Université de Lille 1 – Sciences et Technologies

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

Spécialité : Automatique

par

Richard Béarée

Maître de conférences Arts et Métiers ParisTech Lille

Contribution à la génération de trajectoire pour la maîtrise des vibrations

Préparée au

Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes - UMR 7296

Habilitation soutenue le 12 octobre 2015 devant le jury composé de :

Garant	J.P.	Richard	Prof. Centrale Lille – CRIStAL	
Rapporteur	G.	Авва	Prof. ENIM Metz – LCFC	
	F.	Ben amar	Prof. UPMC Paris 6 – ISIR	
	Ch.	Tournier	Prof. ENS Cachan – LURPA	
Examinateur	О.	Colot	Prof. Univ. Lille 1 – CRIStAL	
	Ph.	Fraisse	Prof. Univ. Montpellier 2 – LIRMM	
	О.	Gibaru	Prof. Arts et Métiers ParisTech Lille – LSIS	
	B.	Siciliano	Prof. Univ. Naples, Frédéric II – PRISMA Lab	
Invité	А.	Suarez	Dr. Ing. Airbus Group-Innovations	

La raison peut se comparer à une montre : on ne voit point marcher l'aiguille ; elle marche cependant, et ce n'est qu'au bout de quelque temps qu'on s'aperçoit du chemin qu'elle a fait. [Jean le Rond d'Alembert]

Remerciements

Es travaux présentés dans ce manuscrit constituent la synthèse de dix ans d'activités de recherche menées au sein de l'équipe Ingénierie Numérique des Systèmes Mécaniques (INSM) du Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes (LSIS). Aussi, je tiens à remercier en premier lieu Lionel Roucoules le directeur de l'équipe INSM.

Je tiens à remercier MM. Pierre-Jean Barre, Eric Dumetz et Jean-Paul Hautier, qui m'ont accueillis et soutenus, d'abord pendant mon doctorat, puis dans le cadre de mon recrutement en tant que maître de conférences à Arts et Métiers ParisTech campus de Lille.

Je voudrais également exprimer ma plus profonde reconnaissance à M. Jean-Pierre Richard, Professeur à l'Ecole Centrale de Lille, pour ses conseils et la confiance dont il a fait preuve en acceptant d'être le garant de ces travaux.

Je souhaite exprimer toute ma gratitude à M. Gabriel Abba, Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz, M. Faiz Ben Amar, Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie, et M. Christophe Tournier, Professeur à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, qui ont accepté la charge de rapporter sur ces travaux. Merci pour le temps que vous avez consacré à la lecture du manuscrit ainsi que pour vos questions et vos conseils. Mes remerciements vont naturellement à M. Olivier Colot, Professeur à l'Université de Lille 1, pour avoir accepté de présider ce jury. J'exprime également ma gratitude aux examinateurs qui m'ont fait l'honneur de participer à ce jury : M. Philippe Fraisse, Professeur à l'Université Montpellier 2, M. Olivier Gibaru, Professeur à Arts et Métiers ParisTech Lille, M. Bruno Siciliano, Professeur à l'Université de Naples – Frédéric II (Italie) et M. Adolfo Suarez, Expert robotique chez Airbus Group - Innovations.

Je remercie chaleureusement Olivier Gibaru, responsable de notre entité *Lilloise* et collègue, pour son travail d'animation et de structuration exemplaire. Je tiens à remercier chaleureusement tous les membres de l'équipe et collègues de l'école pour leur aide, leur dynamisme et leur convivialité. Je voudrais également marquer ma sympathie à l'ensemble du personnel du campus Arts et Métiers de Lille.

De façon naturelle, le contenu de ce manuscrit est emprunts des travaux et discussions scientifiques que j'ai pu mener avec mes doctorants. Qu'Adel Olabi (à présent mon collègue de bureau), Marouene Oueslati, Razvan Chitic, Pierre Besset et David Busson trouvent ici l'expression de ma gratitude et de mon amitié à leur égard.

Enfin, un grand merci à ma femme et à mes filles pour mille raisons...

Lille, le 27 septembre 2015.

Table des matières

Table des matières vii					
LISTE DES FIGURES x				x	
In	TROI	DUCTIO	on Générale	1	
Ι	Activités de recherche			5	
1	Positionnement des travaux de recherche			7	
	1.1	Cont	EXTE ET PROBLÉMATIQUE	7	
	1.2	Éтат	DE L'ART EN GÉNÉRATION DE TRAJECTOIRE	8	
		1.2.1	Trajectoire en temps-minimum	9	
		1.2.2	Prise en compte des vibrations	10	
		1.2.3	Génération dynamique de trajectoire	12	
	1.3	Posit	IONNEMENT ET CONTRIBUTIONS DES TRAVAUX DE RE-		
	CHERCHE			12	
•					
2	GEF	TRATI	ON DYNAMIQUE DE TRAJECTOIRE À JERK LIMITEE	15	
	2.1	IRAJE	CTOIRES EN TEMPS MINIMUM : LA LOI A ACCELERATION	- (
		LIMIT	EE	10	
		2.1.1	Génération du rajectoire à acceleration limitée	10	
	2.2	2.1.2 TD A IE		10	
	2.2		Un point sur le jerk	19	
		2.2.1	Cánáration de trajectoire à jerk limité	19 21	
	2.2	Cont	PIBLITION À LA CÉNÉRATION DE TRAJECTOIRE À LERK LL-	21	
	2.3	MITÉ	RIDOTION & LA GENERATION DE TRAJECTORE À JERR LI	22	
		2.3.1	Exploitation des propriétés des filtres à réponse impul-	-9	
			sionnelle finie	23	
		2.3.2	Méthodologie de génération dynamique de trajectoire à		
			jerk limitée	26	
		2.3.3	, Flexibilité de la méthode	31	
	2.4	QUEL	QUES EXEMPLES APPLICATIFS	33	
				20	
3	AD	APTATI	ON DE LA TRAJECTOIRE À LA RÉDUCTION DE VIBRA-		
	TIO	NS		37	
	3.1	INTRC		37	
	3.1.1 Positionnement et problématique				
		3.1.2	Vibration et trajectoire	39	

	3.2	Caractéristiques fréquentielles intrinsèques à la					
		TRAJECTOIRE	40				
		3.2.1 Trajectoire polynomiale	41				
		3.2.2 Trajectoire à commutations	41				
	3.3	Un point sur les méthodes de compensation de vibra-					
		TION PAR FILTRAGE DE LA TRAJECTOIRE	44				
		3.3.1 Approche par inversion continue	44				
		3.3.2 Approche impulsionnelle	45				
	3.4	Contribution à la réduction de vibration par la syn-					
		THÈSE DE TRAJECTOIRE	48				
		3.4.1 Shaper équivalent pour la loi à jerk limité	48				
		3.4.2 Extensions à d'autres profils de jerk	50				
	3.5	Quelques exemples applicatifs	53				
	Tn A	VALVEN COURCET DEPENDENT DE RECHERCHE					
4		CONTINUETÉ DES TRAVAUX	57				
	4.1		57				
	4.2	OUVERIORE VERS DE NOUVELLES ITHEMATIQUES	50				
		4.2.1 refspectives a court et moyen termes : robolique mobile	-0				
		A 2 2 Perchaptives à long terme : vers l'aute apprentissage	59 62				
		4.2.2 I erspectives a long terme . vers i auto-apprentissage	03				
5	Con	ICLUSIONS	65				
_			-				
Br	BLIO	GRAPHIE	67				
τΔ	TATEV	TC	= -				
1 11	A1_	Définitions : loi en temps minimum et en temps imposé	13				
	111	A1 1-Chemin et trajectoire	73 72				
		A1 2-Trajectoire ontimale en temps et en temps imposé	73				
	A13-Cas des trajectoires multi-aves						
	A2-TRAIECTOIRE À ACCÉLÉRATION LIMITÉE						
	A2 1-Trajectoire à accélération limitée en temps minimum						
	A2 2-Trajectoires à accélération limitée en temps imposé						
	A2 3–Algorithme associé à la logique de commutation						
	A3-	A3-AI CORITHME DE CALCUIL DES DURÉES DES PHASES D'UNE TPA-					
	IECTOIRE À IERK LIMITÉE						
	A4-LOI DE MOUVEMENT À IERK AMORTI						
	_		_				
Π	– N	Notice Individuelle – Informations générales	83				
1	Cur	RRICULUM VITAE	85				
	1.1	ETAT CIVIL	85				
	1.2	Fonctions Exercées	85				
	1.3	Titres et Diplômes	86				
	1.4	Distinctions	86				
	т 1.5	Synthèse des activités scientifiques	86				
	2	~					
2	Ens	eignement et animation de la Recherche	89				
	2.1	Activités de recherche	89				
		2.1.1 Encadrements	89				

		2.1.2	Diffusion et Collaborations	91
		2.1.3	Actions de Recherche et Valorisation	
	2.2	ACTIV	ITÉS D'ENSEIGNEMENTS	93
		2.2.1	Période 2002–2006	94
		2.2.2	Période 2007 à aujourd'hui	94
	2.3	Respo	NSABILITÉS ADMINISTRATIVES ET PÉDAGOGIQUES	96
2	Ριιβ	ΙΙΟΔΤΙ	ONS	07
3	100	SLICATIONS .		
	3.1	ARTIC	LES DE REVUES A COMITES DE LECTURE	97
		3.1.1	Revues internationales (10)	97
		3.1.2	Revues nationales (3)	98
	3.2	Снарі	TRE D'OUVRAGE	98
	3.3	Actes	DE CONFÉRENCES	98
		3.3.1	Conférences internationales (18)	98
		3.3.2	Conférences nationales (12)	100
		3.3.3	Article de vulgarisation	101

LISTE DES FIGURES

1	Quelques démonstrateurs et moyens de la plateforme Usine Agile (Arts et Métiers ParisTech Lille)	2
1.1	Représentation fonctionnelle de la la commande d'un sys- tème du point de vue de la génération de trajectoire appli- quée à la réduction de vibration : (a) Formulation de l'objec- tif de génération intégrant le critère vibratoire; (b) Réduc- tion/élimination des vibrations par filtrage de la trajectoire de référence (feedforward approach).	11
2.1	Profil générique d'une loi de mouvement à accélération li- mitée	16
2.2	Exemple de trajectoire à accélération limitée en temps mini- mum, noté T_{min} , (application pour $\Delta q = 1 m$, $v_{max} = 2 m/s$, $a_{max} = 5 m/s^2$) et trajectoire associée en temps imposé, noté	
	$T_{imp} (T_{imp}/T_{min} = 1, 2). \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	17
2.3	Plan de phase vitesse-distance résiduelle	18
2.4	Représentation fonctionnelle du générateur dynamique de	
	trajectoire à accélération limitée.	19
2.5	Exemple de trajectoire à accélération limitée générée dyna-	
(miquement $(v_{max} = 3m/s, a_{max} = 10m/s^2)$.	20
2.6	Profil generique d'une loi de mouvement a jerk limite.	21
2.7	Exemple de plans de phase associes à une trajectoire à jerk	
	infinite. (a): $v_{max} = 6m/s$, $u_{max} = 50m/s$, $j_{max} = 500m/s^2$; (b): $v_{max} = 6m/s$, $u_{max} = 10m/s^2$, $i_{max} = 100m/s^3$; (c):	
	(b) $U_{max} = 0m/s, u_{max} = 10m/s, j_{max} = 100m/s$, (c) $U_{max} = 2m/s, a_{max} = 10m/s^2$	22
28	$U_{max} = 2m/s, u_{max} = 10m/s, j_{max} = 100m/s \dots$	23 22
2.0	Principe de la convolution par un filtre à movenne glissante	25 25
2.9	Exemple de trajectoire à jerk limitée obtenue par filtrage	29
2.10	d'une trajectoire à accélération limitée	26
2.11	Trajectoire à jerk limitée de type II obtenue avec ou sans	_0
	adaptation du profil initial à accélération limitée.	29
2.12	Trajectoire à jerk limitée de type IV obtenue avec ou sans	
	adaptation du profil initial à accélération limitée.	30
2.13	Exemple de génération dynamique de trajectoire à jerk li-	9
9	mitée obtenue par filtrage d'un profil adapté à accélération	
	limitée.	31
2.14	Exemple de génération dynamique de trajectoire à profil de	-
-	jerk en sinus carré obtenue par filtrage d'un profil adapté à	
	accélération limitée	32

2.15	a) Axelor SL20 (3 axes cartésiens à moteur linéaire, 1 axe à	
	moteur rotatif, équipée d'une broche 20 kW, 15000 tr/min).	
	b) Exemple de pièce de test : pièce à vagues normalisée CE-	
	TIM	33
2.16	Exemple d'erreur moyenne mesurée sur la pièce à vagues	
	pour différentes loi de mouvement.	33
2.17	Robot 6-axes Stäubli RX170 équipé d'une électrobroche UGV.	34
2.18	Algorithme de planification de la vitesse curviligne (avance)	
	sur un chemin représenté par une courbe paramétrique.	35
2.19	Vitesse d'avance mesurée du robot (trait plein) pour trois	55
-	trajectoires théoriques différentes (tracés pointillés) sur un	
	même chemin (ici une spirale logarithmique).	35
2.20	Kuka Lightweight LBR iiwa (Intelligent Industrial Work As-	55
	sistant). Robot 7 axes collaboratif.	36
2.21	Exemple de trajectoire générée dynamiquement sur un axe	5
	de robot Kuka iiwa. La mesure est issue du retour codeur	
	du moteur d'axe.	36
		5
3.1	Représentation fonctionnelle de la chaîne de commande	
	d'un axe de machine	38
3.2	Exemple de modèle d'axe linéaire à constantes localisées in-	
	tégrant <i>n</i> mode de déformation et modèle réduit équivalent	
	sous hypothèse d'une dynamique rapide et précise des as-	
	servissements.	39
3.3	Réponses temporelle et contenu fréquentiel des lois polyno-	
	miales de degrée 3 et 5	42
3.4	Réponses temporelles et contenu fréquentiel de la loi à ac-	
	célération limitée en fonction de α	43
3.5	Réponses temporelles et contenu fréquentiel de la loi a jerk	
	limitée en fonction de β (α est ici fixé à 1/4)	43
3.6	Principe de compensation de vibration par série d'impulsions.	46
3.7	Réponses fréquentielles et indicielles des 3 types de filtres	
	génériques de compensation de vibration	47
3.8	Shaper équivalent pour le profil à jerk limité	48
3.9	Courbe de sensibilité pour les shapers ZV, ZVD et le filtre	
	équivalent au jerk limité. Le % est défini en prenant comme	
	référence l'amplitude vibratoire provoquée par un échelon	
	d'accélération (profil à accélération limitée).	49
3.10	Réponses des filtres impulsionnels pour un système com-	
	portant deux modes de vibrations. Chacun des filtres (ZV,	
	ZVD et jerk limité) est réglé afin de compenser le premier	
	mode de vibration, le second mode représente une dyna-	
	mique négligée.	50
3.11	Exemple de trajectoire à jerk dissocié ($T_{j1} = 20ms$; $T_{j2} =$	
	$30ms T_{j3} = 60ms T_{j4} = 80ms$)	51
3.12	Shaper équivalent pour le profil à jerk amorti.	51
3.13	Vibration résiduelle [%] en fonction de la pulsation adimen-	
	sionnée (ratio entre la pulsation ω du mode vibratoire et	
	la pulsation de réglage ω_0) et de l'amortissement ζ . (a) jerk	
	limité, (b) jerk amorti.	52

3.14	Vibrations résiduelles pour une trajectoire à jerk limitée. Points mesurées superposés à la courbe théorique pour deux machines de productions différentes : un robot car-	
	tésien 3 axes SEPRO Robotique ($a_{max} = 4, 5m/s^2$) et une	
3.15	Courbes d'Iso-temps de réponse superposées au niveau vibratoire obtenu en fonction du jerk maximal pour un robot	54
3.16	cartésien	54
3.17	fonction de la position de l'axe <i>z</i>	55
	mité et à jerk amorti. Les mesures sont réalisées par un sys- tème laser tracker $(15\mu m/m)$.	56
4.1 4.2	Navire-Usine : projet Prélude SHELL	58
	directionnelle (Omni wheels), c) Omnidirectionnelle (Meca-	61
4.3	Plan rotation image/taille du template montrant l'évolution de la zone d'invariance (translation < 1 pixel) à la rotation de l'opération de corrélation croisée. Les pourcentages indi- qués sur les courbes correspondent au nombre de pixels du template qui ne subissent pas de déplacement (région non	01
4.4	 modifiée du template par la rotation). ① Base mobile omnidirectionnelle KUKA MKR; ② Bras collaboratif KUKA iiwa; ③ caméra Basler monochrome 	61
4 -	$CCD 1/3 640 \times 480, 90Hz$) et anneau lumineux	62
4.5	noculaire comparée à la réalité terrain (mesure laser tracker).	62
4.6	a) Actionneur rigide, b) Actionneur compliant : Series Elas- tic Actuators, c) Actionneur compliant : Variable Stiffness Actuators, d) Actionneur compliant : SEA + VSA	63
5.1	Réponse d'un système du second ordre amorti à une réfé-	2
2	rence à jerk amorti.	82

INTRODUCTION GÉNÉRALE

E document, destiné aux rapporteurs et aux membres du jury, présente mes contributions à la génération de trajectoire pour la maîtrise des vibrations et apporte une vue globale sur ma carrière d'enseignantchercheur au Campus de Lille d'Arts et Métiers ParisTech. Cette synthèse porte sur près de dix années d'enseignement et de recherche et se veut le reflet d'un travail attaché au développement du triptyque formationrecherche-industrie. Les partenariats industriels ont une place fondamentale dans mes activités majoritairement tournées vers l'application. Outre le fait d'offrir un moyen de transfert et de validations en contexte réel de mes recherches, ils sont également une opportunité de ressourcement constante en nouvelles problématiques. Ces dernières viennent alimenter mon activité de recherche et me permettent également d'illustrer l'état de l'art technologique et les défis de demain lors de mes enseignements.

PARCOURS ET CONTEXTE DES RECHERCHES

Depuis septembre 2007, je suis maître de conférences en 61ème section à Arts et Métiers ParisTech campus de Lille. J'enseigne principalement l'automatique et la modélisation des systèmes dynamiques en formation initiale, ainsi que l'automatique appliquée à la robotique et à la mécatronique au niveau master.

Mon parcours a été le suivant : après l'obtention d'un diplôme d'ingénieur en mécanique de l'école Polytech'Lille en 2001, j'ai poursuivi et spécialisé ma formation par un Diplôme d'Études Approfondies en Automatique et traitement du signal. J'ai ensuite réalisé une thèse de doctorat en automatique, soutenue en 2005, sur le thème de la commande des machines de production. Suite à cette thèse, réalisée au sein du Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille (L2EP) en partenariat avec le CETIM de Senlis, j'ai été ATER temps-plein durant une année.

Mon activité de recherche dans le domaine du contrôle/commande et de la planification de trajectoire s'est poursuivie au sein de l'équipe commande du L2EP jusqu'à début 2011. Suite à de nombreux échanges scientifiques et techniques avec des collègues du campus Arts et Métiers d'Aix-en-Provence, membres du Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes (LSIS UMR 7296), et dans un souci de mutualisation au sein de l'établissement et de cohérence de mes activités de recherche en automatique, j'ai sollicité mon intégration en 2011 au sein de l'équipe Ingénierie Numérique des Systèmes Mécaniques (INSM) du laboratoire LSIS. Aujourd'hui, la composante lilloise de l'équipe INSM est composée de 22



Robotique de manipulation

FIGURE 1 – Quelques démonstrateurs et moyens de la plateforme Usine Agile (Arts et Métiers ParisTech Lille).

personnes : 8 enseignants-chercheurs (2 Pr, 6 Mcf), 1 enseignant (Prag), 1 post-doctorant, 1 ATER, 7 doctorants et 4 ingénieurs de recherche.

Je participe activement depuis 2007 au développement d'une plateforme technologique baptisée *Usine Agile* : http ://www.usine-agile.fr. Cette vitrine de démonstration scientifique (cf. figure 1) est le siège privilégié des activités de recherche et de transfert de notre équipe. J'ai participé au co-encadrement de 4 doctorants et ai valorisé mes activités de recherche par le biais de plusieurs publications : 1 chapitre de livre, 10 revues internationales, 2 revues nationales, 18 conférences internationales et 12 conférences nationales. Je suis titulaire de la prime d'excellence scientifique (PES) depuis le 1er septembre 2012 et missionné pour les relations entreprises par l'établissement depuis la même date. Je contribue, par de nombreux contrats de partenariat recherche avec l'industrie, au fonctionnement et au développement de l'équipe en termes de moyens humains (post-doctorant, ingénieur) et de matériels.

Organisation du mémoire

Ce manuscrit comporte deux grandes parties.

La *première partie* présente mes activités de recherche principales en trois chapitres. Le premier chapitre est dédié à la problématique de planification de trajectoire pour les systèmes de production industriels et notamment à la génération dynamique de trajectoire. Le second chapitre traite de la compensation de vibration par la mise en forme de la trajectoire. Ces travaux, initialement appliqués au domaine de la machine-outil, sont

aujourd'hui fortement orientés vers le monde de la robotique, avec des contributions à la robotique industrielle et à la robotique mobile. Le troisième chapitre est dédié à mon projet de recherche sur ces thématiques à courts et moyens termes.

La *seconde partie* de ce manuscrit présente une synthèse de mes activités pédagogiques et administratives, ainsi qu'un bilan quantifié des activités de recherche.

Remarque. Les références aux travaux de l'auteur exploitées dans la première partie (référencés sous le format [JI...], [JN...], [CI...] ou [CN...]) sont regroupées dans la liste des publications détaillées dans la seconde partie.

Première partie Activités de recherche

Positionnement des travaux de recherche

1.1 CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

'environnement de production industrielle exploite de nombreuses → machines automatisées de type machine-outil, machine de transitique, robot à structure sérielle et parallèle, ou encore machine spéciale, qui sont utilisées principalement pour réaliser des opérations de positionnement précis, d'assemblage ou d'inspection. Les performances de ces systèmes sont mesurées essentiellement par leurs capacités à produire des mouvements rapides et précis, de façon à maximiser la productivité. Le critère de temps est directement associé à la pleine exploitation de l'énergie disponible. Quant à la précision des machines automatisées, elle sera impactée par de nombreux phénomènes physiques tels que les frottements entre les surfaces en mouvement relatifs, les jeux mécaniques, les interactions avec l'environnement et les déformations et vibrations induites par les mouvements propres du système. Parmi ces phénomènes dégradant la précision dynamique, les vibrations mécaniques demeurent particulièrement influentes pour plusieurs raisons : (a) le phénomène de vibration sera d'autant plus sensible que l'on cherche à augmenter la rapidité des mouvements; (b) l'évolution en termes de conception des machines de production, associée au contexte du développement de la collaboration homme-machine, tendent vers l'exploitation de structures mécaniques de plus en plus légères, voire naturellement souples, pour lesquelles le comportement vibratoire est une caractéristique intrinsèquement dominante.

Dans ce contexte, la problématique générale consiste à proposer des évolutions ou modifications du système dynamique permettant d'augmenter la rapidité et la précision des opérations réalisées par ce dernier. Une difficulté supplémentaire réside dans l'antagonisme naturel des deux objectifs visés. Plusieurs voies d'investigations sont envisageables. A titre d'exemple, un concepteur de machine peut décider d'exploiter des matériaux plus légers et/ou présentant des caractéristiques mécaniques meilleures. Il peut également choisir une autre voie en modifiant ou adaptant la structure de commande du système aux phénomènes dynamiques limitant la productivité. De façon très pragmatique, chacune des ces deux voies se heurte à de nombreuses contraintes : (a) L'allègement des structures en mouvement influencera négativement la dynamique vibratoire et donc la précision du positionnement; (b) Les structures de commande des machines de production sont génériques et non spécifiques à la machine ou à l'opération visée. Les bonnes performances, historiquement reconnues, de la structure générique et classique de commande en position ¹ et sa facilité de réglage, sont des arguments qui rendent toute remise en cause extrêmement délicate. Quand bien même le système se trouverait amélioré par des modifications matérielles ou une synthèse spécifique de sa commande, on cherchera naturellement à repousser ses limites en maximisant les performances.

La problématique générale se ramène finalement à optimiser l'exploitation d'un système commandé existant. La génération ou synthèse de trajectoire, sujet qui est au cœur de mes travaux de recherche, est une voie ici privilégiée, dont le problème peut se résumer qualitativement comme suit : pour un système donné et connu, quelle est l'entrée de commande qui conduira la sortie du système d'un état initial donné à un état final désiré dans les meilleures conditions ? La traduction adaptée à notre contexte spécifique est qu'il s'agit de déterminer une trajectoire minimisant le critère de temps, tout en réduisant, voire annulant, les vibrations induites par le mouvement propre du système.

1.2 ÉTAT DE L'ART EN GÉNÉRATION DE TRAJECTOIRE

Dans [Tuttle, 1997], l'auteur distingue quatre facteurs influençant la synthèse de la trajectoire de commande d'un système dynamique :

- Le premier facteur est le plus évident, puisqu'il s'agit de la nature du changement attendu sur la sortie du système (e.g. déplacement de 1 mètres). Le critère implicite à minimiser étant le temps.
- 2. Le second facteur est le comportement dynamique du système (asservi ou non). Dans le domaine des machines de production, les premières fréquences propres du système représentent très souvent une limite en termes de rapidité (limitation de la bande passante).
- Le troisième facteur est constitué des limitations ou contraintes énergétiques du système, dont il faut tenir compte dans la définition de la trajectoire (e.g. limitations sur les bornes maximales en accélération et en vitesse).
- 4. Un dernier facteur lié aux performances vient potentiellement s'ajouter au trois premiers. En complément de l'objectif dominant associé à la minimisation du temps, la synthèse de trajectoire peut englober des critères complémentaires. Sans recherche l'exhaustivité, on citera les principaux critères suivants : La précision dynamique, qui passe par la réduction des déformations et vibrations de la charge ou de l'effecteur en mouvement [Ulbrich et Ginzinger, 1998, Malzahn *et al.*, 2011]. La sûreté de fonctionnement, dont le verrou principal est la gestion d'un espace de

^{1.} La structure classique de commande en position des machines de production repose sur la mise en œuvre d'asservissements identiques et découplées axe par axe. Les asservissements sont de type boucles imbriquées de dynamiques décroissantes de l'intérieur vers l'extérieur, associées à des anticipations supposant une dynamique rigide des axes.

travail ou d'un environnement dynamique [Zhihua et Jing, 2004, Lawitzky *et al.*, 2013], ou encore l'**efficience énergétique**, qui consiste ici à réduire/optimiser l'énergie consommée par le système pour réaliser ces tâches opérationnelles [Wigstrom *et al.*, 2013, Vergnano *et al.*, 2013, Björkenstam *et al.*, 2013]. Enfin, dans le cas des systèmes dont certaines dynamiques sont inconnues ou non stationnaires, les performances de la trajectoire générée se doivent d'être robustes face à ces paramètres non maîtrisés.

