



**HAL**  
open science

# Identification et modélisation pour le développement de la surveillance d'usinage et de la robotique de production

Sébastien Garnier

► **To cite this version:**

Sébastien Garnier. Identification et modélisation pour le développement de la surveillance d'usinage et de la robotique de production . Génie mécanique [physics.class-ph]. Université de Nantes, Faculté des sciences et des techniques., 2017. tel-01684243

**HAL Id: tel-01684243**

**<https://hal.science/tel-01684243>**

Submitted on 24 Jan 2018

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

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

# Identification et modélisation pour le développement de la surveillance d'usinage et de la robotique de production

Sébastien Garnier

► **To cite this version:**

Sébastien Garnier. Identification et modélisation pour le développement de la surveillance d'usinage et de la robotique de production . Génie mécanique [physics.class-ph]. Université de Nantes, Faculté des sciences et des techniques., 2017. <tel-01684243>

**HAL Id: tel-01684243**

**<https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01684243>**

Submitted on 15 Jan 2018

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

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

Thèse d'Habilitation à Diriger des  
Recherches

Sébastien GARNIER

*Mémoire présenté en vue de l'obtention du  
Habilitation à Diriger des Recherches*

École doctorale : Sciences Pour l'Ingénieur, Géosciences, Architecture

Discipline : Génie mécanique, Productique et Transport, section CNU 60

Spécialité : Génie Mécanique et Productique

Unité de recherche : Laboratoire des sciences du Numérique de Nantes (LS2N)

Soutenue le 29-11-2017

## Identification et modélisation pour le développement de la surveillance d'usinage et de la robotique de production

JURY

### Président du jury

Rapporteurs : **Olivier CAHUC**, Professeur d'Université, Université de bordeaux,  
**Henri PARIS**, Professeur d'Université, Université de Grenoble,  
**Gabriel ABBA**, Professeur d'Université, Ecole National d'ingénieur de Metz,

Examineurs : **Pascal RAY**, Professeur d'Université, Ecole des Mines de Saint Etienne,  
**Laurent SABOURIN**, Maître de conférences, HDR, SIGMA à Clermont-Ferrand,  
**Stéphane CARO**, Chargé de recherche CNRS, HDR, Ecole Centrale de Nantes,

Directeur de Recherche : **Benoît FURET**, Professeur d'Université, Université de Nantes,



## **Remerciements :**

La rédaction de ce manuscrit a été un exercice long et difficile. J'ai initié cette rédaction il y a 3 ans à l'IRCCyN pour l'achever au LS2N. C'est pour moi un aboutissement et une reconnaissance du travail que je fournis au jour le jour.

Plusieurs personnes au cours de ma carrière m'ont permis de parvenir à cette étape. Tout d'abord mon directeur de Thèse Benoît FURET. Il a initié ma carrière en 1998 en me prenant comme thésard, pour ensuite m'accompagner tout au long de mon chemin professionnel. La seconde rencontre qui a fortement influé sur mon parcours de recherche est Stéphane CARO. Nous avons tous les trois encadré la thèse de Claire Dumas. Durant ces années, j'ai pu m'initier à la robotique, pour ensuite prendre mon autonomie. Je tiens à les remercier chaleureusement pour leur disponibilité, leur écoute et leur collaboration.

J'ai la chance d'enseigner à l'IUT de NANTES au département GMP. L'activité y est riche et les collègues compréhensifs quant au temps passé à l'écriture de ce mémoire. Je tiens particulièrement à les remercier pour leur soutien et leur bienveillance.

Lors de la rédaction de mon HDR, Benoît, Stéphane et Philippe WENGER ont pris le temps de relire ce document afin de le faire évoluer. Je les en remercie sincèrement.

Je vous remercie, vous rapporteurs et membres du jury d'avoir accepté sans hésitation de participer à ce moment fort de ma carrière et d'être présents ce 29 Novembre 2017. Votre regard sur mon travail ainsi que votre reconnaissance professionnelle me touchent. Soyez-en ici chaleureusement remerciés.

Enfin, je conclurai ces remerciements en évoquant ma famille : mes 3 Filles, Mathilde, Louise et Juliette et ma femme Cécile qui a su être patiente et me soutenir dans la durée, et pour qui les relectures successives du document ont été une épreuve pour la littéraire qu'elle est. Ce document et la poursuite de la carrière que cette HDR m'ouvrent leur sont dédiés.





PARTIE I.	NOTICE INDIVIDUELLE	8
1.	Curriculum Vitae.....	8
2.	Activité d’enseignement .....	12
3.	Activité de Recherche : Encadrement de thèse .....	20
4.	Projets de recherche et de valorisation .....	22
5.	Dépôt de brevets nationaux .....	23
6.	Liste des publications .....	25
PARTIE II.	SYNTHESE DE MES ACTIVITES DE RECHERCHE	31
1.	Fil conducteur d’une démarche recherche .....	32
2.	Hypothèse de machine Rigide – Application au Fraisage .....	35
3.	Machines souples : identification des couplages avec le procédé .....	94
4.	Conclusion – bilan des activités de recherche .....	138
5.	Perspectives .....	141
6.	Conclusion général .....	156
7.	Bibliographie.....	157
8.	Annexe .....	162

## **Introduction**

Le mémoire d'HDR que je vous présente est la synthèse de l'ensemble de mes activités de recherche, de pédagogie, d'administratif et de transfert de technologie menées depuis bientôt quinze ans. L'ensemble de mes activités est résolument tourné vers l'industrie. En effet, que ce soit dans mes enseignements ou ma recherche, la notion de projet industriel est prédominante et est le ciment entre toutes ces actions.

Dans mes activités de recherche, la frontière peut parfois être difficile à définir entre application industrielle et recherche industrielle. Dans tous mes travaux, je porte une attention particulière à cette différenciation. Cependant, cette richesse de projets liés à l'industrie m'amène à un large spectre d'activités, diverses et pour la plupart abouties et finalisées. Pour autant, et je vous le démontre par la suite, il existe bien derrière l'ensemble de ces travaux une ligne conductrice forte qui met en évidence le couplage modélisation et expérimentation.

Ma démarche, qu'elle concerne les domaines de la Recherche, de l'enseignement, de l'administration ou encore du transfert, commence nécessairement par une phase de réalisation, d'expérimentation pour enfin capitaliser ces savoirs qui me permettent d'aboutir une phase d'innovation qui elle-même va susciter un nouveau besoin ou une nouvelle application qu'il va falloir expérimenter...et mon activité scientifique est en action permanente.

# **Partie I. NOTICE INDIVIDUELLE**

## 1. CURRICULUM VITAE

GARNIER Sébastien  
Né le 30 septembre 1971 à Caen  
Marié, 3 filles

Maître de conférences

De l'université de Nantes

Enseignement :  
**IUT de Nantes**  
2 avenue du Pr Jean Rouxel  
BP 539, 44475 Carquefou cedex

Recherche :  
**Laboratoire des sciences du numérique  
de Nantes(LS2N)**  
UMR CNRS 6004  
1 rue de la noe,  
BP92101, 44321 Nantes

### Parcours et Formation

---

Depuis 2000 Maître de conférences à l'Université de Nantes au sein de l'IUT de Nantes

1999-2000 ATER à l'Université de Nantes au sein de l'IUT de Nantes,

1996-2000 Doctorat

Titre : Détermination de paramètres descriptifs de l'état d'usure d'outils pour le développement d'un système de surveillance automatique de l'usinage en fraisage

Jury

Président : LE MAÎTRE F., Professeur à l'ECN

Rapporteur : ANSELMETTI B., Professeur à l'ENS CACHAN,  
BRISSAUD D. Professeur au l'INP Grenoble,

Examineur : LUCAS M.F. Maître de conférences à l'ECN  
FOURNEAU R. Dr Professeur et directeur CERISIL Belgique,

Directeur de thèse : FURET B., Maître de conférences à l'Universités,

Membre invité: SCHWEITZER A. PDG de la société DIGITAL WAY

1995-1996 Service militaire au sein du Génie de l'Air,

1997-1998 DEA en Génie Mécanique, Option CMAO et Productique à l'Ecole Centrale de Nantes au sein du Laboratoire d'Automatique de Nantes.

Titre : *Recherche des configurations articulaires optimales d'un robot redondant – méthode neuronale.*

### Recherche

---

Domaine de compétences :

- Procédure expérimentale,
- Modélisation et identification,
- Processus de parachèvement, étudié au travers :
  - Des moyens : Commande Numérique et robot,
  - Procédé : fraisage (outil à dents, outil à concrétions diamantées), perçage & ponçage,
  - Matériaux métallique & composite,

Encadrement	
Masters recherche	8
Thèses doctorales soutenues (Ritou 40%, Havette 30%, Caillaud-Boudellier 30%, Lecerf-Dumas 30% , Ambiehl 30%)	5
Thèses doctorales en cours (Ngoufack 40%)	1
Thèses doctorales à venir (Paquet 40%)	1
Communications scientifiques	
Publication internationale avec comité de lecture référencé	7
Publication internationale avec comité de lecture	2
Chapitre d'ouvrage	2
Conférence internationale avec comité de lecture	17
Article en colloque français	15

#### Projets en lien avec la recherche

---

- Projet UGV/Alu Composite (FUI),
- Projet UsinAE (FUI),
- Projet Défi Composite (OSEO),
- Projet ECOWINGBOX (FUI),
- Projet COROUSSO (ANR),
- Projet RoboFin (IRT Jules Vernes),
- Projet COMET (IRT Jules Vernes),
- Projet QuaUsi (FUI),
- Projet CROX (DGA),
- Projet COROMA (Projet Européen),
- Projet Rodeo (Projet Européen),
- Projet BatiPrint (Projet de Maturation),

#### Dépôts de logiciels à l'APP

---

2011	-	Logiciel d'identification des raideurs de robots,
2012	-	Traitement de données issues d'un laser point pour la mesure d'outils,

#### Dépôt de brevet

---

2012	-	Dispositif de ponçage comprenant des moyens de changement de disque abrasif,
2013	-	Procédé et système de contrôle d'un ponçage orbital,
2014	-	Procédé et dispositif pour la mesure du suivi d'une trajectoire sous charge,
2016	-	Fabrication additive de mur béton,
2016	-	Interface de surveillance de couplage robotisé,
2016	-	Système de mesure à résolution sous-pixel pour le positionnement de deux robots lors d'une tâche de contrôle non destructif,
2017	-	Système de couplage de chaînages d'armature,
2017	-	Système de couplage d'armature métallique par l'intermédiaire de picot oblique,

#### Matières enseignées

---

Mathématique	niveau GMP1 durant 3 ans (15h/an cours & TD),
Statistique	niveau GMP1 durant 6 ans (30h/an TD),

