment de savoir dans quelle mesure les "mémoires s'additionnent" lorsque l'on considère l'action combinée de deux opérateurs différentiels à retard. Il permet également de caractériser des réalisations minimales dans le sens où toute autre réalisation nécessiterait un retard plus important dans sa formulation. Précisons ici que le déterminant ci-dessus s'entend au sens de la convolution, de même que le produit $n \text{ conv } A$ est pris au sens de la somme de n termes, cette somme étant définie en (5.4).

Multiplication et convolution

Dans une perspective d'identification des paramètres, ce paragraphe fournit une formulation alternative à l'approche opérationnelle initiée dans les travaux de [Fliess and Sira-Ramirez, 2003]. Dans ce cadre, l'identification des retards apparaît comme un prolongement naturel de la démarche algébrique citée.

Contrairement aux fonctions, la multiplication de deux distributions (disons α et T) n'est pas toujours définie. Si α est une fonction continue et T une mesure, ou encore si α et T ont des supports singuliers disjoints, le produit αT a un sens (le support singulier est défini comme le complémentaire du plus grand ouvert Ω tel que la restriction de T à $\mathcal{D}(\Omega)$ coïncide avec une fonction C^∞). Par ailleurs, cette opération conserve toujours un sens lorsque l'un des termes (disons α) est une fonction indéfiniment dérivable. Dans ce dernier cas, le Théorème ci-dessous fournit un résultat permettant une identification aisée des paramètres ainsi que des termes de retards lorsque les entrées considérées sont constantes par paliers.

Théorème 5 [Schwartz, 1966] *Si T a un support compact K et est d'ordre (nécessairement fini) m , $\alpha T = 0$ chaque fois que α et ses dérivées d'ordre $\leq m$ s'annulent sur K .*

Les exemples ci-dessous illustrent ce résultat dans lequel T est représentée par δ_τ ou $a\delta^{(1)} + b\delta_\tau$. La première ligne montre l'annihilation de T par un polynôme tandis que la seconde utilise des fonctions exponentielles dans lesquelles nous avons noté $\lambda = e^{\gamma\tau}$.

$$(t - \tau)\delta_\tau = 0, \quad t^2(t - \tau)(a\delta^{(1)} + b\delta_\tau) = 0, \quad (5.5)$$

$$(1 - \lambda e^{-\gamma t})\delta_\tau = 0, \quad (1 - e^{-\gamma t})^2(1 - \lambda e^{-\gamma t})(a\delta^{(1)} + b\delta_\tau) = 0. \quad (5.6)$$

Dans les deux cas, on observera que le retard τ ne se manifeste plus uniquement en terme d'argument, mais apparaît également comme coefficient, explicitement dans les cas des polynômes et via le terme $\lambda = e^{\gamma\tau}$ dans le cas des fonctions exponentielles. Cette remarque trouvera son application dans l'identification du paramètre de retard τ .

Deux autres propriétés pratiques pour la suite (car synthétiques) sont celles dans lesquelles interviennent simultanément le produit de convolution et la multiplication par le polynôme t^n ou l'exponentielle $e^{-\gamma t}$, dans le cas où l'une des distributions (S ou T) est à support compact. La première relation ci-après fournit la formulation dans le cas du polynôme suivie d'exemples d'applications dans lesquels nous avons noté $z_i = t^i y$,

$$t^n (S * T) = \sum_{k=0}^n C_n^k (t^k S) * (t^{n-k} T), \quad (5.7)$$

$$\Rightarrow t^3 y^{(2)} = -6z_1 + 6z_2^{(1)} - z_3^{(2)}, \quad (5.8)$$

$$\Rightarrow t^2 \dot{y}(t - \tau) = \delta_\tau * [\tau^2 z_0^{(1)} - 2\tau(z_0 - z_1^{(1)}) - 2z_1 + z_2^{(1)}]. \quad (5.9)$$

De même, pour la fonction exponentielle $e^{-\gamma t}$ (en notant également $z = e^{-\gamma t} y$ et $\lambda = e^{\gamma\tau}$), nous aurons,

$$e^{-\gamma t} (S * T) = e^{-\gamma t} S * e^{-\gamma t} T, \quad (5.10)$$

$$\Rightarrow e^{-\gamma t} y^{(2)} = \gamma^2 z + 2\gamma z^{(1)} + z^{(2)}, \quad (5.11)$$

$$\Rightarrow e^{-\gamma t} \dot{y}(t - \tau) = \lambda^{-1} \delta_\tau * (\dot{z} + \gamma z). \quad (5.12)$$

Les membres de droite des exemples (5.8) et (5.11) fournissent les décompositions correspondants aux formules d'intégration par partie, bien que par la suite les intégrations pourront être avantageusement remplacées par tout transfert causal et ce, dans une perspective de filtrage. Les relations (5.9) et (5.12) montrent comment les membres de gauche peuvent être reformulés en combinaisons de fonctions possédant toutes le même argument, tout en faisant apparaître explicitement ou implicitement les termes de retard à identifier par la suite.

5.2 Analyse d'Identifiabilité

Dans le cadre des équations différentielles fonctionnelles, les premiers travaux d'identifiabilité ont été menés dans [Nakagiri and Yamamoto, 1995, Lunel, 1997, 2001]. Les résultats obtenus sont alors limités aux cas sans entrée et se basent sur une analyse spectrale des opérateurs étudiés. Les spectres obtenus étant généralement de dimension infinie, la mise en oeuvre pratique des tests d'identifiabilité n'est pas immédiate.

Dans le cas non retardé, de nombreuses approches et définitions de l'identifiabilité d'un modèle peuvent être formulées, et le lecteur pourra avantageusement consulter la Thèse [Thomassin, 2005], ainsi que les ouvrages [Ljung, 1987, Walter and Pronzato, 1994]. Parmi ces définitions, l'identifiabilité structurelle, indépendante des conditions expérimentales, se base sur l'unicité du vecteur des paramètres θ dans les expressions des fonctions de transfert des systèmes, ce que l'on peut formuler (de manière très synthétique) par :

$$T(s, \theta) = T(s, \theta^*) \quad \Rightarrow \quad \theta = \theta^*. \quad (5.13)$$

Une autre approche, algébrique et plus récente [Fliess and Sira-Ramirez, 2003], définit (entre autres) l'identifiabilité linéaire du vecteur des paramètres θ par l'intermédiaire d'une relation de la forme :

$$P\theta = Q, \quad \det P \neq 0, \quad (5.14)$$

dans laquelle les matrices P ($r \times r$) et Q ($r \times 1$) sont formées à partir des entrées/sorties du système. Dans les deux cas, l'objet de l'analyse d'identifiabilité est un système dynamique sans retard et le vecteur de paramètres est généralement de dimension finie. Ce ne sera pas nécessairement le cas dans cette section où il sera question, pour les systèmes à retards discrets et/ou distribués, d'identifiabilité structurelle, assurant l'injectivité du transfert défini en (5.13), mais également d'identifiabilité pratique car conduisant de manière constructive à un choix judicieux des entrées.

Formulation du problème

Dans notre démarche concernant les systèmes linéaires à retards, l'identifiabilité porte sur l'unicité des opérateurs différentiels et à retard $P \in \mathcal{E}'^{n \times n}$ et $Q \in \mathcal{E}'^{n \times q}$ utilisés dans la description entrée/sortie ci-dessous et conduisant au transfert $T \in \mathcal{D}_+^{n \times q}$. L'identifiabilité de la condition initiale (une fonction) ne sera pas considérée par la suite mais peut être abordée en se basant sur les mêmes outils [Belkoura, 2003].

$$P * y = Q * u, \quad T = P^{-1} * Q. \quad (5.15)$$

La formulation explicite des opérateurs, en particulier le nombre et la nature discrète ou distribuée des retards, n'est pas requise et seuls sont fixés l'ordre et l'enveloppe convexe des supports, comme décrit ci-après. Dans un certain sens, la question de la discernabilité des modèles comme décrit dans [Berthier et al., 1996] est également abordée.

$$\text{ord } P = n, \quad P(0) = I, \quad \text{conv}[P, Q] = [0, h]. \quad (5.16)$$

La seconde condition ci-dessus ne traduit qu'une normalisation évitant d'aboutir à une unicité "à une matrice régulière près". En outre, la condition relative au support pourra

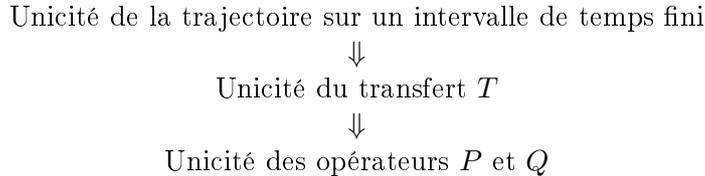
être relaxée dans le cas de retards discrets. On se situe ainsi dans la classe de systèmes décrits par (5.15) et accompagnée de la donnée du couple $(n, h) \in (\mathbb{N}, \mathbb{R}_+)$ satisfaisant (5.16). De manière alternative, nous utiliserons également la représentation du modèle sous la forme :

$$R * w = 0, \quad R = [P, -Q], \quad w = \begin{pmatrix} y \\ u \end{pmatrix}. \quad (5.17)$$

Cette description correspond à l'approche comportementale ("behavioral") des systèmes décrits par des équations de convolution [Vettori and Zampieri, 2000]. Cette approche est souvent abordée en considérant la transformée de Laplace $R(s)$ qui permet de définir le comportement ("behaviour") \mathcal{B} consistant en l'ensemble de toutes les trajectoires $w \in \mathcal{E}^{n+q}$, où \mathcal{E} représente l'espace des fonctions $C^\infty(\mathbb{R}, \mathbb{R})$ et pour lesquelles $w \in \mathcal{B} = \ker_{\mathcal{E}} R(s)$ (voir par exemple [Polderman and Willems, 1998] pour les équations différentielles ordinaires et [Habets, 1999] pour les systèmes plus généraux sur anneaux). Ici encore, l'approche convolutionnelle nous permet de considérer directement des trajectoires $w \notin \mathcal{E}^{n+q}$ sans avoir recours à d'autres notions telles que celle de solution au sens faible. Plus généralement, R pourra être pris de la forme :

$$R = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m R_{ij} \delta_{h_j}^{(i)} + R(\theta), \quad (5.18)$$

comprenant ainsi les équations différentielles ordinaires, les systèmes de type retardé ou neutre, avec ou sans retard distribué (voir par exemple en page 59 pour un exemple de type neutre). Pour les besoins de l'analyse d'identifiabilité, on notera par la suite \hat{y} toute autre solution générée à partir d'une paire notée (\hat{P}, \hat{Q}) et de l'entrée u , de même que \hat{T} et \hat{R} désigneront les transfert et représentation correspondants. Cette analyse s'effectuera en deux étapes décrites ci-dessous et prend comme point de départ la trajectoire du système sur un intervalle de temps fini.



La première phase fait intervenir la notion d'entrée suffisamment riche assurant qu'à deux transferts différents correspondent nécessairement deux trajectoires différentes. A son tour, la seconde phase fournit des conditions suffisantes sur P et Q (ou R) permettant une représentation unique du transfert T . Ces deux phases font l'objet des paragraphes ci-dessous et se basent sur les définitions suivantes :

Définition 6 Une entrée u sera dite suffisamment riche s'il existe $\omega_u > 0$ tel que $\hat{T} = T$ résulte de $\hat{y}|_{[0, \omega_u]} = y|_{[0, \omega_u]}$.