Dans la suite, afin de clarifier, mais également de limiter, le spectre extrêmement large des travaux sur le domaine, nous considérons le cas des systèmes mono-entrée mono-sortie pour lesquels le comportement entrée-sortie peut être raisonnablement modélisé linéairement. Cette assertion est cohérente dans le cadre de la modélisation du comportement dynamique dominant la réponse des axes d'une machine de production, à savoir un comportement de mode rigide auquel peut venir s'ajouter la contribution d'un ou de plusieurs modes flexibles [Poignet *et al.*, 1999, Whalley *et al.*, 2008]. On considère de fait que les asservissements du système auront à traiter les non-linéarités et les dynamiques non modélisées en tant que perturbations².

1.2.1 Trajectoire en temps-minimum

Dans le cas où le temps est l'unique indice de performance considéré pour le système, on se ramène au problème très classique de la commande en temps minimum, qui vise à déterminer la trajectoire la plus rapide entre deux états du système, tout en vérifiant les contraintes sur les limites de l'actionneur. Ce problème d'optimisation mathématique est l'un des plus anciens et a été largement investigué depuis plus de cinquante ans. La majorité des développements dans le domaine s'appuient sur les travaux originaux de Lev Pontryagin spécifiant les conditions nécessaires (et suffisantes dans le cas des système linéaires en temps invariant) que la commande optimale en temps doit satisfaire [Pontryagin et al., 1962]. L'application du principe du maximum a notamment conduit au développement de la commande dite bang-bang fournissant un profil type pour la commande en temps minimum [Athans et Falb, 1966]. D'après ce principe, l'entrée de commande en temps minimum d'un système donné doit avoir une valeur qui sature (en valeur positive et négative) la commande de l'actionneur [Hermes et Lasalle, 1969]. L'espace des solutions possibles pour le profil de la trajectoire se résume alors à l'ensemble des commutations entre les valeurs extrêmes de l'entrée de commande, dont il s'agira de déterminer le nombre, ainsi que les instants d'occurrence.

A titre d'exemple, considérons le cas d'un système linéaire et stationnaire comportant uniquement n pôles, rigides ou réels négatifs, le nombre de commutations de la commande en temps minimum sera alors exactement n - 1 (les transitions à l'instant initial et final ne sont pas comptabilisées). Le lecteur intéressé trouvera la généralisation de ce résultat aux cas des systèmes comportant des zéros dans [Tuttle et Seering, 1999].

^{2.} Ceci inclut des dynamiques non-linéaire, telles que les frottements, pour lesquels un modèle de compensation est généralement exploités dans la structure de commande.

Ce type de résultat direct sur la forme du profil optimisé a été presque immédiatement transposé au domaine des machines de production. On notera d'ailleurs que ces développements sont quasiment concomitants avec l'apparition des premières machines à commande numérique vers 1970. Comme évoqué précédemment, la commande des systèmes industriels est très souvent générique dans sa structure et la génération de trajectoire n'échappe pas à la règle. Ainsi, la dynamique du système considéré dans les générateurs de trajectoire est parfaitement rigide, c'est à dire que le modèle supposé est un double intégrateur (n = 2) entre la position de sortie et l'entrée de commande homogène à l'accélération. Dans l'objectif de contrôler la cinématique du mouvement, une contrainte supplémentaire sur la vitesse maximale atteignable ou désirée est ajoutée à la contrainte première sur la limitation du niveau d'accélération. La trajectoire résultante en temps minimum est classiquement appelée trajectoire à accélération limitée et comporte 1 commutation si la limitation en vitesse n'est pas atteinte, ou 2 commutations si cette limitation est atteinte. Il existe de nombreux travaux, depuis plus de trente ans, exploitant ce résultat et notamment des chapitres entiers dédiés à cette problématique dans pratiquement tous les ouvrages dédiés à la robotique ou aux machines de production [Sciavicco et Siciliano, 1996, Altintas, 2000, Biagiotti et Melchiorri, 2008].

Depuis les années 2000, afin d'adoucir les discontinuités d'accélération qui se révèlent être une source d'excitation pour les vibrations du système, *la trajectoire à jerk limité* est exploitée dans les générateurs de trajectoire [Altintas, 2000]. La notion de douceur (*smoothness* en anglais) introduite par ce type de trajectoire provient de l'ajout d'une contrainte supplémentaire sur le niveau maximal de la dérivée temporelle de l'accélération. Ce type de commande bang-bang comportera 2, 4 ou 6 commutations entre les limites de jerk³.

1.2.2 Prise en compte des vibrations

Dans le domaine de la génération de trajectoire appliquées aux systèmes flexibles, on peut distinguer deux grandes catégories d'approches illustrées sur la figure 1.1.

La première catégorie intègre directement la connaissance de la dynamique vibratoire du système dans la méthodologie de résolution du problème de génération de trajectoire. Une première approche consiste à exploiter en tant que loi horaire une fonction candidate possédant des caractéristiques fréquentielles et temporelles limitant les vibrations. Dans [Aspinwall, 1980, Swigert, 1980, Meckl, 1993], les auteurs proposent des approches similaires et exploitent différentes séries finies de fonctions trigonométriques, c'est à dire différentes versions de la transformée de Fourrier tronquée d'un signal créneau. L'objectif est de produire un signal

^{3.} Le système considéré est ici un triple intégrateur n = 3 avec pour entrée de commande le jerk. La commande bang-bang en temps minimum associée voit s'ajouter son nombre de commutations minimales (ici n - 1 = 2) pour toute contrainte cinématique atteinte supplémentaire



FIGURE 1.1 – Représentation fonctionnelle de la la commande d'un système du point de vue de la génération de trajectoire appliquée à la réduction de vibration : (a) Formulation de l'objectif de génération intégrant le critère vibratoire; (b) Réduction/élimination des vibrations par filtrage de la trajectoire de référence (feedforward approach).

simple dont le spectre fréquentiel ne contient que peu ou pas d'énergie aux fréquences propres du système. Cette technique, bien que particulièrement efficace en termes d'évitement de vibration, ne permet pas de garantir facilement le respect des contraintes imposées sur l'entrée de commande. Une seconde approche est basée sur la théorie de la commande optimale. Elle exploite l'amplitude des vibrations résiduelles comme critère à minimiser [Junkins et Turner, 1986]. Il existe une littérature abondante sur le sujet appliquée à différents modèles de systèmes, pour lesquels le problème d'optimisation est résolu numériquement [Bhat et Miu, 1992, Khalil *et al.*, 2011].

Dans la seconde catégorie d'approches, l'annulation ou la réduction de vibrations est obtenue par filtrage de la trajectoire déjà planifiée. On notera que cette dernière peut par exemple être une trajectoire en temps-minimum obtenue en considérant uniquement la dynamique rigide du système. L'approche la plus évidente et la plus ancienne est dans ce cas l'utilisation d'un modèle inverse du système afin de minimiser l'erreur de suivi de trajectoire malgré les déformations du système [Bhat et Miu, 1992, Khalil et al., 2011]. La définition d'une inversion causale est une des avancées dans ce domaine [Benosman et Le Vey, 2003, Piazzi et Visioli, 2011], qui privilégie ici le critère de suivi de trajectoire au détriment du temps. Une seconde approche, spécifiquement dédiée à l'annulation de vibrations, est connue sous son nom anglais d'input shaping [Singhose, 2004, Singhose, 2009]. Les techniques d'input shaping sont particulièrement reconnues, notamment pour l'annulation des vibrations résiduelles dans des applications telles que le contrôle de grues de chantier, de portiques en gantry ou encore de bras polyarticulés. La technique repose sur la convolution de la trajectoire de commande avec un filtre à réponse impulsionnelle finie (séquence d'impulsions calculées pour annuler ou limiter les vibrations) appelé *shaper*. Dans [Pao et Singhose, 1995, Lau et Pao, 2001], une comparaison entre la commande en temps minimum d'un système flexible et la technique d'*input* shaping est réalisée. Il ressort de ces travaux que les deux méthodes conduisent à des trajectoires identiques. Cette équivalence en termes de performances est, d'un point de vue pratique, plutôt en faveur de la seconde méthode. En effet, une fois que le filtre de compensation de vibration (shaper) est synthétisé, il pourra être exploité par convolution sur tous types d'entrées de commande adaptée à la dynamique rigide du système. A l'opposé, les instants de commutation de la commande optimale devront être recalculés pour chaque consigne.

1.2.3 Génération dynamique de trajectoire

Les approches de génération de trajectoire précédemment exposées sont adaptées à la minimisation du temps et/ou à la réduction de vibrations. Elles reposent toutefois toutes sur un pré-calcul hors ligne de la trajectoire et ne peuvent tenir compte d'événements extérieurs susceptibles de modifier la trajectoire. La seule action possible en temps réel consiste généralement à pouvoir moduler la vitesse d'avance, par simple homothétie sur les durées pré-calculées. La génération dynamique de trajectoire vise, quant à elle, à autoriser une modification arbitraire de la position à atteindre. Cette problématique, qui a reçu un intérêt beaucoup plus récent [Kröger, 2011, Katzschmann et al., 2013, Guarino et Bianco, 2013], est associée au développement de la robotique de service et notamment à l'interaction avec l'homme, domaines pour lesquels il est nécessaire de pouvoir réagir face à un environnement dynamique. Il existe aujourd'hui de nombreuses potentialités d'applications industrielles, ou d'amélioration de l'existant, dans le domaine du travail collaboratif entre l'homme et le robot, ainsi que dans le domaine des véhicules à guidage automatique (en langue anglaise : Automatic Guided Vehicles ou AGV).

1.3 Positionnement et contributions des travaux de recherche

Bien que ne visant pas l'exhaustivité, la synthèse précédente des méthodes employées en génération de trajectoire montre qu'il existe plusieurs solutions permettant de synthétiser des mouvements rapides limitants les vibrations. Ce constat est à présent à replacer dans le contexte des machines de production, pour lequel la simplicité de mise en œuvre, la généricité, la flexibilité et la robustesse des solutions sont des critères d'acceptabilité sine qua non. Ainsi, la complexité de mise en œuvre, aussi bien algorithmiquement parlant qu'en termes de réglage, des solutions historiques basées uniquement sur la théorie de la commande optimale, limite considérablement leur exploitation dans le domaine des machines industrielles. A l'opposé, les trajectoires en temps minimum basées sur une dynamique idéalisée (rigide) du système sont largement répandues. Ce cas correspond au schéma de commande présenté précédemment sur la figure 1.1(b), pour lequel la trajectoire est définie en considérant uniquement les modes rigides du système, puis est ensuite filtrée afin de compenser les modes flexibles. Mes travaux de recherche s'inscrivent dans cette optique de résolution du problème.

Le développement de méthodologies facilitant la synthèse de loi à jerk

limité en temps minimum est un de mes premiers axes de recherche, initié au début des années 2000. Ces travaux ont plus récemment été étendus à la problématique de la génération dynamique de trajectoire, toujours à jerk limité. De manière interdépendante avec les développements précédents, la problématique de compensation de vibration par filtrage de la trajectoire est mon second thème de recherche détaillé plus avant dans ce mémoire.

En résumé, les contributions présentées dans ce mémoire portent sur les points suivants :

- 1. Contribution à la génération de trajectoire à jerk limité (Chapitre 2);
 - (a) Méthodologie de génération par filtrage FIR d'une trajectoire à accélération limitée,
 - (b) Adaptation à la génération en temps minimum,
 - (c) Adaptation à la génération dynamique de trajectoire.
- 2. Contribution à la synthèse de trajectoire adaptée à la réduction de vibrations (**Chapitre** 3).
 - (a) Formalisation de l'influence d'une trajectoire à jerk limité sur la dynamique vibratoire (formalisme de type input shaping),
 - (b) Synthèse de profils en jerk adaptés à la réduction de vibration (cas non-stationnaires et/ou faiblement amortie).

2

Génération dynamique de trajectoire à jerk limitée

A line is a point that went for a walk. [Paul Klee]

Afin de clarifier et facilité la lecture de ce mémoire, les définitions des termes employés et la formulation des problèmes associés à la génération de trajectoire (trajectoire en temps-minimum et en temps imposé) sont détaillés en annexe A1. De plus, nous considérons dans ce qui suit le cas des trajectoires pour un axe de machine. La généralisation au cas multi-axes pour les systèmes considérés se ramène à la résolution d'un problème en temps imposé.

La trajectoire d'un système dynamique peut se décomposer en un chemin Γ, qui représente le support géométrique du mouvement, associé à une loi de mouvement, qui représente la "brique" élémentaire de définition de la trajectoire entre chacun des points de Γ. La génération de trajectoire s'appuie sur deux champs de contraintes à vérifier. Le premier ensemble de contraintes traduit les conditions aux limites imposées à la trajectoire. Classiquement, il s'agira de la position initiale et finale (objectif du positionnement), ainsi que les conditions aux limites sur la vitesse, ce qui autorise une transition à vitesse non nulle entre les différents points d'un chemin. On notera que l'accélération est donc annulée à chaque point de passage. Cette prescription correspond à un compromis réaliste entre la limitation de la complexité algorithmique du problème de génération de trajectoire (voir la résolubilité même du problème) et l'impact de cette assertion sur les systèmes mécaniques. Le second ensemble de contraintes englobe les contraintes cinématiques du système, traduites par des limitations finies sur les k premières dérivées temporelles de la position. A minima k = 2, c'est à dire que la vitesse et l'accélération sont bornées. Ces limites sont imposées par l'utilisateur en accord avec les possibilités du système (ex : vitesse maximale de fonctionnement des guidages des axes ou articulations, limitation en courant des variateurs des actionneurs,...) ou réduites en fonction du comportement désiré pour le procédé auquel est associé la trajectoire (ex : vitesse d'avance en opération d'usinage ou en guidage de base mobile, mouvement associé à une collaboration hommerobot,...). Lorsqu'il existe plusieurs solutions possibles au problème de génération de trajectoire, l'optimalité par rapport au temps est très généralement recherchée.

2.1 Trajectoires en temps minimum : la loi à accélération limitée

2.1.1 Génération de trajectoire à accélération limitée

On peut classifier les lois de mouvement permettant de décrire le mouvement d'un point matériel en plusieurs familles, qui seront décrites plus avant dans le troisième chapitre de ce document. Parmi ces différentes topologies de loi de mouvement, les plus usitées sont les lois dites à commutations ou lois bang-bang. Elles doivent leur appellation à leur principe d'élaboration qui consiste à saturer une ou plusieurs dérivées temporelles de la position, en commutant un certain nombre de fois du niveau maximal au niveau minimal autorisé (contraintes cinématiques imposées). La loi de mouvement bang-bang est ainsi entièrement caractérisée par le degré des polynômes utilisés (i.e. l'ordre de la dérivée de la position utilisée), par le nombre de ses polynômes (nombre de commutations moins une), ainsi que par les valeurs des instants de commutation entre chacun des polynômes. Suivant le choix du nombre de commutations, ce type de profil peut correspondre à la loi de mouvement en temps minimum, car il permet de maximiser l'exploitation des ressources disponibles (énergie) en fonction du temps [Burghes et Graham, 2008, Tuttle et Seering, 1999].



FIGURE 2.1 – Profil générique d'une loi de mouvement à accélération limitée.

La plus connue et la plus utilisée des lois bang-bang est la loi à accélération limitée qui, rappelons le, correspond au profil en temps minimum pour un système dont la dynamique est idéalisée par un comportement rigide de double intégrateur, et est soumis à des contraintes cinématiques sur l'accélération et la vitesse. Le profil de vitesse résultant est constitué de 2 ou 3 phases de mouvement et prend une forme en triangle ou en trapèze. La figure 2.1 présente un exemple générique de profil de loi de mouvement à accélération limitée, divisé en trois phases. Durant la première phase, de durée notée T_a , l'accélération est constante de valeur a_{max} (contrainte cinématique sur l'accélération) et la vitesse est une fonction linéaire du temps de sa valeur initiale v_0 à sa valeur maximale v_{max} (contrainte cinématique sur la vitesse). La seconde phase n'existe que si la vitesse maximale peut être atteinte durant la première phase. Durant cette seconde phase, l'accélération est nulle et la vitesse est constante durant une période notée T_v . La décélération s'opère lors la dernière phase, de durée T_d , pendant laquelle la vitesse décroit linéairement pour atteindre la vitesse finale désirée v_f . On notera que les valeurs d'accélération et de décélération maximales, notées a_{max} et d_{max} sur la figure 2.1, sont classiquement identiques.

Les algorithmes de génération de trajectoire à accélération limitée en temps-minimum ou en temps imposé (cf. figure 2.2) sont aujourd'hui parfaitement connus et maîtrisés. Le lecteur intéressé trouvera ces développements, ainsi que les algorithmes associés en annexe A2.



FIGURE 2.2 – Exemple de trajectoire à accélération limitée en temps minimum, noté T_{min} , (application pour $\Delta q = 1 \text{ m}$, $v_{max} = 2 \text{ m/s}$, $a_{max} = 5 \text{ m/s}^2$) et trajectoire associée en temps imposé, noté T_{imp} ($T_{imp}/T_{min} = 1, 2$).

La loi à accélération limitée est classiquement exploitée afin de précalculer les trajectoires dans les Commande Numériques industrielles. Dans le cas d'un suivi de chemin multipoints, une fonction complémentaire, dite de « look-ahead », peut venir analyser le parcours à venir sur un horizon de plusieurs points et fixe ainsi les limitations de vitesse aux transitions entre ces points (v_f et v_0) en fonction de règles semi-empiriques [Béarée et al., 2004]. Cette approche de génération de trajectoire hors ligne ne peut tenir compte d'événements extérieurs susceptibles de modifier la trajectoire. La seule action possible en temps réel consiste ici à moduler la vitesse d'avance, par simple homothétie sur les durées pré-calculées. La génération dynamique de trajectoire autorise, quant à elle, une modification arbitraire de la position à atteindre. Cette problématique, qui a reçu un intérêt beaucoup plus récent [Katzschmann et al., 2013, Guarino et Bianco, 2013, Kröger, 2011], est associée au développement de la robotique de service et notamment à l'interaction avec l'homme, domaines pour lesquels il est nécessaire de pouvoir réagir face à un environnement dynamique. Il existe aujourd'hui de nombreuses potentialités d'applications industrielles, ou d'amélioration de l'existant, dans le domaine du travail collaboratif entre l'homme et le robot, ainsi que dans le domaine des véhicules à guidage automatique (en langue anglaise : *Automatic Guided Vehicles* ou *AGV*).

2.1.2 Génération dynamique de trajectoire à accélération limitée

Dans le cas simple d'une loi à accélération limitée, la génération dynamique peut s'appuyer directement sur l'expression analytique des instants de commutations de l'accélération calculés en fonction des états du générateur à l'instant d'occurrence d'une nouvelle consigne (cf. algorithme 1 de calcul des instants de commutations en annexe *A*2). Ces états sont la vitesse, qui devient la vitesse initiale pour le nouveau calcul, et la distance à parcourir, c'est dire la différence entre la position actuelle et la nouvelle consigne de position.

Une autre méthodologie de génération dynamique de trajectoire à accélération limitée consiste à exploiter la logique de commutation représentée sur le plan de phase de la figure 2.3. L'accélération a(t) prend ses valeurs dans l'ensemble $\{-a_{max}, 0, a_{max}\}$. Les cas $|a(t)| = a_{max}$ correspondent au trajets paraboliques dans le plan de phase vitesse-distance résiduelle. Le cas de l'accélération nulle correspond soit à l'état de repos, soit à la saturation d'une autre contrainte, ici la vitesse maximale qui est atteinte. La figure 2.4 donne une représentation fonctionnelle de cette méthode de génération dynamique de trajectoire, qui prend ici la forme d'un filtre numérique non-linéaire respectant la causalité (les consignes ne sont pas connues à l'avance, ou considérées comme telles).



FIGURE 2.3 – Plan de phase vitesse-distance résiduelle.

L'implantation de cette logique de commutation peut s'appuyer efficacement sur la notion de *vitesse horizon*, que nous avons notamment exploitée dans [JI2, JI4, CI10]. Ce que nous appelons vitesse horizon, noté v_h , n'est autre que la vitesse maximale autorisée par la distance résiduelle à parcourir $|\Delta q(t)| = |q_f - q(t)|$. La vitesse horizon est donnée par la relation :

$$v_h(t) = \sqrt{2 \cdot a_{max} \cdot |\Delta q(t)| + v_f^2}.$$
(2.1)

La consigne en position q_f est comparée à l'état de la position instantanée



FIGURE 2.4 – Représentation fonctionnelle du générateur dynamique de trajectoire à accélération limitée.

calculée q(t). a(t) prend alors sa valeur dans la liste $\{-a_{max}, 0, a_{max}\}$, en fonction de la vitesse horizon v_h et de l'erreur en position $\Delta q(t)$. L'algorithme 2 en annexe A2 détaille la partie logique de gestion des commutations de a(t) en temps discret. Ce générateur de trajectoire dynamique est exploitable de façon générique. Dans le cadre d'une utilisation dynamique, i.e. pour $q_f(t)$ évoluant de façon arbitraire, v_f n'est pas exploitée ($v_f = 0$). Pour une utilisation en suivi de chemin (liste de points de passage imposés), chaque couple des états désirés (q_f, v_f) est envoyés en consigne du générateur à condition que les états précédents soit atteints, i.e. que la transition $\Delta q = 0$ soit validée. La figure 2.5 présente un exemple de trajectoire obtenue dans la cas d'une référence dynamique. Les positions de consignes sont ici de simples constantes pouvant provenir de données issues de capteurs extéroceptifs (exemple : distance à un objectif, un obstacle). Naturellement, ces consignes ne peuvent être atteintes que si il n'y a aucune occurrence d'autres consignes avant la fin du mouvement.

Remarque. On notera que pour garantir la précision des trajectoires calculées, et au delà de la transposition en échantillonné, il est nécessaire d'ajouter une gestion des erreurs de quantification dans les méthodes précédentes. De plus, afin d'éviter les possibles oscillations autour des points de commutations tels que définis dans le plan de phase (commutation entre deux instants d'échantillonnage), on peut définir une tolérance numérique à la commutation autour de ces derniers [Abdullah et al., 2006] (tolérance qui sera fonction du pas d'échantillonnage et de la précision de calcul). Ces différents aspects ne sont pas développés dans ce mémoire pour des raisons de clarté.

2.2 TRAJECTOIRE À JERK LIMITÉ

2.2.1 Un point sur le jerk

Le jerk est aujourd'hui la dénomination connue et acceptée de la dérivée temporelle de l'accélération, i.e. la dérivée 3^e de la position. Les dérivées d'ordre supérieur sont respectivement nommées, de façon non officielle, le snap, le crackle et le pop. Au délà de la dérivée 6^e de la position, il n'existe plus de nom particulier. Ces dérivées se rencontrent presque exclusivement dans le domaine de l'étude et/ou de la reproduction de mouvements humains [Zatsiorsky, 1998, Kawamura et Svinin, 2007]. En



FIGURE 2.5 – Exemple de trajectoire à accélération limitée générée dynamiquement $(v_{max} = 3m/s, a_{max} = 10m/s^2)$.

mécanique, le jerk, qui traduit le taux de variation de l'accélération par unité de temps, est utilisé comme critère caractérisant la douceur d'une trajectoire (en langue anglaise : *smoothness*). Plus sa valeur maximal est faible, plus la trajectoire sera considérée comme douce et par conséquent peu contraignante pour le système dynamique. On retrouve une limitation du jerk maximal sur de nombreux systèmes dont le fonctionnement impacte le confort humain, tels que le contrôle du mouvement des ascenseurs [Knezevic et al., 2011], ou encore dans les moyens de transport en commun automatisés [Verhille et al., 2010]. Son apparition dans le domaine des machines de production est plus récente (environ une quinzaine d'années) et correspond à une nécessité associée à l'augmentation des dynamiques des systèmes de production. En effet, sur les systèmes conventionnels, les discontinuités d'accélération introduites par les références de trajectoires se trouvaient naturellement filtrées par la faible dynamique du système. Les systèmes actuels de production exploitent des actionneurs possédant des bandes passantes importantes et de fait toute discontinuité sur l'accélération de référence se retrouve quasiment à l'identique sur la mécanique. Ces chocs détériorent de façon significative la précision et la qualité globale du suivi de trajectoire. La gestion du jerk maximal permet de limiter ce phénomène en assurant une continuité de l'accélération et donc des efforts transmis au sein de la mécanique. L'influence des trajectoires, et notamment du paramètre de jerk, sur la dynamique vibratoire est développée dans le troisième chapitre de ce document.



FIGURE 2.6 – Profil générique d'une loi de mouvement à jerk limité.

2.2.2 Génération de trajectoire à jerk limité

La figure 2.6 présente le profil générique d'une trajectoire à jerk limité. Cette trajectoire résulte de la résolution du problème de génération en temps minimum intégrant une contrainte sur le jerk maximal : $q^{(3)}(t) \leq j_{max}$. Le mouvement à jerk limité est constitué de 3, 5, 6 ou 7 phases, suivant que les contraintes cinématiques sur chacune des dérivées sont atteintes ou non. Outre le nombre minimal de commutations, l'optimalité par rapport au temps est assurée par le fait que chacune des phases correspond à la saturation d'une des contraintes cinématiques, la saturation de la dérivée d'ordre la plus élevée étant prioritaire (ici le jerk considéré comme entrée de commande d'une dynamique idéalisée par un triple intégrateur). De même que pour la trajectoire à accélération limitée, il est possible de déterminer analytiquement les durées des différentes phases constituant un profil à jerk limité. La résolution de ce problème est toutefois notablement plus laborieuse. Si dans le cas de la trajectoire à accélération limitée il n'existe que deux types de profils possibles, dans le cas du jerk limité, chacune des phases d'accélération/décélération peut se subdiviser en trois phases. Ainsi, les phases d'accélérations/décélération peuvent être triangulaires (TG) ou trapézoïdales (TZ) et le profil d'accélération résultant peut correspondre à toutes les combinaisons possibles (TG-TG, TG-TZ, TZ-TG, TG-TG), auxquelles il faut ajouter les cas pour lesquels les conditions aux limites imposent l'absence d'une des phases. Une solution élégante est notamment développée dans [Erkorkmaz et Altintas, 2000], puis reprise et étendue dans [Jeong *et al.*, 2005]. Les grandes étapes du calcul sont les suivantes. Considérons un déplacement q(t) d'une situation initiale donnée par $q_0 = q(t_0)$ et $v_0 = dq/dt(t_0)$, à la situation finale $q_f = q(t_f)$; $v_f = dq/dt(t_f)$, soumis aux contraintes cinématiques :

$$\left| v(t) = \frac{dq(t)}{dt} \right| \le v_{max}; \left| a(t) = \frac{d^2q(t)}{dt^2} \right| \le a_{max}; \left| j(t) = \frac{d^3q(t)}{dt^3} \right| \le j_{max}.$$
(2.2)

Supposons que ce déplacement permette d'atteindre la vitesse maximale autorisée v_{max} , ainsi que l'accélération et la décélération maximale a_{max} et d_{max} (initialement $d_{max} = a_{max}$). La durée des 4 phases à jerk constant, notée T_{ja} lors de l'accélération et T_{jd} lors de la décélération s'écrivent :

$$T_{ja} = \frac{a_{max}}{j_{max}}; T_{jd} = \frac{d_{max}}{j_{max}}.$$
 (2.3)

La durée des phases d'accélération et de décélération est donnée par :

$$T_{a} = \frac{v_{max} - v_{0}}{a_{max}} - \frac{a_{max}}{j_{max}}; T_{d} = \frac{v_{max} - v_{f}}{d_{max}} - \frac{d_{max}}{j_{max}}.$$
 (2.4)

La distance parcourue durant ces 6 phases est obtenue pas intégration :

$$\Delta q_{min} = v_{max}^2 \left(\frac{1}{2a_{max}} + \frac{1}{2d_{max}} \right) + v_{max} \frac{a_{max} + d_{max}}{2j_{max}} + \frac{a_{max}v_0 + d_{max}v_f}{2j_{max}} - \frac{v_0^2}{2a_{max}} - \frac{v_f^2}{2d_{max}} \quad (2.5)$$

Enfin, la durée de la phase à vitesse constante est :

$$T_v = \frac{\Delta q - \Delta q_{min}}{v_{max}}.$$
 (2.6)

Si une des durées précédentes est négative, la phase correspondante n'existe pas (i.e. $T_a = 0$ et/ou $T_d = 0$ et/ou $T_v = 0$), et il est nécessaire de recalculer l'accélération et/ou la vitesse réellement atteinte(s) :

$$v_{max} = \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\alpha}.$$
 (2.7)

$$a_{max} = \sqrt{j_{max} \cdot (v_{max} - v_0)}; d_{max} = \sqrt{j_{max} \cdot (v_{max} - v_f)}.$$
 (2.8)

avec $\alpha = 1/(2a_{max}) + 1/(2d_{max})$, $\beta = (a_{max} + d_{max})/(2j_{max})$, $\gamma = (a_{max} \cdot v_0 + d_{max} \cdot v_f)/(2j_{max}) - v_0^2/(2a_{max}) - v_f^2/(2d_{max}) - \Delta q$. Le calcul des durées des phases est alors répété en éliminant de la distance Δq_{min} la ou les phases de durée nulle. On notera que le traitement de ces cas nécessite plusieurs itérations afin de déterminer les paramètres de la trajectoire en temps minimum. Par souci de lisibilité, l'algorithme détaillé n'est pas présenté directement dans le texte, mais donné en version complète en annexe A3. La figure 2.7 présentent les plans de phase associés à un même déplacement de longueur 1 *m*, obtenu par application de l'algorithme précédent, pour 3 ensembles différents de contraintes cinématiques conduisant aux profils à jerk limité à 3, 5, ou 7 phases. Les trajectoires relatives à ces 3 cas sont montrées sur la figure 2.8.