Bureau d'étude	niveau GMP1 depuis 2000 (15h/an TP),
Informatique VBA	niveau GMP1 depuis 2000, responsable de la matière depuis 2006 (30h an cours TD & TP),
Informatique Base de données	
CAO	niveau GMP2 depuis 2010 (15h/an TP),
CAO - surfacique	niveau GMP1 depuis 2000 (15h/an TP),
CAO - surfacique	niveau Licence I2P responsable de la matière depuis 2000 (30h/an Cours & TD),
FAO - 2axes ½	niveau licence I2P durant 8 ans (15h/an cours, TD & TP),
CN avancée	niveau licence I2P depuis 2008 (15h/an),
FAO - 3 et 5axes	niveau licence I2P depuis 2008 (15h/an cours, TD & TP),
Robotique	niveau licence ICMIR depuis 2012 (4 à 8h/an TD),
Robotique	niveau GMP2 depuis 2014 (8h/an cours, TD & TP),

(Les heures données effectives dépendent du nombre de groupes et du nombre d'intervenants)

### Valorisation – projet industriel

Projet industriel	niveau GMP2 Bureau d'étude et fabrication depuis 2000, ces projets industriels sont menés avec des groupes d'étudiants de deuxième année du département GMP. A partir d'un cahier des charges, il s'agit de concevoir, de réaliser et de mettre en fonctionnement chez un client le projet étudié.
2000	- Machine de sollicitation d'une voiture – Société Microcar
2001	- Projet sur une Micro Turbine en inconel 717
2003	- Bouche Artificielle – Enitia
2004	- Prototype d'UPA
2005	- Système de mise à l'eau - Démontable pour bateau 420 – SUAPS
2006-07	- Banc de mise en charge de karting – Société SodiKart
2008	- Banc test pour validation de joint hydraulique – Société SAH LEDUC
2009	- Processus d'usinage pour Voiture CEC – propulsion gaz – Concours CEC
2010	- Transmission innovante à rendement maximum – Mr Voisine
2011	- Processus d'usinage pour Voiture CEC – propulsion électrique – Concours CEC
2012	- Changeur de disque de ponçage sur machine roto orbitale – IRCCyN
2013	- Prototype de parachèvement robotisé portable– IRCCyN
2014	- Découpe de joint de cardan – Société Trelborg
2015	- Imprimante 3D de grandes dimensions - IRCCyN
2016	- Effecteurs pour impression 3D robotisée - IRCCyN

### Organisation de Workshop niveau licence professionnelle

Il s'agit d'une nouvelle forme pédagogique que nous avons mis en place à cinq collègues du département en s'inspirant de la façon de faire du FabLab Nantais Ping avec lequel nous avons de nombreux échanges. Il s'agit, avec tout le groupe d'étudiants de la licence professionnelle I2P, de concevoir et de réaliser en un temps record (8 à 12 jours suivant le cas) un proto « échelle 1 » du système étudié.

- |      |   |
|------|---|
| 2013 | - Réalisation d'une machine CN de détournement et d'usinage de panneau de bois open source, |
| 2014 | - Réalisation d'un concept car pour livraison de colis par drone,                           |
| 2015 | - Réalisation d'un engin quadricycle à pédales pour livraison,                              |
| 2016 | - Réalisation d'exosquelettes,  |

### Administratif

- Responsable de la communication de l'équipe CMAO & Productique de l'IRCCyN (durant 3 ans, gestion du site web),
- Chef d'atelier : 2005-2009 gestion du personnel (2 techniciens), gestion des commandes pour l'ensemble des tous les projets pédagogiques, technique et de recherche (budget annuel 30K€, gestion du parc machines ( 35 machines dont 12 CN) etc..
- Co-organisateur des Assises MUGV 2008 (Machine et Usinage à Grande Vitesse) Nantes 160 participants,
- 2001- 2007 : responsable des spécialités MOPP et CIP de la licence LPGI (24 étudiants volume Horaire 150hrs/an),
- Participation au Comité de Spécialistes de l'université de Nantes, (durant 4ans)
- 2008-2009 : Création de la licence I2P avec 2 options MPP & CIP, directeur des études (28 étudiants - gestion emploi du temps et notes – volume annuel 450h),
- 2009-2013 : Responsable de la Licence I2P, Directeur des études (gestion emploi du temps et notes),
- Mise en place de Course En Cours du point de vue technique (depuis 2009),
- Participation à différents comités d'investissements (centre usinage Belotti, Robot Kr240, Kr120, AGV,...) et à la mise en place de ces moyens de recherche et de formation,
- Co-organisateur de la Conférence Nationale AIP-Priméca 2009, Montalbert, 180 participants,
- Participation au groupe de création du master ITI (interdisciplinaire en technologies innovantes) à l'IUT de Nantes (ouverture prévue en 2018),

## 2. ACTIVITE D'ENSEIGNEMENT

Mon environnement principal d'enseignement est l'IUT de Nantes. Mes enseignements ont été et sont encore très diversifiés, par choix, mais aussi parce que c'est la tradition de ce département où l'enseignement se fait en équipe pédagogique interdisciplinaire. En effet, j'interviens dans de nombreuses matières, et si pour un certain nombre d'entre elles, j'ai pris la responsabilité de plusieurs modules, pour les autres j'y participe en m'imprégnant du point de vue des collègues et de leurs méthodologies d'enseignement. Cette façon de faire est très enrichissante et plutôt source de partage, de dynamisme et d'innovation pédagogique.

Je me propose d'exposer succinctement les enseignements dont j'ai la responsabilité. Je ferai à la fin de cette section un point sur quelques projets industriels menés avec des étudiants, les autres projets traités sont en annexes de ce mémoire. Les projets industriels sont un des points forts du département GMP de Nantes. Ils sont aussi très consommateurs de temps, mais sont également une excellente forme de pratique pédagogique mêlant activités de synthèse, réalisations concrètes et travail en équipe.

### 2.1. Cours Informatique – GMP 1 & 2

Je pilote ce module en première année, j'assure les amphis, propose et produit les supports de TD et TP. Deux collègues m'assistent pour les TD et TP.

Dans le déroulement de cet enseignement, le fil conducteur reste classique pour un cours d'informatique, mais sachant qu'il s'adresse à des étudiants de GMP, il faut lui donner une connotation « boîte à outils » que les étudiants vont s'approprier afin de pouvoir la ré-exploiter; ce que l'on constate chaque année avec les pratiques de certains étudiants en stage. Le cours aborde des notions de VBA sur Excel. Si le cours met en place toutes les notions d'algorithmique, il aborde de manière importante la notion IHM (Interface Homme Machine), qui a pour intérêt d'être plus ludique pour les étudiants.

Dans ce cours en particulier, j'intègre les outils informatiques, permettant une innovation pédagogie interactive. L'utilisation des QCM « à la demande » est l'un d'eux, outre son aspect d'évaluation, il me permet, en plus, d'inciter l'étudiant à revenir à distance sur les notions abordées en l'autorisant à ré exécuter celui-ci quand il le souhaite et autant de fois qu'il le voudra, directement sur son ENT (Espace Numérique de Travail). La difficulté dans la mise en place de ceux-ci a été de trouver le moyen qu'ils ne deviennent pas une saisie systématique avec des réponses retrouvées sur la toile. Ces QCM sont courts, ils incitent donc l'étudiant à les rejouer pour améliorer sa note. Une limitation à 5 ou 6 répétitions paraît pour ce cours optimale afin de ne pas solliciter des comportements déviants.

L'incitation durant les cours à se rendre sur des sites et forum de discussion autour du VBA leur permet de prendre de bonnes habitudes de programmeur.

Ma participation, avec un collègue, aux modules de deuxième année sur les bases de données nous a permis d'initier une activité reprenant les notions vues en première année sur le VBA. Nous avons pu constater l'intérêt de la reprise de ces savoirs dans leur apprentissage. C'est un plus pour des techniciens supérieurs de pouvoir traiter des données et les exploiter à différents niveaux dans l'entreprise.

## 2.2. CAO–formes complexe niveau Licence I2P

Il s'agit ici de faire en sorte que les étudiants de licence professionnelle s'approprient les notions de base nécessaires à une bonne compréhension de la création surfacique et qu'ainsi ils puissent les exploiter complètement dans leurs propres conceptions. Après une première étape sur la construction de filaire dans l'espace, j'explique les notions de continuité des courbes de Bézier, B spline, C spline et enfin T spline. Nous pouvons alors aborder la construction des premières surfaces au travers des surfaces canoniques de base (sphère, cylindre) ainsi que des transformations élémentaires déjà maîtrisées conceptuellement. J'enchaîne sur les opérations entre surface, découpe et jointure. Vient ensuite la notion plus complexe de balayage. J'axe ma pédagogie sur la construction de ces surfaces avec les notions de courbe d'armature positionnant le plan du profil dans l'espace ainsi que l'ancrage et l'orientation du profil dans ce dernier. La notion de morphing est abordée avec les surfaces multi-sections. Bon nombre d'exemples viennent étayer ces notions au cours des 30 heures du module.

## 2.3. Stage pour le profil MPP de la licence I2P

Notre volonté, lors de la création de la licence I2P en 2008 a été de mettre les étudiants du profil MPP (Maîtrise des Procédés de Production) en condition afin qu'ils maîtrisent l'ensemble de la chaîne numérique. Leur formation est organisée autour de 4 stages d'une durée d'une semaine.

Le premier est le module commande numérique «avancée». Notre objectif est d'améliorer la connaissance des machines à commande numérique de nos étudiants. Ces étudiants formés vont partir dans l'industrie comme technicien supérieur spécialiste de la fabrication. Afin d'acquérir les connaissances nécessaires à la bonne maîtrise des moyens de production, ils doivent comprendre les limites physiques des machines de production. Différents aspects sont abordés tels que la géométrie, la cinématique et la dynamique des machines, ... Après quelques cours et TD, nous réalisons une série de 4 TP de 4h sur :

1. La géométrie machine au travers de tests BallBar afin d'en déduire une estimation la capacité machine,
2. La préparation d'outil avant production
  - montage en pince et frettage,
  - Utilisation de banc de pré réglage,
  - Sonnage statique (avec marteau d'impact et accéléromètre), mise en place des notions de souplesse et de fréquence propre,
  - Validation des conditions opératoires au vue des résultats obtenues (go , no go),
3. Mise en place du sonnage dynamique afin de mesurer l'impact du comportement dynamique de la broche et de comprendre les limites d'un sonnage statique broche non tournante,
4. Cinématique machine : mise en évidence des notions de jerk, d'accélération, de vitesse de continuité de trajectoire.

Le second stage concerne l'usinage 2 axe ½ sous CATIA. Pour ce stage, j'interviens à la fin du module pour expliquer la notion d'ébauche automatique, pour définir les notions de fort enlèvement matière (forte avance, forte profondeur de passe, tréflage), et pour proposer une méthodologie de choix des conditions opératoires associées à l'opération.