Définition 7 Le système décrit par (5.15) sera dit identifiable si, pour toute entrée u suffisamment riche, $\hat{y}|_{[0, \omega_u]} = y|_{[0, \omega_u]}$ entraîne $\hat{R} = R$.

Dans les définitions ci-dessus, la notation ω_u est utilisée pour souligner la dépendance de l'intervalle d'analyse $[0, \omega_u]$ vis à vis de l'entrée u et, plus particulièrement, de son support, comme précisé par la suite.

Le choix de l'entrée

La caractérisation d'entrées assurant, le cas échéant, l'identifiabilité d'un système à partir de sa trajectoire sur un intervalle de temps fini, est réalisée dans le domaine temporel et non fréquentiel. La réduction de l'analyse à un intervalle de temps fini est assurée en considérant une u entrée à support dans un compact $[0, E(u)]$, dans lequel $E(u) = \sup\{t \in \text{supp } u\}$. L'utilisation des propriétés des supports $\text{supp } u * v \subset \text{supp } u + \text{supp } v$ pour des éléments de \mathcal{D}'_+ permet alors aisément d'établir que l'égalité des trajectoires sur l'intervalle $[0, \omega_u]$ avec $\omega_u > E(u) + (n+1)h$ implique l'égalité sur toute la droite réelle. Le caractère "riche" de l'entrée u peut être réalisé à partir de fonctions polynomiales par intervalles, ces polynômes étant d'ordre inférieur ou égal à un entier K fixé. On désignera pour cela par $\Lambda_u = \{s_0, \dots, s_L\}$ les bornes de ces intervalles (ou en d'autres termes le support singulier de u), et par $\sigma_u^k(s_l)$ le saut de $u^{(k)}$ en s_l , comme illustré sur la figure 5.1 dans le cas d'une seule entrée. L'ensemble des sauts de $u^{(k)}$ est regroupé dans la matrice réelle $q \times L$

$$\sigma_u^k = [\sigma_u^k(s_0), \dots, \sigma_u^k(s_L)], \quad k = 0, \dots, K+1. \quad (5.19)$$

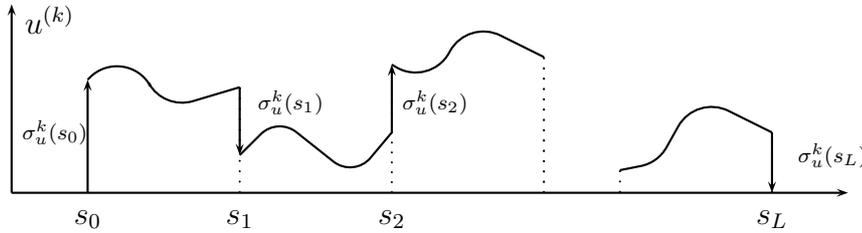


FIG. 5.1 – Discontinuités de la fonction $u^{(k)}$.

Sous réserve qu'une matrice polynomiale (en s) formée à partir de ces sauts de dérivées forme un système linéaire de rang plein, et que ces discontinuités soient suffisamment espacées, l'entrée considérée est suffisamment riche. Plus précisément, nous avons la

Proposition 8 *Toute fonction (à valeurs dans \mathbb{R}^q) polynomiale par morceaux, à support compact, et vérifiant les deux conditions ci-dessous, constitue un entrée suffisamment riche dans le sens de la Définition 6 :*

$$1. \text{rank} \sum_{i=0}^K \sigma_u^{k-i} s^i = q, \quad 2. s_l - s_{l-1} > (n+1)h, \quad l = 1, \dots, L. \quad (5.20)$$

Dans la cas d'une seule entrée ($q = 1$), ces deux conditions peuvent être relaxées.

Le cas d'une seule entrée est en effet trivial puisque l'égalité $(T - \hat{T}) * u = 0$ entraîne $(T - \hat{T}) * u^{(k+1)} = 0$ et que, $u^{(k+1)}$ ayant un support discret, elle est inversible au sens défini en page 27. Plus généralement, la réalisation la plus simple consiste en une entrée constante par morceaux et aux discontinuités judicieusement choisies. Cette définition étend aux systèmes à retards et à plusieurs entrées une classe de signaux suffisamment riches décrits dans [Miller and Michel, 1990]. À noter enfin que dans le cas de retards discrets, la condition (5.20-2) ci-dessus peut être remplacée par une condition portant sur la commensurabilité des retards [Orlov et al., 2003]. Dans les deux cas, une connaissance à priori du retard total h ou des retards discrets est nécessaire.

Du transfert vers les paramètres

L'unicité du transfert T étant maintenant supposée, ce paragraphe examine dans quelle mesure ce dernier permet de définir une unique représentation R comme celles fournies en (5.17) (5.18). Notons que l'égalité de deux transferts T et \hat{T} se traduit également par

$$\hat{R} = \alpha * R, \quad \alpha = \hat{P} * P^{-1}, \quad (5.21)$$

de sorte que le système étudié sera identifiable si α se réduit à l'unité δI . La technique permettant de définir dans quel cadre cette identité est réalisée fait appel aux notions d'ordre d'une distribution, de distribution inversible et au Théorème des supports décrits plus haut. Le résultat principal s'énonce alors comme suit.

Théorème 9 [Belkoura, 2005] *Si $R = [P, -Q]$ vérifie les deux conditions (5.22) ci-dessous, alors $\text{supp } \alpha = \{0\}$.*

$$1. \text{rank } R(s) = p, \quad s \in \mathbb{C}, \quad 2. \text{conv det } P = n \text{ conv } R. \quad (5.22)$$

Si de plus P est de type normal, alors le système considéré est identifiable.

La condition (5.22-1) ci dessus caractérise la contrôlabilité spectrale d'un système et suffit dans le cas des systèmes linéaires sans retard, la condition (5.22-2) étant alors toujours satisfaite. Dans le cas de systèmes décrits par un opérateur de type normal P avec retards distribués de la forme :

$$P = \delta' I + \sum_{i=0}^M P_i \delta_{h_i} + \sum_{i=1}^M P_{-i} \delta'_{h_i} + P_c(\theta). \quad (5.23)$$

et pour lequel les supremum des supports vérifient $E(Q) < E(P)$, il est aisé d'établir, à partir des travaux de [Yamamoto, 1989], que ces deux points forment les conditions nécessaires et suffisantes de contrôlabilité approchée dans le sens où l'espace atteignable est dense dans l'espace d'état. Notons également, et indépendamment des questions d'identifiabilité, que les seuls points (5.22-1) et (5.22-2) établissent que pour toute autre représentation \hat{R} , $\text{conv } \hat{R} = \text{conv } \alpha + \text{conv } R$, ce qui montre que toute autre description du système nécessite une mémoire de taille supérieure ou égale à h .

Exemple : Un exemple d'application est fourni par le système multivariable suivant :

$$\dot{y}_1(t) = y_1(t) + \int_{-1}^0 y_2(t + \theta) d\theta, \quad (5.24)$$

$$\dot{y}_2(t) = y_1(t - 1) + y_2(t) + \int_{-1}^0 u(t + \theta) d\theta. \quad (5.25)$$

Ce dernier admet la représentation $R * w = 0$ avec $w = (y_1, y_2, u)^T$ et

$$R = [P, -Q] = \left[\begin{array}{cc|c} \delta' - \delta & -\pi & 0 \\ -\delta_1 & \delta' - \delta & -\pi \end{array} \right], \quad (5.26)$$

expression dans laquelle nous avons noté $\pi(t) = H(t) - H(t - 1)$ (H =échelon unitaire) avec $\text{supp } \pi = [0, 1]$. Cette expression montre clairement que $\text{conv } R = [0, 1]$. Par ailleurs, la distribution P est de type normal et satisfait :

$$\text{conv det } P = \text{conv}(\delta'' - 2\delta' + \delta - \delta_1 * \pi,) = [0, 2], \quad (5.27)$$

La condition (5.22-2) du Théorème 9 est ainsi remplie. Enfin, $R(s)$ s'exprime par

$$R(s) = \begin{bmatrix} s-1 & -(e^{-s}-1)/s & 0 \\ -e^{-s} & s-1 & -(e^{-s}-1)/s \end{bmatrix}, \quad (5.28)$$

de laquelle la condition (5.22-1) de rang plein est aisément établie en considérant les seconde et troisième colonnes pour $s \neq 0$ ainsi que les deux premières colonnes pour $s = 0$. Le système considéré est donc identifiable pour toute entrée suffisamment riche. Cette entrée étant scalaire, un simple échelon de durée (ω_u) finie arbitraire répond au cadre de la définition 6. ■

5.3 Identification

Peu de travaux dans la littérature se sont penchés sur l'identification en ligne des systèmes continus à retards. Quelques résultats significatifs ont été obtenus par une approche du type moindres carrés modifiés dans [Ren et al., 2005], et par une technique adaptative basée sur les fonctionnelles de Lyapounov et le principe d'invariance de Krasovkii-Lasalle dans [Belkoura et al., 2004] et [Orlov et al., 2003]. Ces approches sont cependant asymptotiques et présentent de faibles rapidités de convergence, les rendant par nature difficilement exploitables dans un contexte de commande en ligne. Une synthèse de l'approche adaptative est décrite dans l'article "Identifiability and identification of linear systems with delays" figurant au chapitre "Sélection de publications".

L'objet de cette section est de présenter une approche non asymptotique permettant une identification simultanée des retards et des paramètres. Cette technique s'inscrit dans la droite ligne de l'approche algébrique initiée par les travaux de [Fließ and Sira-Ramirez, 2003] dans le cadre des systèmes linéaires par rapport aux paramètres, non nécessairement linéaires vis à vis des entrée-sorties, mais sans retards. Il s'agit ici d'une approche à temps continu, préservant ainsi la nature physique des signaux et ne nécessitant pas l'hypothèse restrictive de retards égaux en durée à un nombre entiers de périodes d'échantillonnage. Quelques éléments permettant une extension aux systèmes à temps discret seront par ailleurs présentés en fin de section.

Ces recherches sur l'identification par une approche algébrique se poursuivent actuellement au sein du l'équipe-projet ALIEN de l'INRIA-Futurs (et ailleurs), groupe en phase d'élargissement à quatre membres de notre équipe SyNeR à la suite des convergences et complémentarités des centres d'intérêt scientifique.