La synthèse analytique de trajectoires à jerk limitée optimale en temps nécessitent une approche d'optimisation par itération pour la gestion des profils à 3, 5 ou 6 phases. La transposition en termes de logique conduit naturellement à des tests et choix multiples quant aux nombres de segments et instants de commutations associés.



FIGURE 2.7 – Exemple de plans de phase associés à une trajectoire à jerk limitée. (a) : $v_{max} = 6m/s, a_{max} = 50m/s^2, j_{max} = 500m/s^3$; (b) : $v_{max} = 6m/s, a_{max} = 10m/s^2, j_{max} = 100m/s^3$; (c) : $v_{max} = 2m/s, a_{max} = 10m/s^2, j_{max} = 100m/s^3$.



FIGURE 2.8 – Trajectoires associées aux plans de phase de la figure 2.7.

2.3 Contribution à la génération de trajectoire à Jerk limité

2.3.1 Exploitation des propriétés des filtres à réponse impulsionnelle finie

Motivations

Comme vu précédemment, l'obtention analytique d'une trajectoire à jerk limité en temps minimum, bien que d'une complexité algorithmique

supérieure au cas d'une trajectoire à accélération limitée, est un problème soluble. La méthode développée dans la suite, exploitée notamment dans [JI2, JI4], s'appuie sur les propriétés des filtres à Réponse Impulsionnelle Finie (RIF) afin d'obtenir une trajectoire à jerk limité par filtrage linéaire d'une trajectoire à accélération limitée. Cette méthode originale de synthèse de trajectoire s'adapte parfaitement au contexte de la génération dynamique et présente plusieurs intérêts pratiques :

- Le profil résultant de l'opération de filtrage peut aisément être modulé par simple modification des coefficients du filtre. Dans notre cas le profil de jerk est initialement de forme créneau (filtre équivalent à une moyenne glissante), mais en relaxant la contrainte d'optimalité par rapport au temps, les coefficients du filtre peuvent être choisis de façon à produire d'autre forme (sinus, sinus carré,...);
- Ces filtres peuvent être combinés en série (linéarité) afin d'augmenter le degré de continuité du profil;
- Les filtres de type RIF sont facilement implantables. Ils sont de plus déjà disponibles sur la majorité des contrôleurs numériques;
- L'adaptation en temps-réel des paramètres de définition de la trajectoire se ramène à une mise à jour en temps-réel des coefficients du filtre (RIF adaptatif)).

L'objectif initial, qui nous a conduit à proposer cette méthodologie, consistait à développer un générateur de trajectoire : (a) **générique** et **modulable**, c'est à dire capable d'exploiter facilement différentes lois de mouvement (point 1 et 2 de la liste précédente); (b) **implantable** sur les systèmes de commande existant (point 3 et 4).

La contrainte d'implantation de la solution est encore aujourd'hui un élément déterminant pour le transfert vers l'industrie. En effet, dans un contexte d'exploitation industrielle d'un algorithme de commande, l'utilisation de commande numérique dites *ouvertes* (base PC associée à un langage de programmation connu et à un protocole de communication non propriétaire) est parfois limitée par le fait que l'accessibilité à certains paramètres implique la perte des sécurités prévue par le constructeur du système. De fait, une solution s'appuyant sur tout ou partie du système de commande actuel permet d'éviter cet écueil. Dans notre cas d'application, il est possible d'intercaler notre solution entre les trajectoires planifiée par le système industriel et les consignes envoyées en temps réel aux commandes d'axes de la machine. Cette méthode à notamment été employée dans le cadre d'un projet collaboratif avec le CETIM portant sur l'impact des lois de mouvement pour une machine-outil 4-axes.

Principes

Le profil d'accélération de la loi à jerk limité est constitué d'une succession de fonctions rampe (cf. figure 2.6). Une rampe peut facilement être obtenue par intégration de la fonction de Heaviside (échelon) ou encore par la convolution d'un échelon avec lui-même. Cette dernière équivalence



FIGURE 2.9 – Principe de la convolution par un filtre à moyenne glissante.

fait apparaître la notion de *convolution* largement employée en traitement du signal par filtrage. Soit un signal d'entrée e(t) de type échelon d'amplitude e et un second signal de type fonction porte $f_T(t)$ de durée T. La fonction porte peut s'exprimer comme étant la succession de deux échelons unitaires h(t) de signe opposé et décalés dans le temps :

$$\forall t \in \mathbb{R}, f_T(t) = \frac{1}{T} \left(h(t) - h(t - T) \right).$$
(2.9)

Considérons le produit de convolution des deux signaux précédents :

$$e * f_T(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e(t-\tau) \cdot f_T(\tau) \,\mathrm{d}\tau. \tag{2.10}$$

En développant :

$$e * f_T(t) = \frac{e}{T} \int_{-\infty}^{+\infty} h(t-\tau) \cdot (h(\tau) - h(\tau-T)) d\tau$$
$$= \frac{e}{T} \int_0^t h(\tau) - h(\tau-T) d\tau$$

$$0 \le t \le T, e * f_T(t) = \frac{e}{T} \int_0^t h(\tau) \, \mathrm{d}\tau = \frac{e \cdot t}{T}$$
$$t > T, e * f_T(t) = \frac{e}{T} \int_0^t h(\tau) - h(\tau - T) \, \mathrm{d}\tau = e$$

Ainsi, comme illustré par la figure 2.9, le produit de convolution précédent conduit à un signal constitué d'une rampe de pente e/T qui atteint une valeur finie après une durée T égale à l'amplitude de l'échelon d'entrée e. On notera que le signal porte $f_T(t)$ correspond à l'expression continu d'un filtre à moyenne glissante (filtre de type RIF). Ce filtre à moyenne glissante peut s'écrire, dans le domaine continu de Laplace (avec s la variable de Laplace) :

$$F_T(s) = \frac{1}{T} \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s} \cdot e^{-Ts} \right),$$
 (2.11)

ou encore en temps discret :

$$F_N(n \cdot T_e) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \delta_{n-i},$$
 (2.12)

avec δ_k l'impulsion unité à l'instant $k \cdot T_e$ et $N = T/T_e$ le nombre d'échantillons (que l'on arrondira à l'entier supérieur), T_e étant la période d'échantillonnage. Ce résultat illustre le principe d'obtention d'un profil en rampe par filtrage d'un signal d'entrée en créneau. Principe qui est exploité et étendu dans la partie suivante afin de synthétiser une loi à jerk limitée.



FIGURE 2.10 – Exemple de trajectoire à jerk limitée obtenue par filtrage d'une trajectoire à accélération limitée.

2.3.2 Méthodologie de génération dynamique de trajectoire à jerk limitée

Considérons l'application du filtre RIF à moyenne glissante précédent en sortie d'un générateur dynamique de trajectoire à accélération limitée, tel que celui présenté à la figure 2.4. On notera que par linéarité de l'opération de filtrage FIR, le filtre peut être appliqué indifféremment à la position où à une de ses dérivée temporelle. L'implication immédiate de l'exploitation d'un filtrage temporel est que le paramètre imposé est ici la durée de filtrage, c'est-à-dire la durée des phases à jerk constant que l'on notera T_{ja} et T_{jd} (cf. notations de la figure 2.6). Ces durées sont corrélées à la valeur du jerk maximal j_{max} autorisé par la relation :

$$j_{max} = \frac{a_{max}}{T_{ja}} = \frac{d_{max}}{T_{jd}}.$$
(2.13)

Initialement les valeurs d'accélération et de décélération maximales sont supposées identiques. Les durées T_{ja} et T_{jd} sont égale à $T_j = a_{max}/j_{max}$ qui représentent la durée maximal des phases à jerk constant.

La figure 2.10 présente un premier exemple de résultat obtenue pour l'ensemble de contraintes $q_f = 1m$, $v_{max} = 2m/s$, $a_{max} = 10m/s^2$, $j_{max} = 100m/s^3$. En exploitant la relation 2.13, la contrainte sur le jerk maximal autorisé est traduite en durée T_j ($T_{ja} = T_{jd} = 0, 1s$) pour le filtre f_{T_j} . La trajectoire présentée respectent toutes les contraintes et correspond à la trajectoire optimale en temps à jerk limitée. Ce résultat garantissant l'optimalité par rapport au temps par simple filtrage de durée constante T_j est généralisable pour toute trajectoire composée de 7 phases et dont les profil d'accélération et de décélération sont symétriques. Ces conditions d'optimalité sur la trajectoire finale à jerk limitée peuvent être traduites en conditions sur la trajectoire à accélération limitée avant filtrage (on indicera * les durées du profil initial à accélération limitée) :

- (Condition 7 phases de mouvement). Condition 1 : la vitesse maximale, l'accélération et la décélération maximale sont atteintes. Les durées des phases à vitesse, accélération et décélération constantes du profil initial à accélération limitée doivent vérifier : T^{*}_v ≥ T_{ja}, T^{*}_a ≥ T_{ja}, T^{*}_a ≥ T_{ja}, ;
- 2. (Condition de symétrie des phases à jerk constant). Condition 2 : Les durées des phases à jerk constant lors des phases d'accélération/décélération doivent être égales : {*T*^{*}_a, *T*^{*}_d} ≥ *T*_j.

Si une des conditions précédentes n'est pas vérifiée, la trajectoire obtenue par filtrage de durée constante T_{ja} (ou T_{jd}) n'est plus optimale en temps et parfois ne respectent pas la contrainte imposée sur le jerk maximal. En premier lieu, la condition 2 ne peut être vérifiée que dans des cas particuliers. L'application générique du filtrage nécessite dés lors une adaptation des coefficients du filtre durant la génération de la trajectoire. De façon pratique, le filtre RIF sera défini pour exploiter un registre maximal de N coefficients correspondant à la durée maximal T_j . Durant la phase d'accélération et la phase de vitesse constante (si présentes), le filtre aura une durée T_{ja} ($\leq T_j$) et durant la phase de décélération le filtre aura la durée T_{jd} . En ce qui concerne la condition 1, les différents cas de mouvement (3, 5, 6 phases) peuvent être simplement traités en adaptant le calcul du profil d'accélération initial.

Adaptation du profil à accélération limité avant filtrage

L'adaptation du profil initial à accélération limité avant filtrage vise à respecter les relations décrites précédemment (équations 2.6 – 2.9) afin d'obtenir un profil en temps minimum. La table 2.1 synthétise les adaptations nécessaires en fonction du type de profil a jerk limité qui résultera de l'opération de filtrage. Les durées initiales du profil à accélération limitée sont indicées par *. Le profil de type I vérifie les conditions 1 et 2 et ne nécessite par conséquent aucune modification du profil à accélération limité avant filtrage. Le profil de type II ne présente pas de phase à vitesse constante et la vitesse maximale atteinte doit être recalculée. Les profils de type III ne permettent pas d'atteindre la valeur maximale d'accélération ou de décélération et ses valeurs doivent par conséquent être recalculées. Enfin, les profils de type IV combinent les cas précédents et nécessitent une adaptation des valeurs de la vitesse maximale et de l'accélération et/ou décélération maximales.

Afin d'illustrer l'effet, ainsi que la nécessité, de ces adaptations, nous considérons deux exemples de trajectoires générées dynamiquement ($v_f = 0$). Pour tous types de profil, nous aurons les relations génériques suivantes sur la trajectoire initiale à accélération limitée :

$$T_a^* = \frac{v_{max} - v_0}{a_{max}}; T_d^* = \frac{v_{max}}{d_{max}},$$
 (2.14)

Trajectoire à		Trajectoire initiale à acc. limitée		
jerk limitée		,		
Type	de profil	Détection	Adaptation	
Ι	Tz-V-Tz	$\{T_a^*, T_v^*, T_d^*\} \geq T_j$	Aucunes	
II	Tz-Tz	$T_v^* < T_j \& \{T_a^*, T_d^*\} \ge T_j$	$T_v^* = T_{ja} \Rightarrow v_{max} \searrow$	
III-a	Tg-V-Tz	$T_a^* < T_j \& \{T_v^*, T_d^*\} \ge T_j$	$T_a^* = T_{ja} \Rightarrow a_{max} \searrow$	
III-b	Tz-V-Tg	$T_d^* < T_j \& \{T_v^*, T_a^*\} \ge T_j$	$T_d^* = T_{jd} \Rightarrow d_{max} \searrow$	
III-c	Tg-V-Tg	$\{T_a^*, T_d^*\} < T_j \& T_v^* \ge T_j$	$T_a^* = T_{ja}, T_d^* = T_{jd}$	
IV-a	Tg-Tz	$\{T_a^*, T_v^*\} \le T_j \& T_d^* \ge T_j$	$ \begin{array}{c} \Rightarrow \{u_{max}, u_{max}\} \\ T_a^* = T_v^* = T_{ja} \\ \Rightarrow \{z_{max}, z_{max}\} \\ \end{array} $	
IV-b	Tz-Tg	$\{T_d^*, T_v^*\} \le T_j \& T_a^* \ge T_j$	$\Rightarrow \{u_{max}, v_{max}\} \searrow $ $T_d^* = T_{jd}, T_v^* = T_{ja}$	
IV-c	Tg-Tg	$\{T_a^*, T_v^*, T_d^*\} \le T_j$	$\Rightarrow \{a_{max}, v_{max}\} \searrow $ $T_a^* = T_v^* = T_{ja}, T_d^* = T_{jd}$ $\Rightarrow \{a_{max}, v_{max}, d_{max}\}$	
			\neg ["max, "max, "max] \searrow	

 TABLE 2.1 – Détection du type de profil à jerk limité en fonction des caractéristiques calculées de la trajectoire à accélération limitée avant filtrage et adaptation de cette dernière afin d'obtenir une trajectoire optimale en temps. Tz: Phase d'accélération/décélération en trapèze, Tg: Phase d'accélération/décélération en triangle, V: Phase à vitesse constante.

$$\Delta q = \frac{T_a^*(v_{max} - v_0)}{2} + T_a^*v_0 + T_v^*v_{max} + \frac{T_d^*v_{max}}{2}.$$
 (2.15)

Exemple 1 : **Trajectoire de type II** $(T_v^* < T_j \& \{T_a^*, T_d^*\} \ge T_j)$. La phase à vitesse constante étant inférieure à la durée T_j du filtre, il existera une durée pendant laquelle le filtre contient des coefficients dans l'ensemble $\{a_{max}, 0, -a_{max}\}$, ce qui revient à un filtrage d'un échelon d'accélération d'amplitude $2a_{max}$. Cet effet du filtrage et le seul qui peut remettre en cause le respect de la contrainte sur le jerk maximal puisque dans ce cas on aurait une durée non nulle pendant laquelle le jerk maximal est double $(j_{max} = 2a_{max}/T_j)$. L'adaptation du profil à accélération limitée consiste ici à imposer une durée pour la phase à vitesse constante avant filtrage de valeur égale à T_j et à réduire en conséquence la valeur de la vitesse maximale. Les deux phases T_a^* et T_d^* étant supérieures à la durée T_j , l'accélération et la décélération maximale sont atteinte ($a_{max} = d_{max}$). En remplaçant T_v^* dans 2.15 par sa valeur imposée $T_j = a_{max}/j_{max}$ et en développant cette relation grâce aux équations 2.14, on obtient que la nouvelle valeur de v_{max} doit être la solution positive de :

$$\frac{1}{a_{max}}v_{max}^2 + \frac{a_{max}}{j_{max}}v_{max} - \left(\Delta q + \frac{v_0^2}{2a_{max}}\right) = 0.$$
(2.16)

Suite à ce calcul, on vérifiera que les nouvelles valeurs de T_a^* et T_d^* données pas les relations 2.14 sont toujours supérieures à T_j . Dans le cas contraire, la trajectoire optimale en temps est nécessairement de type IV. La figure 2.11 illustre cette démarche d'adaptation du profil initial à accélération



FIGURE 2.11 – Trajectoire à jerk limitée de type II obtenue avec ou sans adaptation du profil initial à accélération limitée.

limité.

Exemple 2 : **Trajectoire de type IV-a** $\{T_a^*, T_v^*\} \leq T_j \& T_d^* \geq T_j$. Dans ce cas, il n'y a pas de palier à vitesse ou à accélération constante. La phase de décélération peut comporter un palier de valeur d_{max} (cette valeur reste égale à l'accélération maximale initiale a_{max} et donc a priori $T_{jd} = T_j$). Afin d'obtenir la trajectoire optimale en temps, les durées des phases à accélération et vitesse constantes doivent être imposée égale à T_{ja} . En remplaçant T_a^* et T_v^* dans 2.15 par sa valeur imposée $T_{ja} = a_{max}/j_{max}$ et en développant cette relation grâce aux équations 2.14, on obtient que la nouvelle valeur de a_{max} doit être solution de :

$$\frac{a_{max}^4}{2j_{max}^2 d_{max}} + \frac{3a_{max}^3}{2j_{max}^2} + \frac{2v_0 a_{max}^2}{2j_{max} d_{max}} + \frac{2v_0 a_{max}}{j_{max} d_{max}} + \frac{v_0^2}{d_{max}} - \Delta q = 0.$$
(2.17)

Les racines de ce polynôme sont déterminés numériquement et l'on choisira la plus grande racine réelle respectant la contrainte initiale. De même que précédemment, on vérifiera que la nouvelle valeur de T_d^* donnée pas la relation 2.17 est toujours supérieures à T_j . Dans le cas contraire, la trajectoire optimale en temps est nécessairement de type IV-c, le calcul précédent pouvant être repris en ajoutant la contrainte $T_d^* = T_{jd} = T_{ja} = a_{max}/j_{max}$. La figure 2.12 montre les effet de cette adaptation du profil initial à accélération limité dans le cas d'une trajectoire de type IV-c.

Finalement, la figure 2.13 présente un exemple de trajectoire à jerk limitée optimale en temps générée dynamiquement par filtrage d'un pro-


FIGURE 2.12 – Trajectoire à jerk limitée de type IV obtenue avec ou sans adaptation du profil initial à accélération limitée.

fil adapté à accélération limitée. Cette trajectoire intègre différents types de profils. On notera que les transitions dynamiques entre deux positions de consigne doivent également être gérées, afin de ne pas violer les contraintes imposée, si l'accélération n'est pas nulle à l'instant de commutation. Dans ce cas, soit la valeur d'accélération est maintenue constante, soit le profil à accélération limité initial intégrera une phase de retour à accélération nulle, si une accélération de signe opposée est requise pour atteindre la nouvelle consigne. La transition entre la trajectoire 1 et 2 de la figure 2.13 correspond à ce dernier cas.

Implantation de l'algorithme

Concernant l'implantation temps-réel de la méthode présentée, on notera que la durée de calcul est équivalente à celle obtenue par les méthodes purement analytiques (Pour une trajectoire temps optimale). Cette durée sera naturellement fonction des différentes combinaisons rencontrées en termes de type de trajectoire. Pour information, cet algorithme codé uniquement en fonction Matlab® sur un PC core duo 1,44*GHz* conduit à un temps de calcul compris entre 20 et $110\mu s$ par point à atteindre (ce qui laisse présager des temps encore réduits en codant l'algorithme en C⁺⁺). A titre d'exemple comparatif, les contrôleurs de robot actuels autorisent un accès à la définition de la trajectoire toute les 4 ou 8 *ms*, ce qui n'est pas suffisant pour une reconfiguration en temps réel de la trajectoire. Les générateurs de trajectoires dynamiques disponibles sur le marché, associés généralement à un environnement de commande ouverte (type librairie ROS, www.ros.org), permettent une générations échantillonnée à 1 *ms*



FIGURE 2.13 – Exemple de génération dynamique de trajectoire à jerk limitée obtenue par filtrage d'un profil adapté à accélération limitée.

par axe. Le générateur dynamique à jerk limité le plus évolué en termes d'implantation temps réel est celui de la librairie Reflexxes [Kröger, 2011], disponible sous licence (www.reflexxes.com).

2.3.3 Flexibilité de la méthode

Un des avantages de la méthodologie de génération de trajectoire précédente est la versatilité du profil de jerk généré. Dans [Béarée et Olabi, 2013] la méthode est étendue afin de générer des trajectoires optimales en temps à jerks dissociés. La valeur de jerk maximale est modulable pour chaque phase à jerk constant.

Le profil de la loi de mouvement en jerk peut également être modulé en modifiant les valeurs des coefficients du filtre RIF. On notera qu'il n'est évidemment plus question d'optimalité en temps dans ce cas. Pour exemple, la figure 2.14 présente le même cas de génération dynamique que celui de la figure 2.13, mais avec une loi de mouvement en sinus carré de jerk. Les coefficients du filtre ne sont plus égaux, mais donnés par :

$$F_N(n \cdot T_e) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} C_{n-i},$$
(2.18)

$$C_1 = \sin^2\left(\frac{\pi}{2N}\right), \ C_i = \sin^2\left(\frac{i\pi}{2N}\right) - \sin^2\left(\frac{(i-1)\pi}{2N}\right) \ i = 2, \dots, N.$$
(2.19)

Il est également possible d'augmenter facilement le degré de continuité de la trajectoire en associant plusieurs filtres à moyenne glissante



FIGURE 2.14 – Exemple de génération dynamique de trajectoire à profil de jerk en sinus carré obtenue par filtrage d'un profil adapté à accélération limitée.

en série (linéarité du filtre RIF). Cette méthode récemment présentée dans [Biagiotti et Melchiorri, 2012] permet de générer des trajectoires limitant les dérivées d'ordre élevée (snap, crackle, pop,...). Cette propriété est intéressante pour synthétiser des trajectoires douces. Ces avantages sont à relativiser dans le cas où l'on cherche à maintenir l'optimalité par rapport au temps, ce qui conduit à un algorithme beaucoup plus complexe et potentiellement non exploitable en temps réel. De plus, le choix de la valeur de la contrainte sur la dérivée n^{ieme} de la position demeure particulièrement empirique. En effet, quelle valeur maximale donner au snap, au crackle ou bien même au jerk en fonction d'une application donnée?

Enfin, le générateur par filtrage RIF peut également être exploiter de manière simplifiée en imposant la durée du filtre plutôt que la valeur de jerk maximale. Ce mode d'utilisation, qui de fait ne respecte plus l'optimalité en temps, consiste à imposer la durée des phases de jerk constant (le jerk maximal sera toujours borné par la relation 2.13). La perte de l'optimalité stricte en temps (pour les mouvements ne comportant pas 7 phases) est à relativiser face à la simplicité de mise en œuvre. Le filtre à moyenne glissante exploité aura alors une durée constante pour toutes les trajectoires. Un autre élément motivant ce mode de génération de trajectoire est que la durée des phases à jerk constant a une influence directe sur le niveau vibratoire de l'axe commandé. Ce mode d'utilisation est exploité dans le second chapitre de ce mémoire consacré à la réduction des vibrations par la génération de trajectoire.



FIGURE 2.15 – *a*) Axelor SL20 (3 axes cartésiens à moteur linéaire, 1 axe à moteur rotatif, équipée d'une broche 20 kW, 15000 tr/min). b) Exemple de pièce de test : pièce à vagues normalisée CETIM.



FIGURE 2.16 – Exemple d'erreur moyenne mesurée sur la pièce à vagues pour différentes loi de mouvement.

2.4 Quelques exemples applicatifs

La méthodologie de génération de trajectoire précédemment décrite a été exploité sur de nombreux démonstrateurs et systèmes industriels.

Une des premières applications, réalisée dans le cadre d'une collaboration avec le CETIM de Senlis, consistait à comparer l'influence de différents types de loi de mouvement (jerk limitée, jerk en sinus carré et polynôme à minimum de jerk) sur les performances en termes de précision et de temps cycle d'une machine-outil dédiée à l'Usinage à Grande Vitesse. Cette étude s'inscrivait dans le cadre d'un grand projet du CETIM sur l'apport potentiel des Commandes Numériques dites ouvertes (CN à base PC dont le programme est quasiment open source). La machine utilisée, visible sur la figure 2.15, est une axelor SL20. Toutes les lois de mouvement testées ont été obtenues par filtrage RIF de la loi à accélération limitée pré-calculée par la Commande Numérique. La figure 2.16 présente un exemple de résultat métrologique obtenu après usinage d'une pièce de tests (pièce à vague de la figure 2.15). Sans entrer dans l'analyse des résultats, qui sont la propriété du CETIM, cette étude a permis de démontrer que la méthodologie de génération de trajectoire par filtrage RIF est un moyen élégant et fonctionnel de s'interfacer avec les contrôleurs existants. Ce point est un atout majeur dans ce contexte applicatif, puisqu'il évite d'avoir à développer un algorithme complet de génération de trajectoire, qui devrait inclure notamment la fonction d'*analyse à l'avance* du chemin et de détection des difficultés de profil (appelé *look-ahead* pour les machines-outils).