Le Troisième stage que j'ai créé concerne l'usinage de formes complexes, il est détaillé ci-après.

Et enfin, le dernier concerne la métrologie appliquée, entre autre, aux pièces que les étudiants ont usinées.

## 2.4. FAO – formes complexe et 5 axes

Durant ce stage, nous utilisons Power Mill de DELCAM, c'est un logiciel plus performant que Catia pour les aspects formes complexes et 5 axes. Après une présentation des différentes stratégies de finition de forme gauche avec les outils hémisphériques, nous revenons sur la chaîne numérique. Durant 4h, nous alternons sur un simple balayage entre FAO et usinage sur un centre Hermle 5 axes, nous modulons les différents paramètres permettant d'améliorer la qualité tout en essayant de maintenir la productivité initiale. La pièce Figure 1 permet d'illustrer ces travaux, nous disposons de 4 faces identiques à finir. Les notions de diamètre outil, hauteur de crête, tolérance radiale, tolérance longitudinale, lissage CN, dépinçage et enfin régulation sont abordées.

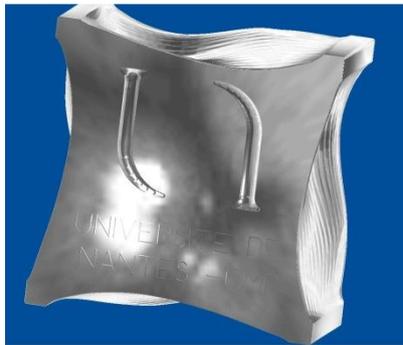


Figure 1 : Pièce de Tp pour l'usinage de forme complexe

Pour la mise en application des notions abordées, les étudiants reçoivent par groupe de deux ou trois, une pièce ou plusieurs pièces permettant la réalisation de moule ou de master (maître modèle). Ils doivent réaliser ces pièces en effectuant une analyse critique de la phase de finition afin de proposer des voies d'amélioration. Le type de pièces proposées est divers comme un moule de club de golf (Figure 1) ou encore le master d'un bateau de modélisme (Figure 3).



Figure 2 : Moule de club de golf constitué de trois parties

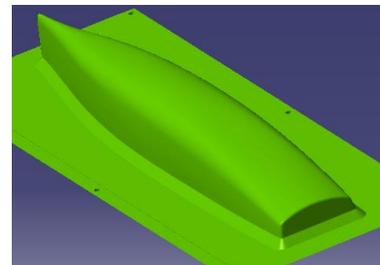


Figure 3 : Modèle d'un master de bateau de modélisme

Lors de ces stages, nous développons une pratique de couplage des formations qui est très intéressante car elle rend la réalisation fonctionnelle; les travaux des étudiants ont un aboutissement qui dépasse leur formation. Cette année, nous proposons 5 projets, trois sont soumis par les étudiants de la licence IMOC avec des pièces permettant la mise en

œuvre de différents procédés (pré imprégné, RTM, moulage de résine chargée..) les deux derniers étant la réalisation d'un master pour un canoë bi place de 4 mètres de long réalisé par les étudiants GMP.

## 2.5. Robotique

Ce cours en GMP est récent puisque la robotique vient de revenir dans le module d'automatique du PPN (Programme Pédagogique National) du GMP. J'ai choisi d'orienter ce cours, TD et TP, autour de la prise de conscience de deux aspects majeurs en robotique. Le premier concerne la capabilité du robot par rapport à son architecture (boucle de mesure /cout). Différentes machines sont comparées tel que les commandes numériques et les robots suivant des points de vue de commande ou de conception. Le second présente la notion d'espace articulaire avec ses conséquences:

- sur l'hétérogénéité de l'espace de travail,
- les singularités,
- la notion de redondance cinématique.

Au cours des TD, les étudiants appliquent ces notions sur la mise en place d'une gamme d'usinage (Figure 4) avec un robot (Figure 5) et la notion de configuration multiple.

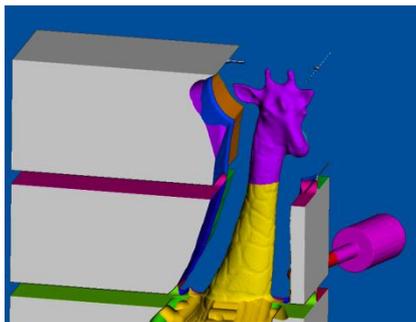


Figure 4 : gamme d'usinage réalisée sur une pièce d'1m20



Figure 5 : mise en place d'un usinage robotisé

Au cours du TP, les étudiants reviennent sur les notions d'espace articulaire, ainsi que sur le très classique « pick and place ».

Avec les étudiants de la licence professionnelle ICMIR (Industrialisation, Conduite et Maintenance d'Installations Robotisées) rattachée à l'IUT de La Roche sur Yon dont une partie des TP a lieu à l'IUT de Nantes sur la plate-forme Robotique et Procédés de l'IRCCyN, nous abordons les stratégies de programmation des robots. L'objectif est de déterminer dans quelles limites on peut utiliser une stratégie d'apprentissage sur trajectoire et avec quelle précision en fonction du robot. Enfin, nous traitons le cas de l'intégration de capteur externe, comme un laser de distance, dans la boucle de commande afin de constater des gains de précision que l'on peut espérer.

## 2.6. Projets industriels en GMP 2

A l'IUT de Nantes, dans le département GMP, le stage en entreprise des étudiants est réalisé entre la première et la seconde année. Cette organisation nous permet de réaliser un projet industriel durant la seconde année.

Comme je l'ai déjà abordé succinctement précédemment, les projets ont pour objectif de traiter des cas concrets et d'appliquer les démarches vues durant la formation. Les groupes sont constitués de 6 à 8 étudiants. Entre les années 2000 et aujourd'hui, le volume horaire attribué à cette activité a diminué. Actuellement, les étudiants ont au minimum 4h par semaine dédiés à ce projet pour ensuite, après la fin de l'année civile, passer à 8h semaine au dernier semestre. Les dernières semaines de l'année sont quasiment entièrement consacrées à ces projets. La demande des projets peut être émise par un industriel, un laboratoire, une association, un particulier et bien sûr l'IUT lui-même pour s'auto-équiper ou promouvoir la formation. Les étudiants sont soumis à un calendrier précis nous permettant de rythmer l'avancement de projet :

- Revue critique de faisabilité,
- Revue critique de conception,
- Revue critique de définition,
- Revue critique de réalisation.

Ce calendrier permet de valider chacune des étapes primordiales à la réalisation d'un produit. Ces projets sont encadrés par un binôme d'enseignants. Nous devons toujours garder à l'esprit que notre objectif est et reste l'apprentissage de nos étudiants. Nous avons ainsi obligation de moyens mais pas de résultats, ce qui est clairement indiqué dans la convention remise au client.

Ce mémoire d'HDR est aussi pour moi le moyen de promouvoir cette pédagogie au travers de projets industriels souvent ambitieux qui est comme je l'ai déjà dit, une excellente approche de la pédagogie participative et active.

Parmi les quatorze projets industriels que j'ai été amené à encadrer, j'en ai retenu trois que je vais détailler ci-après, les autres sont consultables dans les annexes de ce mémoire.

- Cas industriel : Banc de mise en charge de karting – Société SodiKart
- Promotion du département : Processus d'usinage pour Voiture CEC – propulsion électrique –
- Projet innovant : Changeur de disque de ponçage sur machine roto orbitale - IRCCyN

### **a** *banc de mise en charge de karting*

**Le demandeur** : – Société SodiKart

**Enseignant encadrant** : GARNIER Sébastien  
LE LOC'H Sébastien

**Nombre d'étudiants** : 8

**Contexte** : le service de développement de SodiKart souhaite pouvoir tester différentes structures afin de confirmer les calculs théoriques de déformation des parechocs.

**Objectif** : Concevoir et réaliser un banc de caractérisation de déformation des parechocs. Ce banc doit permettre l'application d'efforts en différents points (35kN), et mesurer de la déformée en d'autres points. L'objectif pour la société est de tester la performance en matière de sécurité et la fiabilité des kartings de location.

**Réalisation des étudiants** : le projet a été réalisé sur deux années et finalisé. Ce banc test est toujours utilisé pour la R&D de SodiKart



Fig. 6 : karting de la société SODIKART

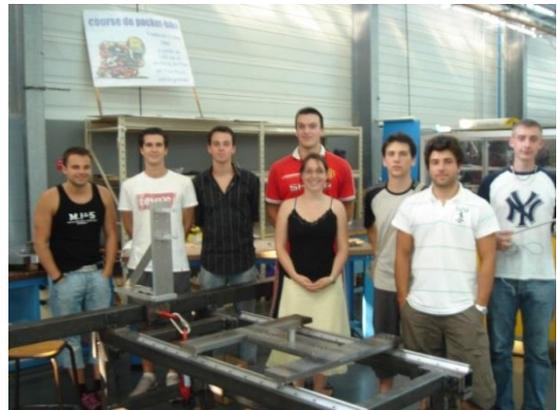


Figure 7 : Réalisation de la plateforme

### **b** *Projet Course En Cours (version électrique)*

**Le demandeur** : IUT de Nantes-Département GMP

**Enseignant encadrant** : GARNIER Sébastien  
CARDIN Olivier

**Nombre d'étudiants** : 7

**Contexte** : Course en Cours est un concept pédagogique créé par Renault et Dassault Système pour promouvoir la démarche de conception-réalisation dans laquelle les élèves de collèges ou lycées doivent concevoir et usiner une voiture de course à échelle réduite.

Lors du concours national, le système de propulsion à gaz a changé en une propulsion électrique. Les dimensions du brut ont changées. elles ont été fixées au volume maximal d'un charlie Robot (ce modèle de machine étant répandu parmi les participants au concours). Cette compétition, depuis son apparition, a un réel succès. Nous avons commencé avec 8 équipes de collégiens en 2009, nous sommes aujourd'hui en 2016 la plus grosse académie avec plus de 220 équipes inscrites.

**Objectif** : L'objectif principal était d'automatiser la fabrication des voitures. Etant le centre technique de la région, nous devons fournir à la fois le processus FAO et une quarantaine de montage d'usinage.

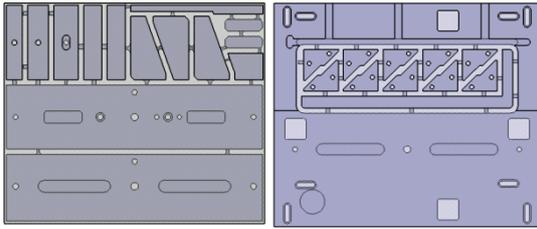


Figure 8 : Répartition des pièces pour l'usinage en strato conception

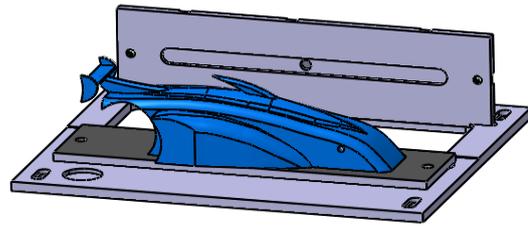


Figure 9 : Montage d'usinage permettant les trois posages

**Réalisation des étudiants** : après une analyse du montage précédemment réalisé, une conception plus robuste a été mise en place. Le montage a été réalisé par strato-conception (Figure 8), il a été décliné plus d'une quarantaine de fois depuis (Figure 9).