Bien qu'admettant une formulation équivalente dans le domaine opérationnel (i.e. par transformée de Laplace), l'approche présentée dans ce mémoire utilise le formalisme des distributions, pour les raisons évoquées en page 26 et afin de conserver une notation cohérente à l'ensemble de ce document. Cette équivalence se résume pour l'essentiel aux correspondances ci dessous dans lesquelles, pour l'exemple, le signal considéré $w(t)$ est supposé nul aux temps négatifs et discontinu à l'origine :

Domaine opérationnel $\omega(s)$		Domaine temporel $w(t)$
$s\omega(s) - w(0)$	\Leftrightarrow	$dw/dt - w(0)\delta$
$d\omega/ds$	\Leftrightarrow	$-tw(t)$
$\omega(s) - \omega(s + \gamma)$	\Leftrightarrow	$(1 - e^{-\gamma t})w(t)$

La procédure d'identification s'articule autour des trois étapes ci-dessous :

1. Dérivation : cette opération a pour effet de réduire à des impulsions de Dirac, éventuellement dérivées et retardées, les perturbations dites structurées ainsi que des entrées spécifiques apparaissant dans l'équation de fonctionnement du système.
2. Multiplication par une fonction \mathcal{C}^∞ : c'est une application directe du Théorème de Schwartz (page 29), permettant l'annihilation des singularités formées lors de la

dérivation, comme le montrent les exemples fournis en (5.5) et (5.6). Ces fonctions sont choisies polynomiales et/ou exponentielles afin de permettre une décomposition du type intégration par parties, prévue dans la phase ultérieure. Dans un contexte bruité, notre choix sera plutôt orienté vers les multiplications des signaux par des fonctions exponentielles de la forme $(1 - e^{-\gamma t})$ (convergeant vers 1 contrairement à t) qui, outre le fait d'offrir une pondération γ ajustable, évitent l'amplification du bruit.

3. Intégration : dans le cas d'entrées spécifiques (par exemple bloquées), cette dernière étape permet de s'affranchir de toute dérivation et conduit au système d'équations final, à partir duquel les paramètres sont estimés. Dans le cas d'entrée retardée quelconque ou de retard sur l'état, un produit de convolution supplémentaire est envisagé afin de s'affranchir des arguments retardés.

Le cas des entrées spécifiques (retardées et bloquées) et sans retard sur l'état du système se distingue des autres situations par la simplicité d'implémentation de l'algorithme d'identification, mais également par sa fréquence en terme d'applications potentielles. La sous-section suivante lui est consacrée et reprend pour partie les développements publiés dans [Belkoura et al., 2006] et [Belkoura and Richard, 2006].

Les deux premiers exemples sont traités en simulation afin d'illustrer le potentiel de cette nouvelle approche tandis que le troisième exemple considère une étude expérimentale pour laquelle l'identification simultanée des paramètres et du retard est requise. Une discussion sur la robustesse y est alors engagée. D'autres exemples sont enfin présentés, élargissant notamment les cadres des entrées spécifiques à des situations non linéaires ainsi qu'au cas des frottements secs. On rappelle pour mémoire que H désignera par la suite l'échelon unité et $H^k y$ la convolution itérée $H * H * \dots * H * y$, ce qui revient, au facteur $1/(k-1)!$ près, à effectuer k intégrations successives.

Systèmes à entrée retardée et bloquée

Exemple introductif

Ce premier exemple académique précise les étapes citées plus haut et illustre l'aspect non asymptotique de l'approche. On considère un système du premier ordre soumis à un biais (perturbation) constant d'amplitude γ_0 , et pour lequel l'entrée u est également supposée constante, d'amplitude u_0 , et retardée du paramètre τ à identifier. La prise en compte de la condition initiale $y(0)$ dans l'équation de fonctionnement ainsi qu'une dérivation à l'ordre 1 se traduit respectivement par les deux relations ci-après :

$$\dot{y} + ay = y(0)\delta + \gamma_0 H + bu(t - \tau) \quad (5.29)$$

$$\ddot{y} + a\dot{y} = y(0)\delta^{(1)} + \gamma_0\delta + bu_0\delta_\tau \quad (5.30)$$

On supposera dans un premier temps le coefficient a connu. En vertu du Théorème de Schwartz, l'annihilation du membre de droite de cette dernière équation est réalisée au moyen d'une multiplication par toute fonction α satisfaisant $\alpha(0) = \alpha'(0) = 0$, $\alpha(\tau) = 0$. Le choix du polynôme $\alpha(t) = t^2(t - \tau)$ répond à cet objectif, ce qui formulé légèrement différemment se traduit aussi par :

$$\begin{aligned} t^3 (\ddot{y} + a\dot{y}) &= bu_0 \tau^3 \delta_\tau \\ t^2 (\ddot{y} + a\dot{y}) &= bu_0 \tau^2 \delta_\tau \end{aligned} \Rightarrow t^3 (\ddot{y} + a\dot{y}) = \tau t^2 (\ddot{y} + a\dot{y}). \quad (5.31)$$

Il s'agit ici d'égalités de distributions singulières qui ne sauraient être interprétées en tout point de l'axe réel, auquel cas nous aurions $\tau = t$. Une simple intégration de l'équation de droite conduit cependant à une égalité de fonctions rendant τ accessible. Néanmoins, afin de s'affranchir de toute dérivation dans l'algorithme d'identification, $k \geq 2$ intégrations (i.e. une convolution avec H^k) seront nécessaires pour former la relation :

$$\tau H^k (t^2 y^{(2)} + a t^2 y^{(1)}) = H^k (t^3 y^{(2)} + a t^3 y^{(1)}). \quad (5.32)$$

Compte tenu des propriétés des supports $\text{supp } H^k \delta_\tau \subset (\tau, \infty)$, les premières égalités obtenues en (5.31) montrent que les fonctions obtenues $H^k (t^q y^{(2)} + a t^q y^{(1)})$, $q = 2, 3$, sont nulles sur l'intervalle $(0, \tau)$, rendant le retard non identifiable par l'équation (5.32) sur ce segment. A l'inverse, comme fonctions continues et non nulles pour $t > \tau$, le retard sera identifiable sur tout l'intervalle (τ, ∞) et fourni par :

$$\tau = \frac{H^k (t^3 y^{(2)} + a t^3 y^{(1)})}{H^k (t^2 y^{(2)} + a t^2 y^{(1)})}, \quad t > \tau. \quad (5.33)$$

La réalisation effective des termes formés ci-dessus s'effectue selon le principe de l'intégration par parties, bien que dans un contexte bruité l'intégration (convolution avec H) pourra être avantageusement remplacée par tout transfert (filtre) strictement propre. La figure ci-dessous fournit les éléments de cette décomposition par parties dans laquelle $z_i = t^i y$, ainsi qu'un schéma partiel de réalisation.

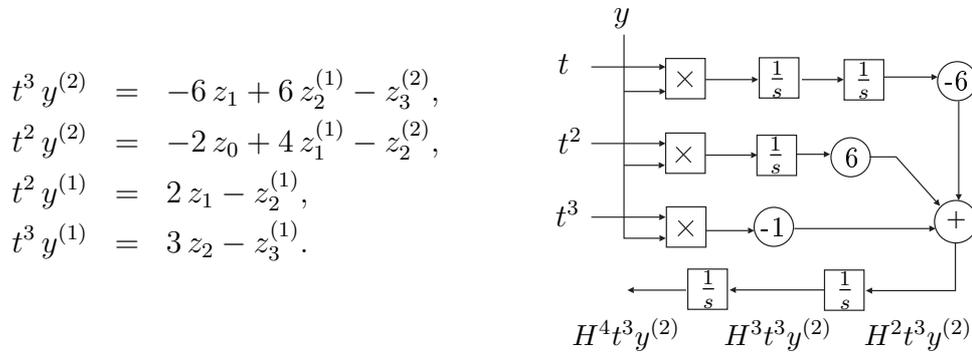


FIG. 5.2 – "Préintégration" par parties et schéma partiel de réalisation

Du fait de la non identifiabilité du retard sur l'intervalle $(0, \tau)$, ce dernier peut être maintenu à 0 tant que les numérateur ou dénominateur formés en (5.33) n'ont pas atteint de valeur non nulle significative. Notons enfin que cette algorithme ne requiert que les valeurs du coefficient a et de la fonction y . Dans le cas d'un coefficient a également inconnu, la même approche peut être envisagée en considérant le système d'équations linéaire en $(\tau, a\tau, a)$ formé à partir de différentes valeurs du nombre d'intégrations k :

$$(H^k t^2 y^{(2)}, H^k t^2 y^{(1)}, -H^k t^3 y^{(1)}) \begin{pmatrix} \tau \\ a\tau \\ \tau \end{pmatrix} = H^k t^3 y^{(2)}. \quad (5.34)$$

Pour les raisons d'identifiabilité citées plus haut, ce système d'équations peut ne pas être consistant pour $t < \tau$. La figure ci-dessous fournit les résultats en simulation des algorithmes (5.32) et (5.34) pour les valeurs $y(0) = 0.3$, $a = 2$, $\tau = 0.6$, $\gamma_0 = 2$, $b = 1$, $u_0 = 1$. Dans le cas de l'identification simultanée, et contrairement au cas du retard seul, des pertes locales d'identifiabilité peuvent apparaître (perte de rang) comme suggéré sur la figure de droite pour $t \approx 1.5$ s. Dans un contexte réel, une autre approche sera envisagée pour l'identification conjointe du retard et des paramètres.

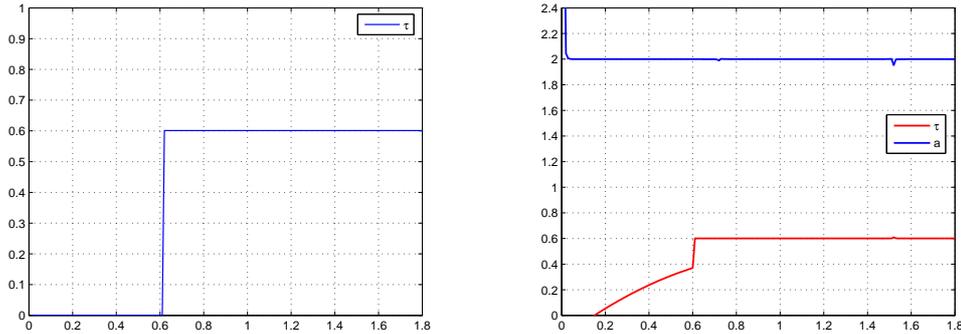


FIG. 5.3 – Identification du retard τ et du couple (a, τ)

Notons pour conclure cet exemple que d'autres combinaisons de paramètres, incluant la condition initiale, peuvent être envisagées pour l'identification et ce, au moyen de fonctions α différentes. Ainsi par exemple, retard, paramètre a et condition initiale $y(0)$ peuvent être identifiés en considérant la fonction $\alpha(t) = t(t - \tau)$. Seul le paramètre b associé au terme retardé de l'équation (5.29) nécessite une connaissance explicite du retard.

Systèmes avec série de retards

Du point de vue applicatif, cet exemple est à rapprocher de la problématique des retards de transmission Maître-Esclave dans lesquels le Maître génère des commandes à intervalle de temps régulier kT , ces dernières agissant de manière retardée au niveau de l'Esclave, aux instants $h_k := \tau_k + kT$.

Structurellement, le retard de l'exemple introductif a été identifié car il correspondait également à un instant de commutation (discontinuité) du second membre de l'équation de fonctionnement. En présence de plusieurs retards, différentes options sont offertes pour adapter la démarche précédente.

1. Envisager la multiplication par $t^2(t - h_1) \cdots (t - h_K)$, si K est fini. Cette technique peut alors mener à un système d'équations linéaire de grande taille dont la consistance n'est assurée que pour $t > h_K$.
2. Effectuer une identification récursive dont l'inconvénient majeur serait le risque de propagation des erreurs.
3. Envisager une identification "locale" si on admet que deux commutations successives sont séparées dans le temps par un retard incompressible $h_{k+1} - h_k > \Delta$.