Un second contexte applicatif est celui de l'usinage robotisé, investigué dans les travaux de thèses d'Adel Olabi [Th1] et de Marouene Oueslati [Th3]. De part leurs caractéristiques d'agilité et de flexibilité, associées à leur faible coût par rapport aux machines-outils conventionnelles, les robots industriels tendent à être employés pour des opérations de plus en plus diversifiées et complexes. L'adaptation des robots en vue de réaliser des opérations d'usinages continus à grande vitesse représente aujourd'hui un besoin croissant de l'industrie manufacturière. L'un des verrous technologique de ce nouveau procédé d'usinage consiste à améliorer les performances statiques et dynamiques des robots de façon à atteindre un niveau de précision ad hoc. Dans ce contexte, nous avons notamment proposé une méthode de **génération de trajectoire adaptée à l'usinage continu pour un robot** 6-axes poly-articulé, présenté sur la figure 2.17.



FIGURE 2.17 – Robot 6-axes Stäubli RX170 équipé d'une électrobroche UGV.

La planification de trajectoire classique pour ce type de robot est réalisée dans l'espace articulaire. Le chemin décrit dans l'espace opérationnel est projeté dans l'espace articulaire. Les trajectoires générées pour chacune des articulations sont ensuite synchronisées (Génération en temps fixé relativement à la trajectoire de durée la plus longue). Ce type de génération ne permet pas de contrôler la cinématique sur le chemin, i.e. la cinématique curviligne de l'effecteur. La méthodologie développée, illustrée par la figure 2.18, repose sur une interpolation paramétrique du chemin à réaliser directement dans l'espace opérationnel. La génération de trajectoire par filtrage RIF a été ici exploitée afin de générer une avance de l'outil à jerk limité (trajectoire curviligne). La trajectoire curviligne est ensuite projetée sur les axes machines afin de vérifier le respect des contraintes cinématiques articulaires. La vitesse maximale curviligne (vitesse d'avance de l'outil) pouvant être réduite de manière itérative jusqu'à vérification de ces contraintes cinématiques. Cette maîtrise des variations de la vitesse d'avance de l'outil sur le chemin du parcours d'outil, classiquement exploité en machine-outil, est une condition nécessaire afin de garantir de bonnes conditions de coupe (qualité de l'état de surface de la pièce usinée). La figure 2.19 présente des résultats expérimentaux



Vers les asservissements d'axes robot

FIGURE 2.18 – Algorithme de planification de la vitesse curviligne (avance) sur un chemin représenté par une courbe paramétrique.



FIGURE 2.19 – Vitesse d'avance mesurée du robot (trait plein) pour trois trajectoires théoriques différentes (tracés pointillés) sur un même chemin (ici une spirale logarithmique).

démontrant la maîtrise de l'avance de l'outil. Les trajectoires mesurées (ici les vitesses d'avance réelles) sont obtenues grâce à un laser tracker (de précision $15\mu m/m$) visant une cible au niveau de la pointe-outil. La géométrie du chemin employé pour ce test est une spirale logarithmique (courbure continue et décroissante) et la loi d'évolution de la vitesse d'avance est choisie comme étant une fonction de la courbure maximale. Les trois trajectoires générées correspondent à un découpage de ce chemin en 1,4 ou 8 segments de chemin. La vitesse d'avance peut dans ce cas être significativement augmentée sur chacun des segments sans violation des contraintes cinématiques articulaires.

L'adaptation/généralisation de la méthodologie de génération de trajectoire précédente au contexte de la génération *dynamique* est plus récente. Dans le cadre de développements associés notamment à la robotique collaborative, ce type de générateur de trajectoire est devenu indispensable afin de pouvoir réagir instantanément à une nouvelle consigne provenant



FIGURE 2.20 – Kuka Lightweight LBR iiwa (Intelligent Industrial Work Assistant). Robot 7 axes collaboratif.

de capteurs ou d'un opérateur humain. La figure 2.20 présente un des robots collaboratifs exploités par notre équipe dans ce contexte. Il s'agit de la dernière génération de robot collaboratif de la société Kuka, disposant de capacité sensorielle (retour d'effort sur chaque axe) dédiée à la sécurité de l'interaction homme-machine (commande compliante) et à l'interaction maîtrisée avec l'environnement (contrôle d'effort). Une mise en œuvre expérimentale de la génération dynamique de trajectoires temps-optimales à jerk limitée est présentée sur la figure 2.21. Cette méthodologie est notamment exploitée dans le cadre de la thèse de Pierre Besset [Th4].



FIGURE 2.21 – Exemple de trajectoire générée dynamiquement sur un axe de robot Kuka iiwa. La mesure est issue du retour codeur du moteur d'axe.

Adaptation de la trajectoire à la réduction de vibrations

We have been all wrong ! What we have called matter is energy, whose vibration has been lowered as to be perceptible to the senses. [Albert Einstein]

3.1 INTRODUCTION

Dans un contexte d'amélioration constante de la productivité et de la flexibilité des machines de production, les vibrations mécaniques demeurent un phénomène limitant les performances dynamiques. Le problème de réduction des vibrations induites par les perturbations extérieures (interaction avec l'environnement) est généralement abordé par le biais de la mise en œuvre de systèmes de dissipation passifs ou actifs [Preumont, 2012], ou encore par la synthèse d'une structure de commande réalisant un amortissement actif des vibrations [Song, 1994, Siciliano et Khatib, 2008] (exemple classique : une commande par retour accélérométrique comme détaillé dans [Futami *et al.*, 1983]). Quant aux vibrations induites par le mouvement propre des axes de la machine, elles peuvent également être abordées par les méthodes précédentes, ou indépendamment prises en compte et éliminées, ceci sans ajout de capteur ou de dispositifs physiques dédiés, lors de la synthèse de la trajectoire du système.

Ce chapitre présente les travaux de l'auteur concernant les méthodes de réduction de vibration basées sur la *mise en forme* de la trajectoire du système. Une analyse unifiée des méthodes présentées est réalisée en s'appuyant sur les caractéristiques fréquentielles des différentes trajectoires générées.

3.1.1 Positionnement et problématique

La figure 3.1 présente la structure fonctionnelle de la commande d'un axe de machine industrielle. La trajectoire de référence, associée à la position à atteindre q, est notée q(t) et ses caractéristiques fréquentielles sont données par $Q(j\omega)$. Le contenu fréquentiel de cette référence est potentiellement modifié par un filtre de précommande $F(j\omega)$, afin de réduire l'excitation des fréquences propres de l'axe considéré. La trajectoire est



FIGURE 3.1 – Représentation fonctionnelle de la chaîne de commande d'un axe de machine.

envoyée en entrée des asservissements dont la fonction de transfert de correction est notée $C(j\omega)$. La structure classique des asservissements industriels combinent les propriétés de robustesse et de rejet de perturbations de l'approche en boucle fermée, qui se traduit classiquement sous la forme de boucles imbriquées de dynamiques décroissantes ¹, avec les performances en suivi de trajectoire de l'approche en boucle ouverte, matérialisée par des actions d'anticipation [Matsubara et al., 2002, Economou et al., 1999]. On notera que les anticipations sont classiquement basées sur un modèle parfaitement rigide du système ; Ces actions d'anticipation sont alors équivalentes à des dérivateurs pondérés par un simple gain de réglage. La méthodologie de réglage de cette structure de commande est détaillée en particulier dans [Groß et al., 2001]. Pour des raisons de simplicité de réglage (historique), de robustesse, de stabilité inconditionnelle et parfois simplement de faisabilité, les retours d'informations utilisées par les asservissements concernent uniquement des dynamiques mesurées au niveau de l'actionneur, notée $G(j\omega)$. Par conséquent, la dynamique $H(\omega)$ situées en aval de ce dernier n'est pas directement prise en compte dans la commande.

Le fait de ne pas disposer d'une mesure directe du point à contrôler limite la précision de nombreux systèmes. L'irréversibilité énergétique, les jeux, les irrégularités des étages de réduction et/ou de transformation de mouvement, situés entre l'actionneur et la charge, sont autant de phénomènes qui réduisent considérablement la possibilité de reconstruire le comportement dynamique de la charge. A titre d'exemple, les vibrations de l'organe terminal induites par le mouvement des robots anthropomorphes industriels seront quasiment imperceptibles sur les signaux exploités en commande (courant, vitesse et position moteur).

^{1.} Une boucle externe sera délibérément réglée de manière à respecter une contrainte sur sa dynamique. On imposera une dynamique plus lente que celle de la boucle interne (rapport de 3 à 5), de façon à négliger l'influence de cette dernière dans la synthèse de correcteur de la boucle externe

3.1.2 Vibration et trajectoire

La dynamique rapide des actionneurs employés sur la majorité des systèmes actuels, permet un réglage très « rigide » des asservissements et par conséquent un écart très faible entre la position de l'actionneur et la référence de trajectoire. Dans ce cas, la dynamique de la partie asservie $C(j\omega).G(j\omega)$ peut raisonnablement être négligée devant les dynamiques résiduelles induites par $H(j\omega)$ (ou idéalisée par un comportement de type filtre passe-bas ayant une bande passante incluant $H(j\omega)$). La figure 3.2 présente un modèle asservi d'axe linéaire à constantes localisées soumis à n modes de déformation élastique dans sa transmission de mouvement. L'hypothèse précédente sur le temps de réponse négligeable de la partie asservie devant la dynamique vibratoire résiduelle conduit au second modèle d'axe commandé en position. La référence de trajectoire impacte alors directement la dynamique vibratoire.



FIGURE 3.2 – Exemple de modèle d'axe linéaire à constantes localisées intégrant n mode de déformation et modèle réduit équivalent sous hypothèse d'une dynamique rapide et précise des asservissements.

La dynamique de ce système peut être décrite par le système d'équations différentielles suivant :

$$m_1 \ddot{q_1} + d_1 \left(\dot{q_1} - \dot{q_0} \right) + k_1 \left(q_1 - q_0 \right) - d_2 \left(\dot{q_2} - \dot{q_1} \right) - k_2 \left(q_2 - q_1 \right) = 0$$

$$m_{i}\ddot{q}_{i} + d_{i}\left(\dot{q}_{i} - \dot{q}_{i-1}\right) + k_{i}\left(q_{i} - q_{i-1}\right) - d_{i+1}\left(\dot{q}_{i+1} - \dot{q}_{i}\right) - k_{i+1}\left(q_{i+1} - q_{i}\right) = 0$$

$$\vdots$$

$$m_{n}\ddot{q}_{n} + d_{n}\left(\dot{q}_{n} - \dot{q}_{n-1}\right) + k_{n}\left(q_{n} - q_{n-1}\right) = 0$$

Dans le cas où l'on s'intéresse uniquement à un mode vibratoire dominant la réponse dynamique, ce système se ramène à :

$$m_1 \ddot{q}_1 + d_1 \dot{q}_1 + k_1 q_1 = d_1 \dot{q}_0 + k_1 q_0. \tag{3.1}$$

En définissant $\epsilon = q_1 - q_0$ l'erreur dynamique de positionnement due à l'élasticité, on obtient :

$$\ddot{\epsilon} + 2\zeta_0 \omega_0 \dot{\epsilon} + \omega_0^2 \epsilon = -\ddot{q}_0, \tag{3.2}$$

avec $\omega_0 = \sqrt{k_1/m_1}$ et $\zeta_1 = d_1/(2m_1\omega_0)$ la pulsation naturelle et le coefficient d'amortissement du mode considéré. Ou encore dans le domaine fréquentiel :

$$H_{\epsilon}(j\omega) = \frac{\epsilon(\omega)}{\ddot{q}_0(\omega)} = \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2) + j2\varsigma_0\omega_0\omega}.$$
(3.3)

Cette dernière expression illustre le fait que la dynamique de l'erreur vibratoire $H_{\epsilon}(j\omega)$ sera directement impactée par les caractéristiques fréquentielles du profil d'accélération de la trajectoire de référence.

3.2 Caractéristiques fréquentielles intrinsèques à la trajectoire

Comme décrit dans le chapitre 2 de ce manuscrit, le planificateur de trajectoire d'un système de positionnement industriel (machine-outil, robot, manipulateur,..) se doit de générer les références temporelles de position pour la commande du système en intégrant une certains nombre de contraintes cinématiques (la vitesse d'avance conseillée et/ou vitesses, accélération, jerk maximales des axes). Il existe de nombreuses représentations mathématiques susceptibles de décrire un profil de déplacement intégrant ces contraintes. Les deux familles de trajectoire les plus usitées sont les lois de mouvement de type polynomial, dites « douces » (cubique, quintique) et les lois à commutation en temps minimum (accélération limitée, jerk limité). Les contraintes de synthèse de ces deux familles de trajectoires s'expriment dans le domaine temporel, mais on notera qu'elles présentent des caractéristiques fréquentielles très différentes et ne sont donc pas équivalentes en termes de potentiel d'excitation vibratoire pour le système. Toutes les fonctions étudiées q(t), définissant une trajectoire, sont dites à énergie finie pour des raisons physiques évidentes. Il est par conséquent possible de définir leur transformée de Fourier, ainsi que leur transformée inverse (fonction réelle et paire) :

$$Q(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} q(t)e^{-j\omega t}dt = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{\infty} |Q(\omega)|\cos\left(\omega t + \varphi(\omega)\right)d\omega.$$
(3.4)

Cette dernière équation exprime le fait que la fonction q(t) est la somme d'une infinité de termes sinusoïdaux d'amplitude $|Q(\omega)| / \pi$. Il en découle que par l'analyse fréquentielle, il est possible d'évaluer les contraintes vibratoires induites par une trajectoire temporelle donnée. De façon qualitative, afin de limiter les vibrations induites par la trajectoire, la transformée de Fourier de cette dernière doit posséder, soit un contenu spectral faible aux hautes fréquences, soit uniquement aux fréquences de résonances dominants la dynamique du système mécanique sollicité. Une trajectoire possédant très peu d'harmoniques en haute fréquence sera naturellement « douce ». Une trajectoire imposant peu d'excitation uniquement au niveau des fréquences propres du système sera potentiellement « plus optimale » quant au compromis temps/vibrations et sera associée aux techniques de filtrage. Afin de faciliter l'analyse comparative des propriétés intrinsèques de ces trajectoires, nous considérons, dans ce qui suit, le cas d'un mouvement de type point à point (vitesses de départ et de fin nulles) de longueur L = 1 m, réalisé en un temps T = 1 s.

3.2.1 Trajectoire polynomiale

La trajectoire polynomiale d'ordre 3, ou cubique, décrivant un mouvement point à point de longueur *L* en *T* secondes est donnée par :

$$q_{cub}(t) = \frac{3L}{T^2} t^2 - \frac{2L}{T^3} t^3; \ \dot{q}_{cub}(t) = \frac{6L}{T^2} \left(t - \frac{t^2}{T} \right); \ddot{q}_{cub}(t) = \frac{L}{T^2} \left(6 - \frac{12t}{T} \right).$$
(3.5)

La transformée de Fourier du profil d'accélération sera alors :

$$\ddot{Q}_{cub}(\omega) = j \frac{12L}{\omega^2 T^2} e^{-j\omega T/2} \left| \frac{2}{T} \sin\left(\omega \frac{T}{2}\right) - \omega \cos\left(\omega \frac{T}{2}\right) \right|.$$
(3.6)

En posant $\Omega = \frac{\omega}{2\pi/T}$, on peut exprimer l'amplitude de cette transformée sous la forme :

$$\left|\ddot{Q}_{cub}(\omega)\right| = \frac{6L}{T\Omega^2 T^2} \left|\sin(\pi\Omega) - \pi\Omega\cos(\pi\Omega)\right|.$$
(3.7)

De même, pour une trajectoire quintique point à point on aura :

$$q_{quin}(t) = \frac{10L}{T^3}t^3 - \frac{15L}{T^4}t^4 + \frac{6L}{T^5}t^5; \ \dot{q}_{quin}(t) = \frac{30L}{T^3}\left(t^2 - \frac{2t^3}{T} + \frac{t^4}{T^2}\right); \ddot{q}_{quin}(t) = \frac{60L}{T^3}\left(t - \frac{3t^2}{T} + \frac{2t^3}{T^2}\right).$$
(3.8)

Ce qui, après manipulation algébrique, conduit à l'amplitude de la transformée de Fourier suivante pour l'accélération :

$$\left|\ddot{Q}_{quin}(\omega)\right| = \frac{30L}{T\Omega^4 T^4} \left| (3 - \pi^2 \Omega^2) \sin(\pi \Omega) - 3\pi \Omega \cos(\pi \Omega) \right|.$$
(3.9)

La figure 3.3 décrit les caractéristiques fréquentielles issues des trajectoires polynomiales de degré 3 et 5. Le premier lobe du polynôme de degré 5 est plus important que celui de la cubique, ce qui traduit naturellement le fait que pour une durée de mouvement fixée, la loi quintique nécessite une accélération supérieure. En contrepartie, les lobes suivants sont significativement plus faibles (rapport 2 à 3), de part la double intégration supplémentaire. Les trajectoires polynomiales de degré 5 seront ainsi naturellement moins « excitantes » (plus douces) pour les modes propres du système.

3.2.2 Trajectoire à commutations

Les trajectoires de type « bang-bang », dont la génération est détaillée dans le chapitre 2, sont des lois de mouvement qui saturent une dérivée de la position de référence. Par nature, ce type de loi optimise le critère temps pour un point matériels soumis à un ensemble de contraintes cinématiques. La plus classique et la plus ancienne est la loi à accélération limitée, appelée également loi en trapèze de vitesse. En remarquant que ce type de loi peut être représenté par une succession d'échelons d'accélération décalés dans le temps (cf. figure 2.1 du chapitre 2), on peut facilement



FIGURE 3.3 – *Réponses temporelle et contenu fréquentiel des lois polynomiales de degrée* 3 *et* 5.

écrire l'expression du profil d'accélération dans le domaine continu de Laplace. En notant *s* la variable de Laplace, l'accélération pour un mouvement point à point à accélération limité sera donnée par :

$$\ddot{Q}_{acc}(s) = \frac{a_{max}}{s} \left(1 - e^{-sT_a} - e^{-s(T-T_a)} + e^{-sT} \right).$$
(3.10)

En notant T_a = la durée des phases d'accélération, on trouve que l'accélération maximale est associée à la relation :

$$a_{max} = \frac{L}{\alpha(1-\alpha)T^2}.$$
(3.11)

L'expression de la transformée de Fourier du signal d'accélération se déduit de sa transformée de Laplace et l'amplitude de cette transformée exprimée en fonction du paramètre adimensionné Ω est définie comme suit :

$$\left|\ddot{Q}_{acc}(\omega)\right| = 2L \frac{\left|\sin\left((1-\alpha)\pi\Omega\right)\sin(\alpha\pi\Omega)\right|}{(1-\alpha)\alpha T\pi\Omega}.$$
(3.12)

En procédant de même pour une loi à jerk limité (cf. figure 2.6) en notant $T_a = \text{et } T_j = \beta T_a$, respectivement la durée des phases d'accélération et de jerk non nulles, on obtient l'amplitude de la transformée de Fourier suivante :

$$\left|\ddot{Q}_{jerk}(\omega)\right| = 2L \frac{\left|\sin\left((1-\alpha)\pi\Omega\right)\sin\left(\alpha(1-\beta)\pi\Omega\right)\sin(\alpha\beta\pi\Omega)\right|}{(1-\beta)(1-\alpha)\beta\alpha^2 T \pi^2 \Omega^2}.$$
 (3.13)

Les réponses temporelles, ainsi que le contenu fréquentiel des trajectoires à accélération et à jerk limitée sont présentées respectivement sur les figures 3.4 et 3.5 pour différentes valeurs des paramètres α et β . Le paramètre α conditionne ici le niveau maximal de l'accélération (pour un temps *T* fixé). Plus ce paramètre sera faible et plus le spectre de ces deux trajectoires sera riche, donc potentiellement excitant pour le système. Quant au paramètre β associé à la durée des phases à jerk constant, on remarque qu'il a une influence forte sur la réduction du contenu fréquentiel dans certaines bandes de fréquences. On constate ici que en agissant sur la durée de jerk T_j , il est possible de réduire l'amplitude fréquentielle de l'accélération de consigne pour certaines valeurs de fréquences. Naturellement, si l'on impose ce paramètre de durée de jerk, le niveau de jerk maximal j_{max} sera induit par la relation :

$$j_{max} = \frac{a_{max}}{T_j} = \frac{a_{max}}{\beta T_a}.$$
(3.14)

La possibilité qu'offre la durée des phases de jerk de pouvoir être réglé de façon à réduire les vibrations est détaillée dans la suite.



FIGURE 3.4 – Réponses temporelles et contenu fréquentiel de la loi à accélération limitée en fonction de α .



FIGURE 3.5 – Réponses temporelles et contenu fréquentiel de la loi a jerk limitée en fonction de β (α est ici fixé à 1/4).

3.3 UN POINT SUR LES MÉTHODES DE COMPENSATION DE VI-BRATION PAR FILTRAGE DE LA TRAJECTOIRE

Les méthodes de filtrages appliquées à la trajectoire de référence d'un système (Le filtre $F(\omega)$ sur la figure 3.1) dédiées à la compensation/réduction des vibrations peuvent être globalement divisées en trois types d'approches : (a) l'approche par filtrage de gabarit passe-bas, (b) l'approche par inversion continue (ou pseudo-inversion) des dynamiques à compenser et (c) l'approche par génération d'impulsions annulant à certains instants les vibrations présentes. La première approche (a) est la plus simple dans son principe. Il s'agit ici de limiter la bande passante de commande afin de réduire l'injection d'énergie aux fréquences correspondantes aux modes vibratoires. Cette méthode peut s'avérer très efficace et robuste [Economou et al., 2001], mais implique par principe une sousexploitation des capacités dynamiques du système, ce qui de fait la rend peu adaptée au contexte des systèmes de production. On notera de plus que cette limitation sera amplifiée dans le cas des système comportant de très basses fréquences de résonance, comme les systèmes souples (bras robotisé, manipulation fine,...). Les deux autres approches sont quant à elles sélectives d'un point de vue fréquentielle et ne souffrent pas de la limitation précédente. Elles sont présentées dans ce qui suit.

3.3.1 Approche par inversion continue

Le filtrage par modèle inverse consiste à définir un filtre de fonction de transfert égale à l'inverse des dynamiques à compenser. Sous contrainte d'implantation causale, le dénominateur du filtre en question sera classiquement compléter par des dynamiques rapides de type 1^{*er*} ordre. Considérons le cas du système à 1 mode dominant H_{ϵ} , le modèle inverse est dans ce cas un filtre de type biquadratique de la forme :

$$F_{biquad}(s) = \frac{s^2 + 2\zeta_0 \omega_0 s + \omega_0^2}{(1 + \tau_1 s) (1 + \tau_2 s)},$$
(3.15)

avec les pulsations $1/\tau_i$ ($i \in 1, 2$) situées au-delà de la bande passante utile. On notera que si la dynamique du système est à non-minimum de phase, le modèle inverse serait naturellement instable. Dans ce cas, plusieurs méthodes approchées permettent de garantir la réalisabilité du filtre en minimisant l'erreur d'inversion [Benosman et Le Vey, 2003]. Une extension/généralisation particulièrement intéressante, détaillée dans [Piazzi et Visioli, 2011], présente une méthode d'inversion non-causale stable permettant d'obtenir une trajectoire point à point exempt de vibration.

Le filtre coupe-bande ou « notch » est classiquement le plus utilisé dans l'industrie afin d'éliminer une fréquence indésirable dans la bande passante utile. La forme la plus simple de ce type de filtre est également une fonction de type biquadratique et peut se mettre sous la forme :

$$F_{notch}(s) = \frac{s^2 + \omega_1^2}{s^2 + \omega_2/Qs + \omega_2^2},$$
(3.16)

avec *Q* le coefficient de surtension et les pulsations ω_i ($i \in 1, 2$) généralement prisent égales à la pulsation du mode à éliminer, i.e. ω_0 .

3.3.2 Approche impulsionnelle

Fondement de la méthode

Dans le domaine de la compensation de vibration mécanique, les techniques d'input shaping sont particulièrement reconnues, notamment pour l'annulation des vibrations résiduelles dans des applications telles que le contrôle de grues de chantier, de portiques en gantry ou encore de bras polyarticulés. La technique repose sur la convolution de la trajectoire de commande q(t) avec un filtre F à réponse impulsionnelle finie (séquence d'impulsions) appelé shaper. Le signal ainsi convolué, noté $q^*(t)$, devient la nouvelle trajectoire de référence pour le système H. On notera que H peut représenté un système en boucle ouverte ou un système asservi. L'objectif de l'input shaping consiste à synthétiser le filtre (shaper) F de façon à ce que dés que la trajectoire de commande q(t) atteint et reste à zéro, la trajectoire du système à contrôler $q_H(t)$ atteint et reste à zéro en temps fini. Si le système comporte des modes de vibration, l'objectif précédent devient la condition d'annulation des vibrations résiduelles (Zero Residual Vibration ZRV condition). La réponse $q_H(t)$ du système H peut s'exprimer en termes de convolution entre les différentes réponses impulsionnelles de H et du filtre F, notées respectivement h et f (la réponse impulsionnelle hest en temps infini, alors que celle du filtre f est en temps fini T_f). Considérons une trajectoire de référence q(t) de durée finie T_q , la réponse $q_H(t)$ peut s'écrire :

$$q_H(t) = \int_0^{T_q} f * h(t - \tau) q(\tau) \, \mathrm{d}\tau.$$
(3.17)

La condition d'annulation des vibrations résiduelles $q_H(t) = 0$ pour $t > T_q + T_{f*h}$ sera vérifiée si f est synthétisé de manière à ce que f*h est une durée finie T_{f*h} :

$$f * h(t) = \int_0^{T_f} h(t - \tau) f(\tau) \, \mathrm{d}\tau = 0, \ t > T_{f * h} \ge T_f.$$
(3.18)

Une interprétation de la condition (3.18) précédente est que la réponse impulsionnelle du filtre f(t) doit être orthogonale à la fonction $h(\tau - t)$ pour tout décalage temporel $\tau > T_{f*h}$. Le modèle du système H inclut principalement la dynamique vibratoire que l'on cherche à annuler. Cette dynamique peut se décomposer en une sommes de n modes de vibrations :

$$h(t) = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i h_i(t), \ h_i(t) = e^{-\omega_i \sqrt{1-\varsigma_i^2} t} \cos\left(\omega_i t - \phi_i\right).$$
(3.19)

Le choix du filtre f se ramène ainsi généralement à déterminer n fonctions (filtres) f_i , telles que :

$$\int_{0}^{T_{f_i}} h_i(t-\tau) f_i(\tau) \, \mathrm{d}\tau = 0, \ t > T_i.$$
(3.20)

Le filtre f sera alors construit par convolution des n filtres ($f = f_1 * f_2 * \cdots * f_n$) et aura une durée total $T_f = \sum_i T_{f_i}$. Cette méthodologie est la

plus répandue pour synthétiser des filtres visant à annuler les vibrations résiduelles de systèmes multi-modes. On choisira classiquement comme fonction candidate f_i , associé à un mode de vibration, une fonction constituée d'une sommes de *m* impulsions (i.e. un filtre RIF) :

$$f_i(t) = \sum_{k=1}^m A_k \delta(t - T_k),$$
(3.21)

avec A_k et T_k l'amplitude et l'instant d'occurrence de l'impulsion k. En intégrant l'expression (3.21) dans la condition (3.20) on obtient la nouvelle condition :

$$\sum_{k=1}^{m} A_k h_i(t - T_k) = 0, \ t > T_m.$$
(3.22)

En exploitant le fait que $\cos(\omega_i(t - T_k) - \phi_i) = \cos(\omega_i t - \phi_i)\cos(\omega_i T_k) + \sin(\omega_i t - \phi_i)\sin(\omega_i T_k)$, la condition (3.22) se ramène à résoudre le système suivant :

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{m} A_k \cos\left(\omega_i T_k\right) = 0\\ \sum_{k=1}^{m} A_k \sin\left(\omega_i T_k\right) = 0 \end{cases}$$
(3.23)

En pratique, on peut choisir le filtre (3.21) minimisant le nombre d'impulsions *m* (simplicité) et vérifiant les conditions (3.23). La figure 3.6 donne une représentation graphique du principe de la compensation de vibration par génération d'une série d'impulsions. Pour un mode vibratoire, ici non-amorti, une série de 2 impulsions est suffisante. Le filtre de durée la plus courte, possède deux impulsions d'amplitude positive séparée d'une durée égale à la demi-période du mode propre considéré. Il s'agit d'un filtre appelé *ZV shaper* (Zero Vibration). Un autre shaper, dit négatif, peut annuler cette vibration pour 2 impulsions opposées en signe et séparées d'une durée égale à la période du mode. Le choix du ZV shaper est naturellement favorisé dans notre contexte afin de minimiser la durée du mouvement sur la trajectoire. Nous verrons dans la suite que le second choix peut être intrinsèquement retrouvé lors de la génération d'une trajectoire à jerk limité.