Le processus de fabrication des voitures a exploité des fonctionnalités avancées sous CATIA (Figure 10). La notion de publication a été utilisée. Les publications permettent, en renseignant les surfaces sur la voiture des collégiens, sa mise en position automatique (un appui plan, un appui linéaire, un appui ponctuel). Dans une seconde phase, l'automatisation des phases d'usinage de la voiture est également réalisée.



Figure 10: Mise en place d'un processus d'usinage automatisé dans CATIA via la publication

### c **Changeur de disque de ponçage sur machine roto orbitale**

**Le demandeur** : IRCCyN – Capacité (Samuel BONNET)

**Enseignant encadrant** : GARNIER Sébastien

**Nombre d'étudiants** : 7

**Contexte** : Dans le cadre de nos travaux de recherche sur le ponçage robotisé, nous avons étudié le ponçage réalisé avec une ponceuse roto orbitale. Le changement de papier abrasif sur ce type de moyen portatif est complexe et pour autant absolument nécessaire afin d'envisager une automatisation du procédé.

**Objectif** : Concevoir un système de petite taille afin qu'il puisse être embarqué, ce qui permettra le changement automatique de papier sur une ponceuse roto orbitale installée sur

un robot. Les deux contraintes principales étaient l'alignement des trous d'aspiration entre le papier et le plateau support, et l'assurance d'une bonne remise en place de celui-ci (aucune erreur possible, un ponçage sans papier étant catastrophique).

**Réalisation des étudiants :** Le projet a été un succès. Les étapes d'arrachage du papier existant, le positionnement de la ponceuse pour les trous d'aspiration, la mise en place du papier neuf, et enfin, le contrôle de la présence d'un papier ont été validés (Figure 11 & Figure 12).

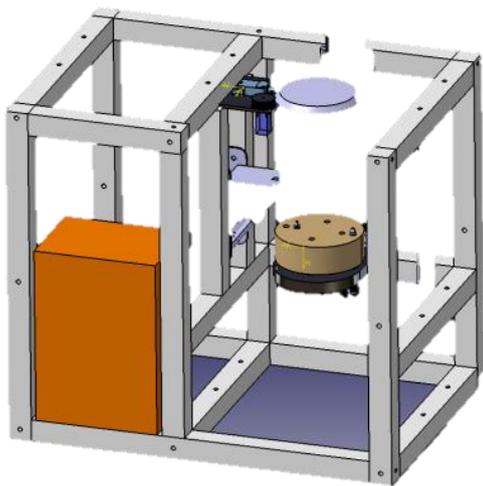


Figure 11 : CAO du changeur de disque de ponçage



Figure 12 : Maquette du changeur de disque sur ponceuse roto orbitale

Après réception du projet, celui-ci a été fiabilisé, et la fonction stockage des papiers usagés a été ajoutée.

Un dépôt de brevet a été réalisé, avec l'aide de la SATT Ouest Valorisation qui a vendu une licence d'exploitation de ce système à une entreprise française qui réalise des cellules robotisées de ponçage. Une vingtaine de systèmes de changement automatique d'abrasif ont été implantés dans l'industrie en Europe, la SATT perçoit 12,5% du montant des ventes et reverse à l'Université de Nantes.

### 3. ACTIVITE DE RECHERCHE : ENCADREMENT DE THESES

Les thématiques que j’aborde sont axées sur des procédés avancées de productions. Les premières thèses concernaient le procédé de fraisage, les applications ciblés nous ont amenés à considérer l’usinage robotisés. Tout naturellement, au vue des difficultés, induites par l’utilisation de ces derniers, des travaux ont débuté afin d’étudier le couplage procédé robot dans l’objectif de l’améliorer.

Dans cette partie, je liste des différentes thèses que j’ai pu encadrer. J’y ferai pour partie référence dans la rédaction de mon projet recherche.

Thèse	Période
Mathieu RITOU (30%) (surveillance, fraisage)	09/2003 – 12/2006
Benjamin HAVETTE (pilotage, fraisage)	(30%) 09/2007 - 01/2011
Aude CAILLAUD/BOUDELIER (fraise à concrétions diamantées)	(30%) 09/2007 – 12/2011
Claire LECERF/DUMAS (fraisage, robot, rigidité)	(30%) 09/2008 - 12/2011
Raphaël POIREE (ponçage, matériaux tendre)	(50%) 09/2011 à 10/2014
David GUERIN (Rigidité, robot sur rail)	(30%) 09/2012 - ??/2016
Alexandre AMBIEHL (Qualité de trajectoire, robot)	(30%) 03/2014 - ??/2016

Tableau 1 : Gantt liée à l’encadrement des thèses (voir annexe Listes des thèse encadrées)

Suite à ma thèse sur la surveillance d’usinage en fraisage, j’ai poursuivi mes travaux sur la maîtrise des procédés de production avec l’encadrement des thèses de Mathieu RITOU et Benjamin HAVETTE. La première a concentré nos recherches sur la surveillance des bris d’outils. Au cours de cette thèse, un **nouveau critère** a été proposé ainsi qu’une méthodologie permettant de rendre la **détection plus robuste**. La seconde s’est focalisée sur le pilotage du procédé. Nous nous sommes intéressés aux pics de puissance constatés durant l’usinage, ceux-ci pouvant pénaliser la productivité, voire être un paramètre déterminant dans le cas de l’exploitation de broche à paliers magnétiques. Une solution a été développée via **un pilotage des vitesses d’avance**. Nous avons montré les gains ainsi que la **maitrise de la puissance broche**.

Notre implication avec le milieu industriel environnant (aéronautique, nautisme) nous a permis de prendre conscience de certains verrous technologiques et scientifiques. La typologie de pièces de grande dimension ayant des tolérances plus larges (plusieurs dixièmes de millimètre) permet d’envisager l’exploitation de robot. Néanmoins, le principal verrou est le couplage existant entre le robot et le procédé. Dans ces applications, l’usinage ne concerne pas uniquement les matériaux métalliques. Afin de pouvoir lever ces verrous

scientifiques, deux thèses sont initiées : la première, celle d'Aude CAILLAUD, portant sur l'usinage des matériaux composites. Ces travaux nous ont permis de rationaliser et de mettre au point une **méthodologie de choix de fraises à concrétions diamantées**. Afin de répondre à la problématique liée à la robotisation du procédé, la mise en place d'une **modélisation** permet l'estimation **des efforts** liés aux détourages de ces matériaux. Parallèlement, une thèse réalisée par Claire DUMAS s'est concentrée sur l'aspect robotique. Afin de pouvoir comprendre et piloter le processus, nous devons disposer d'un **modèle élasto-statique**. C'est le principal apport de ces travaux. Une procédure pragmatique a été mise au point afin d'**identifier ce modèle**. Les **couplages** existant ont été **mis en évidence**. Différentes propositions ont été faites afin d'améliorer la qualité obtenue, dont la **correction miroir** qui permet de prévoir des trajectoires fausses pour réaliser des pièces bonnes.

Industriellement, le parachèvement robotisé de pièces concerne différents procédés. On peut citer le détourage, le perçage et la préparation de surface. Parmi ces procédés, le dernier est encore le moins bien maîtrisé et montre néanmoins un grand potentiel. La connaissance de ce procédé reste macroscopique. C'est pourquoi, nous avons initié des travaux de thèse (réalisés par Raphaël POIREE) dans ce domaine afin de mieux comprendre quels sont les paramètres liés à ce procédé afin de maîtriser les éventuelles couplages au cours de sa robotisation. Ces travaux ont portés sur la compréhension de la **notion de pouvoir d'abrasion** et sur la prédiction d'**enlèvement matière sur forme gauche sur matériaux tendre**. Raphaël POIREE, agrégé, a obtenu un poste en classe préparatoire à Lille, il n'a pas jugé nécessaire de finir le travail réalisé durant ces trois ans de thèse.

Industriellement la dimension de pièces envisagées ne cesse de s'accroître. C'est pourquoi dans le cadre du projet ROBOFIN, une structure avec un robot sur rail a été étudiée. Ces travaux sont réalisés par David GUERIN dans le cadre d'une thèse CIFRE à l'IRT Jules VERNE. Les premiers résultats consistent dans la prise en compte du rail dans le modèle du système poly articulé. Pour ce faire, le protocole d'**identification** a été revu et **amélioré** (application d'une déformation, contrairement aux premiers travaux où nous appliquions un effort). La seconde étape, ambitieuse, consiste à établir un protocole permettant une identification du processus robotisé (robot + baie), ayant pour but de **s'affranchir de mesure pour la correction miroir**. David GUERIN suite à une dépression en 3eme année, puis à une reconversion dans l'animation n'a pas soutenue sa thèse.

D'un point de vue industriel, la robotisation des procédés n'est pas forcément à opposer au procédé classique d'usinage sur MOCN. Ils peuvent être complémentaires. C'est l'objet du projet QUAUSI. Durant l'usinage, de nombreuses données sont collectées puis analysées. Le premier axe du projet exploite ces données d'un point de vue optimisation du processus de production en fournissant des indications sur les qualités de la pièce produite. Le deuxième axe concerne l'exploitation des données numériques sur les défauts identifiés. Le défaut étant connu, il s'agit d'automatiser la reprise de celui-ci via un processus robotisé alors qu'actuellement, le parachèvement des pièces usinées est entièrement réalisé manuellement par des opérateurs ajusteurs. La création de la FAO doit être automatisée ainsi que son exécution afin de ne pas engendrer des coûts de programmation importants qui nuiraient à la rentabilité de cette robotisation des tâches aléatoires, non répétables donc difficilement automatisables mais surtout pénibles et fastidieuses. Ces travaux sont réalisés par Alexandre AMBIEHL dans le cadre d'une thèse CIFRE dans la société Gébé2Productique.

L'aspect scientifique de sa thèse concerne plus spécifiquement l'amélioration de **l'identification du robot** et des **trajectoires d'usinages du robot** dans la continuité des travaux précédemment menés.

#### 4. PROJETS DE RECHERCHE ET DE VALORISATION

##### 4.1. Projets

Les projets auxquels, j'ai pu participer sont de plusieurs catégories : FUI (fond unique interministériel), ANR (agence National de Recherche) et enfin, au sein de l'IRT Jules Verne et enfin européen avec deux derniers projets démarrant cette année.