Nous nous limiterons dans cet exemple au troisième cas de figure et considérons un processus du second ordre régi par l'équation :

$$\sum_{k=0}^2 a_i y^{(i)} = b \sum_{k=0}^{\infty} u_k \chi_k, \quad (5.35)$$

dans laquelle χ_k désigne la fonction caractéristique de l'intervalle $(\tau_k + kT, \tau_{k+1} + (k+1)T)$. Par souci de concision, la condition initiale ainsi que les perturbations structurées ne sont pas prises en compte et seuls les retards sont à identifier. Dérivation, multiplication par t et t^2 et convolution avec H^3 conduisent aux identités suivantes :

$$D := H^3 t \sum_{k=0}^2 a_i y^{(i+1)} = b \sum_{k=0}^{\infty} \sigma_k h_k H^3 \delta_{h_k}, \quad (5.36)$$

$$N := H^3 t^2 \sum_{k=0}^2 a_i y^{(i+1)} = b \sum_{k=0}^{\infty} \sigma_k h_k^2 H^3 \delta_{h_k}, \quad (5.37)$$

dans lesquelles les σ_k représentent les sauts des discontinuités du second membre de (5.35) aux instants h_k . La déduction analogue au cas traité en (5.31) n'est plus ici envisageable si on considère la convolution avec des échelons. Il suffirait par contre que le support de H^3 soit contenu dans $(0, \Delta)$ pour pouvoir déduire un ensemble d'égalités donnant accès aux instants de commutation h_k . Ainsi, par exemple :

$$H(s) = \frac{1 - e^{-\Delta s/3}}{s} \Rightarrow \begin{array}{ll} N = D = 0 & \text{sur } \mathbb{R} \setminus (\tau_k, \tau_k + \Delta), \\ h_k = kT + \tau_k = N/D & \text{sur } (\tau_k, \tau_k + \Delta). \end{array} \quad (5.38)$$

Les retards τ_k peuvent ainsi être identifiés localement, maintenus à leur valeur tant que les termes N ou D n'ont pas repris de nouvelles valeurs significatives. Un exemple d'application de cette démarche est illustré sur la simulation suivante dans laquelle condition initiale non nulle et perturbation constante ont été considérées, avec $a_0 = 2$, $a_1 = 1$, $a_2 = 1$, $y(0) = 1.3$, $\dot{y}(0) = -2.3$, $\gamma_0 = 0.5$, $\Delta = 1$.

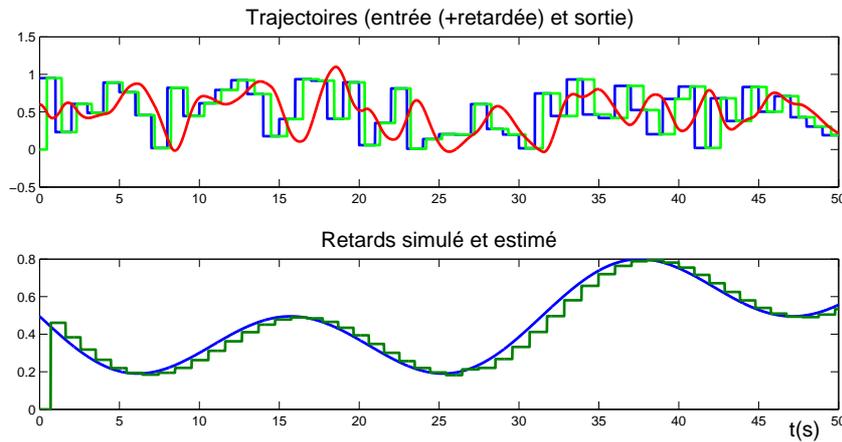


FIG. 5.4 – Identification d'une série de retards.

Etude expérimentale

L'application envisagée dans ce paragraphe porte sur la réponse indicielle du processus thermique Feedback PT326, bien connu de la communauté scientifique et enseignante.

L'identification est basée sur le choix à priori des modèles d'ordre 1 et 2 retardés. Les résultats sont présentés pour les deux modèles, mais par souci de concision, les développements qui suivent sont limités au second ordre. Pour la raison évoquée plus haut (convergence vers 1 et coefficient γ ajustable), le choix des fonctions exponentielles est retenu et la multiplication de l'équation de fonctionnement est réalisée avec la fonction

$$\alpha = (1 - e^{-\gamma t})^k (1 - \lambda e^{-\gamma t}), \quad (5.39)$$

avec $\gamma = 2$, $k = 2$ (resp. 3), et le paramètre $\lambda = e^{\gamma\tau}$ contenant le retard à identifier. Dérivation, multiplication et intégrations successives permettent de former le système d'équations

$$(A(t) - \lambda B(t)) \begin{pmatrix} a_2 \\ a_1 \\ 1 \end{pmatrix} = 0, \quad \text{avec} \quad \begin{cases} A_{i,j} = H_i (1 - e)^3 y^{(4-j)}, \\ B_{i,j} = H_i e (1 - e)^3 y^{(4-j)}, \end{cases} \quad (5.40)$$

dans lequel $e := e^{-\gamma t}$ et H_i , $i = 1, \dots, 3$, représentent des filtres linéaires de degré relatif ≥ 3 . Il s'agit ici d'un problème aux valeurs propres généralisées dans lequel le retard à identifier correspond à une des valeurs propres du système, tandis que les coefficients a_i sont obtenus à partir du vecteur propre normalisé correspondant. Le choix de cette formulation valeur/vecteur propre est motivé ci-après.

Contrairement à l'exemple introductif, il est à noter que, comme solution de $\det(A(t) - \lambda B(t)) = 0$, l'identification du retard est indépendante des valeurs prises par les coefficients a_i . Cette observation est d'autant plus importante que les résultats d'identification montrent une rapidité de convergence du retard identifié bien plus marquée que celle des coefficients cités. La figure ci-dessous retrace l'analyse spectrale, en fonction du temps, des modèles d'ordre un et deux. Ces analyses sont effectuées avec le logiciel MATLAB et sa fonction `polyeig`.

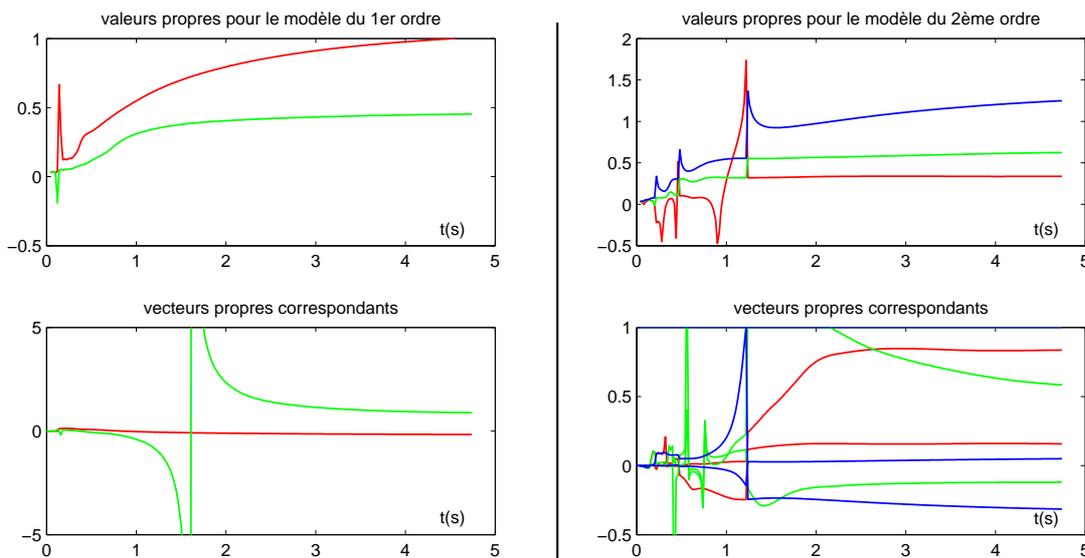


FIG. 5.5 – Analyse spectrale de modèles d'ordre 1 et 2.

Contrairement au modèle du second ordre (colonne de droite), l'analyse à l'ordre 1 ne permet pas de dégager de valeur propre constante, confirmant ainsi l'inadéquation du modèle au processus. À l'inverse, les valeurs propres obtenues à l'ordre 2 montrent clairement une valeur qui se stabilise rapidement à la valeur de 0,34 et correspondant au retard estimé. Par ailleurs, les coefficients a_i obtenus pour les autres solutions correspondent à des transferts instables à écarter. La figure ci-après compare les résultats d'identification des modèles d'ordre un et deux avec la réponse expérimentale. Comme dans l'exemple introductif, le coefficient associé à l'entrée, i.e. le gain, n'est pas identifié par cette approche mais déduit de mesures statiques.

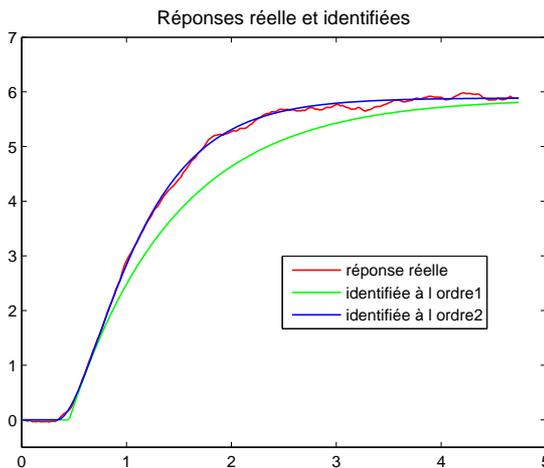


FIG. 5.6 – Comparaisons des réponses indicielles réelle et simulées sur la base des coefficients identifiés aux ordres 1 et 2. Au modèle du second ordre correspond le transfert estimé :

$$G(s) \simeq \frac{5.9 e^{-0.34s}}{0.16 s^2 + 0.84 s + 1}$$

Discussion soulevée par ces essais et premières perspectives : Comme le suggèrent les analyses ci-dessus, le terme de retard gagne à être identifié séparément et plusieurs aspects peuvent être considérés en vue d'une amélioration des performances globales :

- Dans le contexte plus bruité, et afin d'accélérer la convergence des estimations des coefficients a_i , le choix des filtres H_i utilisés en (5.40) ainsi que celui de la pondération γ nécessiterait une analyse plus fine.
- Le choix en ligne du couple valeur/vecteur propre constant reste à développer. Une première analyse basée sur la stationnarité du couple recherché est à l'étude.
- En complément du point précédent, une formulation redondante du problème (5.40) est également envisageable en considérant plus de filtres (lignes) que de colonnes. Néanmoins, et contrairement à un problème du type moindres carrés ordinaire, cette solution se traduirait par un problème de faisceaux matriciels rectangulaires dont la résolution actuelle est nécessairement hors ligne. Ce type de résolution se base sur la notion d' ϵ -spectre pouvant être défini par $\Lambda_\epsilon = \{z \in \mathbb{C} : \|(A - zB)v\| \leq \epsilon, \|v\| = 1\}$. Le lecteur pourra consulter [Boutry, 2003] ainsi que les références incluses sur ce sujet relativement récent en analyse numérique.