FIGURE 3.6 – Principe de compensation de vibration par série d'impulsions.

ZV shaper

Le ZV shaper permet de compenser un mode souple amorti par une succession de deux impulsions d'amplitude A_1 et A_2 , l'occurrence de la

seconde impulsion ayant lieu au temps T_{ZV} (= T_2) égal à la demi-période du mode propre considéré. Le ZV shaper est donné par la séquence impulsionnelle suivante (solution du système (3.23) pour m = 2) :

$$\begin{pmatrix} A_i \\ T_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{1+K} & \frac{K}{1+K} \\ 0 & T_{ZV} \end{pmatrix}, \qquad (3.24)$$

avec $T_{ZV} = \pi / (\omega_0 \sqrt{1 - \varsigma_0^2})$ et $K = \exp(-\varsigma_0 \pi / \sqrt{1 - \varsigma_0^2})$. En notant que la transformée de Laplace d'une impulsion unité est la constante unité, la fonction de transfert équivalente au filtre impulsionnel du ZV shaper est :

$$F_{ZV}(s) = A_1 + A_2 \exp\left(-sT_{ZV}\right).$$
(3.25)

L'amplitude de sa transformée de Fourier s'obtient après quelques manipulations algébriques :

$$|F_{ZV}(\omega)| = 4A_1A_2 \left[\cos\left(\omega T_{ZV}/2\right)\right]^2 + (A_1 - A_2)^2.$$
 (3.26)

La figure 3.7 illustre les réponses fréquentielles et indicielles des trois filtres génériques (Bi-quadratique, Notch et ZV shaper) réglés pour compenser le mode associé à H_{ϵ} . Le filtre de type Notch induit une modification de la trajectoire difficilement exprimable analytiquement (cf. réponse indicielle), ce qui conduit à une difficulté notable quant à la prévision de la durée du mouvement. Le filtre biquadratique inversant la dynamique conduit à une réponse indicielle présentant des discontinuités. Ce type de filtrage nécessite naturellement une trajectoire de référence dont l'ordre de continuité doit être au moins égale à l'ordre du filtre. On notera que le ZV shaper réduit le contenu spectral en accord avec l'amortissement choisi aux fréquences correspondantes à $(2k + 1)\omega_0$ avec $k \in \mathbb{N}$. Ainsi, un mode à fréquence propre plus élevé situé à proximité d'un multiple impair de la fréquence propre compensé sera naturellement amorti. L'allongement de la durée du mouvement est ici parfaitement défini par la durée du shaper, i.e. la demi-période du mode à compenser pour un ZV shaper.



FIGURE 3.7 – Réponses fréquentielles et indicielles des 3 types de filtres génériques de compensation de vibration.

Remarque. Il existe une grande variété de shapers qui permettent notamment d'améliorer les propriétés de robustesse du ZV shaper. La réduction de la sensibilité au variations de la pulsation ω_i à compenser, s'obtient principalement

par l'ajout de contraintes sur les dérivées de la condition (3.23) par rapport à ω_i . Ainsi le shaper annulant une vibration résiduelle, ainsi que sa dérivée et appelé ZVD (Zero Vibration Derivative). Le lecteur intéressé trouvera les différentes méthodologies associées à l'input shaping dans les ouvrages suivants [Singhose, 2004, Singhose, 2009].

3.4 Contribution à la réduction de vibration par la synthèse de trajectoire

La loi à jerk limitée peut permettre de réduire les amplitudes de vibration d'un système mécanique. Ce fait est intuitivement ressenti par la douceur (intégration supplémentaire) qu'apporte cette loi comparativement à une loi à accélération limitée plus *agressive*. Au delà de ce constat qui conduirait à faire un lien direct entre la valeur maximal de jerk et l'amplitude des vibrations, l'analyse de l'amplitude de la transformée de Fourier d'une trajectoire à jerk limitée (cf. équation 3.13) démontre que ce sont les durées des phases à jerk constant qui ont une influence plus significatives. En effet, suivant la valeur de la durée de ces phases, il est possible d'annuler localement le spectre de la trajectoire autour d'une fréquence donnée. C'est cette propriété que nous avons mis en évidence, puis généralisé dans différents travaux résumés dans ce qui suit.

3.4.1 Shaper équivalent pour la loi à jerk limité

Dans le chapitre 2 nous avons exploité les propriétés des filtre RIF afin d'obtenir une trajectoire à jerk limité par filtrage d'une trajectoire à accélération limitée. Le filtre utilisé est un filtre à moyenne glissante. Comme illustré à la figure 3.8, ce filtre peut se décomposer comme étant l'intégrale temporelle d'un shaper à deux impulsions. Ces deux impulsions ont la même amplitude, mais des signes opposés, il s'agit dans ce cas d'un shaper négatif. Dans le cas où la durée entre les deux impulsions, i.e.



FIGURE 3.8 – Shaper équivalent pour le profil à jerk limité.

la durée des phases à jerk constant, est égale à un multiple de la période propre d'un mode vibratoire, les vibrations résiduelles seront notablement réduite, voire annuler dans le cas d'un mode non-amorti. Cette propriété peut être exploitée facilement en imposant la durée de filtrage, ce qui de fait a pour conséquence de fixer la valeur maximale du jerk (cf. équation (3.14)) et naturellement conduit à une trajectoire à jerk limité qui ne respecte plus l'optimalité par rapport au temps (pour les mouvements ne comportant pas 7 phases). La perte de l'optimalité stricte en temps est ici à relativiser puisqu'il s'agit d'une optimalité sans prise en compte de la dynamique du système, donc des vibrations induites par le mouvement. En réglant le paramètre de durée de jerk afin d'annuler/réduire les vibrations, on obtient une solution certes sub-optimale quant au compromis temps/précision, mais avec les propriétés notables suivantes :

- (a) Facilité d'implantation : un unique paramètre de réglage.
- (b) Rationalité du réglage : Fourni (indirectement) une valeur *phy-sique* au paramètre de Jerk afin de compenser une vibration.
- (c) Robustesse : Bonnes propriétés de robustesse face aux variations de la fréquence propre du mode vibratoire considéré, ainsi qu'aux dynamiques vibratoires négligées.



FIGURE 3.9 – Courbe de sensibilité pour les shapers ZV, ZVD et le filtre équivalent au jerk limité. Le % est défini en prenant comme référence l'amplitude vibratoire provoquée par un échelon d'accélération (profil à accélération limitée).

La propriété (c) de robustesse est intimement liée à l'intégration temporelle du shaper équivalent (cf. figure 3.8). La figure 3.9 présente un comparatif en termes de réduction de vibration des shapers ZV, ZVD et du filtre équivalent au jerk limité en fonction du ratio entre la pulsation ω du mode vibratoire et la pulsation de réglage du shaper ω_0 . La sensibilité du filtre équivalent au jerk limité, indiquée ici à 5%, est comprise entre celle d'un shaper de type ZV (d'une durée égale à une demie-période propre) et celle d'un ZVD (d'une durée égale à une période du mode propre). Toutefois, dans le cas de dynamiques vibratoires négligées, le profil à jerk limité est naturellement moins sensible que les autres shapers. La figure 3.10 illustre ce principe dans le cas d'un système comportant un second mode vibratoire.



FIGURE 3.10 – Réponses des filtres impulsionnels pour un système comportant deux modes de vibrations. Chacun des filtres (ZV, ZVD et jerk limité) est réglé afin de compenser le premier mode de vibration, le second mode représente une dynamique négligée.

3.4.2 Extensions à d'autres profils de jerk

Dans [JI2] la méthode précédente est étendue afin de générer des trajectoires à jerks dissociés. La durée des phases à jerk constant (donc la valeur de jerk maximale) est modulable pour chaque phase à jerk constant. La durée du filtre à moyenne glissante est réadaptée pour chacune des 4 phases du mouvement en fonction d'un durée de jerk désirée. Il devient dés lors possible d'étendre les propriétés de compensation de vibrations, en s'adaptant notamment aux variations de la fréquence propre du mode considéré (en fonction du temps et/ou de la configuration du système). Cette adaptation s'appuie sur un modèle de connaissance de la variations de la fréquence propre ou sur une identification en ligne rapide. Dans [CI2] et [CI5], nous exploitons les méthodes d'identification algébriques afin d'estimer rapidement (\leq 1 période du mode vibratoire) la fréquence et l'amortissement de la vibration à compenser.

Dans [JI1], nous proposons une évolution de la loi à jerk limitée afin de tenir compte de l'amortissement du mode à compenser. En effet, pour la loi à jerk limité, les deux impulsions du shaper équivalent sont d'amplitude égale, ce filtre impulsionnel ne peut donc compenser qu'un mode à amortissement nul. Le nouveau filtre proposé génère une trajectoire baptisée à jerk amorti (Damped-jerk trajectory), qui permet de compenser parfaitement un mode vibratoire tout en conservant les propriétés naturelles de la loi à jerk limitée. C'est-à-dire, la simplicité de réglage, d'implantation et surtout le filtrage naturelle des fréquences élevées (effet de l'intégrale sur le shaper). Ce nouveau filtre, ainsi que sa décomposition en shaper, sont présentés sur la figure 3.12. La méthodologie de réglage de ce filtre est explicitée en annexe A4. La figure 3.13 donne un comparatif



FIGURE 3.11 – Exemple de trajectoire à jerk dissocié ($T_{j1} = 20ms$; $T_{j2} = 30ms T_{j3} = 60ms T_{j4} = 80ms$).



FIGURE 3.12 – Shaper équivalent pour le profil à jerk amorti.

des propriétés de réduction de vibration pour une trajectoire à jerk limité et une trajectoire à jerk amorti en fonction de l'amortissement, noté ζ , du mode considéré. Le pourcentage de vibration résiduelle étant référencé par rapport à l'amplitude de vibration induite par la loi à accélération limitée (utilisée comme référence). On vérifie sur ces tracés que la loi à jerk amorti permet d'atteindre le même niveau de réduction vibratoire indépendamment de la valeur du coefficient d'amortissement du mode vibratoire. Une trajectoire à jerk amorti apportera un gain notable en terme de réduction de vibration, comparativement à la trajectoire à jerk limité, pour des systèmes à amortissement non négligeable. Cet amortissement peut avoir été *augmenté* par la commande (amortissement actif) ou par l'ajout de systèmes externes (amortissement passif). On notera par conséquent que cette nouvelle loi autorise une synthèse concourante de la trajectoire et de la commande en vue de réduire l'effet des vibrations.



FIGURE 3.13 – Vibration résiduelle [%] en fonction de la pulsation adimensionnée (ratio entre la pulsation ω du mode vibratoire et la pulsation de réglage ω_0) et de l'amortissement ζ . (a) jerk limité, (b) jerk amorti.

3.5 QUELQUES EXEMPLES APPLICATIFS

A l'origine de mes travaux sur le jerk, c'est à dire il y a un peu plus de dix ans, le paramètre de valeur maximal du jerk (ou son paramètre corollaire la durée des pentes d'accélération) était disponible sur la majorité des Commandes Numériques exploitées dans l'industrie. Cette valeur était toutefois réglée de manière empirique, voire non exploitée. Les premiers travaux portant sur l'analyse de l'influence du jerk sur le comportement vibratoire des axes de machine ont permis de formaliser le réglage de ce paramètre en fonction du/des modes vibratoires dominants la réponse du système dynamique. Ces travaux ont fait l'objet de plusieurs applications et actions de transferts vers l'industrie. La figure 3.14 présente des résultats expérimentaux obtenus sur deux types de machines : un axe de robot cartésien de transitique (précision de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre) et un axe de machine-outil UGV (précision de l'ordre du micromètre). Les courbes théoriques tiennent compte de plusieurs paramètres associés au réglage de la commande d'axe. Dans le cas du robot cartésien, le paramètre de gain de position (structure de commande par boucle en cascade position/vitesse/courant) est repris sur la courbe 3D. On notera que la maîtrise du niveau vibratoire obtenue par le réglage de la durée des phases à jerk constant, permet une augmentation du gain de position (initialement faible sur des systèmes souples), ce qui finalement permet d'atteindre deux objectifs généralement antagonistes sur des structures souples : réaliser un gain en rapidité et un gain en précision dynamique. Ce principe est illustré sur la figure 3.15. Dans le cas des axes de machine-outil à grande dynamique, les bandes passantes des actionneurs sont très élevées (moteur linéaire dans le cas présent), et les asservissements "très rigides" (les gains de position sont déjà à la limite des capacités énergétiques). Sans remise en cause de la structure de commande de ces machines, l'unique paramètre permettant d'associer la réduction de vibration à la réduction du temps de réponse est ici le paramètre d'anticipation en vitesse (il s'agit d'une action de type boucle ouverte en supposant un modèle parfaitement rigide du système).

Les fréquences propres associées aux déformations dominant la dynamique d'un système sont très souvent non-stationnaires. Dans le cas des systèmes multi-axes, ces fréquences propres sont dépendantes de la configuration des axes. La figure 3.16 illustre cette état non stationnaire pour les 2 premières fréquences propres d'un robot cartésien. Dans ce cas, l'application du principe de réduction de vibration par la loi à jerk limitée passe par une adaptation de la durée des phases à jerk non nul en fonction de la position des axes. Cette adaptation se ramène à une modification en ligne des coefficients du filtre FIR utilisé dans le générateur de trajectoire, afin d'obtenir une trajectoire à jerk dissocié (cf. figure 3.11). La table 3.1 synthétise les résultats expérimentaux obtenus sur ce robot pour une génération de trajectoire à jerk dissocié. Comparativement à une loi à jerk constant (sans adaptation des durées des phases à jerk non nul), la loi à jerk dissociée permet de réduire d'environ 23% l'amplitude des vibrations. De plus, le temps de cycle du robot (pour une tolérance de



FIGURE 3.14 – Vibrations résiduelles pour une trajectoire à jerk limitée. Points mesurées superposés à la courbe théorique pour deux machines de productions différentes : un robot cartésien 3 axes SEPRO Robotique ($a_{max} = 4, 5m/s^2$) et une machine-outil UGV ($a_{max} = 20m/s^2$).



FIGURE 3.15 – Courbes d'Iso-temps de réponse superposées au niveau vibratoire obtenu en fonction du jerk maximal pour un robot cartésien.

positionnement de l'ordre de 3/10 mm) est ici réduit de plus de 10 %.

Un derniers exemple applicatif concerne la loi à jerk amorti, présenté dans la partie 3.4.2. Contrairement à la loi à jerk limité, la loi à jerk amorti permet de tenir compte de l'amortissement du mode vibratoire à compenser. Le gain en termes de réduction du niveau vibratoire est significatif pour des modes vibratoires à amortissement non négligeable (entre 10 et 40 %). Toutefois, même dans le cas d'un amortissement très faible, le profil à jerk amorti peut permettre d'atteindre des performances en positionnement *en rupture avec l'état de l'art*. A titre d'exemple, la figure 3.17 présente la position mesurée d'un axe de robot anthropomorphe pour un



FIGURE 3.16 – Modélisation éléments finis des 2 premières déformées modales d'un robot 3 axes cartésien et mesure expérimentale de l'évolution des deux fréquences propres associées en fonction de la position de l'axe z.

	Direction X	Direction Y
Vibration résiduelle		
Valeur moyenne	-27	-19.1
Maximum	-60.1	-54
Mininimum	0	2
Ecart type	18.2	10.3
Temps d'établissement		
Valeur moyenne	-11	-9.2
Maximum	-37.7	-22
Mininimum	-4	-3
Ecart type	13.4	7.2

 TABLE 3.1 – Statistiques des résultats d'une loi à jerk dissocié obtenues pour 6 ensembles

 de contraintes cinématiques différents pour les 3 axes du robot présenté à la figure 3.16.

 Les résultats sont exprimés en % relativement à ceux obtenus pour une loi de mouvement

 à jerk constant.



FIGURE 3.17 – Vibrations résiduelles de l'axe 1 d'un robot anthropomorphe, obtenues pour une trajectoire articulaire à jerk limité et à jerk amorti. Les mesures sont réalisées par un système laser tracker $(15\mu m/m)$.

mouvement articulaire. On se focalise ici sur la fin du mouvement (vibration résiduelle). Le premier mode dominant cette axe est associé à un coefficient d'amortissement faible de l'ordre de 6%. La loi à jerk limitée apporte une réduction significative des amplitudes vibratoires (-94% par rapport à la loi de référence à accélération limité). La loi à jerk amorti permet quant à elle d'atteindre un niveau de précision de positionnement dynamique inférieure au 1/10mm (exactement -20% par rapport au jerk limité), ce qui représente la limite de répétabilité statique de ce type de robot, i.e. une limite intrinsèque pour le système.

Travaux en cours et Perspectives de recherche

4.1 CONTINUITÉ DES TRAVAUX

Les contributions aux deux axes de recherche présentés dans ce mémoire, à savoir *la génération dynamique de trajectoire* et *l'adaptation des trajectoires à la réduction des vibrations*, sont des axes aujourd'hui matures, au sens où ils sont immédiatement appliqués dans mes activités de recherche partenariale avec l'industrie. Ces thématiques demeurent cependant ouvertes à plusieurs sources d'évolution, afin notamment d'intégrer de nouveaux champs de contraintes associés à des contextes applicatifs particuliers. Ainsi, la continuité des développements associés à ces deux axes me permettra d'affirmer une spécificité dans le contexte national et international.

A titre d'exemple, je co-encadre actuellement une thèse sur la commande de bras de chargement/déchargement de gaz naturel liquéfié en milieu marin (Thèse de P. Besset [Th4] - Cifre avec la société FMC Technologies). La figure 4.1 présente une vue du projet SHELL Prélude. Il s'agit d'un navire-usine (Floating Liquified Natural Gas plateform) de dimensions inédites et destiné à l'exploitation des gisements en gaz naturel (ici localisé au large de l'Australie), ainsi qu'au chargement en pleine mer des méthaniers clients. On peut entrevoir sur cette image une représentation générique (choix non définitif et confidentialité) des bras de chargement/déchargement entre le navire client et le FLNG. Dans ce contexte particulier, les systèmes polyarticulés que constituent les bras de chargement sont conçus pour répondre à des contraintes fortes de compacité, ce qui les rend d'autant plus sensibles aux perturbations induites par l'environnement marin (état de mer et vent). Le guidage automatisé de ces systèmes, qui se ramène à un problème de « rendez-vous » entre l'organe terminal du bras et le receveur sur le navire client, doit être capable de générer des trajectoires dynamiques précises (le receveur étant une cible mouvante) et n'induisant que peu ou pas de vibrations pour des raisons de sécurité (encombrement important de la zone d'action). Les apports ou évolutions quant aux techniques actuelles de planification de mouvement et de compensation de vibrations reposent d'une part, sur l'adaptation de la génération de trajectoire à la dynamique particulière des bras et de l'environnement, et d'autre part, sur la synthèse concourante de la trajectoire de référence et de l'amortissement des vibrations par contrôle actif et/ou

passif [Ni *et al.*, 2009, Liu et Li, 2010]. Un des principaux verrous réside également dans l'estimation robuste de la position à atteindre, par une fusion de données multi-capteurs et une prédiction sur un horizon réduit (10s) de l'état de mer [Kuchler *et al.*, 2011, Lin *et al.*, 2011].



FIGURE 4.1 – Navire-Usine : projet Prélude SHELL.

4.2 OUVERTURE VERS DE NOUVELLES THÉMATIQUES

Dans [Garcia et al., 2007], les auteurs présentent une revue des évolutions dans le domaine de la recherche en robotique. De la fin des années 1960 et jusqu'aux années 1990, la recherche en robotique était dominée par les besoins exprimés par l'industrie automobile. Un des axes de recherche privilégié étant la problématique d'amélioration de la précision statique et dynamique des robots. Cette problématique, qui a notamment été investiguée au cours du co-encadrement des thèses d'Adel Olabi [Th 1] et de Marouene Oueslati [Th 3], est généralement abordée par le biais de la mise en œuvre de méthodes de calibration (processus de modélisation et d'identification du modèle cinématique/dynamique du système) et/ou de méthodes de compensation d'erreur de suivi, de déformation et de vibrations. Au début des années 1990, le développement massif de nouvelles industries (pharmaceutique, agro-alimentaire,) et de nouveaux secteurs (robotique de service et robotique médicale) ont imposé de nouveaux besoins concernant les applications en robotique. Une des principales caractéristiques de cette évolution étant le besoin en termes de flexibilité, afin de disposer de moyens robotisés capables de s'adapter à de multiples taches et reconfigurables rapidement. Depuis, les exigences associées à la personnalisation de masse des produits n'ont fait que renforcer ce besoin de flexibilité.

Usine 4.0, Horizon 2020, Usine du futur, Industrie du futur, sont autant de grands projets structurants et de nouveaux concepts qui ont confirmé les besoins et favorisé des développements très récents dans le domaine de la robotique industrielle. La robotique mobile, collaborative et humanoïde¹ sont aujourd'hui des thématiques incontournables associées à l'évolution

^{1.} Ici au sens de l'intelligence artificielle, de l'apprentissage automatisé et du traitement avancé de la vision

économique et sociétale. Alimentée par les problématiques afférentes à ces thématiques, notre plateforme technologique *Usine Agile* comporte notamment des moyens innovants et totalement *ouverts* d'un point de vue contrôle/commande. Pour exemple, forts d'un partenariat avec la société KUKA, nous disposons depuis mars 2015 de la dernière version de la base mobile mobile *Kuka MKR iiwa*, ainsi que de plusieurs robots collaboratifs 7 axes de type *Kuka LBR iiwa*, venant compléter un ensemble de moyens déjà disponibles, dont notamment 2 robots collaboratifs 6 axes *Universal Robot UR*10. Ces nouveaux systèmes et domaines applicatifs sont autant d'opportunités d'adaptation/application de mes travaux, ainsi que de développement de nouveaux axes de recherche. Actuellement, les principaux axes de recherche en robotique, identifié particulièrement dans la roadmap européenne *Robotic* 2020 [eu-robotics, 2014], concernent les grands ensembles technologiques suivants :

- Le développement des méthodologies et outils logiciels facilitant l'intégration des nouvelles technologies. Cet ensemble est associé aux principaux mots-clés suivant : Robustesse et sécurité de fonctionnement, standardisation des méthodes et modèles, sécurité des communications.
- L'interaction homme-machine. Il s'agit ici d'accroître le potentiel d'interaction sûre entre l'homme et le robot.
- La mécatronique. Cet ensemble est associé au développement de nouveaux principes/moyens de mesure. La recherche et le développement d'actionneurs et de leurs commandes associées permettant de se rapprocher des performances et du comportement biologique humain est notamment au cœur de cet axe.
- La perception, la navigation et la connaissance (AI). Les principaux mots-clés sont ici : Fusion de données multimodales, reconnaissance de formes/ propriétés (visuelle, chimique,), gestion de flottilles de robot hétérogènes, capacité d'apprentissage, raisonnement et résolution de problème automatisés.

4.2.1 Perspectives à court et moyen termes : robotique mobile et collaborative

En premier lieu, afin de développer et de rendre identifiable les compétences de notre équipe dans le domaine de la recherche en robotique, je souhaite renforcer notre participation aux groupements de recherche, notamment en ce qui concerne les activités du GDR Robotique (GT4 : Architectures de contrôle pour la robotique et GT5 : Interactions personnes / systèmes robotiques). Les perspectives à courts termes de mes travaux de recherche sont en effet principalement centrées sur les développements associés à la perception et à la navigation en robotique mobile et en robotique collaborative. Un certain nombre de travaux en cours viennent conforter cette orientation, qui s'inscrit notamment dans le secteur *Plateforme robotique industrielle* du plan *Usine du futur* de la Nouvelle France industrielle.

Robotique mobile et vision

Un premier axe de recherche concerne le développement et l'évaluation de méthodes de localisation rapides et précises en robotique mobile. Cet axe reste centré sur la notion de trajectoire, mais se place de *l'autre côté du problème*. Il s'agit ici d'estimer par traitement de bas niveau la trajectoire réellement réalisée. Il existe une littérature particulièrement abondante sur le sujet [Jungmin et al., 2012, McCarthy et Barnes, 2004, Scaramuzza et Siegwart, 2008] et quelques solutions fonctionnelles sont disponibles « sur étagère ». Pourquoi alors développer sur ce thème ? Il n'existe tout simplement pas une solution générique² et simple à mettre en œuvre au problème de localisation. Je me focalise plus particulièrement sur la localisation en intérieur, donc en milieu non couvert par les signaux GPS. Sans détailler de façon exhaustive ce domaine très vaste, les solutions employées aujourd'hui reposent encore principalement sur de l'odométrie mécanique (codeur sur les roues). Cette méthode ne s'avère robuste que si le phénomène de glissement est négligeable. Or, pour des raisons de compacité et de flexibilité, les robots mobiles industriels récents (ou AGV) exploitent de plus en plus des roues dites « suédoises » (Mecanum, Omniwheel), qui confèrent une parfaite holonomie de mouvement, mais impliquent par principe un glissement relatif vis-à-vis de l'axe des roues principales (cf. figure 4.2). Pour ces robots holonomes, les technologies de localisation disponibles sur le marché passent, soit par la mise en œuvre de marqueurs ou balises dans l'environnement, afin de trianguler la position du système (cible laser ou amers pour la vision), soit par une fusion des données issues des codeurs mécaniques avec une/des mesures extéroceptives supplémentaires (centrale inertielle, scanner laser). Ainsi, les solutions actuelles robustes nécessitent soit la modification de l'infrastructure, ce qui implique des coûts supplémentaires et limite la flexibilité spatiale du système, soit la mise en œuvre de différents algorithmes (fusions de données) et moyens particulièrement coûteux (un couple de scanners laser normé sécurité représente actuellement un poste budgétaire supérieur à 8k€). Ce constat démontre qu'il existe toujours un besoin concret en terme de solution d'odométrie simple, compact, robuste et autonome. L'erreur de positionnement relative recherchée est de l'ordre de 1% (1 cm/m, 0,01 rad/m).