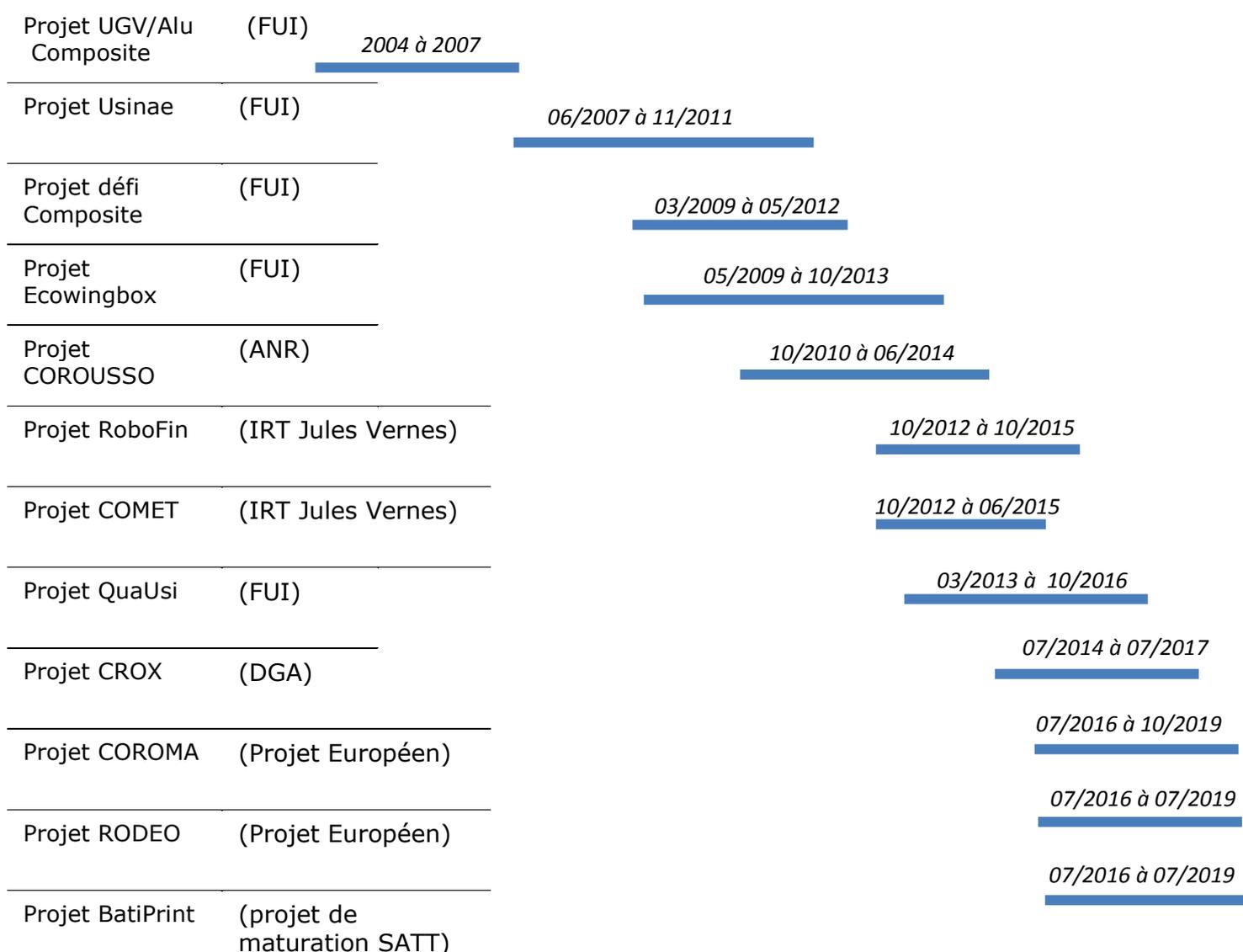


Tableau 2 : gantt des projets

Au cours des années mon expertise s'est centrée sur les processus robotisés. Généralement, parallèlement aux ingénieurs et technicien nécessaire au bon déroulement des projets, nous abordons des travaux de recherche permettant de lever des verrous scientifiques nécessaires à l'expansion de ces activités. En plus de la participation au montage de ces projets, j'interviens dans l'encadrement de ces thèses, je prends en responsabilité de certains Workpackage et pour le projet CROX la responsabilité scientifique du projet entier. Les détails de ces différents projets sont apportés en annexe, mais les développements scientifiques réalisés sont abordés dans le cœur de ce mémoire.

## 5. DEPOT DE BREVETS NATIONAUX ET EUROPEENS

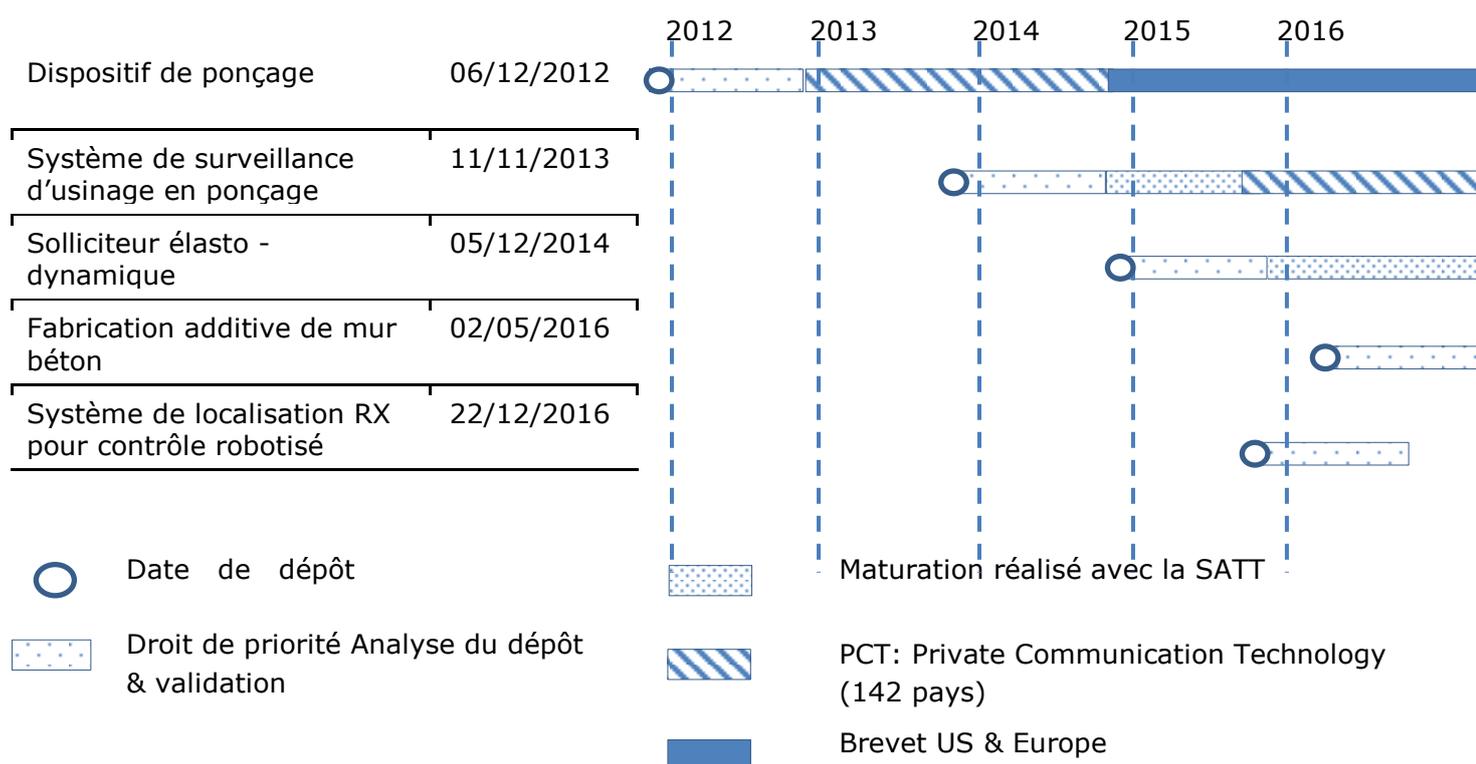


Tableau 3 : Dépôt des brevets

### **Dispositif de ponçage comprenant des moyens de changement de disque abrasif**

Ce brevet fait suite au projet préalablement présenté (page 18). Après l'avoir finalisé, nous avons poursuivi par le dépôt du brevet

Date de dépôt : 10 décembre 2012

Date de PCT : 09 décembre 2013

N° et date de publication de la demande [WO2014090753 - 2014-06-19](https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/WO2014090753)

Inventeur : Bonnet Samuel, Garnier Sébastien (30%), Le Loc'h Sébastien, Furet Benoît, Gallot Guillaume

À ce jour le produit est licencié à une entreprise Gébé2 productique, qui a commencé sa commercialisation.

### ***Procédé et système de contrôle d'un ponçage orbital***

Ce brevet a pour objectif de surveiller les incidents élémentaires en ponçage (problème d'aspiration, encrassage, manque de papier,..)

Date de dépôt : 11/03/2014

Date de PCT : 11/03/2015

N° et date de publication de la demande [WO2015136008 - 2015-09-17](#)

Référence : 247545D32889

Inventeur : Samuel Bonnet, Sébastien Garnier(30%), Sébastien Le Loch, Benoît Furet, Guillaume Gallot

### ***Procédé et dispositif pour la mesure du suivi d'une trajectoire sous charge***

Il s'agit ici de proposer un système de mesure permettant le diagnostic et l'identification de modèle associé du robot.

Date de dépôt : 05/12/2014

Date de PCT : 07/12/2015

N° et date de publication de la demande [WO2016087681 - 2016-06-09](#)

Inventeur : Sébastien Garnier (90%), Benoît Furet

### ***Fabrication additive de mur béton***

Ce brevet décrit le dépôt d'un mur de béton par trois buses simultanées. Les deux buses extérieures créent un coffrage et la troisième dépose un béton structurant.

Date de dépôt : 02/05/2016

Numero soumission :1000345649

Inventeur : Benoît Furet, Sébastien Garnier (30%), Elodie Paquet, Leklou, Poullain

### ***Interface de surveillance de couplage robotisé***

Ce brevet définit une interface instrumentée entre un robot mobile et un robot poly articulé porté par le robot mobile permettant de piloter les déplacements en fonction des mesures réalisées.

Date de dépôt : /02/2016

Numéro soumission : INPI 09322-01

Inventeur : Sébastien Garnier (45%), Guillaume GALLOT, Benoît Furet, Samuel Bonnet

### ***Système de mesure à résolution sous-pixel pour le positionnement de deux robots lors d'une tâche de contrôle non destructif***

Ce brevet définit un principe de relocalisation de la source X porté par un robot par rapport au récepteur porté par un second robot, et ceci avec une précision inférieure au pixel du récepteur.