Autres exemples d'applications

Transferts parallèles : l'exemple qui suit montre comment le retard ainsi que certains paramètres peuvent être identifiés dans le cas d'une action simultanée de deux transferts

dont un seul est retardé. Le transfert ci-dessous modélise de manière simplifiée les effets instationnaires (C_z) induits par une rafale de vent verticale sur le vol longitudinal d'un avion :

$$y = \left[\frac{k_{w0} + k_{w1}s}{1 + \tau_w s} + \frac{k_{t0} + k_{t1}s}{1 + \tau_t s} e^{-\tau s} \right] w, \quad (5.41)$$

dans lequel w est la rafale de vent (entrée indicelle), tandis que les différents coefficients traduisent les effets de la voilure et de la portance sur le transfert global. Le retard correspond quant à lui au décalage aile-empennage de l'avion [Veysset et al., 2006b]. Le problème aux valeurs propres correspondant se traduit par une expression de la forme :

$$(A_0 + \lambda A_1 + \lambda^2 A_2 + \lambda^3 A_3) \begin{pmatrix} \tau_w \tau_t \\ \tau_w + \tau_t \\ 1 \end{pmatrix} = 0, \quad (5.42)$$

dans laquelle $\lambda = e^{-\gamma\tau}$. Les coefficients k_\bullet de (5.41) ne sont pas identifiés par cette approche. Le choix des fonctions exponentielles est retenu avec $\gamma = 0.2$ et les différentes lignes sont déduites par intégrations successives.

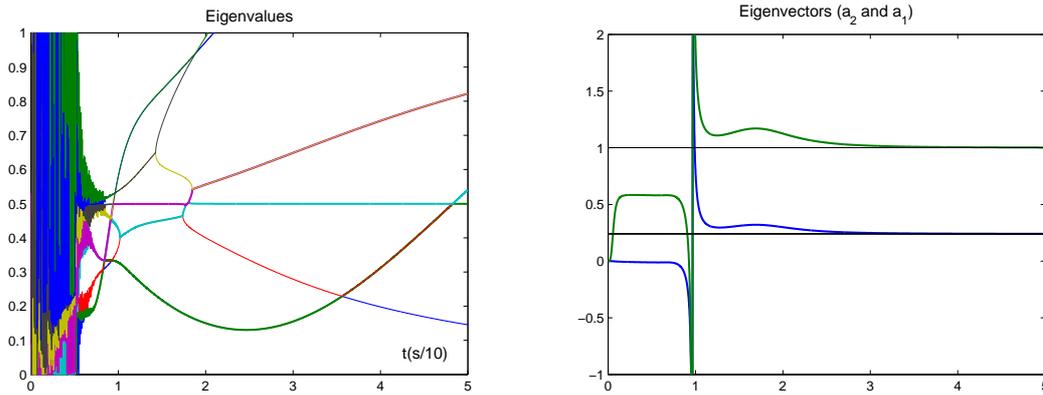


FIG. 5.7 – Identification du transfert induit par une rafale verticale.

Cette simulation montre clairement une valeur propre constante correspondant au terme de retard recherché, tandis que la figure de droite retrace l'évolution des coefficients $a_2 = \tau_w \tau_t$ et $a_1 = \tau_w + \tau_t$, ces derniers étant marqués par la traversée d'une singularité au voisinage de $t \approx 1$ s .

Système non linéaire sujet à des frottements secs : Bien que présentant une formulation simple et académique, l'objectif de ce paragraphe est double : d'une part il souligne que l'extension à une certaine classe de systèmes non linéaires en l'état est immédiate, dans la mesure où rien n'est changé dans la méthode, si ce n'est qu'à la mesure y est substituée une autre mesure $f(y)$. D'autre part, il montre comment appréhender les singularités dépendant implicitement du temps. L'exemple considéré est celui du balancement d'une tige rigide soumise à des frottements secs, dont le comportement est régi par l'équation :

$$\ddot{y} + a_1 \dot{y} + a_0 \sin y = b \operatorname{sgn}(\dot{y}) + \varphi_0, \quad (5.43)$$

dans laquelle φ_0 (d'ordre 1 et de support $\{0\}$) regroupe les termes relatifs à la condition initiale. Une difficulté rencontrée dans ce genre de situation réside dans l'estimation de la dérivée \dot{y} intervenant dans la fonction signe. Dans cet exemple, la dérivation de la contribution du terme de frottement se traduit par la fonction composée $2b \delta \circ \dot{y}$. En désignant par $\{\tau_i\}$ les instants de passage de \dot{y} par 0, cette dernière quantité s'exprime également par $2b \sum \tau_i$ et on se retrouve, au terme $\sin y$ près (au lieu de y) dans la situation analogue au problème des séries de retards. Dans une zone de fonctionnement dans laquelle les balancements sont suffisamment espacés, la convolution avec un filtre H de degré relatif ≥ 3 et de support $\subset (0, \Delta)$ avec $\Delta < \tau_{i+1} - \tau_i$, conduit à la formulation :

$$[A_4^6 - \tau_i A_3^5] \Theta = 0 \quad \text{sur} \quad (\tau_i, \tau_i + \Delta), \quad (5.44)$$

$$A_3^5 \Theta = 0 \quad \text{sur} \quad \mathbb{R} \setminus (\tau_i, \tau_i + \Delta), \quad (5.45)$$

dans laquelle $\Theta = (1, a_1, a_0)^t$ est le vecteur des paramètres à identifier, tandis que les lignes des matrices A_k^{k+3} sont issues des techniques précédentes de multiplication/intégration, soit explicitement $H(1 - e)^k [y^{(3)}, y^{(2)}, (\sin y)^{(1)}]$. Des premiers résultats en simulation confortent l'approche théorique et des essais sur le banc réel du Laboratoire sont à l'étude.

Systèmes à entrée quelconque et état retardés

Les limitations pour les systèmes avec entrée et état retardés sont de deux natures. La première est relative à la mise en oeuvre en ligne de la procédure d'identification tandis que la seconde est de nature plus fondamentale :

- Les retards pourront être identifiés au moyen du calcul de produits de convolution, ce qui peut constituer un obstacle aux développements en ligne. Cet obstacle peut être levé s'il n'y a de retard sur l'état et si le choix de l'entrée est libre.
- Dans le cas d'un système avec état retardé, et sauf cas particulier, la condition initiale est une fonction par nature inconnue (support $\subset (-\tau, 0)$ inconnu). En vertu du Théorème de Schwartz, l'annihilation de cette condition initiale pourrait se faire via la multiplication par une fonction \mathcal{C}^∞ à support compact a priori suffisamment large. Malgré cet "à priori", cette technique ne se prête pas au calcul par intégration par partie de la phase ultérieure d'identification.

Dans le contexte état retardé, nous nous limiterons par la suite aux cas particuliers pour lesquels la condition initiale est une fonction nulle, voire polynomiale. Une perspective pour le cas plus général sera néanmoins citée. Dans ces conditions, les étapes de dérivation, multiplication et intégration restent effectives. Elles sont simplement complétées par un produit de convolution permettant de s'affranchir des retards apparaissant au niveau des arguments. La technique repose sur l'utilisation de la propriété multiplication/convolution citée en page 29 et dont nous reprenons les exemples :

$$e^{-\gamma t} \dot{y}(t - \tau) = \lambda^{-1} \delta_\tau * (\dot{z} + \gamma z) \quad \text{avec} \quad \lambda = e^{-\gamma \tau}, \quad z_i = e^{-\gamma t} y,$$

$$t^2 \dot{y}(t - \tau) = \delta_\tau * [\tau^2 z_0^{(1)} - 2\tau (z_0 - z_1^{(1)}) - 2z_1 + z_2^{(1)}] \quad \text{avec} \quad z_i = t^i y.$$

Dans ces expressions, les membres de gauche mettant en jeu des fonctions possédant des arguments différents ont été reformulés en terme de signaux z_i possédant tous le même

argument, tout en faisant apparaître de manière explicite les termes de retard.

L'exemple ci-dessous illustre cette approche dans laquelle la propriété citée plus haut se réduit au plus simple cas, à savoir, $e^{-\gamma t} w(t - \tau) = e^{-\gamma \tau} [e^{-\gamma(\bullet)} w(\bullet)](t - \tau)$. On considère un système du second ordre à entrée retardée et soumis à un bouclage à retour unitaire :

$$\sum_{i=0}^2 a_i y^{(i)} = u(t - \tau) - y(t - \tau) := \delta_\tau * \Delta, \quad (5.46)$$

$$\Rightarrow e \sum_{i=0}^2 a_i y^{(i)} = \lambda^{-1} \delta_\tau * e\Delta, \quad (5.47)$$

avec les notations $e = e^{-\gamma t}$ et $\Delta = u - y$. Les conditions initiales ainsi que les perturbations structurées sont supposées nulles. La convolution croisée de ces deux équations conduit à une relation sans argument retardé :

$$([\Delta * ey^{(2)}, \Delta * ey^{(1)}, \Delta * ey] - \lambda^{-1}[e\Delta * y^{(2)}, e\Delta * y^{(1)}, e\Delta * y]) \begin{pmatrix} a_2 \\ a_1 \\ 1 \end{pmatrix} = 0. \quad (5.48)$$

Il suffit ensuite de procéder, comme précédemment, à des intégrations ou filtrages successifs pour former un problème de valeurs propres généralisées. Signalons que l'élimination du facteur commun $\delta_\tau * (\dots)$ lors du passage de (5.46-5.47) à (5.48) ne doit pas faire oublier qu'il s'agit d'une égalité de fonctions nulles pour $t < \tau$.

La figure ci-après valide en simulation les développements théoriques présentés dans cette section. Contrairement au cas des systèmes avec entrée bloquée dans lesquels le dernier produit de convolution n'a pas lieu d'être, les essais réalisés à l'heure actuelle montrent des propriétés de robustesse relativement faibles. Cet aspect constitue une priorité pour les développements ultérieurs.

Le cas de la condition initiale : La présence d'une condition initiale constante ou polynomiale peut être surmontées "à coups de dérivations successives", la réduisant au même titre que les perturbations structurées à des singularités de Dirac, annihilables par des polynômes ou exponentielles. Dans le cas d'une fonction arbitraire, une autre approche peut être envisagée, abandonnant cependant la perspective d'un calcul en ligne car mettant en jeu des produits de convolutions de fonctions non causales (i.e. non nulle pour $t < 0$). Cette approche pourrait se baser sur la propriété suivante [Schwartz, 1966] : " Le produit de convolution d'une distribution à support compact et d'une exponentielle (notée E) est une exponentielle proportionnelle". Ainsi par exemple, avec la multiplication par t :

$$(t\varphi_0) * E = k_1 E \quad \text{et} \quad (t^2\varphi_0) * E = k_2 E, \quad (5.49)$$

ce qui réduit ainsi la dimension infinie de la condition initiale aux coefficients réels $k_1, k_2 \in \mathbb{R}$ à identifier conjointement aux paramètres du système.