Mes premiers travaux sur le sujet datent du début de l'année 2014 et sont actuellement en second reviewing pour la revue *IEEE trans. Robotics.* Ils portent sur une solution d'odométrie visuelle monoculaire temps réel. Les informations du mouvement sont extraites du flux vidéo d'une caméra dirigée vers le sol et fixée au véhicule, sans contrainte sur l'implantation et le type de transmission du véhicule. Le mouvement se déduit par la mise en correspondance de plusieurs zones entre les images successives. Afin d'estimer rapidement le mouvement (>60 Hz), la métrique de corrélation croisée normalisée est utilisée. Cette dernière est connue pour sa rapidité et sa robustesse, parfois supérieures aux méthodes basées

^{2.} Une solution au sens d'un optimum global, applicable en intérieur, comme en extérieur, robuste sur tout type de terrain et dans toutes conditions (ambiance lumineuse, potentiel d'occlusion par la présence de l'humain).



FIGURE 4.2 – Géométrie de transmission : a) Type Ackermann, b) Omnidirectionnelle (Omni wheels), c) Omnidirectionnelle (Mecanum).



FIGURE 4.3 – Plan rotation image/taille du template montrant l'évolution de la zone d'invariance (translation < 1 pixel) à la rotation de l'opération de corrélation croisée. Les pourcentages indiqués sur les courbes correspondent au nombre de pixels du template qui ne subissent pas de déplacement (région non modifiée du template par la rotation).

sur le calcul du flot optique [Schreier *et al.*, 2009]. L'apport de la méthode proposée s'appuie sur le fait que pour les types de sols visés (béton et bitume), il est montré (cf. figure 4.3) que l'appariement par corrélation des images sera invariant à la rotation pour de petit angle (< 6°). De fait, un ensemble de n ($n \ge 2$) mesures de translations entre chacune des images successives permet de reconstruire la transformation rigide (translation et rotation) entre le plan du sol et le plan caméra. La figure 4.4 présente une base mobile omnidirectionnelle (Roue Mecanum) exploitée pour les essais d'odométrie visuelle et un exemple de résultat obtenu est décrit sur la figure 4.5.



FIGURE 4.4 - (1) Base mobile omnidirectionnelle KUKA MKR; (2) Bras collaboratif KUKA iiwa; (3) caméra Basler monochrome CCD 1/3 640 × 480, 90Hz) et anneau lumineux.



FIGURE 4.5 – Exemple de chemin obtenu par la méthode d'odométrie monoculaire comparée à la réalité terrain (mesure laser tracker).

Robotique mobile collaborative

Un second axe de recherche concerne **le développement de méthodologies de gestion d'une flottille de robots collaboratifs hétérogènes**. Sur ce thème, je co-encadrerai, à partir d'octobre 2015, une thèse de doctorat portant sur la gestion de plusieurs robots mobiles équipés de bras anthropomorphes et réalisant des opérations d'assemblage dans un environnement fortement contraint. L'aspect collaboratif est ici envisagé entre les robots (partage de tâches, priorisation des déplacements, gestion des défaillances), ainsi qu'entre les humains et les robots par un partage de l'espace de travail. Les principales voix d'investigation concernent la robustesse de fonctionnement [Erhart *et al.*, 2013], ainsi que le développement de la flexibilité et de l'autonomie des robots, notamment par la synthèse d'une commande décentralisée de coordination des différentes taches [Dimarogonas *et al.*, 2003].

Enfin, un autre axe de développement envisagé concerne **la génération des trajectoires pour un ensemble constitué d'une base mobile et d'un bras robotisé destiné à la cobotique**. Le caractère générique de la méthode de filtrage présentée dans ce mémoire doit permettre d'employer la même méthodologie pour les deux sous-systèmes. Par une adaptation en temps réel du générateur de trajectoire, les degrés de liberté des deux sous-systèmes pourraient être fusionnés et parfois synchronisés afin de répondre à une problématique particulière [Bu et Zhang, 2009]. Les scenarii envisagés intègrent le fait que la base mobile contribue à l'opération réalisée par le robot collaboratif, par exemple en maximisant son espace de travail, en améliorant les conditions d'accessibilité de certaines zones, ou encore en minimisant les vibrations induites par le mouvement propre du robot collaboratif (amortissement actif par le robot mobile).



4.2.2 Perspectives à long terme : vers l'auto-apprentissage

FIGURE 4.6 – a) Actionneur rigide, b) Actionneur compliant : Series Elastic Actuators, c) Actionneur compliant : Variable Stiffness Actuators, d) Actionneur compliant : SEA + VSA.

Dans leur majorité les robots industriels reposent sur un mimétisme morphologique et comportemental de l'humain. L'aspect comportemental se développe naturellement dans le contexte de la collaboration homme/robot. Il s'agit dans un premier temps de rassurer l'humain par des mouvements compréhensibles, autrement dit des mouvements prévisibles et donc sécuritaires. Dans un second temps, il est question de reproduction par l'apprentissage du mouvement expert de l'humain [Kuwahara et al., 2010, Yajima et Katsura, 2012]. Dans [Hernoux et al., 2015], nous présentons des premiers travaux sur la qualification et l'exploitation d'un capteur de type *leap-motion*, afin de reproduire une gestuelle humaine en temps réel. La reproduction du mouvement humain témoigne d'une forme d'intelligence encore très limitée (pas de compréhension des primitives préprogrammées du mouvement). Ce dernier point ouvre toutefois un champ d'investigation plus fondamental, le principe d'imitation, qui supposerait une intentionnalité du système et donc une conscience de soi et d'autrui, i.e. une forme d'intelligence évoluée. Je souhaite participer au développement de l'intelligence artificielle et plus particulièrement au déploiement du champs d'étude de **l'apprentissage automatique** [Pan et Yang, 2010, Song *et al.*, 2012], qui est, de mon avis, la prochaine étape évolutive en robotique industrielle et en robotique de service. En m'appuyant sur l'expertise présentée dans ce mémoire, je n'envisage raisonnablement pas d'aborder directement l'aspect cognitif, mais plutôt de **contribuer à l'évolution des moyens de** saisir l'information, i.e. les sens. Je privilégie les deux axes suivants :

- La vue. Les développements associés à l'étude sur l'odométrie visuelle, précédemment présentée, sont les prémisses à de futurs développements en analyse d'image et en suivi de trajectoire par retour visuel appliqués à la cobotique.
- Le toucher. Les robots collaboratifs disposent de retour d'efforts ou d'une image des efforts d'interaction avec l'environnement. La synthèse d'une forme de compliance indispensable à toute manipulation fine est dans ce cas entièrement dévolue à la commande du système rigide. Une première étude en cours porte sur l'optimisation en conception et commande d'actionneurs intrinsèquement (mécaniquement) compliants : les actionneurs compacts de type Se-

ries Elastic Actuators [Paine *et al.,* 2014]. La première piste d'investigation est l'optimisation en temps-réel de la combinaison entre la compliance passive du SEA et une compliance active à raideur et amortissement variables introduite par la commande (cf. figure 4.6.d).

Conclusions

Sous le titre de contribution à la génération de commande pour la réduction de vibration, j'ai synthétisé les deux thématiques de mes activités de recherche, à savoir :

- la génération de trajectoire, appliquée plus particulièrement à la synthèse dynamique de trajectoire à jerk limité;
- la compensation de vibration, abordée par le biais de la mise en forme (filtrage) de la trajectoire désirée du système et appliquée aux vibrations induites par le mouvement propre de ce dernier.

L'efficacité, la facilité d'implantation, ainsi que la robustesse des méthodologies présentées ont permis de les rendre exploitables dans le cadre d'applications industrielles, notamment lors de mes activités de transfert vers l'industrie.

Mon projet de recherche est retranscrit sous la forme de perspectives témoignant d'une réorientation forte vers le domaine de la robotique mobile et collaborative. La pertinence de ces perspectives est étayée par des travaux récemment réalisés, ou en cours : une publication sur la reproduction de mouvement humain; une publication en 2^{nd} reviewing sur le thème de la localisation de plateforme robotisée; un co-encadrement de thèse (Débuté au 1^{er} septembre 2015) sur le thème de la gestion robuste d'une flottille de manipulateurs mobiles, destinée à réaliser des opérations complexes (assemblage, usinage, rivetage,) dans un espace fortement contraint.
Bibliographie

- [Abdullah *et al.*, 2006] A.M. Abdullah, G. GuoXiao, B. Chao, *Hard Disk Drive : Mechatronics and Control,* CRC Press , Cambridge University Press, ISBN 978 0 849 37253 7, (2006).
- [Altintas, 2000] Y. Altintas, *Manufacturing Automation : Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design,* 1st Edition, Cambridge University Press, ISBN 978 1 107 00148 0, (2000).
- [Aspinwall, 1980] D.M. Aspinwall, Acceleration Profiles for Minimizing Residual Response, ASME. J. Dyn. Sys., Meas., Control, 102(1), (1980), pages 3 – 6.
- [Athans et Falb, 1966] M. Athans, P.L. Falb, *Optimal Control*, New York : McGraw-Hill Book Company, (1966).
- [Béarée, 2014] R. Béarée, *New Damped-Jerk trajectory for vibration reduction*, Control Engineering Practice, 28, (2014), pages 112 – 120.
- [Béarée et Olabi, 2013] R. Béarée, A. Olabi, *Dissociated jerk-limited trajectory applied to time-varying vibration reduction*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 29(2), (2013), pages 444 – 453.
- [Béarée et al., 2011] R. Béarée, J-Y. Dieulot, P. Rabate, An innovative subdivision-ICP registration method for tool-path correction applied to deformed aircraft parts machining, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 53(5), (2011), pages 463 – 471.
- [Béarée et al., 2004] R. Béarée, P.J. Barre, S. Bloch, Influence of high-speed machine tool control parameters on the contouring accuracy – Application to linear and circular interpolation, Journal of Intelligent and Robotic Systems, 40(3), (2004), pages 321 – 342.
- [Benosman et Le Vey, 2003] M. Benosman, G. Le Vey, Stable inversion of SISO nonminimum phase linear systems through output planning : an experimental application to the one-link flexible manipulator, IEEE trans. On Control Systems Technology, 40(3), (2003), pages 588 – 597.
- [Bhat et Miu, 1992] S.P. Bhat, D.K. Miu, *Point-to-Point Positioning of Flexible Structures Using a Time Domain LQ Smoothness Constraint*, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 114, (1992), pages 416 – 421.
- [Biagiotti et Melchiorri, 2008] L. Biagiotti, C. Melchiorri, *Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots*, Springer, ISBN 978 – 3 – 540 – 85629 – 0, (2008).
- [Biagiotti et Melchiorri, 2012] L. Biagiotti, C. Melchiorri, FIR filters for online trajectory planning with time- and frequency-domain specifications, Control Engineering Practice, 20(12), (2012), pages 1385 – 1399.

- [Björkenstam et al., 2013] S. Björkenstam, D. Gleeson, R. Bohlin, Energy Efficient and Collision Free Motion of Industrial Robots using Optimal Control, in proc. of IEEE Conf. on Automation Science and Engineering (CASE 2013), Aug, Madison, Wisconsin, (2013).
- [Bu et Zhang, 2009] C.W. Bu, L.X. Zhang, Robust Compensation Control of Mobile Manipulator Service Robot, In proc. of IEEE International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, April 11-12, Zhangjiajie, Hunan, (2009).
- [Burghes et Graham, 2008] D.N. Burghes, A. Graham, Introduction to control theory, including optimal control, J. Wiley & Sons, DOI : 10.1002/oca.4660020210, (1981).
- [Dimarogonas *et al.*, 2003] D. Dimarogonas, M. Zavlanos, S. Loizou, K. Kyriakopoulos *Decentralized motion control of multiple holonomic agents under input constraints*, in proc. of IEEE Conf. on Decision and Control, (2013).
- [Delpoux *et al.*, 2014] R. Delpoux, R. Béarée, A. Olabi, O. Gibaru, *Toward on-line robot vibratory modes estimation*, In proc. of American Control Conference, Portland, USA, (2014).
- [Economou et al., 2001] D. Economou, C. Lee, C. Mavroidis, L. Antoniadis, Experimental demonstration of input preconditioning for residual vibration suppression using low-pass FIR digital filters, In proc. of American Control Conference, Arlington, VA, (2001).
- [Economou *et al.*, 1999] G. Ellis, R.D. Lorentz, *Comparison of motion control loops for industrial applications*, In proc. of IEEE IAS, Phoenix, USA, (1999).
- [Erhart *et al.*, 2013] S. Erhart, D. Sieber, S. Hirche, *An impedance-based control architecture for multi-robot cooperative dual-arm mobile manipulation*, In proc. of IEEE Intelligent Robots and Systems (IROS), Nov. 3-7, Tokyo , Japan, (2013).
- [Erkorkmaz et Altintas, 2000] K. Erkorkmaz, Y. Altintas, High speed CNC system design. Part I : jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 41, (2005), pages 1323 – 1345.
- [eu-robotics, 2014] eu-robotics, *Robotics* 2020 Multi-Annual Roadmap, http://www.eu-robotics.net, (2014)
- [Futami et al., 1983] S. Futami, N. Kyura, S. Hara, Vibration Absorption Control of Industrial Robots by Acceleration Feedback, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 30(3), (1983), pages 299 – 305.
- [Garcia *et al.*, 2007] E. Garcia, M.A.. Jimenez, P.G. De Santos, M. Armada, *The evolution of robotics research*, IEEE Robotics Automation Magazine, 14(1), (2007), pages 90 – 103.
- [Groß *et al.*, 2001] H. Groß, J. Harmann, G. Wiegârtner, *Electrical Feed Drives in Automation*, John Wiley Sons, ISBN 978 3 89578 148 3, (2001).
- [Guarino et Bianco, 2013] C. Guarino, L. Bianco, *Minimum-Jerk Velocity Planning for Mobile Robot Applications*, IEEE Transactions on Robotics, 29(5), (2013), pages 1317 – 1326.

- [Hermes et Lasalle, 1969] H. Hermes, J. P. Lasalle, *Functional Analysis and Time Optimal Control*, New York : Academic Press, (1969).
- [Hernoux et al., 2015] F. Hernoux, R. Béarée, O. Gibaru, Investigation of dynamic 3D Hand Motion Reproduction by a robot using a Leap Motion, In proc. of 17th International Conference and Exhibition of Virtual Technologies and uses (VRIC), Laval, France, (2015).
- [Jeong et al., 2005] S.Y. Jeong, Y.J. Choi, P.Park, S.G. Choi, Jerk limited velocity profile generation for high speed industrial robot trajectories, IFAC World Congress, 16(1), (2005).
- [Jungmin et al., 2012] K. Jungmin, W. Seungbeom, K. Jaeyong, D. Joocheol, K. Sungshin, B. Sunil, *Inertial navigation system for an automatic* guided vehicle with Mecanum wheels, Int. J. Precis. Eng. Manuf., 13(3), (2012), pages 379 – 386.
- [Junkins et Turner, 1986] J.L. Junkins, J. D. Turner, *Optimal Spacecraft Rotational Maneuvers*, New York : Elsevier Science Publishers, (1986).
- [Katzschmann et al., 2013] R. Katzschmann, T. Kröger, T. Asfour, O. Khatib, Towards Online Trajectory Generation Considering Robot Dynamics and Torque Limits, In proc. of IEEE int. Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), November 3 – 7, Tokyo, Japan, (2013).
- [Kawamura et Svinin, 2007] S. Kawamura, M. Svinin, Advances in Robot Control : From Everyday Physics to Human-Like Movements, Springer Science & Business Media, ISBN 978 – 3 – 540 – 37346 – 9, (2007).
- [Khalil et al., 2011] I.S.M. Khalil, B. Celebi, G. Cevik, E. Globovic, B. Mehmet, A. Sabanovic, Optimal motion control and vibration suppression of flexible systems with inaccessible outputs, in proc. of IEEE Int. Conf. on Mechatronics (ICM), April 13 – 15, Istanbul, (2011).
- [Knezevic *et al.*, 2011] B. Knezevic, B. Blanusa, D. Marcetic, *Model of elevator drive with jerk control*, in proc. of IEEE Information, Communication and Automation Technologie Symposium (ICAT), Oct 27 – 29, Sarajevo, Bosnia, (2011).
- [Koren et al., 1983] Y. Koren, Computer Control of Manufacturing Systems, McGraw-Hill, ISBN 0070353417, (1983).
- [Kröger, 2011] T. Kröger, Opening the Door to New Sensor-Based Robot ApplicationsThe Reflexxes Motion Libraries, in proc. of IEEE Int. Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 9 – 13, Shanghai, China, (2011).
- [Kuchler et al., 2011] S. Kuchler, T. Mahl, J. Neupert, K. Schneider, O. Sawodny, Active Control for an Offshore Crane Using Prediction of the Vessel's Motion, IEEE/ASME Transaction on Mechatronics , 16(2), (2011).
- [Kuwahara et al., 2010] H. Kuwahara, H. Tanaka, Y. Suzuki, K. Ohnishi, *A reproduction method of human motion based on integrated information for haptic skill education*, In proc. of IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, March 21-24, Nagaoka, Japan, (2010).
- [Lau et Pao, 2001] M.A. Lau, L.Y. Pao, *Comparison of input shaping and time-optimal control of flexible structures,* in proc. of American Control Conference, Jun 25 27, Arlington, VA, (2001).

- [Lawitzky et al., 2013] M. Lawitzky, M. Kimmel, P. Ritzer, S. Hirche, Trajectory generation under the least action principle for physical human-robot cooperation, in proc. of IEEE Int. Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 6 – 10, Karlsruhe, Germany, pages 4285 – 4290, (2013).
- [Lin et al., 2011] F. Lin, Z. Xinfu, Z. Xingquan, H. Haibo, The Application Study of Heave Compensation Control Based on Motion Prediction and Fuzzy-PID for Intelligence Crane, in proc. of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, August 7 - 10, Beijing, China, (2011).
- [Liu et Li, 2010] S. Liu, L. Li, Control Performance Simulation on Heave Compensation System of Deep-sea Mining Based on Dynamic Vibration Absorber, in IEEE International Conference on Digital Manufacturing Automation, (2010).
- [McCarthy et Barnes, 2004] C. McCarthy, N. Barnes, *Performance of optical flow techniques for indoor navigation with a mobile robot*, In proc. of IEEE Conf. Robot. Autom. (ICRA), New Orleans, USA, (2004).
- [Malzahn et al., 2011] J. Malzahn, A.S. Phung, F. Hoffmann, T. Bertram, Vibration control of a multi-flexible-link robot arm under gravity, in proc. of IEEE Int. Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Dec 7 – 11, Karon Beach, Phuket, pages 1249 – 1254, (2011).
- [Matsubara *et al.*, 2002] A. Matsubara, S. Ibaraki, Y. Kakino, K. Lee, *A practical servo parameter tuning method for high speed feed drives of NC machine tools*, in proc. of the 2002 JapanUSA Symposium on Flexible Automation, Jul 14 19, Hiroshima, Japan, (2002).
- [Meckl, 1993] P.H. Meckl, Robust Motion Control of Flexible Systems Using Feedforward Forcing Functions, in proc. of American Control Conference, Francisco, CA, (1993).
- [Ni et al., 2009] J. Ni, S. Liu, M. Wang, X. Hu and Y. Dai, The Simulation Research on Passive Heave Compensation System for Deep Sea Mining, in Proc. Of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, August 9 - 12, Changchun, China, (2009).
- [Olabi *et al.*, 2010] A. Olabi, R. Béarée, O. Gibaru, M. Damak, *Feedrate planning for machining with industrial six-axis robot*, Control Engineering Practice, 18(5), (2010), pages 471 – 482.
- [Oueslati *et al.*, 2012] M. Oueslati, R. Bearee, O. Gibaru, G. Moraru, *Improving the dynamic accuracy of elastic industrial robot joint by algebraic identification approach*, in proc. of IEEE Int. Conference on Systems and Computer Science (ICSCS), Aug 29 31, Lille, France, (2012).
- [Paine et al., 2014] N. Paine, N. Sehoon, L. Sentis, Design and Control Considerations for High-Performance Series Elastic Actuators, IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, 19(3), (2014), pages 1080 – 1091.
- [Pan et Yang, 2010] S. Jialin Pan, Q. Yang, A Survey on Transfer Learning, IEEE Transactions on Knowledge Data Engineering, 22(10), (2010), pages 1345 – 1359.
- [Pao et Singhose, 1995] L.Y. Pao, W.E. Singhose, On the equivalence of minimum time input shaping with traditional time-optimal controls, Proc.

of the IEEE Conf. on Control Applications, Sep 28 – 29, Albany, NY, (1995).

- [Piazzi et Visioli, 2011] A. Piazzi, A. Visioli, Minimum-time systeminversion-based motion planning for residual vibration reduction, IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, 5(1), (2000), pages 12 – 22.
- [Poignet et al., 1999] Ph. Poignet, M. Gautier, W. Khalil, Modeling, control and simulation of high speed machine tool axes, IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, September, Atlanta, GA, (1999).
- [Pontryagin et al., 1962] L. S. Pontryagin, V. G. Boltyanskii, R. V. Gamkrelidze, E. F. Mishchenko, *The Mathematical Theory of Optimal Processes*, New York : John Wiley and Sons, Inc., (1962).
- [Preumont, 2012] A. Preumont, Vibration Control Of Active Structures An Introduction (Third Edition), Springer-Verlag, ISBN 978 – 94 – 007 – 2032 – 9, (2012).
- [Salvine et al., 2011] P. Salvine, M. Nicolescu, H. Ishiguro Benefits of Human - Robot Interaction, IEEE Robotics & Automation Magazine, 18(4), (2011), pages 98 – 99.
- [Schreier et al., 2009] H. Schreier, J.J. Orteu, M.A. Sutton, Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements, Springer, ISBN 978 – 0 – 387 – 78746 – 6, (2009).
- [Scaramuzza et Siegwart, 2008] D. Scaramuzza, R. Siegwart, Appearance-Guided Monocular Omnidirectional Visual Odometry for Outdoor Ground Vehicles, IEEE Trans. Robot., 24(5), (2008), pages 1015 – 1026.
- [Sciavicco et Siciliano, 1996] L. Sciavicco, B. Siciliano, *Modelling and Control of Robot Manipulators,* Springer, ISBN 978 – 1 – 4471 – 0449 – 0, (1996).
- [Siciliano et Khatib, 2008] B. Siciliano, O. Khatib, Springer Handbook of Robotics, Springer, ISBN 978 – 3 – 540 – 30301 – 5, (2008).
- [Singhose, 2004] W. Singhose, *Trajectory Planning for Flexible Robots*, Robotics and Automation Handbook, 1st ed, (2004), pages 9 24.
- [Singhose, 2009] W. Singhose, *Command Shaping for Flexible Systems : A Review of the First* 50 *Years*, Int. J. of precision engineering and manufacturing, 10(4), (2009), pages 153 – 168.
- [Song, 1994] Y. D. Song, Active Damping Control of Critical Mode Vibrations in Large Flexible Space Structures, American Control Conference, June, Baltimore, Maryland, (1994).
- [Song et al., 2012] X. Song, H. Fang, X. Jiao, Y. Wang, Autonomous mobile robot navigation using machine learning, In proc. of 17th International Conference on Information and Automation for Sustainability (ICIAfS), Sept. 27-29, Zurich, Swiss, (2012).
- [Swigert, 1980] C.J. Swigert *Shaped Torque Techniques, Journal of Guidance and Control,* Journal of Guidance and Control, 3(5), (1980), pages 460 467.
- [Tuttle, 1997] T.D. Tuttle, *Creating Time-Optimal Commands for linear systems*, MIT Ph.D. Thesis, (1997).

- [Tuttle et Seering, 1999] T.D. Tuttle, W.P. Seering, *Creating Time-Optimal Commands with Practical Constraints*, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 22(2), (1999), pages 241 – 250.
- [Ulbrich et Ginzinger, 1998] H. Ulbrich, L. Ginzinger, *Motion and Vibration Control*, Springer, ISBN 978 – 1 – 4020 – 9437 – 8, (2009).
- [Vergnano et al., 2013] A. Vergnano, C. Thorstensson, B. Lennartson, P. Falkman, M. Pellicciari, F. Leali, S. Biller, Modeling and optimization of energy consumption in cooperative multi-robot systems, IEEE Trans. on Automation Science and Engineering, 9(2), (2013), pages 423 428.
- [Verhille et al., 2010] J.N. Verhille, R. Béarée, A. Bouscayrol, Causal-based generation of velocity reference for automatic subways, in proc. of IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Sep 1 – 3, Lille, France, (2010).
- [Wang et al., 2013] Q. Wang, D. Xu, L. Shi, A review on robot learning and controlling : imitation learning and human-computer interaction, in proc. of IEEE Control and Decision Conference (CDC), May 25 – 27, Guiyang, China, (2013).
- [Whalley et al., 2008] R. Whalley, A.A. Abdul-Ameer, M. Ebrahimi, Machine tool modelling and profile following performance, Applied Mathematical Modelling, 32(12), (2008), pages 2290 – 2311.
- [Wigstrom *et al.*, 2013] O. Wigstrom, B. Lennartson, A. Vergnano, C. Breitholtz, *High-level scheduling of energy optimal trajectories*, IEEE Trans. on Science and Engineering, 10(1), (2013), pages 57 – 64.
- [Yajima et Katsura, 2012] S. Yajima, S. Katsura, Simplified Integrated Reproduction of Human Motion Based on Motion-Copying System, In proc. of IEEE International Conference on Human System Interactions (HSI), June 6-8, Perth, Australia, (2012).
- [Zatsiorsky, 1998] V.Z. Zatsiorsky, *Kinematics of Human Motion*, Human Kinetics, ISBN 9780880116763, (1998).
- [Zhihua et Jing, 2004] Q. Zhihua, W. Jing, *A new analytical solution to mobile robot trajectory generation in the presence of moving obstacles*, IEEE Trans. on Robotics, 20(6), (2004), pages 978 993.

ANNEXES

A1– Définitions : loi en temps minimum et en temps imposé

Chemin et trajectoire

Définition 1 (Chemin). Un chemin Γ de \mathbb{R}^n est un ensemble de points de \mathbb{R}^n (le plus souvent n = 1, 2 ou 3), représentant les positions occupées par un point matériel dans cet espace à n dimensions.

Un chemin est généralement défini par une liste de points $\mathbf{X} = \{x_i\}$, $x_i \in \mathbb{R}^n$, ou parfois par la donnée d'une courbe paramétrique C(s) interpolant les points précédents, *s* étant l'abscisse curviligne.

Définition 2 (Trajectoire). Une trajectoire d'un point matériel entre les instants initial t_0 et final t_f , est l'ensemble des positions successives occupées par ce point, notée q(t), sur un chemin Γ :

$$\begin{array}{rccc} q & : & [t_0, t_f] & \to & \Gamma \subset \mathbb{R}^n \\ & t & \mapsto & \Gamma \left(s \left(t \right) \right) \end{array}$$

Définition 3 (Loi de mouvement). Une loi de mouvement, ou loi horaire, est une trajectoire générique entre deux points de \mathbb{R}^n , qui lie la distance parcourue sous divers contraintes cinématiques et conditions aux limites, au temps nécessaire à la parcourir.

Trajectoire optimale en temps et en temps imposé

Le problème de génération de trajectoire optimale en temps peut s'exprimer comme suit.