Date de dépôt : 22/08/2016

Inventeur : David Tlalolini Romero, Sébastien Garnier (45%), Benoît Furet

### **Système de couplage de chaînages d'armature**

Date Déclaration d'invention: 05/01/2017

Inventeur : seb (70%),ben,rom elodie

### **Système de couplage d'armature métallique par l'intermédiaire de picot oblique**

Date Déclaration d'invention: 05/01/2017

Inventeur : benoît,romain, elodie, seb (10%),

## **6. LISTE DES PUBLICATIONS**

Le graphe ci-dessous synthétise mes publications et met en évidence l'augmentation des publications ces dernières années. Le détail est fourni à la suite.

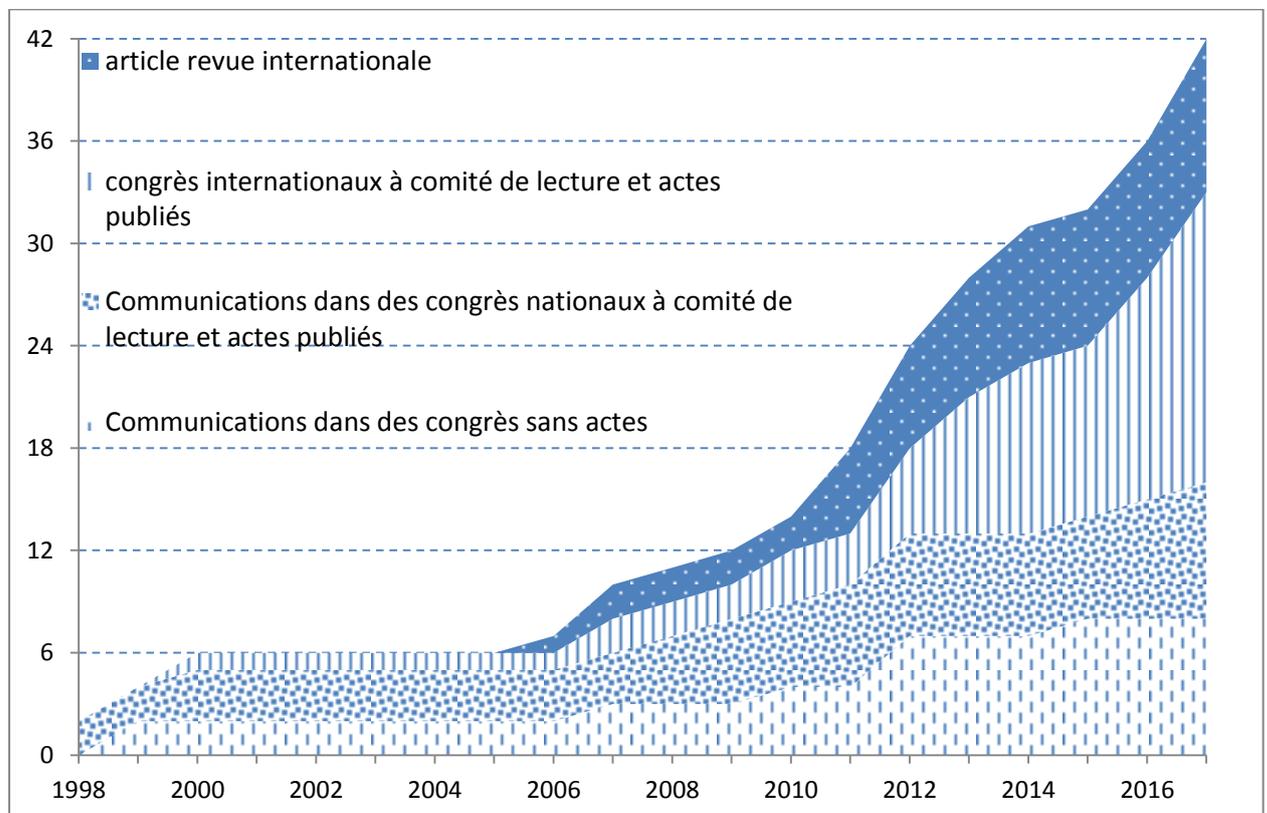


Tableau 4 : progression de l'activité de publication

### **Articles dans des revues internationales avec comité de lecture,**

1. Klimchik A., Ambiehl A., Garnier S., Furet B. et Pashkevich A. « Efficiency evaluation of robots in machining applications using industrial performance measure », journal of Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2017, vol 48, pp12-29, <[10.1016/j.rcim.2016.12.005](https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.12.005)>
2. Ritou M., Garnier S., Furet B., Hascoët J.Y., "Angular approach combined to mechanical model for tool breakage detection by eddy current sensors *Mechanical Systems and Signal Processing*" , Elsevier, 2014, 44 (1-2), pp.211-220.<[10.1016/j.ymssp.2013.02.004](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.02.004)>
3. Boudelier A., Ritou M., Garnier S., Furet B., "Investigation of CFRP machining with diamond abrasive cutters", *Journal of Composite and Advanced Materials Revue des composites et des matériaux avancés*, 2013, 23 (3), pp.425-436. <[10.3166/RCMA.23.425-436](https://doi.org/10.3166/RCMA.23.425-436)>
4. Dumas C., Boudelier A., Caro S., Garnier S., Ritou M., "Development of a robotic cell for trimming of composite parts - Développement d'une cellule robotisée de détournage des composites" *Mechanics and Industry / Mécanique et Industries*, EDP Sciences, 2012, 12 (6), pp.487-494.<[10.1051/meca/2011103](https://doi.org/10.1051/meca/2011103)>
5. Dumas C., Caro S., Mehdi C., Garnier S., Furet B., "Joint Stiffness Identification of Industrial Serial Robots" *revue Robotica*, Cambridge University Press, 2011, pp.1-20. <[10.1017/S0263574711000932](https://doi.org/10.1017/S0263574711000932)>
6. Dumas C., Caro S., Garnier S., Furet B., "Joint Stiffness Identification of Six-revolute Industrial Serial Robots" *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Elsevier, 2011, 27 (4), pp.881-888.<[10.1016/j.rcim.2011.02.003](https://doi.org/10.1016/j.rcim.2011.02.003)>.
7. Boudelier A., Ritou M., Garnier S., Furet B. "Optimization of Process Parameters in CFRP Machining with Diamond Abrasive Cutters" *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publications, 2011, 223, pp.774-783.<[10.4028/www.scientific.net/AMR.223.774](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.223.774)>
8. Gouleau S., Garnier S., Furet B. « Perçage d'empilages multi-matériaux : composites et métalliques », *Mécanique et Industries*, 2007, vol. 8, No. 5, p. 463-469. <<http://dx.doi.org/10.1051/meca:2007069>>
9. Ritou M., Garnier S., Furet B., Hascoët J.Y. "A new versatile in-process monitoring system for milling" *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Elsevier, 2006, 46 (15), pp.2026-2035 <[10.1016/j.ijmachtools.2006.01.001](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.01.001)>

### **Communications dans des congrès internationaux avec comité de lecture et actes publiés,**

1. Paquet E., Furet B., Garnier S., Subrin K., Bernard A., «Additive manufacturing of foam for molds and large components in naval sector», 14th Conference on fast sea transportation & innovative materials for maritime à Nantes le 27 au 29 septembre 2017
2. Ambiehl A., Garnier S., Subrin K., Furet B., «New Method for Decoupling the Articular Stiffness Identification : Application to an Industrial Robot with Double Encoding System on Its 3 First Axis», IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vancouver, Canada, 24-28 September 2017,
3. Poullain P., Furet B., Garnier S., «Batiprint3D and Yhnova : Open Innovation projects in the context of large scale», ACE Workshop 2017, Annual Civil Engineering Workshop, Lille, France, 5-7 juillet 2017,

4. Garnier S., Subrin K., Kriangrai W. «Modelling of robotic drilling », 16th CIRP Conference on Modelling of Machining Operation, Cluny, France 15-16 juin 2017 <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.246>
5. Paquet E., Garnier S., Furet B., Desfontaines V., «The implementation of a methodology for robotic repair operations on composite structures», JCM 2016, International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing, Catania, Italy, 14-16 september 2016
6. Klimchik A., Ambiehl A., Garnier S., Furet B. et Pashkevich A. «Experimental study of robotic-based machining », 8th IFAC, conference on Manufacturing modelling, Management & control, troyes, France, june 28-30, 2016
7. Klimchik A., Ambiehl A., Garnier S., Furet B. et Pashkevich A. «Comparison study of industrial robots for high-speed machining», ICMRE International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering, Nice, France, February 19, 2016
8. Guérin D., Caro S., Garnier S., Girin A., « Optimal Measurement Configurations for the Joint Stiffness Identification of an Industrial Robot Mounted on a Rail», IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (IEEE/ASME AIM 2014), Besancon, France, July 8–11, 2014.
9. Poirée R., Garnier S., et Furet B., « Matériel removal distribution in robotized random orbital sanding », in Joint Conférence On Mechanical, design Engineering & Advanced Manufacturing, Toulouse, France, 2014.
10. Caro S., Dumas C., Garnier S., Furet B., « Workpiece Placement Optimization in Robotic-Based Manufacturing », présenté à IFAC 2013, Saint petersBurg, Russia, 2013, p. 819-824.
11. Garnier S., Dumas C., Caro S., et Furet B., « Quality Certification and Productivity Optimization in Robotic-Based Manufacturing », présenté à IFAC 2013, Saint petersBurg, Russia, 2013, p. 825-830.
12. Caro S., Dumas C., Garnier S., et Furet B., « Workpiece placement optimization for machining operations with a KUKA KR270-2 robot », in Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on, 2013, p. 2921–2926.
13. Dumas C., Caro S., Garnier S., et Furet B., « Workpiece Placement Optimization of a Machining Robot », présenté à VMPT 2012, Ecole Polytechnique, Montreal, Canada, 2012.
14. Dumas C., Caro S., Garnier S., et Furet B., « Workpiece Placement Optimization of Six-Revolute Industrial Serial Robots for Machining Operations », in ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, 2012, p. 419–428
15. Dumas C., Caro S., Chérif M., Garnier S., et Furet B., « A methodology for joint stiffness identification of serial robots », in Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on, 2010, p. 464–469.
16. M. Ritou, Garnier S., Furet B., et J.-Y. Hascoët, « Reliable cutter breakage monitoring during pocket machining operation », présenté à 6th international conference on high speed machining, San sebastian, Espagne, 2007.
17. Garnier S. et Furet B., « Tool Wear study with taguchi method », présenté à WMC 99, Durham, UK, 1999.