Extension aux cas temps discrets

Un des intérêts de l'approche développée au sein de l'équipe ALIEN, reprise et étendue dans nos récents travaux aux systèmes à retards, est de préserver la nature physique "temps

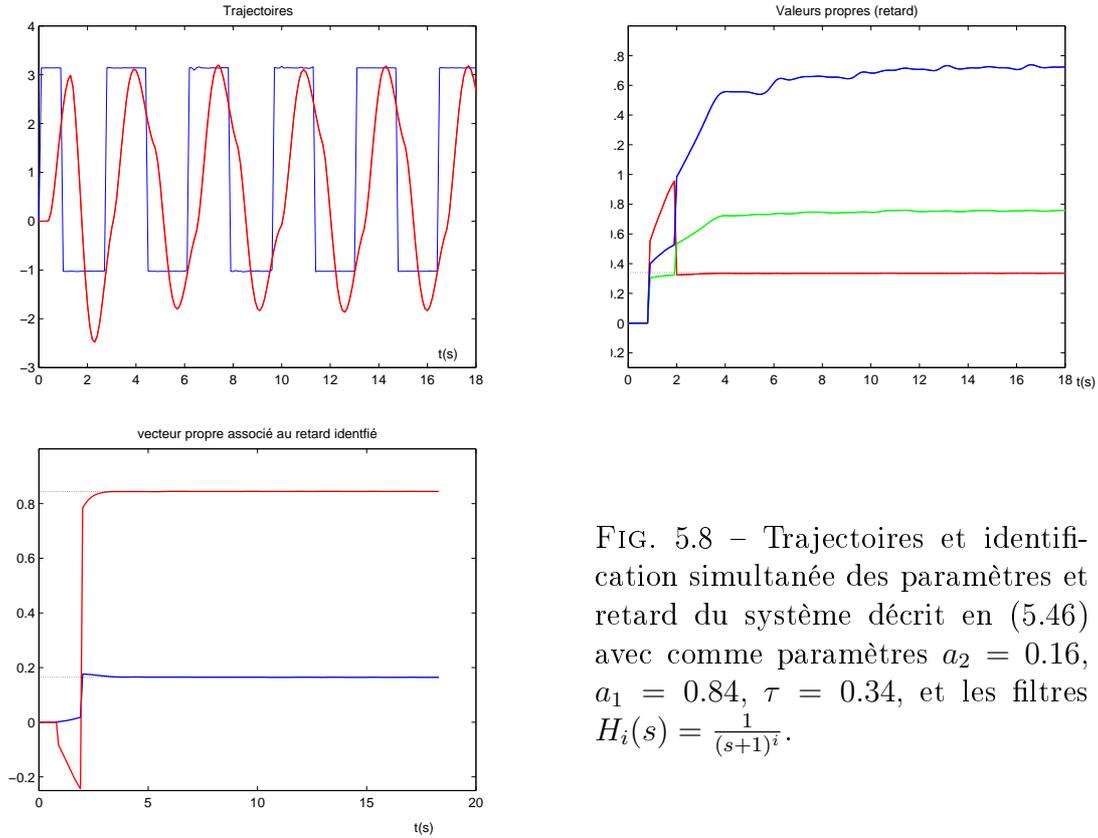


FIG. 5.8 – Trajectoires et identification simultanée des paramètres et retard du système décrit en (5.46) avec comme paramètres $a_2 = 0.16$, $a_1 = 0.84$, $\tau = 0.34$, et les filtres $H_i(s) = \frac{1}{(s+1)^i}$.

continu" des signaux. Il est cependant remarquable de noter qu'elle reste également très adaptée aux systèmes de nature temps discret, bien que la problématique en terme de retards soit légèrement différente. L'objet de ce paragraphe sera simplement de souligner cette propriété en mettant en évidence les similarités et spécificités soulevées par le cas discret.

L'approche générale ne nécessite pas d'adaptation particulière hormis les quelques points suivants : tout d'abord, la nature des signaux qui sont considérés ici sous la forme de peignes de Dirac, soit par définition des distributions singulières. Dans ce contexte également, les procédures de multiplication par une fonction $\alpha \in C^\infty$ trouvent tout leur sens, en vertu de la propriété $\alpha \delta_\tau = \alpha(\tau) \delta_\tau$. Ainsi par exemple, un signal y sera défini par :

$$y = \sum_{k=0}^{\infty} y_k \delta_k \quad \text{pour lequel} \quad t^m y = \sum_{k=0}^{\infty} k^m y_k \delta_k. \quad (5.50)$$

Dérivation et intégration discrètes $[(\delta - \delta_1)$ et $(\delta - \delta_1)^{-1}]$ remplacent les opérations en continu, la première permettant notamment de réduire un peigne constant à une singularité isolée, tandis que la seconde (itérée) fournit un nombre d'équations suffisant à l'identification de l'ensemble des paramètres. Les formules associant multiplication et convolution, à savoir celles de la forme $t^n(S * T)$ ou $e^{-\gamma t}(S * T)$ reste inchangées, donnant par exemple :

$$t^2 y(t - r) = t^2(\delta_r * y) = \delta_r * [r^2 y + 2r ty + t^2 y]. \quad (5.51)$$

Notons que, dans cette relation, le retard r n'est pas nécessairement entier. Comme dans le cas continu, la réalisation du membre de droite met en jeu les termes homogènes en leur argument ty, t^2y , soit les mesures ky_k et k^2y_k .

Une spécificité du cas discret réside dans le fait qu'une "fonction" discrète de support compact $\{0, 1, \dots, r\}$ peut être annulée par le polynôme $t(t-1) \cdots (t-r)$ ou par l'exponentielle $(1-e)(1-\lambda e) \cdots (1-\lambda^r e)$. Dans le cas continu, cette opération n'est pas envisageable car l'annihilation d'une fonction à support compact requiert une fonction C^∞ à support également compact qui ne se prête pas aux procédures d'intégration par parties. Cette difficulté a notamment été rencontrée dans le cas des systèmes à état retardé et pour lesquels la condition initiale était supposée polynomiale. Cette spécificité peut être mise à profit comme l'illustre l'exemple simple suivant.

Exemple : perturbation périodique Considérons un système du premier ordre soumis à une perturbation γ périodique, de période r connue mais d'éléments $\gamma_0, \dots, \gamma_{r-1}$ inconnus. Nous conserverons ici le formalisme utilisé tout au long de ce mémoire, bien qu'une interprétation dans le domaine opérationnel utilisant l'opérateur de retard $z^{-k} = e^{-ks}$ soit tout aussi souple. La première étape de dérivation n'est pas nécessaire dans ce cas de figure, et il vient :

$$(\delta + a\delta_1) * y = y_0\delta + bu + \gamma * (\delta + \delta_r + \delta_{2r} + \cdots), \quad (5.52)$$

$$\gamma = \gamma_0\delta + \cdots + \gamma_{r-1}\delta_{r-1},$$

↓

$$(\delta - \delta_r) * [(\delta + a\delta_1) * y - bu] = (\delta - \delta_r)y_0 + \gamma\delta. \quad (5.53)$$

Ainsi, perturbation et condition initiale peuvent être annihilées par le polynôme (par exemple) $t(t-1) \cdots (t-r)$, permettant ainsi l'identification des coefficients a, b , en considérant les intégrations successives :

$$(\delta - \delta_1)^{* -k} * \{t(t-1) \cdots (t-r)[(\delta - \delta_r) * [(\delta + a\delta_1) * y - bu]]\} = 0 \quad (5.54)$$

■

L'identification des retards peut également être envisagée dans ce cadre discret. Son intérêt se justifie dans des applications mettant en jeu des mesures suffisamment espacées dans le temps pour ne pas être assimilées à des phénomènes continus. Il en est ainsi par exemple de la problématique d'estimation du retard dans un bief de rivière [Thomassin, 2005]. Une approche intéressante dans ce problème consisterait en une étude comparative des estimations de retards obtenues par les travaux cités dans cette référence et par la technique développée dans ce mémoire, aussi bien dans le cadre continu que discret.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Principales contributions

Par son cadre algébrique (algèbre de convolution) et fonctionnel, le formalisme des distributions appliqué au domaine de l'Automatique offre de nouveaux outils ainsi que des réelles perspectives. Loin d'en avoir épuisé le potentiel, ce mémoire en illustre les premiers développements dans le domaine de l'analyse et l'identification des systèmes à retards.

Ainsi, la notion de support associé au produit de convolution fournit un cadre naturel pour l'analyse des systèmes à retards, dans la mesure où le support d'un opérateur et la mémoire du système associé sont étroitement liés. Nous avons déjà exploité cet aspect, via le Théorème des supports, dans le cadre des analyses d'identifiabilité.

Par ailleurs, ces outils permettent d'appréhender de manière simple les singularités (discontinuités d'un signal ou de ses dérivées) intervenant fréquemment dans le fonctionnement des systèmes dynamiques. Toujours dans le cadre de l'analyse l'identifiabilité, cela nous a permis une caractérisation simple et constructive d'entrées dites suffisamment riches permettant de conclure, le cas échéant, à l'identifiabilité d'un système.

Des résultats d'identifiabilité de la condition initiale peuvent également être obtenus à l'aide de ce formalisme [Belkoura, 2003]. Ceux-ci sont obtenus grâce à une opération de troncature, différente de la notion de restriction d'une distribution, et n'admettant pas d'analogue (à ma connaissance) dans le domaine opérationnel.

L'extension aux systèmes à retards des méthodes algébriques développées dans les travaux de [Fliess and Sira-Ramirez, 2003], et notamment l'usage de la multiplication, fournit une méthode simple et innovante d'identification pour nombre de processus retardés. L'apport principal de nos travaux réside ici en l'identification des retards.

De par la formulation spectrale adoptée, les retards peuvent être identifiés indépendamment des paramètres du système (valeurs propres). Au delà d'une alternative à la formulation opérationnelle, le formalisme adopté offre la possibilité d'envisager directement la multiplication par des fonctions autres que des polynômes en t , offrant ainsi plus de souplesse pour de futurs développements relatifs aux problèmes de robustesse. Toute cette étude est confortée par des analyses en simulation, mais également par des résultats expérimentaux.

Verrous scientifiques et recherche fondamentale

Comme dans toute recherche, beaucoup d'aspects restent encore ouverts, et l'amélioration des performances des algorithmes construits constitue notre première priorité. Cet objectif s'inscrit notamment dans les orientations pour les recherches de l'équipe projet ALIEN de l'INRIA-FUTURS. Son dépassement nécessite l'examen approfondi des deux premiers points cités ci-dessous, le troisième étant une extension naturelle de la thématique développée. Enfin, d'autres pistes décrites par la suite et sortant du cadre des retards vont être évoquées.

Analyse numérique

Dans la formulation spectrale adoptée pour l'identification des retards, une méthode efficace permettant la sélection en ligne des bons paramètres reste à développer. Une première analyse basée sur la stationnarité du couple retard-paramètres recherché se heurte à des problèmes de robustesse, aspect considéré dans le paragraphe suivant. Une autre approche basée sur une formulation redondante peut être envisagée et ce, en considérant plus de filtres (lignes) que de colonnes. Il en résulte un problème d'identification de la forme :

$$(A - zB)v = 0, \quad (6.1)$$

dans lequel les matrices rectangulaires $m \times n$, $m > n$, A et B dépendent des trajectoires du système, tandis que z et v informent respectivement sur le retard et les paramètres du système. Contrairement aux systèmes sans retard pour lesquels l'ajout de nouvelles lignes peut être appréhendé par une simple technique de moindres carrés (ou de ses variantes), (6.1) "has the awkward feature that most matrices have no eigenvalues at all, whilst for those that do, an infinitesimal perturbation will in general remove them" ¹ [Wright and Trefethen, 2001]. Le contournement de cette difficulté soulève la problématique relativement récente en analyse numérique des pseudo-spectres associés aux faisceaux matriciels rectangulaires, la notion d' ϵ -spectre pouvant être défini par :

$$\Lambda_\epsilon = \{z \in \mathbb{C} : \|(A - zB)v\| \leq \epsilon, \|v\| = 1\}. \quad (6.2)$$

Le lecteur pourra également consulter [Boutry, 2003] ainsi que les références incluses sur ce sujet. Dans l'état actuel des connaissances, ce type de résolution est difficilement envisageable en ligne.