Problème (Trajectoire en temps minimum). Déterminer, pour un ensemble de contraintes $\{q_0, q_f, v_0, v_f, \dot{q}_{max}, \cdots, q_{max}^{(n)}\}$, la trajectoire q(t) qui minimise la durée du trajet, notée T_{min} , en satisfaisant les conditions aux limites et les contraintes :

$$\begin{cases} q(0) = p_0, q(T_{min}) = p_f \\ \dot{q}(0) = v_0, \dot{q}(T_{min}) = v_f, \\ \ddot{q}(0) = 0, \ddot{q}(T_{min}) = 0 \end{cases} \begin{cases} |\dot{q}(t)| \le \dot{q}_{max}(=v_{max}) \\ \vdots \\ |q^{(n)}(t)| \le q^{(n)}_{max} \end{cases}$$
(A1.1)

Un problème corollaire est celui de la génération de trajectoire en temps imposé.

Problème (Trajectoire en temps imposé). Déterminer, pour un ensemble de contraintes $\{q_0, q_f, v_0, v_f, \dot{q}_{max}, \cdots, q_{max}^{(n)}, T_{imp}\}$, une trajectoire q(t) satisfaisant les conditions aux limites et contraintes données par le système (A1.1). Ce problème ne peut avoir de solution que si, bien sûr, la durée imposée T_{imp} est plus grande que le résultat en temps minimum T_{min} obtenu pour le même ensemble de contraintes.

Cas des trajectoires multi-axes

Pour les systèmes multi-axes (ou multi-articulations), il est généralement souhaité que les mouvements ne soient pas par-axiaux, mais que tous les axes concernés par le mouvement dans l'espace opérationnel démarrent et terminent leur trajectoire au même instant. Une trajectoire en temps-minimum peut être obtenue pour un système multi-axes en respectant les étapes suivantes :

- 1. Générer la trajectoire temps-optimale pour chacun des n axes (chacune des n articulations). On notera $T_{min,i}$, la durée optimale du mouvement de l'axe i.
- 2. Déterminer la durée optimale des mouvement combinées $T_{multi} = \max_{i} T_{min,i}$. En pratique, afin d'éviter tout dépassement des limitations cinématiques, on choisira

$$T_{multi}^* = T_e \left[T_{multi} / T_e \right], \qquad (A1.2)$$

 $\lceil \cdot \rceil$ désignant la partie entière supérieure et T_e la période d'échantillonnage utilisée pour le calcul de la génération de trajectoire (classiquement 1 ms).

3. Générer la trajectoire en temps imposé pour chaque axe avec la contrainte commune de durée $T_{imp} = T^*_{multi}$.

A2–Trajectoire à accélération limitée

Trajectoire à accélération limitée en temps minimum

Considérons un déplacement q(t) d'une situation initiale donnée par $q_0 = q(t_0)$ et $v_0 = dq/dt(t_0)$, à la situation finale $q_f = q(t_f)$; $v_f = dq/dt(t_f)$, soumis aux contraintes cinématiques :

$$\left|v(t) = \frac{dq(t)}{dt}\right| \le v_{max}; \left|a(t) = \frac{d^2q(t)}{dt^2}\right| \le a_{max}.$$
 (A2.1)

Supposons que ce déplacement permette d'atteindre la vitesse maximale autorisée v_{max} , les durées des phases d'accélération et de décélération seront données par :

$$T_a = \frac{v_{max} - v_0}{a_{max}}; T_d = \frac{v_{max} - v_f}{a_{max}}.$$
 (A2.2)

La distance parcourue durant ces deux phases est la distance minimale, notée Δq_{min} , pour laquelle la vitesse maximale est atteinte. Par intégration du profil de vitesse durant les deux phases précédentes, on obtient :

$$\Delta q_{min} = \frac{T_a(v_{max} - v_0)}{2} + T_a v_0 + \frac{T_d(v_{max} - v_f)}{2} + T_d v_f \qquad (A2.3)$$

$$\Rightarrow \Delta q_{min} = \frac{2v_{max}^2 - v_0^2 - v_d^2}{2a_{max}}.$$
 (A2.4)

Si la longueur du déplacement désiré $\Delta q = |q_f - q_0|$ est plus grande que Δq_{min} , alors il y aura une phase à vitesse constante de durée :

$$T_v = \frac{\Delta q - \Delta q_{min}}{v_{max}}.$$
 (A2.5)

Si à présent la longueur du déplacement désiré est plus petite que Δq_{min} , le profil de vitesse sera triangulaire et la vitesse maximale atteinte doit être recalculée en remplaçant Δq_{min} par Δq dans (A2.4). La nouvelle valeur de v_{max} peut être introduite dans (A2.2) afin d'obtenir la durée des phases d'accélération et de décélération correspondantes. Ainsi, un profil à accélération limité peut être très simplement planifié en utilisant, par exemple, le pseudo-algorithme 1 (donné dans le domaine continu).

Trajectoires à accélération limitée en temps imposé

Le problème de génération de trajectoire en temps imposé (cf. Problème 5 en annexe A1) est aisément solvable pour le profil à accélération limité. Soit T_i ($i \in \{1,2,3\}$) les durées des différentes phases d'une trajectoire à accélération limitée en temps minimum. On note T_{min} la durée de la trajectoire :

$$T_{min} = \sum_{i=1}^{3} T_i = T_a + T_v + T_d.$$
 (A2.6)

Algorithme 1 : Algorithme de calcul des durées des différentes phases d'un profil à accélération limitée.

 $\begin{aligned} & \text{Données}: q_0; q_f; v_0; v_f; a_{max}; v_{max} \\ & \text{Résultat}: T_a; T_v; T_d \\ & \Delta q = \left| q_f - q_0 \right|; \Delta q_{min} = (2v_{max}^2 - v_0^2 - v_f^2)/2a_{max} \\ & \text{si } \Delta q \geq \Delta q_{min} \text{ alors} \\ & \texttt{I}_a = (v_{max} - v_0)/a_{max}; T_d = (v_{max} - v_f)/a_{max}; \\ & T_v = (\Delta q - \Delta q_{min})/v_{max}; \\ & \text{sinon} \\ & \texttt{I}_v = v_{max} \text{ non atteinte } */ \\ & \begin{bmatrix} v_{atteinte} = \sqrt{(2 \cdot a_{max} \cdot \Delta q + v_0^2 + v_f^2)/2}; \\ & T_v = 0; T_a = \max\{0, 1/a_{max} \cdot (v_{atteinte} - v_0)\}; \\ & T_d = \max\{0, 1/a_{max} \cdot (v_{atteinte} - v_f)\}; \end{aligned} \end{aligned}$

Pour toute durée imposée T_{imp} vérifiant $T_{imp} \leq T_{min}$, il existe une infinité de solutions au problème de génération de trajectoire. Classiquement, on choisit celle qui se déduit tout simplement de la solution en temps optimal par une dilatation temporelle de rapport $\alpha = T_{imp}/T_{min}$. Ainsi, on dilate la durée de chacune des phases, notées $\tau_i = \alpha T_i$, et afin de respecter la consigne de position, la valeur d'accélération de chacune des phases, notées $a_i \in \{-a_{max}, 0, a_{max}\}$ est modulée en conséquence par un coefficient d'homothétie $\beta_i \leq 1$ à déterminer. Cette homothétie sur la valeur de la contrainte d'accélération maximale revient à minimiser l'accélération sur ce type de profil en temps imposé [Jeong *et al.*, 2005]. Par intégration des profils d'accélération et de vitesse résultants, on peut écrire :

$$\sum_{i=1}^{3} \beta_{i} a_{i} \tau_{i} = v_{f} - v_{0}; \sum_{i=1}^{3} \beta_{i} a_{i} \tau_{i} \left(\frac{1}{2}\tau_{i} + \sum_{k=i}^{2} \tau_{i+1}\right) = \Delta q - v_{0} T_{imp}.$$
(A2.7)

En reprenant la dénomination classique des durées des phases, le système précédent de 2 équations à 2 inconnues β_1 et β_3 (β_2 n'est pas défini puisque $a_2 = 0$) admet pour solution :

1

$$\beta_1 = \frac{2\Delta q - 2T_{imp}v_0 + T_d(v_0 - v_s)}{a_{max}T_a \left(T_a + 2T_v + T_d\right)};$$
(A2.8)

$$\beta_3 = \frac{2\Delta q - 2T_{imp}v_0 + (T_a + 2T_v + 2T_d)(v_0 - v_s)}{a_{max}T_d (T_a + 2T_v + T_d)}.$$
 (A2.9)

La figure 2.2 montre une trajectoire en temps imposé obtenue par la méthode précédente.

Algorithme associé à la logique de commutation pour une trajectoire à accélération limitée

Cet algorithme est en temps discret ($t = kT_e$ avec T_e la période d'échantillonnage du calculateur).

Algorithme 2 : Algorithme associé à la logique de commutation pour une trajectoire à accélération limitée.

 $\begin{array}{ll} \textbf{Entrées} : \Delta q(k); v_f; a_{max}; v_{max}; q(k); v(k) \\ \textbf{Sorties} : a(k+1) \\ v_h(k) = \sqrt{2 \cdot a_{max} \cdot |\Delta q(k)| + v_f^2} \\ v_{estime}(k+1) = v(k) + a(k) \cdot T_e \\ \textbf{si} | v_{estime}(k+1)| > v_h(k) \textbf{ alors} & /* v_h \textbf{ atteint } */ \\ & \left\lfloor a(k+1) = -sgn(\Delta q(k)) \cdot a_{max}; \\ \textbf{sinon si} | v_{estime}(k+1)| sgn(\Delta q(k)) < v_{max} \textbf{ alors} & /* v_{max} \textbf{ non} \\ \textbf{atteint } */ \\ & \left\lfloor a(k+1) = sgn(\Delta q(k)) \cdot a_{max}; \\ \textbf{sinon} & /* \pm v_{max} \textbf{ atteint } */ \\ & \left\lfloor a(k+1) = 0. \end{array} \right. \end{array}$

A3–Algorithme de calcul des durées des phases d'une trajectoire à jerk limitée

Algorithme 3 : Algorithme de calcul des durées des différentes phases d'un profil à jerk limitée.

 $\begin{array}{l} \textbf{Données}: q_{0}; q_{f}; v_{0}; v_{f}; a_{max}; v_{max} \\ \textbf{Résultat}: T_{j}; T_{a}; T_{v}; T_{d} \\ \Delta q = \left| q_{f} - q_{0} \right|; \\ \textbf{Appel fonction}: \\ \left(T_{j}; T_{a}; T_{d}; a_{max}; d_{max}; \Delta q_{min} \right) = CalculDurées \left(v_{0}; v_{f}; a_{max}; v_{max}; j_{max} \right) \\ \textbf{si} \ \Delta q \ge \Delta q_{min} \ \textbf{alors} \\ | \ T_{v} = \frac{\Delta q - \Delta q_{min}}{v_{max}} \\ \textbf{sinon} \\ \\ \begin{matrix} T_{v} = 0; \\ \textbf{Appel fonction}: \left(v_{max} \right) = AdaptationVmax(T_{a}; T_{d}) \\ \textbf{Appel fonction}: \\ \left(T_{j}; T_{a}; T_{d}; a_{max}; d_{max}; \Delta q_{min} \right) = CalculDurées \left(v_{0}; v_{f}; a_{max}; v_{max}; j_{max} \right) \end{array}$

Algorithme 4 : Fonction *CalculDurées* permettant de calculer les paramètres T_i , T_a , T_d , a_{max} , $d_{max}etq_{min}$.

Entrées : v_0 ; v_f ; a_{max} ; v_{max} ; j_{max} **Sorties** : T_j ; T_a ; T_d ; a_{max} ; d_{max} ; Δq_{min} /* a_{max} atteint */ si $v_{max} - v_0 \ge a_{max} / j_{max}$ alors $T_a = (v_{max} - v_0)/a_{max} - a_{max}/j_{max};$ $a_{max} = a_{max}$ sinon $T_a = 0;$ $a_{max} = \sqrt{j_{max} \cdot (v_{max} - v_0)}$ si $v_{max} - v_f \ge a_{max}/j_{max}$ alors $/* d_{max}$ atteint */ $T_d = (v_{max} - v_f) / a_{max} - a_{max} / j_{max};$ $d_{max} = a_{max}$ sinon $T_d = 0;$ $d_{max} = \sqrt{j_{max} \cdot (v_{max} - v_f)}$ $T_{ja} = a_{max} / j_{max}$; $T_{jd} = d_{max} / j_{max}$ /* Calcul de la distance parcourue Δq_{min} suivant que a_{max} ou d_{max} sont atteints. */ cas où $T_a = 0 \ \mathcal{E} \ T_d = 0$ $\Delta q_{min} = v_{max}(a_{max} + d_{max})/j_{max} + (a_{max} \cdot v_0 + d_{max} \cdot v_f)/j_{max}$ cas où $T_a = 0 \ \mathcal{E} \ T_d \neq 0$ $\Delta q_{min} = v_{max}^2 / (2d_{max}) + v_{max}(2a_{max} + d_{max}) / (2j_{max}) + (2a_{max} \cdot d_{max}) / (2j_{max} \cdot d_{max}) / (2j_{max}) + (2a_{max} \cdot d_{max}) / (2j_{max} \cdot d_{max}$ $v_0 + d_{max} \cdot v_f)/(2j_{max}) - v_f^2/(2d_{max})$ cas où $T_a \neq 0 \ \mathcal{E} \ T_d = 0$ $\Delta q_{min} = v_{max}^2 / (2a_{max}) + v_{max}(a_{max} + 2d_{max}) / (2j_{max}) + (a_{max} \cdot d_{max}) / (2j_{max}) / (2j_{max}) + (a_{max} \cdot d_{max}) / (2j_{max}) /$ $v_0 + 2d_{max} \cdot v_f) / (2j_{max}) - v_0^2 / (2a_{max})$ autres cas

 $\Delta q_{min} =$ $v_{max}^2 (1/(2a_{max}) + 1/(2d_{max})) + v_{max}(a_{max} + d_{max})/(2j_{max}) +$ $(a_{max} \cdot v_0 + d_{max} \cdot v_f)/(2j_{max}) - v_0^2/(2a_{max}) - v_f^2/(2d_{max})$

Algorithme 5 : Fonction *AdaptationVmax* permettant de réadapter la vitesse atteignable v_{max} .

Entrées : Δq ; T_a ; T_d ; v_0 ; v_f ; a_{max} ; j_{max} **Sorties** : v_{max} cas où $T_a = 0 \ \mathcal{E} \ T_d = 0$ $| v_{max} = (\Delta q \cdot j_{max} - a_{max} \cdot v_0 - d_{max} \cdot v_f) / (a_{max} + d_{max})$ cas où $T_a = 0 \& T_d \neq 0$ $\alpha = 1/(2d_{max}); \beta = (2a_{max} + d_{max})/(2j_{max}); \gamma =$ $(2a_{max} \cdot v_0 + d_{max} \cdot v_f)/(2j_{max}) - v_f^2/(2d_{max}) - \Delta q;$ $v_{max} = (-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma})/(2\alpha)$ cas où $T_a \neq 0 \ \mathcal{E} \ T_d = 0$ $\alpha = 1/(2a_{max}); \beta = (a_{max} + 2d_{max})/(2j_{max}); \gamma =$ $(a_{max} \cdot v_0 + 2d_{max} \cdot v_f)/(2j_{max}) - v_0^2/(2a_{max}) - \Delta q;$ $v_{max} = (-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma})/(2\alpha)$ autres cas $\alpha = 1/(2a_{max}) + 1/(2d_{max}); \beta = (a_{max} + d_{max})/(2j_{max}); \gamma =$ $(a_{max} \cdot v_0 + d_{max} \cdot v_f)/(2j_{max}) - v_0^2/(2a_{max}) - v_f^2/(2d_{max}) - \Delta q;$ $v_{max} = (-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma})/(2\alpha)$

A4–Loi de mouvement à jerk amorti

La loi de mouvement à jerk amorti étend les propriétés de réduction de vibration de la loi à jerk limitée afin de tenir compte de l'amortissement du mode vibratoire considéré. Comme présenté à la figure 3.12, le profil de jerk de la loi à jerk amorti peut se décomposer en deux échelons d'amplitudes différentes et une fonction rampe. En reprenant les notations de la figure 3.12, le filtre équivalent F_{DJ} exprimé dans le domaine continu de Laplace est donné par :

$$F_{DJ}(s) = \frac{1}{s} \left(A_1 + A_2 e^{-Ts} + \frac{1}{s} \left(B_1 + B_2 e^{-Ts} \right) \right).$$
(A4.1)

 $|B_1|$ (= $|B_2|$) étant la pente de la rampe, elle relie naturellement les amplitudes des deux échelons par la relation géométrique :

$$B_1 = -B_2 = -\frac{A_1 - A_2}{T}.$$
 (A4.2)

Enfin, la relation suivante garantit le fait que ce filtre ne modifie pas l'amplitude de l'entrée :

$$A_1 + A_2 = \frac{2}{T}.$$
 (A4.3)

Ainsi, seul deux paramètres sont à fixer afin de paramétrer ce filtre, i.e. A_1 ou A_2 et T la durée du filtre. Comme détaillé dans [Béarée, 2014], l'amplitude de vibration A_{DJ} induite par la réponse impulsionnelle du filtre F_{DJ} peut s'exprimer analytiquement :

$$A_{DJ}(\omega_0) = \frac{e^{-\zeta_0 \omega_0 T}}{\omega_0} \sqrt{(C_{DJ})^2 + (S_{DJ})^2}$$
(A4.4)

avec

$$C_{DJ} = \sum_{i=1}^{2} e^{\zeta_{0}\omega_{0}T} \left((A_{i} - \frac{\zeta_{0}B_{i}}{\omega_{0}}) \cos(\omega_{0d}T) - \frac{B_{i}}{\omega_{0}} \sqrt{1 - \zeta_{0}^{2}} \sin(\omega_{0d}T) \right)$$
(A4.5)

$$S_{DJ} = \sum_{i=1}^{2} e^{\zeta_{0}\omega_{0}T} \left((A_{i} - \frac{\zeta_{0}B_{i}}{\omega_{0}}) \sin(\omega_{0d}T_{i}) + \frac{B_{i}}{\omega_{0}} \sqrt{1 - \zeta_{0}^{2}} \cos(\omega_{0d}T) \right)$$
(A4.6)

Le problème consiste à déterminer le couple de paramètres (A_1, T) qui minimise l'amplitude des vibrations résiduelles, ainsi que la durée T du filtre. Ce problème d'optimisation n'a pas de solution analytique, mais par approximation numérique nous avons déterminé la règle suivante :

$$T_{J} = \frac{2\pi}{\omega_{0}} \left(1 + 0.083\zeta_{0} + 0.047\zeta_{0}^{2} + 7.1\zeta_{0}^{3} \right)$$

$$A_{1} = \frac{1 + \pi\zeta_{0}}{T}$$
(A4.7)

On vérifie que pour un mode non amorti ($\zeta_0 = 0$), la relation (A4.7) conduit au profil classique à jerk limité ($A_1 = A_2$ et $B_1 = B_2 = 0$) avec une durée de filtrage égal à la période naturelle du mode propre considéré. La figure 5.1 présente un exemple de réponse obtenue pour un filtre à jerk limité et un filtre à jerk amorti, tout deux réglés afin de compenser le mode vibratoire.



FIGURE 5.1 – Réponse d'un système du second ordre amorti à une référence à jerk amorti.

Deuxième partie

– Notice Individuelle –
Informations générales

CURRICULUM VITAE

1.1 ETAT CIVIL

Béarée Richard

Né le 19 avril 1977 à Lille (59), France 37 ans Nationalité Française Marié, 2 enfants

Courriel : richard.bearee@ensam.eu *Tél* : +33 3 20 62 29 48

Adresse personnelle : 26, rue André Devienne, 59175 Vendeville

Adresse professionnelle : Arts et Métiers ParisTech, 8 bd. Louis XIV, 59046 Lille, France

Laboratoire de rattachement : Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes (LSIS CNRS n°7296), équipe INSM – http://www.lsis.org/fiche/richard_bearee.html

1.2 Fonctions Exercées

depuis 2007	Maître de Conférences (61 ^{eme} section, 5 ^{eme} échelon)
	– Arts et Métiers ParisTech (ENSAM), campus de Lille
	/ Laboratoire des Sciences de l'Information et des
	Systèmes (LSIS UMR 7296)
2006 – 2007	Ingénieur d'études / Activités Post-doctorales-
	Arts et Métiers ParisTech (ENSAM), campus de
	Lille / Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electro-
	nique de Puissance de Lille (L2EP).4
2005 – 2006	Attaché Temporaire d'Enseignement et de Re-
	cherche (Temps plein) – Arts et Métiers ParisTech
	(ENSAM), campus de Lille / Laboratoire d'Electro-
	technique et d'Electronique de Puissance de Lille
	(L2EP)

Encadrements		Publications	
Thèses soutenues	3	Revues internationales	10
Thèses en cours	2	Revues nationales	3
Stages de master recherche	>10	Conf. Internationales	18
Post-Doctorants	2	Conf. Nationales	12
		Chapitre d'ouvrage	1

 TABLE 1.1 – Synthèse des encadrements et des publications scientifiques.

2002 – 2005 **Chercheur Doctorant** – *Arts et Métiers ParisTech (EN-SAM),* campus de Lille / convention CIFRE entre le CETIM de Senlis et le laboratoire L2EP

1.3 TITRES ET DIPLÔMES

2005	Thèse de doctorat – Arts et Métiers ParisTech (EN-
	SAM), spécialité Automatique. Prise en compte des
	phénomènes vibratoires dans la génération de commande
	des machines-outils à dynamique élevée, Lille, le 1 dé-
	cembre 2005. Directeur : Jean-Paul Hautier, enca-
	drant : Pierre-Jean Barre.
2002	Diplôme d'Etudes Approfondies – Université des
	Sciences et Technologies de Lille, spécialité Automa-
	tique et Informatique Industrielle.
2001	Diplôme d'ingénieur en conception mécanique
	- École Polytechnique Universitaire de Lille (Polyte-
	ch'Lille anciennement EUDIL).
1995	Baccalauréat série S, option mathématique.

1.4 DISTINCTIONS

depuis 2012	Prime d'Encadrement Doctoral et de Recherche.
2006	Prix de thèse Pierre Bézier, décerné par la Fonda-
	tion Arts et Métiers.

1.5 Synthèse des activités scientifiques

Le tableau 1.1 résume quantitativement mes encadrements et publications scientifiques et le tableau 1.2 donne le facteur d'impact (Journal Citation Reports[®]) en 2013 des journaux dans lesquels j'ai publié. La figure 1 donne la répartition par année des publications et rapports de contrat.

Revue	Facteur d'impact	Nombre
Control Engineering Practice	1,912	2
Robotics and Computer Integrated Manufacturing	1,839	1
International Journal of Advanced Manufacturing Technology	1,779	1
Journal of Intelligent and Robotic Systems	0,81	2
Journal of Systems Science and Systems Engineering	0,566	1
Mécanique & Industries	0,206	2

 TABLE 1.2 – Facteur d'impact (2013 Thomson Reuters Journal Citation Reports[®]).



Figure 1 – *Répartition par année des publications et rapports de contrat.*

Enseignement et animation de la Recherche

2.1 Activités de recherche

2.1.1 Encadrements

Doctorants (3 soutenues - 1 en cours)

[Th1] A. OLABI, Amélioration de la précision des robots industriels pour des applications d'usinage à grande vitesse, soutenue le 23 Novembre 2011, directeur : O GIBARU, co-encadrants M. DA-MAK, R. BEAREE, encadrement 33%

 \Rightarrow Publications associées : [AI2, AI4, CI1, CI6, CI9, CI10, CN1, CN5, CN6, CN8]

 \Rightarrow Depuis septembre 2013, A. OLABI est Maître de Conférences à Arts et Métiers ParisTech, il effectue sa recherche au sein de l'équipe INSM du laboratoire LSIS

[Th2] R. CHITIC, Actionnement électrique pour le transport de poudre par modes vibrants. Financement : CIFRE société Synaptec, soutenue le 8 Juillet 2013, directeur : B. LEMAIRE-SEMAIL (Laboratoire L2EP), co-encadrement : F. GIRAUD (L2EP), R. BEAREE, encadrement 33%

 \Rightarrow Publications associées : [CI2, CI5]

 \Rightarrow Depuis septembre 2013, R. CHITIC est ingénieur pour la société Synaptec (Villeneuve d'Ascq, France)

[Th3] M. OUESLATI, Contribution à la modélisation dynamique, l'identification et la synthèse de lois de commande adaptées aux axes flexibles d'un robot industriel, soutenue le 18 Décembre 2013, directeur : O. GIBARU, co-encadrement : G. MORARU, R. BEAREE, encadrement 33%

 \Rightarrow Publications associées : [CI4, CI7, CN4]

 \Rightarrow Depuis mai 2014, M. OUESLATI est ingénieur pour la so-

ciété Dana Holding Corporation (Bruges, Belgique)

- [Th4] P. BESSET, Commande d'un bras de chargement/déchargement de gaz naturel liquéfié (GNL) en milieu marin. Financement : CIFRE société FMC Technologies, débutée le 1 avril 2014, directeur : O GIBARU, co-encadrants A. OLABI, R. BEAREE, encadrement 35%
- [Th5] D. BUSSON, Gestion d'une flottille de manipulateurs mobiles collaboratifs en milieu fortement contraint. Financement : CIFRE société Kuka aerospace, débutée le 1 septembre 2015, directeur : O GIBARU, co-encadrants A. OLABI, R. BEAREE, encadrement 33%

Masters de recherche (6)

Je participe à l'encadrement de stage de master de recherche depuis 2007, avec en moyenne 2 étudiants / an. Les masters concernés sont le master de recherche Knowledge Integration in Mechanical Production, parcours Advanced Production System (KIMP APS, master de recherche ENSAM en cotutelle avec l'Université Suédoise de Linköping) et le master de recherche Energie Electrique et Développement Durable (E2D2, master de l'Université Lille 1). Ci-après sont détaillées mes six dernières contributions à l'encadrement de stages de master.