## **Chapitre d'ouvrage**

1. PAQUET E., Garnier S., Ritou M., Desfontaines V., «Implementation of a new method for robotic repair operations on composite structures», janvier 2017, In book: *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing*, pp.321-328, DOI: 10.1007/978-3-319-45781-9\_33
2. Garnier S., Ritou M., Furet B., Hascoet J.Y. , « Comparision and Analisys of In-Process Tool Condition Monitoring Criteria in Milling», janvier 2005, In book: *AMST'05 Advanced Manufacturing Systems and Technology*, pp.523-532 DOI: 10.1007/3-211-38053-1\_51

***Communications dans des congrès nationaux avec comité de lecture et actes publiés,***

1. Furet B., Garnier S., Paquet E., Subrin K., « La robotique au service de la construction par impression 3D », 15eme Colloque AIP PRIMECA à La Plagne 2017 le 12 et 14 avril 2017,
2. Paquet E., Garnier S., Ritou M., Furet B., Desfontaine V., « Usinage robotisé de scarfs pour la réparation de pièces composites / Scarfs robotic machining for the repair of composite parts », MUGV, 9eme Assises Machines et Usinage Grande Vitesse, tours le 8 et 9 juin 2016,
3. Dumas C., Caro S., Garnier S., et Furet B., « Développement d'une méthodologie pour l'identification des raideurs articulaires des robots sériels afin d'optimiser leur exploitation en usinage », présenté à Congrès roadef 2011, Saint étienne, France, 2011.
4. Caillaud A., Ritou M., Garnier S., et Furet B., « Choix de procédés de parachèvement pour les pièces en matériaux composites = Choice of finishing process for composite parts », in *Recueil des résumés et comptes rendus des 16èmes Journées Nationales sur les Composites*, Toulouse, France, 2009, p. 10
5. Ritou M., Garnier S., Havette B., et Furet B., « Le pilotage intelligent du process d'usinage: L'approche S.M.M.S. (Smart Machining Method & System) », présenté à Assises MUGV, Nantes, France, 2008.
6. Garnier S. et Furet B., « Identification of the specific coefficient to monitor the cutting process in milling », présenté à Conférence du CIRP, La Baule, France, 2000.
7. Garnier S. et Furet B., « Bases of an adaptative model for automatic monitoring machining system », présenté à IDMME 98, Compiègne , France, 1998.
8. Garnier S. et Furet B., « Original study of the specific cutting coefficients for an automatic monitoring system in milling », 1998.

***Communications dans des congrès nationaux avec actes***

1. Gallot G., Dumas C., Garnier S., Caro S., et Furet B., « Correction dynamique de trajectoires pour l'usinage robotisé », présenté à 13ème Colloque National AIP PRIMECA, Mont-Dore, France, 2012.
2. Poirée R., Garnier S., et Furet B., « Nouveau modèle d'abrasion mécanique appliqué dans le cas du ponçage: étude de l'influence de la méthode d'analyse de l'angle d'attaque des grains actifs sur le pouvoir abrasif », présenté à 13ème colloque National AIP Priméca, 2012.
3. Poirée R., Garnier S., Furet B., et Bonnet, « Étude de la répartition d'enlèvement de matière en ponçage roto-orbital », présenté à Intercut 2012, Saint étienne, France, 2012.
4. Boudelier A., Dumas C., Caro S., Furet B., Garnier S., et Ritou M., « Développement d'une cellule robotisée optimale de détournage des composites », in *MUGV 2010*, Cluny, France, 2010.

5. Ritou M., Laporte S., Peigné G., Furet B., Garnier S., et J.-Y. Hascoët, « Instrumentation de la broche par des capteurs inductifs : application à la mesure d'effort et à l'étude du comportement des broches UGV », présenté à 10e colloque national AIP-Primeca, La Plagne, France, 2007.
6. Garnier S., Furet B., et Tichadou S., « Implémentation de plan d'expériences avec la méthode Taguchi pour la détermination de paramètre de surveillance d'usinage », présenté à 6ème Colloque Aip Priméca, 1999.
7. Garnier S. et Furet B., « Construction d'un plan d'expérience pour l'analyse de l'usure en fraisage », présenté à CFM99, Toulouse, France, 1999.

**Autre**

Conférence invité : AFPR assises 2017 , «Recensement des différents projets actuels dans le monde sur l'impression 3D pour la construction»



## **Partie II. SYNTHÈSE DE MES ACTIVITÉS DE RECHERCHE**

### Table des matières

1.	Fil conducteur d'une démarche recherche .....	32
2.	Hypothèse de machine Rigide – Application au Fraisage .....	35
2.1.	<i>Etat de l'art : Modélisation Classique</i>	37
2.2.	<i>Application à la surveillance de l'usure [6]</i>	47
2.3.	<i>Application à la surveillance du bris d'outil [7]</i>	53
2.4.	<i>État de l'art : dynamique des transitoires</i>	62
2.5.	<i>Application du Pilotage en puissance en fraisage [8]</i>	68
2.6.	<i>Fraisage des composites avec des meules à concrétions diamantées [9]</i>	77
2.7.	<i>Construction d'une modélisation des efforts de coupe</i>	79
2.8.	<i>Synthèse des travaux en fraisage</i>	91
3.	machines souples : identification des couplages avec le procédé.....	94
3.1.	<i>Le besoin – constat des faiblesses</i>	95
3.2.	<i>Analyse expérimentale de structures de robot industriel</i>	101
3.3.	<i>Mise en place de protocole d'identification du modèle élasto statique</i>	107
3.4.	<i>Application à la correction de trajectoire</i>	116
3.5.	<i>Impact de l'hétérogénéité de l'espace de travail du robot sur la qualité</i>	125
3.6.	<i>Application au pilotage du procédé</i>	128
3.7.	<i>Conclusion – Machines souples</i>	137
4.	Conclusion – bilan des activités de recherche .....	138
5.	Perspectives .....	141
5.1.	<i>vision à court terme</i>	141
5.2.	<i>vision à moyen terme</i>	152
6.	bibliographie .....	157

## 1. FIL CONDUCTEUR D'UNE DEMARCHE RECHERCHE

Mes premiers pas en recherche m'ont conduit, sous la direction de Benoit Furet, à m'intéresser à la surveillance d'usinage en fraisage. Ces travaux ont une connotation forte sur l'industrialisation des solutions à mettre en place. L'angle d'attaque de ces travaux a été une approche expérimentale. Nous constatons que les moyens de production fonctionnent actuellement très souvent à l'aveugle. Un processus de fabrication est imaginé, défini et ensuite réalisé. Notre objectif est donc d'observer celui-ci, de l'analyser, d'en extraire des informations afin d'agir sur le processus.

Après avoir achevé ma thèse sur l'identification de l'état d'usure des outils, nous avons poursuivi sur l'élaboration d'une détection des bris d'outil en fraisage. Cette maturation sur la surveillance d'usinage, nous a amenés à plusieurs constats. L'introduction de systèmes de surveillance évolués dans l'industrie est complexe, et sans aucun doute risquée. Bon nombre de systèmes créés dans les années 80 ont été désactivés par insuffisance de robustesse. Un système de surveillance évolué ne peut voir le jour qu'avec une base d'exemples importante et diversifiée. Pour autant, nos travaux nous ont montré de nombreuses sources d'améliorations potentielles par l'observation des différents capteurs dont nous équipions nos machines.

Le concept de S.M.M.S. (Smart Machining Method and System) a vu le jour (figure 13). Notre démarche, jusqu'à ce jour, était de chercher à équiper une machine de capteurs dans un objectif déterminé et potentiellement difficile à appliquer industriellement. Nous avons donc pris le contre-pied de cette approche en nous posant la question suivante : comment exploiter les données acquises via les capteurs afin d'améliorer nos systèmes de production ? Si ce changement de point de vue peut sembler trivial, il nous a pourtant ouvert un ensemble de champs de recherche et de réussites industrielles.

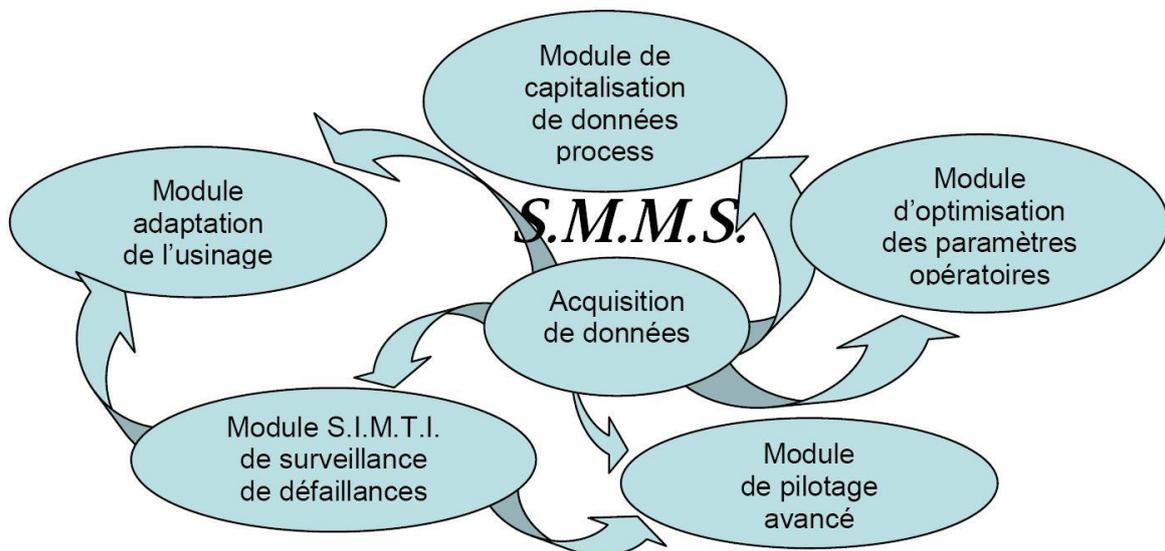


figure 13 : Concept SMMS (Smart Machining Method and System)

Approfondissons cette approche afin de mieux en cerner les contours. Au centre nous retrouvons bien évidemment le système d'acquisition, il n'est pas dédié à un type de capteur en particulier bien au contraire. La méthode est plutôt d'observer et d'analyser

quelle potentialité un capteur peut nous offrir. La mise en place d'un modèle de connaissance du processus permet bien souvent d'extraire des données plus pertinentes. La première des applications est la capitalisation de données, elle est cruciale car c'est le terreau de toute exploitation future. Furet & Ritou ont d'ailleurs poussé ce concept et en arrivent aujourd'hui à faire du Big Data via un produit industrialisé la EmmaTools. L'une des applications assez directe est l'optimisation de conditions opératoires. Dans ce cadre, on peut par exemple encore citer ce que l'on appelle le sonnage dynamique développé par Mr Furet, Peigne et Laporte. Les travaux réalisés durant ma thèse et celle de Mathieu Ritou s'intègrent dans la détection de défaillance SIMTI (System Intermittant de Monitoring Tool Inspection).