Filtrage et analyse fonctionnelle

Bien que de nature non asymptotique, l'accélération de la convergence des algorithmes d'estimation peut être envisagée. En particulier, les calculs effectués au voisinage de l'origine du temps restent relativement fragiles du fait du faible contenu informatif sur le comportement du système. Toujours en terme de robustesse, et plus particulièrement dans les cas des systèmes avec entrée quelconque et état retardés ², une analyse plus fine des produits

¹(6.1) a la fâcheuse propriété que la plupart des matrices ne possèdent aucune valeur propre, tandis que pour celles qui en possèdent, des perturbations infimes les éliminent.

²même si la majeure partie des applications ne fait intervenir que des retards sur l'entrée, à de rares exceptions telle celle relative à l'aérodynamique.

de convolution formés avec des termes ne s'apparentant pas à des filtres est à envisager. Dans un cadre plus général, une problématique nouvelle et non triviale de traitement du signal (filtrage) est mise à jour, via des expressions de la forme :

$$H_k * [\alpha_i \times g_j], \quad i = 1, 2, j = 1, \dots, n, k = 1, \dots, m. \quad (6.3)$$

dans lesquelles H_k sont des filtres à déterminer, α_i des fonctions \mathcal{C}^∞ et g_j des termes dépendant des trajectoires du système. L'optimalité, dans un sens à préciser, des termes H_k assurant un filtrage simultané des produits $\alpha_i \times g_j$ nécessite un examen approfondi. En outre, la contrainte de régularité imposée aux fonctions α_i candidates à la multiplication gagnerait à être assouplie, offrant alors aux algorithmes plus de souplesse quant au choix des pondérations.

Systèmes non stationnaires et/ou non linéaires

L'identification des systèmes avec retards variables constitue un fort enjeu scientifique et industriel. Plus particulièrement, les retards mis en jeu dans les applications de communications sont en général soumis à de fortes variations ou gigues. Des premiers résultats appliqués aux retards constants par morceaux figurent dans ce mémoire, et leur extension aux retards à variation continue constitue une perspective de recherche naturelle. Une plate-forme expérimentale formée de deux systèmes mécaniques articulés et complétée par un dispositif de retour d'effort (prévu fin 2006) est déjà mise en place au sein du LAGIS.

Sur le même registre, l'identification de retards bidirectionnels constitue également un enjeu majeur. La problématique soulevée concerne alors l'identification des systèmes retardés et non stationnaires, comme l'illustre l'exemple simple suivant d'un système du premier ordre, avec une entrée u retardée d'argument $\varphi(t) = t - \tau_1(t)$, et dont la mesure m est également retardée et d'argument $\psi(t) = t - \tau_2(t)$,

$$\begin{cases} y + a \dot{y} = u \circ \varphi \\ m = y \circ \psi \end{cases} \Rightarrow m + (a/\dot{\psi}) \dot{m} = u \circ \varphi \circ \psi. \quad (6.4)$$

A noter que le cas d'un retard non constant sur la mesure ($\dot{\psi} \neq 1$) révèle le caractère non stationnaire du problème à analyser, soulevant au passage la question ouverte de l'identifiabilité simultanée des paramètres et retards. Enfin, les extensions aux systèmes multivariés avec accès partiel aux variables d'états, ainsi qu'aux systèmes non linéaires (continus ou discrets) très brièvement cités dans ce mémoire, sont autant de sujets qu'il reste à considérer.

Au delà des retards

L'analyse et l'exploitation des singularités dépasse le cadre des systèmes à retards étudiés dans ce mémoire. Une première application relative à l'identification en présence de frottements secs a déjà été évoquée dans le cadre de la Thèse de Samer Riachy, et une recherche commune avec l'équipe Cémodyne de l'ENSAM de Lille sur les machines outils à dynamique élevée est à l'étude. Au delà de ces premières pistes, d'autres voies de recherche semblent prometteuses, car elles aussi liées aux phénomènes de sauts :

- Pour les Systèmes Hybrides, un des atouts majeurs du formalisme adopté réside dans le fait que des phénomènes essentiels tels que les discontinuités sont naturellement pris en compte lors des opérations de dérivation. Cette propriété pourrait être mise à profit dans l'analyse d'une classe de systèmes connue sous le nom de "jump-linear systems" [Vidal et al., 2002] et régie par des équations différentielles continues avec paramètres discontinus.
- La détection de rupture caractérisée par une variation "violente" d'un signal constitue un axe de recherche programmé au sein du projet ALIEN. Dans la même optique, et avec les outils dont nous disposons pour l'estimation des dérivées de signaux bruités, l'analyse d'image ou de scènes dynamiques entre dans ce cadre et a fait l'objet de premiers travaux publiés [Fliess et al., 2005]. Ces résultats pourraient être renforcés par une recherche transversale, commune avec des équipes de recherche en Vision, et permettraient de dégager de nouveaux outils d'analyse et de décision. Des premiers contacts et discussions avec les chercheurs de l'équipe Vision du LAGIS sont engagés à cet effet.

Perspectives en recherche appliquée

Outre les projets et programmes cités en page 15 pour lesquels des résultats sont attendus en terme d'identification et ce, préalablement à la réalisation de lois de commande, les perspectives d'application à court et moyen terme de ce nouvel outil sont nombreuses. Hormis la maîtrise des phénomènes de retards inhérents aux problèmes de transmission, problématique citée plus haut dans le cadre des retards variables ou bidirectionnels, quelques axes privilégiés peuvent être soulignés :

- En Aéronautique, et en complément du travail de thèse de François Veysset cité dans ce mémoire, de nouveaux essais en vol de maquette viennent enrichir la base d'informations nécessaires à l'identification et à la validation du modèle. Les premiers résultats encourageants obtenus en identification permettent d'envisager une poursuite de la collaboration avec l'ONERA. Par ailleurs, ces nouvelles mesures offrent une occasion supplémentaire de "mise à l'épreuve" des techniques d'estimations de l'équipe-projet ALIEN, offrant une alternative au traditionnel filtrage de Kalman.
- Pour le Diagnostic, le potentiel d'identification en ligne permet d'aborder sous un angle nouveau l'analyse des pannes. Cet aspect est déjà abordé au sein du projet ALIEN de l'INRIA-FUTURS dans le cas de systèmes non retardés [Join et al., 2004]. Dans le cas de retards constants, rencontrés dans de nombreux de procédés industriels, nos techniques ALIEN existantes peuvent sans difficultés être adaptées aux systèmes retardés.

Dans un cadre plus large, et contrairement aux paramètres constants dont le maintien à une valeur fixée traduit généralement un régime de fonctionnement dit normal, la présence de retards naturellement variables soulève d'autres questions. Ici encore, une recherche transversale impliquant notamment les chercheurs relevant des domaines du diagnostic et de la sûreté de fonctionnement (par exemple l'équipe SFSD du LAGIS) devrait être soutenue.

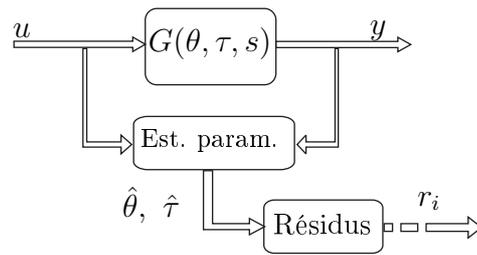


FIG. 6.1 – Détection de défauts à base de modèles.

Organisation et stratégie prévisionnelles de recherche et d'encadrement

Comme il vient d'être mis en évidence, les perspectives de recherche offertes par notre nouvelle approche sont nombreuses et s'inscrivent aussi bien dans des projets applicatifs à court et moyen terme que dans le long terme. Cependant, leur simple énumération ne saurait constituer un véritable projet de recherche.

Je me suis efforcé dans ce chapitre de différencier les sujets relevant plus de compétences confirmées en Mathématiques pures (analyse numérique, analyse fonctionnelle) de ceux propres à l'Automatique telle qu'on la situe habituellement. Les perspectives énoncées ci-dessous se situent dans un contexte local mais ne sauraient y être limitées.

Pour les premiers sujets, le potentiel existant au sein des équipes SyNeR et ALIEN devrait servir de moteur pour les futures avancées. Néanmoins, dans la perspective d'une recherche plus soutenue, et dans la mesure où les matières abordées ne sont pas suffisamment développées au sein de nos cursus d'Automatique, une recherche commune avec d'autres entités de Recherche (telles par exemple les laboratoires de mathématiques et mathématiques appliquées), et impliquant des recrutements d'étudiants de Master ou de Doctorat issus d'autres formations ou horizons, pourrait être encouragée. Il s'agit ici d'une recherche de plus longue haleine dont l'objectif, à terme, est de pouvoir proposer un cadre formel opérationnel, offrant aux jeunes chercheurs en Automatique de nouveaux outils performants d'analyse et de synthèse des systèmes dynamiques. Sur Lille, nous comptons poursuivre les collaborations déjà entreprises avec le laboratoire Painlevé de l'UMR CNRS 8524 de Mathématique, et qui ont déjà vu le co-encadrement d'un étudiant (Emmanuel Moulay) depuis le master jusqu'au Doctorat.

Parallèlement aux développements attendus par cette recherche fondamentale, de nombreux projets de Master ou sujets de Thèse en Automatique peuvent être engagés sur les thèmes cités plus haut, offrant autant d'opportunités d'élargir les champs d'applications des outils proposés.

Les sujets propres aux systèmes à retards et/ou non linéaire relèvent, au moins localement, des compétences des équipes SyNeR et ALIEN. Ces structures suffisent à l'encadrement de jeunes doctorants engagés sur ces thématiques. Cependant, il est clair que la prise en

compte des phénomènes de retards ou de rupture dans le fonctionnement des processus dépasse les clivages traditionnels en terme de thématique ou d'équipe de recherche. Des recherches transversales, accompagnées de projets de recherche en co-encadrement, et tenant compte de la spécificité de la thématique abordée sont également à envisager. Il en est ainsi par exemple des recherches en Diagnostic et détection de pannes, avec la prise en compte de retards variables dans la conception des résidus, ou en Analyse d'image et de scènes dynamiques, avec la prise en compte de filtres discrets, multidimensionnels et non causaux.

SÉLECTION DE PUBLICATIONS

Trois publications viennent compléter ce document.

La première, "Identifiability of systems described by convolution equations", L. Belkoura, *Automatica* 2005, effectue une synthèse des travaux réalisés en identifiabilité des systèmes linéaires.

La seconde, "Identifiability and identification of linear systems with delays", L. Belkoura, M. Dambrine, Y. Orlov and J-P. Richard, chapitre de l'ouvrage paru dans *Springer, LNCSE Advances in Time Delay Systems* 2004, développe l'approche d'identification adaptative qui n'a été que citée dans ce mémoire. Par ailleurs, des conditions suffisantes d'identifiabilité dans le cas plus restreint de systèmes à retards discrets et commensurables sont proposées.