- [MR1] Q. FELIX, Conception et contrôle Labview d'un banc d'essai pour les turbines à double entrée (twin scroll turbines), 2014, encadrement 100%
- [MR2] J.A. GONZÁLEZ, Chatter analysis of robot milling, 2014, encadrement 50%
- [MR3] M. METAIRIE, Diminution de la longueur de la fin de la ligne d'assemblage des carters des moteurs EB2DT pour la FM, 2013, encadrement 100%
 ⇒ Accepté pour financement de thèse LSIS/Renault, aban-
 - \Rightarrow Accepte pour financement de these LSIS/Renault, abandon par le candidat en novembre 2013
- [MR4] L. CHORFI, Stratégies d'insertion à grande vitesse de fixations aéronautiques, 2012, encadrement 100%
- [MR5] J. YU, Low-cost stereo vision for robotic applications, 2011, encadrement 100%
- [MR6] **A. LINH**, Bilan énergétique et Structure de commande d'un dispositif de transport de poudre, 2011, encadrement 50%

Post-Doctorants (2)

- [PoD1] **R. DELPOUX**, *Méthode d'estimation rapide de fréquence appliquée* en robotique, 2014, encadrement 50%
 - \Rightarrow Publications associées : [CI2]
 - \Rightarrow R. DELPOUX est enseignant-chercheur à l'INSA de Lyon, laboratoire AMPERE (UMR 5005), depuis le 1 septembre 2014
- [PoD2] F. HERNOUX, Vision pour la robotique industrielle, 2013, encadrement 100%
 - \Rightarrow Publications associées : [CI1, CN3]

2.1.2 Diffusion et Collaborations

Comités de programme et d'organisation

- Membre du comité scientifique des assises MUGV 2014, Clermont-Ferrand, 15 – 16 octobre 2014
- Membre du comité d'organisation de VPPC 2010 "Vehicle Power and Propulsion Conference", Lille, 1 – 3 septembre 2010
- Membre du comité scientifique des assises MUGV 2010, Cluny, 14 15 octobre 2010

Comités de lecture

- Revues : Control Engineering Practice (11 papiers depuis 2011, 3 papiers/an), IEEE Trans. On Robotics (2014), Journal of Intelligent and Robotic Systems (2013), International Journal of Precision Engineering and Manufacturing (2013), Transactions on Mechatronics (2012, 2013), Mécanique et Industries (2 papiers en 2010)
- Conférences : IEEE Conference on Decision and Control (2014), American Control Conference (2014), Assises Machine-Outil et UGV en (2006, 2008, 2010, 2014)
- Evaluation de projets : Expertise de dossiers pour l'ANR (3 en 2014), expertise de dossiers pour l'appel à projet DIGITEO 2014 : http://www.digiteo.fr

Jury de thèse

 Examinateur de la thèse de X. BEUDAERT, Commande numérique ouverte : interpolation optimisée pour l'usinage 5 axes grande vitesse des surfaces complexes, ENS Cachan, LURPA, soutenue le 5 juillet 2013

2.1.3 Actions de Recherche et Valorisation

Projets collaboratifs labellisés (≈ 520 k€ sur les 4 dernières années)

[FUI1] Responsable LSIS du projet FUI AM4D-L

Porté par la société SAPELEM, Partenaires : SAPELEM, Université de Rouen, ENSAIT, ARTS. Mars 2011 à décembre 2015 Montant global en k \in : 1993, Montant LSIS en k \in : 276 \Rightarrow Implication scientifique personnelle : *Responsable des Work-Packages WP2 et WP3 dévolus au LSIS. Conduite et suivi trimestriel du projet. Embauche de 3 ingénieurs (3x18 mois). Développement d'algorithmes de planification de mouvement et d'odométrie par vision industrielle.*

[FUI2] Participation au projet FUI SELECT 2.0

Porté par la société EADS IW, Partenaires : EADS, DUPUIS Mécanique, MONTUPET, CETIM, GEOMNIA, ARTS. Février 2012 à février 2015 Montant global en k \in : 3240, Montant LSIS en k \in : 320 \Rightarrow Implication scientifique personnelle : *Aide au montage des* WP1 et WP2 dont le LSIS est responsable. Apport d'expertise en compensation de vibrations.

[FUI3] Participation au projet FUI SOLLICITERN

Porté par la société HYDROVIDE, Partenaires : HYDRO-VIDE, PLASTICON, MECA, HUWER, ARTS. Décembre 2013 à décembre 2016 Montant global en k \in : 2200, Montant LSIS en k \in : 90 \Rightarrow Implication scientifique personnelle : *Apport d'expertise en automatisation et embauche d'un ingénieur* (18 *mois*).

Projets de recherche et de transfert ($\approx 171 \text{ k} \in \text{sur les 4 dernières}$ années)

- [RC1] P.J. Barre, R. Béarée, rapport de contrat, Recherche et analyse de nouvelles lois de mouvement pour machine-outil de production 3 axes, pour la société : CETIM. Montant du contrat : 130 k€ (2006-2009)
- [RC2] R. Béarée, rapport de contrat, Recalage des trajectoires d'outil de robot usinant Application au détourage d'un hublot, pour la société : EADS IW / AEROLIA. Montant du contrat : 5 k€ (2009).
 Publications associées : [RI1]
- [RC3] R. Béarée, rapport de contrat, Détourage robotisé de composites application aux sections de fuselage des futurs avions commerciaux composites, pour la société : EADS IW/AEROLIA. Montant du contrat : 5 k€ (2009)

- [RC4] R. Béarée, rapport de contrat, Développement et Implantation d'un algorithme de génération de loi de mouvement dans une CN ouverte équipant une machine-outil 3 axes, pour la société : CE-TIM. Montant du contrat : 17 k€ (2010)
- [RC5] R. Béarée, rapport de contrat, Analyse de stratégies pour le sertissage rapide robotisé, pour la société EADS IW. 2 mois/Ingénieur, 1 master. Montant du contrat : 12 k€ (2012)
- [RC6] R. Béarée, O. Gibaru, rapport de contrat, Faisabilité d'une opération d'éclissage par un robot collaboratif de type UR10, pour la société EADS IW. Montant du contrat : 20 k€ (2013)
- [RC7] O. Gibaru, R. Béarée, rapport de contrat, rapport de contrat, Analyses comparatives de stratégies de commande appliquées au positionnement d'une structure actionnée en milieu marin, pour la société FMC. Montant du contrat : 20 k€ (2014)
- [RC8] O. Gibaru, R. Béarée, rapport de contrat, Thèse Cifre : Commande d'un bras de chargement en milieu marin, pour la société FMC. Montant du contrat : 275 k (2014 – 2016)
- [RC9] R. Béarée, rapport de contrat, Qualification d'un robot collaboratif pour des applications de perçage, pour la société : Dassault. Montant du contrat : 35 k€ (2015)

Actions de formation (2)

- [FO1] R. Béarée, Responsable du montage et du suivi d'une formation en robotique industrielle et usinage robotisée pour 3 personnels du CETIM (2 jours). Montant : 5 k€ (2012).
- [FO2] R. Béarée, Responsable du montage et du suivi d'une formation en robotique et planification de trajectoire pour 5 personnels de la société EADS (4 jours). Montant : 7 k€ (2009).

2.2 Activités d'enseignements

Mon expérience d'enseignement a débutée durant ma thèse par des vacations en automatique à l'école Polytech'Lille, suivies en 2006 d'une année en tant qu'ATER temps plein en automatique à Arts et Métiers ParisTech campus de Lille. J'enseigne donc depuis plus de dix ans dans le cadre de la 61ème section. Depuis mon recrutement en tant que Maître de conférences en 2007, j'ai pris la responsabilité de l'unité d'automatique modélisation et commande des systèmes dy-namiques enseignée en 2ème année de la formation initiale d'Arts et Métiers ParisTech. Cet enseignement, majoritaire dans ma charge de service, s'est appuyé sur mes activités de recherche, notamment celles associées à la recherche partenariale afin d'illustrer les concepts de l'automatique par la résolution de problématiques industrielles. J'ai successivement diversifié mes enseignements, d'abord en traitement

du signal et technologie de capteur (unité de lère année), puis en robotique et planification de trajectoire (master recherche KIMP APS). Depuis septembre 2014, je suis responsable d'une année d'expertise (niveau M2) de la formation initiale d'Arts et Métiers Paris-Tech, baptisée SMILE (Système Mécatronique pour l'Innovation industrielLE). Cette nouvelle formation porte principalement sur les problématiques associées à la robotique industrielle : robotique manufacturière, robotique mobile, capteurs innovants, MEMS, vision industrielle.

Le détail des enseignements réalisés est donné dans les pages suivantes décomposées en deux périodes.

2.2.1 Période 2002–2006

Niveau M1

2002 – 2005	Vacataire Arts et Métiers ParisTech : Modélisation et commande des systèmes dynamiques – 70 étu- diants – 24 h eq.TD/an. <i>Travaux Pratiques d'automa-</i> <i>tique en temps continu</i> .
2002 – 2005	Vacataire Polytech'Lille : Automatique linéaire – 40 étudiants – 24 h eq.TD/an . <i>Travaux Pratiques d'automatique en temps continu</i> .
2006	ATER Arts et Métiers ParisTech : Modélisation et commande des systèmes dynamiques – 70 étu- diants – 192 h eq.TD . <i>Travaux Pratiques d'automa-</i> <i>tique en temps continu et discret.</i>
Niveau M2	

2002 – 2005 Vacataire Université Lille 1 : Master 2 professionnel en génie mécanique – 20 étudiants – 22 h eq.TD/an. Cours, TP et TD de commande des systèmes de production (machines-outils, robots).

2.2.2 Période 2007 à aujourd'hui

La figure 2 montre la répartition de mon service d'enseignement qui est, depuis septembre 2011, totalement réalisée en formation initiale Arts et Métiers ParisTech, pour un volume moyen annuel de 300 h eq.TD.

Niveau L3



Figure 2 – *Répartition du service par niveau et par matière* – 300 *h eq.TD/an.*

Depuis 2007	Capteur et instrumentation électronique – 160 étu- diants – 45 h eq. TD/an . <i>Initiation au principe phy- sique de la mesure, conditionnement des capteurs passifs</i> <i>et actifs</i> (<i>Cours et TD</i>).
Niveau M1	
Depuis 2007	Modélisation et commande des systèmes dyna- miques – 70 étudiants – 140 h eq. TD/an Concepts et outils fondamentaux de l'automatique linéaire en temps continu et discret. Principe et méthodes d'élaboration de modèles dynamiques (Cours, TD et TP).
2007 – 2011	Automatique linéaire de l'école Polytech'Lille – 40 étudiants – 60 h eq. TD/an Concepts et outils fon- damentaux de l'automatique linéaire en temps continu. Principe et méthodes d'élaboration de modèles dyna- miques (Cours et TD).
Depuis 2008	Optimisation produit, procédé, matériau – 50 étu- diants – 60 h eq. TD/an <i>Initiation à la robotique indus-</i> <i>trielle, mise en oeuvre, programmation et gestion de la</i> <i>sécurité de cellules robotisées sur notre plateforme Usine</i> <i>Agile : www.usine-agile.fr (TD).</i>
Niveau M2	
Depuis 2008	Master recherche KIMP Advanced Production Systems – 15 étudiants – 20 h eq. TD/an <i>Planifica-</i> <i>tion de trajectoire en robotique et machines de production</i> (<i>Cours et TD</i>).

Depuis 2014 Système Mécatronique pour l'Innovation industrielLE – 20 étudiants – 50 h eq. TD/an Cette dernière année de la formation ingénieur Arts et Métiers Paris-Tech, spécialise une vingtaine d'étudiants chaque année au domaine de la mécatronique et de la robotique industrielle (Cours, TD et TP).

Encadrements associés

- Niveau M1 : Projets métiers 4 projets/an.
- Niveau M2 : Projets/stages ingénieur et stages de master recherche – 6 projets/an.

2.3 Responsabilités administratives et pédagogiques

- Membre élu du conseil de centre Arts et Métiers ParisTech campus de Lille (Depuis Janvier 2011).
- Missionné Relations Entreprises pour Arts et Métiers ParisTech campus de Lille (Depuis septembre 2012).
- Membre de la commission nationale de vie à l'école (CNVE) de Arts et Métiers ParisTech (2011–2013).
- Responsable et animateur du M2 Arts et Métiers ParisTech -Système Mécatronique pour l'Innovation industrielLE (SMILE 60 Ects).
- Responsable de module de master recherche "UE11 Innovation in Mecatronics" du Master Knowledge Integration in Mechanical Production - Advanced Production Systems (KIMP-APS), co-habilité entre Arts et Métiers ParisTech et les Universités Suédoises de Linköping et KTH.
- Membre de jury pour le concours ENSAM (banque e3a) : épreuve oral pour la banque PT (2011–2014) et épreuve écrite pour la banque PSI (depuis 2013).
- Membre de jury de sélection de l'agrégation externe en génie mécanique (2009–2012).
- Membre de jury épreuve écrite pour le concours Polytechnique pour l'épreuve de Science de l'Ingénieur en filière MPSI (2010– 2012).
- Participation aux commissions de spécialistes pour les postes de Mcf au sein d'Arts et Métiers ParisTech (5 postes depuis 2008).

PUBLICATIONS

3.1 Articles de revues à comités de lecture

3.1.1 Revues internationales (10)

- [JI1] **R. Béarée**. New Damped-Jerk trajectory for vibration reduction, *Control Engineering Practice*, 28 : 112–120, 2014.
- [JI2] **R. Béarée**, A. Olabi. Dissociated jerk-limited trajectory applied to time-varying vibration reduction, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(3) : 444–453, 2013.
- [JI3] R. Béarée, J-Y. Dieulot, P. Rabate. An innovative subdivision-ICP registration method for tool-path correction applied to deformed aircraft parts machining, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(5) : 463–471, 2011.
- [JI4] A. Olabi, R. Béarée, O. Gibaru, M. Damak. Feedrate planning for machining with industrial six-axis robot, *Control Engineering Practice*, 18(5): 471–482, 2010.
- [JI5] J. Gomand, X. Kestelyn, R. Béarée, P-J. Barre. Dual-drive gantry stage decoupling control based on a coupling model, *ElectroMotion*, 15(2) : 94–98, 2008.
- [JI6] J-Y. Dieulot, I. Thimoumi, F. Colas, R. Béarée. Numerical Aspects and Performances of Trajectory Planning Methods of Flexible Axes, *International Journal of Computers, Communications* & Control, 1(4): 35–44, 2006.
- [JI7] **R. Béarée**, J. Gomand, P.J. Barre, J.P. Hautier. Control structure synthesis based on the natural causality inversion, *WSEAS Transactions on systems*, 5(1) : 9–17, 2006.
- [JI8] R. Béarée, P.J. Barre, P. Borne, E. Dumetz. Influence of a Jerk Controlled Movement Law on the Vibratory Behaviour of High-Dynamics Systems, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 42(3) : 275–293, 2005.
- [JI9] P.J. Barre, J.Y. Dieulot, R. Béarée, A. Bouzidi. A heuristic path-planning method for enhancing machine-tool contourfollowing, *Journal of systems science and systems engineering*, 14(1): 85–96, 2005.

[JI10] R. Béarée, P.J. Barre, S. Bloch. Influence of high-speed machine tool control parameters on the contouring accuracy – Application to linear and circular interpolation, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 40(3) : 321–342, 2004.

3.1.2 Revues nationales (3)

- [JN1] R. Béarée, P.J. Barre. Adaptation de la loi de mouvement aux systèmes de positionnement à dynamique élevée, Mécanique et Industries, 8 : 407-417, 2007.
- [JN2] R. Béarée, P.J. Barre, E. Dumetz, F. Ghestem, H. David. Jerk time influence on residual vibration and movement time of a 3-axis Cartesian robot, *Mécanique et Industries*, 6: 439–445, 2005.
- [JN3] R. Béarée, P.J. Barre, P. Borne, J.P. Hautier. Analyse d'une loi de mouvement en jerk sur le comportement vibratoire d'une structure mécanique, *Journal européen des systèmes automatisés*, 38(5): 475–496, 2004.

3.2 CHAPITRE D'OUVRAGE

[CO1] R. Béarée. Usinage à grande vitesse Chap. 6 Modélisation dynamique des machines UGV, Christophe Tournier, Dunod/L'Usine Nouvelle, ISBN : 9782100518104, 2010.

3.3 Actes de conférences

3.3.1 Conférences internationales (18)

- [CI1] F. Hernoux, R. Béarée, O. Gibaru. Investigation of dynamic 3D Hand Motion Reproduction by a robot using a Leap Motion. In proceedings of 17th International Conference and Exhibition of Virtual Technologies and uses (VRIC), Laval, France, April 2015.
- [CI2] R. Delpoux, R. Béarée, A. Olabi, O. Gibaru. Toward on-line robot vibratory modes estimation. In proceedings of American Control Conference, Portland, USA, June 2014.
- [CI3] R. Chitic, R. Béarée, F. Giraud, B. Lemaire-Semail, M. Favre, P. Tierce, J. Jehanno. Modeling of an Ultrasonic Powder Transportation System. In *proceedings of EPE* 2013, Lille, France, 2013.
- [CI4] L. Gajny, R. Béarée, E. Nyiri, O. Gibaru. Path planning with PH G2 splines in R2. In proceedings of IEEE 1st International Conference on Systems and Computer Science, Villeneuve d'Ascq, France, August 2012.

- [CI5] M. Oueslati, R. Béarée, O. Gibaru, G. Moraru. Improving the Dynamic Accuracy of Elastic Industrial Robot Joint by Algebraic Identification Approach. In proceedings of IEEE 1st International Conference on Systems and Computer Science, Villeneuve d'Ascq, France, August 2012.
- [CI6] R. Chitic, R. Béarée, F. Giraud, B. Lemaire-Semail, M. Favre, J. Jehanno. Industrial Equipment for Powder Transportation Using Piezoelectric Friction Control Method. In *proceedings of Actuator* 2012, Bremen, Germany, August 2012.
- [CI7] A. Olabi, M. Damack, R. Béarée, O. Gibaru, S. Leleu. Improving the Accuracy of Machining Robot by off-line Compensation of Joints Errors. In proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology, Athens, Greece, March 2012.
- [CI8] M. Oueslati, S. Thiery, O. Gibaru, R. Béarée, G. Moraru. On Algebraic Approach for MSD Parametric Estimation. In proceedings of International Conference on Integrated Modeling and Analysis in Applied Control and Automation, Rome, Italy, September 2011.
- [CI9] J.N. Verhille, R. Béarée, A. Bouscayrol. Causal-based generation of velocity reference for automatic subways. In *proceedings* of *IEEE vehicle power and propulsion conference*, Lille, France, September 2010.
- [CI10]A. Olabi, R. Béarée, E. Nyiri, O. Gibaru. Enhanced Trajectory Planning For Machining With Industrial Six-Axis Robots. In proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology, Vina del mar, Chile, March 2010.
- [CI11]A. Olabi, R. Béarée, E. Nyiri, O. Gibaru. L1 parametric interpolation and feedrate planning for machining robots. In *proceedings of The Swedish Production Symposium*, Göteborg, Sweden, December 2009.
- [CI12]J. Gomand, R. Béarée, X. Kestelyn, P.J. Barre. Physical Dynamic Modelling and Systematic Control Structure Design of a Double Linear Drive Moving Gantry Stage Industrial Robot. In proceedings of 12th Conference on Power Electronics and Applications EPE 2007, Aalborg, Denmark, September 2007.
- [CI13]T. Cano, R. Béarée, P. Ray, J.M. Lavest. Dynamic Metrology Tool to measure the elastic deformation of Parallel Kinematics Machines. In proceedings of International Conference on Smart Machining Systems (ICSMS), Gaithersburg, Maryland, USA, mars 2007.

- [CI14] R. Béarée, J.P. Hautier, P.J. Barre. Control structure synthesis for electromechanical systems based on the concept of inverse model using Causal Ordering Graph. In proceedings of 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON06), Paris, France, september 2006.
- [CI15]R. Béarée, J. Gomand, P.J. Barre, J.P. Hautier. On the causality integration in the design of axis drive control. In proceedings of WSEAS international conference on Dynamical Systems and Control, Venice, Italy, novembre 2005.
- [CI16] R. Béarée, P.J. Barre, J.P. Hautier. Vibration reduction abilities of some jerk-controlled movement laws for industrial machines. In proceedings of 16th IFAC World Congress, Pragues (Praha), Jully 2005.
- [CI17]R. Béarée, P.J. Barre, E. Dumetz. Modelling and control of a flexible positioning system : Application to a linear accelerator of pallet. In *proceedings of IDMME* 2002, Clermont-Ferrand, France, May 2002.
- [CI18]R. Béarée, P.J. Barre, E. Dumetz. Comparative analysis of control solutions in order to improve the performances of a linear accelerator of pallets. In proceedings of 6th international conference on precision mechanics and mechatronics (COMEFIM), Brasov, Romania, October 2002.

3.3.2 Conférences nationales (12)

- [CN- **R. Béarée**. Etat de l'art de la compensation de vibration par
- INV1] la génération de trajectoire application à la robotique industrielle. Machines et Usinage à Grande Vitesse (MUGV), Clermont-Ferrand, France, 15 – 16 Octobre 2014.
- [CN2] A. Olabi, R. Béarée, O. Thomas, O. Gibaru, J. Gonzales. Analyse expérimentale des phénomènes vibratoires d'un robot usineur. Machines et Usinage à Grande Vitesse (MUGV), Clermont-Ferrand, France, 15 – 16 Octobre 2014.
- [CN3] F. Hernoux, R. Béarée, L. Gajny, E. Nyiri, J. Bancalin, O. Gibaru. Leap Motion pour la capture de mouvement 3D par spline L1. Application à la robotique. Journées du Groupe de Travail en Modélisation Géométrique (GTMG 2013), Marseille, 27 – 28 mars 2013.
- [CN4] M. Oueslati, O. Gibaru, R. Béarée, G. Moraru, M. Damak. Modélisation et identification des défauts dans la chaine de transmission d'un axe de robot industriel usinant. Machines et Usinage à Grande Vitesse (MUGV), Cluny, France, 13 – 15 Octobre 2010.

- [CN5] A. Olabi, R. Béarée, M. Damak, O. Gibaru. Mouvement à rigidité maximale pour un robot 6 axes destiné à des opérations d'usinage. Machines et Usinage à Grande Vitesse (MUGV), Cluny, France, 13 – 15 Octobre 2010.
- [CN6] A. Olabi, R. Béarée, M. Damak, O. Gibaru. Planification de l'avance sur trajectoire pour un robot 6 axes usinant. 11ème Colloque National AIP PRIMECA La Plagne - 22 – 24 avril 2009.
- [CN7] M. Bertrand, R. Béarée, X. Kestelyn, O. Gibaru. La plateforme technologique agile systems engineering : un lieu d'échange pédagogie-recherche-transfert. 11ème Colloque National AIP PRIMECA La Plagne - 22 – 24 avril 2009.
- [CN8] A. Olabi, R. Béarée, M. Damak, O. Gibaru, J-M. David. Analyse de l'influence de la planification de trajectoire sur les vibrations d'un robot 6 axes destiné à des opérations d'usinage. Assises MUGV, Nantes, 5 – 6 juin 2008.
- [CN9] R. Béarée, P-J. Barre. Adaptation de la loi de mouvement aux systèmes de positionnement à dynamique élevée. 4ème Assises MUGV, Aix-en-Provence, 8 – 9 juin 2006.
- [CN10] R. Béarée, P-J. Barre, J-P. Hautier, O. Ruelle. Influence dune loi de mouvement en jerk sur le comportement vibratoire dune machine-outil. In proc. of 2ième séminaire optimus, EN-SAM Cluny, 6 – 7 Octobre 2004.
- [CN11] R. Béarée, P-J. Barre, E. Dumetz, F. Ghestem, H. David. Influence du jerk sur le comportement dynamique dun robot cartésien 3 axes. In proc. of 3ème Assises Machines et Usinage à Grande Vitesse, Clermont-Ferrand, 10 – 11 Mars 2004.
- [CN12] R. Béarée, P-J. Barre, E. Dumetz. Modélisation et commande d'un système de positionnement souple : Application à un module de transfert rapide. In proc. of 2ème Assises Machines et Usinage à Grande Vitesse, Lille, Mars 2002.

3.3.3 Article de vulgarisation

[JV1] **R. Béarée**, P.J. Barre, Analyse comparative de l'influence de différentes lois de mouvement sur les vibrations mécaniques, *Technologies & Formations*, 132 : 30-41, 2007.

Titre Contribution à la génération de trajectoire pour la maîtrise des vibrations

Résumé La synthèse de trajectoire est un sujet fondamental associé au principal critère de performance des systèmes de production, le temps. Les approches historiques concernent essentiellement l'intégration des contraintes cinématiques du système, ou du procédé concerné, dans la résolution d'un problème d'optimisation par rapport au temps sur différentes topologies de supports de la trajectoire. Les travaux présentés dans ce mémoire portent plus spécifiquement sur la génération de trajectoire intégrant une contrainte sur le niveau de jerk. La méthodologie développée s'appuie sur les propriétés des filtres à réponse impulsionnelle finie et offre la possibilité de moduler le profil de la loi de mouvement (jerk constant, jerk en sinus,...) par simple adaptation des paramètres de définition du filtre. Elle est de plus naturellement adaptée la thématique de génération de trajectoire dynamique qui fait l'objet de développements plus récents, associés essentiellement au domaine de la robotique et notamment à l'interaction homme-robot. Il est ici question de proposer des méthodologies de synthèse de trajectoires qui peuvent être modifiées dynamiquement (en ligne), en fonction de facteurs extérieurs, tels que des données issues de capteurs ou de nouvelles consignes fournies par l'homme.

En complément du critère dominant associé à la minimisation du temps, la synthèse de trajectoire peut englober des critères secondaires, tels qu'éviter l'accumulation de contraintes mécaniques (fiabilité), réduire les vibrations de la charge ou de l'effecteur en mouvement (précision dynamique), ou encore réduire l'énergie consommée pour réaliser la tâche (efficacité énergétique). La réduction de vibration par la mise en forme de trajectoire (trajectory shaping en anglais) est le second thème des travaux présentés. Par analogie avec la technique dite d'input shaping, les propriétés naturelles de la loi à jerk limité peuvent être expliquées : (a) Annulation des vibrations induites par un mode vibratoire dominant non-amorti, (b) réduction des vibrations induites par les autres modes vibratoires potentiellement sensibles. Différentes lois de mouvement en jerk qui étendent ces propriétés afin de tenir compte des variations de la fréquence propre du mode dominant (loi à jerk dissocié), ainsi que de l'amortissement de ce dernier (loi à jerk amorti), sont ensuite présentées.

Les travaux détaillés dans le mémoire ont fait l'objet de validations expérimentales sur différents systèmes industriels : machine-outil multi-axes, robot 6 axes usinant, robot collaboratif, robot manipulateur cartésien. Dans une partie finale, les perspectives de recherche, ainsi que les premiers travaux portant sur les domaines de la robotique mobile et collaborative, sont présentés.

Mots-clés Planification de trajectoire; Réduction de vibrations; Filtre RIF; Robotique

Title Trajectory generation for vibration reduction

Abstract Trajectory planning is a key component for the productivity of industrial machines and robots. The classical approaches are based on a time optimization problem integrating the kinematic constraints of the system for different types of paths. In this work, the focus is on the jerk-constrained trajectory generation. The proposed methodology is based on the finite impulse response filter properties and the jerk pattern (jerk-limited, sine jerk,) and can be easily modified by changing the filter coefficients. Moreover, the method is naturally adapted to the online trajectory generation associated to the new context of human-robot interaction.

In addition to the main objective function associated to the motion time, the trajectory generation can take into account secondary criteria, such as the reduction of the mechanical constraints (system reliability), the reduction of deformation and vibration (accuracy) or the reduction of the energy consumption (energy efficiency). Trajectory shaping to cancel or reduce vibration is the second theme of the presented works. Based on the *Input Shaping* formalism, the properties of the jerk-limited profile can be explained : (a) cancellation of the undamped vibration of a dominating flexible mode, (b) vibration reduction for higher frequency flexible modes. Adaptation and extension of the jerk-limited profile to unstationnary vibration (dissociated jerk profile) and damped vibration (damped-jerk profile) are presented.

Experimental validations have been tested on various industrial systems : multi-axis machine-tool, 6-axis robot, cartesian robot, collaborative robot. In the final part of this report the new directions of research and the current works in the field of mobile robots and collaborative robots are detailed.

Keywords Trajectory planning; Trajectory shaping, Vibration, Jerk