La troisième, "On line identification of systems with delayed inputs", L. Belkoura, M. Fliess, J-P. Richard, *17th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems*, Juillet 2006, Japon, présente les premiers développements publiés dans le cadre des systèmes à entrée retardée et bloquée. Quelques remarques et simulations portant sur la robustesse vis-à-vis des bruits de mesure y sont présentées.



Available online at www.sciencedirect.com



Automatica 41 (2005) 505–512

automatica

www.elsevier.com/locate/automatica

Identifiability of systems described by convolution equations[☆]

Lotfi Belkoura*

LAGIS, Université des Sciences et Technologies de Lille, Bat. P2, 59650 Villeneuve d'Ascq, France

Received 29 January 2004; received in revised form 14 July 2004; accepted 5 November 2004
Available online 23 December 2004

Abstract

Parameter identifiability is studied for a class of finite- and infinite-dimensional systems described by convolution equations. The notion of sufficiently rich input which enforces identifiability is also addressed and the results are obtained assuming knowledge of solutions on a bounded time interval.

© 2004 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: Identifiability; Convolution equations; Approximate controllability; Weak controllability

[☆] A shorter version of this paper was presented at the 13th IFAC Symposium on System Identification, Rotterdam, August 27–29, 2003. This paper was recommended for publication in revised form by Guest Editors Torsten Söderström, Paul van den Hof, BoWahlberg and Siep Weiland.

* Tel.: +33 03 20 33 77 86; fax: +33 03 20 43 47 43.

E-mail address: lotfi.belkoura@univ-lille1.fr (L. Belkoura).

Identifiability and Identification of Linear Systems with Delays

Lotfi Belkoura¹, Michel Dambrine², Yuri Orlov³, and Jean-Pierre Richard²

¹ LAIL, Université des Sciences et Technologies de Lille, France
lotfi.belkoura@univ-lille1.fr,

² LAIL, Ecole Centrale de Lille, France
Michel.Dambrine@ec-lille.fr, Jean-Pierre.Richard@ec-lille.fr

³ CICESE Research Center, Electronics and Telecom Dpt., San Diego, USA
yorlov@cicese.mx

1 Introduction

Numerous researches involve time-delay systems and their applications to modelling and control of concrete systems. To name a few, the two monographs [20, 28] give examples in biology, chemistry, economics, mechanics, viscoelasticity, physics, physiology, population dynamics, as well as in engineering sciences. In addition, actuators, sensors, field networks and wireless communications that are involved in feedback loops usually introduce such delays. As it was noted in the recent survey [34], delays are strongly involved in challenging areas of communication and information technologies: stability of networked controlled systems, quality of service in MPEG video transmission or high-speed communication networks, teleoperated systems, parallel computation, computing times in robotics... Finally, besides actual delays, time lags are frequently used to simplify very high order models.

Works on identification of FDEs have shown the complexity of the question [37]. Identifying the delay is not an easy task for systems with both input and state delays, or when the delay is varying enough to require an adaptive identifier. Several authors use the relay-based approach initiated by Astrom and Hagglund [26, 35], which, however, is not a real-time procedure since it needs to close some switching feedback loop during a preliminary identification phase. The adaptive control of delay systems is not so much developed either [4, 15, 38] and the delay is generally assumed to be known. And yet, as noted in [11], the on-line delay estimation has a longstanding issue in signal processing.

The present work will focus on the question of identifiability (section 2) and, then, on some algorithms for identification (section 3).

On-line identification of systems with delayed inputs

Lotfi Belkoura, Jean-Pierre Richard, and Michel Fliess

Abstract— This communication deals with on-line identification of systems with delayed inputs. It is based on new non-asymptotic algebraic estimation techniques. A concrete case-study and an application to transmission delays are discussed. Several successful numerical simulations are provided even with noisy data.

BIBLIOGRAPHIE

- H.J. Allen. Pressure distribution and some effects of viscosity on slender inclined bodies of revolution. Technical Report 2044, NACA, 1950.
- K. Astrom and K. Furuta. Swinging up a pendulum by energy control. *Automatica*, 36 : 287–295, 2000.
- L. Belkoura. Parameter and initial function identifiability of linear delay differential equations. *IFAC Workshop on Time-Delay Systems*, 2003.
- L. Belkoura. Identifiability of systems described by convolution equations. *Automatica*, 41 :505–512, 2005.
- L. Belkoura and Jean-Pierre Richard. A distribution framework for the fast identification of linear systems with delays. *6th IFAC Workshop on Time Delay Systems 2006 (TDS'06), L'Aquila, Italy, 10-12 July*, 2006.
- L. Belkoura, M. Dambrine, Y. Orlov, and J-P. Richard. Identifiability and identification of linear systems with delays. *Springer, LNCSE Advances in Time Delay Systems*, 38 : 123–135, 2004.
- L. Belkoura, Jean-Pierre Richard, and Michel Fliess. On-line identification of systems with delayed inputs. *17th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems, MTNS06) July 24-28, Kyoto, Japan*, 2006.
- F. Berthier, J.-P. Diard, L. Pronzato, and E. Walter. Identifiability and distinguishability concepts in electrochemistry. *Automatica*, 32, No 7 :973–984, 1996.
- G. Boutry. Contribution à l'approximation et à l'algèbre linéaire numérique. *Thèse de 3ème cycle, Mathématiques appliquées, Université des Sciences et Technologies de Lille, 18 décembre*, 2003.
- P. Coton. Contribution au DTP Turbulence - Modélisation du vol en turbulence. Technical report, ONERA, 2000.
- P. Coton. DTP Turbulence - Identification du modèle aérodynamique instationnaire. Technical report, ONERA, 2002.
- L. Ehrenpreis. Completely inversible operators. *Proc. Nat. Acad. Sc. USA*, 41-11 :945–946, 1955.

- L. Ehrenpreis. Solutions of some problems of division, part iii, division in the spaces d', h, q, o . *Amer. Journal of Mathematics*, pages 685–715, 1956.
- L. Ehrenpreis. Solutions of some problems of division, part iv, invertible and elliptic operators. *Amer. Journal of Mathematics*, 82 :522–588, 1960.
- M. Fliess and H. Sira-Ramirez. An algebraic framework for linear identification. *ESAIM Control, Optimization and Calculus of Variations*, 9, 2003.
- M. Fliess, C. Join, M. Mboup, and A. Sedoglavic. Estimation des dérivées d'un signal multidimensionnel avec application aux images et aux vidéos. *20 ème colloque GRESTI sur le traitement du signal et des images, Louvain-la-Neuve, Septembre, 2005*.
- H-G.Kussner. Stresses produced in airplane wings by gusts. Technical Report 654, NACA, 1932.
- L.C.G.J.M. Habets. System equivalence for ar-systems over rings, with an application to delay-differential systems. *Journal of Mathematics of Control, Signals, and Systems*, 12 : 219–244, 1999.
- L. Hormander. *The Analysis of Linear Partial Differential Operators I*. Springer-Verlag, Berlin, 1990a.
- L. Hormander. *The Analysis of Linear Partial Differential Operators II*. Springer-Verlag, Berlin, 1990b.
- C. Join, M. Fliess, and H. Sira-Ramirez. Fault diagnosis of closed loop linear systems with parametric uncertainties. *15th Int. Workshop on Principles of Diagnosis, Carcassonne, june, 2004*.
- E. W. Kamen. On an algebraic theory of systems defined by convolution operators. *Journal of Mathematical systems theory*, 9, No 1 :57–74, 1975.
- L. Ljung. *System Identification, Theory for the user*. Prentice-Hall information and system sciences series, 1987.
- S.M.V. Lunel. Parameter identifiability of differential delay equations. *Int J. of Adapt. Control Signal Process.*, 15 :655–678, 2001.
- S.M.V. Lunel. Identification problems in fonctionnal differential equations. *Proc. 36th conf. on Decision and Control*, pages 4409–4413, 1997.
- R.K. Miller and A.N. Michel. An invariance theorem with application to adaptive control. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 35 :744–748, 1990.
- S. Nakagiri and M. Yamamoto. Unique identification of coefficient matrices, time delay and initial functions of fonctionnal differential equations. *Journal of Mathematical Systems, Estimation and Control*, 5, No 3 :323–344, 1995.

- O. Diekmann, S.A. van Gils, S.M.V. Lunel, and H.O. Walther. *Delay equation, Functionnal, Complex, and Nonlinear Analysis*. Springer-Verlag, New York, 1995.
- Y. Orlov, L. Belkoura, J.P. Richard, and M. Dambrine. Adaptive identification of linear time-delay systems. *Int. Journal of Robust and Nonlinear Control, Special issue on Time-Delay*, 13, 9, 2003.
- Y. Orlov, I.V. Kolmanovsky, and O. Gomez. On-line identification of siso linear time-delay systems from output measurements : Theory and applications to engine transient fuel identification. *American Control Conference, Minneapolis, Minnesota, USA, June*, 2006.
- J. W. Polderman and J.C. Willems. *Introduction to Mathematical Systems Theory. A Behavioral Approach*. Springer-Verlag, New York, 1998.
- X.M. Ren, A.B. Rad, P.T. Chan, and W.L. Lo. On line identification of continuous-time systems with unknown time delay. *Ieee Tac*, 50-9 :1418–1422, 2005.
- L. Schwartz. *Théorie des distributions*. Hermann, Paris, 1966.
- T. Theodorsen. General theory of aerodynamic instability and the mechanism of flutter. Technical Report 496, NACA, 1935.
- M. Thomassin. Estimation de retard dans des conditions expérimentales passives. application à l'identification de bief de rivière. *Thèse de 3ème cycle, Université Henry Poincaré, Nancy I, juin*, 2005.
- P. Vettori and S. Zampieri. Controllability of systems described by convolutionnal or delay-differential equations. *SIAM Journal of Control and Optimization*, 39, No 3 :728–756, 2000.
- F. Veysset, L. Belkoura, P. Coton, and J-P. Richard. Modélisation de la dynamique du vol longitudinal d'un avion dans la turbulence par modèles à retards. *Conférence Internationale Francophone d'Automatique, CIFA 06, Bordeaux, juin*, 2006a.
- F. Veysset, L. Belkoura, P. Coton, and J-P. Richard. Delay system identification applied to the longitudinal flight of an aircraft through a vertical gust. *14th Mediterranean Conference on Control and Automation, Ancona, Italy, june*, 2006b.
- R. Vidal, A. Chiuso, and S. Soatto. Observability and identifiability of jump linear systems. Technical report, 41st Conference on Decision and Control (CDC02), Las Vegas, 2002.
- E. Walter and L. Pronzato. Identification de modèles paramétriques à partir de données expérimentales. *Masson, Paris*, 1994.
- Thomas G. Wright and Lloyd N. Trefethen. Eigenvalues and pseudospectra of rectangular matrices. Technical report, Report n° 01/13, 2001.
- Y. Yamamoto. A note on linear input/output maps of bounded-type. *IEEE Trans. on Automatic Control*, AC-29 :733–734, 1984.

- Y. Yamamoto. Reachability of a class of infinite-dimensional linear systems : An external approach with application to general neutral systems. *SIAM J. of Control and Optimization*, 27 :217–234, 1989.
- A.H. Zemanian. *Distribution theory and transform analysis*. McGraw-Hill, New York, 1965.