Si nous poursuivons cette taxinomie, nous pouvons regrouper les travaux de Aude Caillaud-Boudelier ainsi que les travaux de Raphaël Poirée dans la partie concernant l'optimisation de paramètres opératoires : la première s'intéressant aux fraises à concrétions diamantées, et le second au ponçage roto-orbital. Le module pilotage avancé a été traité aussi bien au travers de la thèse de Benjamin Havette sur le lissage de puissance, que des travaux de Claire Lecerf-DUMAS sur les aspects parachèvement robotisé. Comme nous le verrons, le couplage robot-procédé est tel qu'il est nécessaire d'étudier le parachèvement simultanément à la trajectoire robotique. Les thèses de David Guerin et Alexandre Ambiehl, si elles portent sur des aspects robotiques, restent avec des visées clairement manufacturières.

Pour autant, le module central de ce concept « acquisition de données » est le cœur du système. On parle ici de données de haut niveau, pas uniquement de signaux juste filtrés. Pour nous, ce module intègre la modélisation choisie et l'identification des paramètres de celle-ci. Cette phase, comme nous le verrons à maintes reprises, doit être conçue pour répondre à un cahier des charges précis, c'est avec ce point de vue que nous aborderons nos travaux.

Comme nous avons pu l'entrevoir, les travaux de ces 15 dernières années sont assez diversifiés mais cependant restent tous centrés autour des procédés et de leur robotisation. Le bassin industriel dans lequel nous évoluons n'y est pas étranger. On y retrouvera l'aéronautique et le nautisme avec des problématiques différentes mais avec cependant un point commun qui est le parachèvement de pièces de grandes dimensions. Le parachèvement concerne différents procédés (détourage, ébavurage, perçage, ponçage, préparation de surfaces, etc.) et ce pour des matériaux métalliques et/ou composites. Ces pièces de grandes dimensions dans bon nombre de scénarii ne sont plus issues d'assemblage, les intervalles de tolérance affichés sont assez importants et laissent entrevoir l'utilisation de moyens de production low cost tel que des robots. C'est donc tout naturellement que ces différentes thématiques seront abordées dans ces pages.

J'ai fait le choix dans la rédaction de ce manuscrit d'aborder l'ensemble de ces thématiques en conservant le concept du SMMS. Dans cette approche, la partie expérimentale est cruciale. Il faut à la fois bien choisir les capteurs nous permettant une observation, tout en restant critique sur les informations fournies. Dans bien des cas, avant d'obtenir une information exploitable, nous passons par une phase de traitement de la donnée de plus ou moins haut niveau (du filtrage à l'identification). Les choix associés à ce prétraitement peuvent modifier de manière significative les résultats obtenus, induisant de

facto des conclusions erronées. Une attention particulière sera donc de rigueur lors de la construction des modèles représentant les phénomènes physiques observés en exprimant clairement les hypothèses retenues dans nos modèles.

Suivant le besoin, la modélisation du processus est macroscopique (prise en compte de donnée globale au système puissance, vitesse de déplacement...) ou mésoscopique (prise en compte de la cinématique afin d'obtenir des informations plus fines) [5].

Nos travaux ont pour objectif d'analyser le triptyque outil-matière-machine (ou robot) pour valider l'ensemble de nos identifications et modèles afin de rendre ce tryptique plus efficace, robuste et exploitable industriellement.

Ce mémoire s'articule en deux parties, suivant l'hypothèse envisagée. Dans la première partie, la machine est considérée comme rigide. Nous explorons de manière approfondie le fraisage avec différents outils à dents ou non. Dans la seconde partie, la machine est considérée comme souple, puisqu'il s'agit d'un robot, nous analysons alors le couplage robot-processus de coupe. Dans ce dernier chapitre, nous ferons un focus sur l'identification de ces souplesses et des paramètres d'un robot qui sont nécessaire pour maîtriser son exploitation.

Je compléterai ces chapitres par une conclusion générale sur l'ensemble des travaux scientifiques menés avant de terminer par une partie importante sur les perspectives de poursuite des travaux de recherche avec des pistes particulières que je souhaite développer.

## 2. HYPOTHESE DE MACHINE RIGIDE – APPLICATION AU FRAISAGE

### Table des matières

2.1.	<i>Etat de l'art : Modélisation Classique</i>	37
a	Description phénoménologique du fraisage .....	37
b	La cinématique du fraisage .....	38
c	Hypothèse de coupe orthogonale .....	39
d	Estimation de l'épaisseur de copeau .....	40
e	Géométrie réelle de l'outil .....	43
f	Généralisation aux outils à géométries complexes.....	45
g	Les coefficients spécifiques de coupe .....	45
h	Conclusion .....	46
2.2.	<i>Application à la surveillance de l'usure [6]</i>	47
a	Objectif lié à l'estimation en ligne de l'usure.....	47
b	Constat de l'impact de l'usure sur les efforts .....	47
c	Mise en place de l'étalonnage de la modélisation.....	50
d	Bilan des travaux associés .....	52
e	Conclusion & perspective .....	52
2.3.	<i>Application à la surveillance du bris d'outil [7]</i>	53
a	Objectif lié à la détection de bris.....	53
b	Constat de l'impact de la variation d'état de l'outil sur les efforts .....	54
c	Construction d'une modélisation de la signature outil .....	55
d	Mise en place d'une surveillance de la signature outil .....	57
e	Bilan du principe de surveillance intermittente.....	59
f	Conclusion .....	62
2.4.	<i>État de l'art : dynamique des transitoires</i>	62
a	Introduction .....	62
b	Vitesse d'avance .....	63
c	Engagement radial.....	65
2.5.	<i>Application du Pilotage en puissance en fraisage [8]</i>	68
a	Objectif lié au High Power Milling .....	68
b	Constat des fluctuations de puissance lors d'un vidage de poche.....	68
c	Construction d'un profil de vitesse lissant la puissance .....	69
d	Bilan du pilotage en vitesse sur la puissance .....	73
e	Limitation de la méthodologie.....	76
f	Conclusion .....	76
2.6.	<i>Fraisage des composites avec des meules à concrétions diamantées [9]</i>	77
a	Objectifs issus de l'usinage avec des meules .....	77
b	Mise en place d'une modélisation macroscopique de la puissance.....	77
2.7.	<i>Construction d'une modélisation des efforts de coupe</i>	79
a	Base scientifique de la modélisation .....	79
b	Modélisation exploratoire des coefficients spécifiques en fonction de $\theta$ .....	81
c	Critère de qualité.....	84
d	Analyse des résultats du modèle par palier .....	85
e	Choix de modèles de représentation des coefficients spécifiques de coupe .....	85

f	Modèle associé à l'épaisseur de copeau .....	87
g	Hypothèse liée à la coupe continue et Scan d'outil .....	88
h	Conclusion .....	91
2.8.	<i>Synthèse des travaux en fraisage</i>	91

Durant cette partie, nous considérons au cours de la modélisation du triptyque Outil-Matière-Machine que cette dernière est rigide. Les corps ne se déforment pas. Durant la première phase de cette partie, la dynamique de la machine n'est pas prise en compte. Nous décrivons les procédés pendant des phases dites stables, c'est à dire à vitesse constante. Dans une seconde phase, au fil de nos développements, nous abordons ces aspects. La notion de transitoire prend alors toute son importance.

Nous commençons la description du fraisage en nous plaçant dans les phases d'usinage stabilisé donc hors transitoires. Après une rapide description de la modélisation du fraisage pour les outils à dents, nous analysons l'impact de l'imperfection des outils sur les signaux. Nous montrons alors l'exploitation que l'on peut faire de cette signature en surveillance d'usinage. Nous illustrerons ceci par l'identification de l'usure de l'outil, puis des bris d'outil [6][7].

Nous poursuivons notre analyse en nous focalisant sur l'impact de la dynamique machine sur le procédé de fraisage. Nous observerons alors la puissance d'un point de vue macroscopique. Nous montrerons comment exploiter cette connaissance pour réaliser un pilotage intelligent du moyen afin d'accroître sa productivité [8].

Jusqu'à cette étape, le fraisage est réalisé avec des outils à dents, cependant le constat a été fait qu'avec la présence croissante des matériaux composites, ces outils (carbures et/ou PCD) ne sont plus parmi ceux ayant le meilleur ratio coût/mètre usiné. Nous avons donc travaillé dans le cadre du projet Alu/composites au développement des outils à concrétions diamantées. Ils sont utilisés pour des opérations de détournage des pièces aéronautiques en matériaux composites (de type carbone epoxy).

Les modèles précédemment utilisés se sont avérés inexploitable (répartition déterministes des zones coupantes) et l'hypothèse d'homogénéité du matériau n'est plus valide. La morphologie des outils à concrétions diamantées avec la répartition aléatoire de leurs grains, à la fois en position et en taille, nécessite la construction d'un nouveau modèle compatible pour étudier la coupe, déterminer les conditions opératoires et prédire les efforts. Nous détaillerons ensuite la méthodologie mise en œuvre pour reconstruire un modèle exploitable dans ces matériaux et avec ces outils. Nous exposerons simultanément la mise au point d'un procédé « bout de ligne » nous permettant l'analyse et le suivi de ces outils particuliers [9].

## 2.1. Etat de l'art : Modélisation Classique

### **a Description phénoménologique du fraisage**

Il s'agit ici d'un procédé de production par enlèvement de matière. On impose un déplacement et une rotation à l'outil. Cet outil va couper la matière. Cette interaction avec la matière va générer sur la pièce des changements de géométrie, de température, de tension interne et/ou superficielle, etc.

Le terme « fraisage » est assez large dans sa définition, il est utilisé à la fois sur des opérations d'ébauche et/ou de finition, de pièce de forme ou non. L'usinage avec des directions d'avance non comprises dans le plan normale à l'axe outil existe : nous pouvons citer l'usinage en rampe, ou encore le tréflage. L'usinage en rampe est souvent utilisé pour atteindre une zone stable, on la considère alors comme une phase transitoire. Le tréflage,

quant à lui, avec une direction parallèle à l'axe outil, est principalement utilisé pour éviter des problèmes vibratoires dans le cas de l'usinage haute performance (ou grand débit) pour des poches profondes.

L'observation des efforts ou des vibrations nécessite une modélisation différente. Il est donc nécessaire de décrire les hypothèses que nous ferons dans cette première étape :

- Le déplacement s'effectue dans le plan normal à l'axe outil,
- La vitesse d'avance est stable (pas de vibration),
- L'outil est considéré comme parfait géométriquement,
- La matière usinée est homogène,

Ces hypothèses faites, nous pouvons aborder la modélisation du fraisage avec une première partie décrivant la cinématique du fraisage, puis l'interaction avec la matière afin d'en déduire les efforts (hypothèse de la coupe semi-orthogonale), enfin les formes d'outil seront prises en compte.

### **b La cinématique du fraisage**

Une fraise est un outil ayant plusieurs dents. Lors de la rotation de l'outil, chacune des dents coupe la matière et ceci de manière intermittente. Comme nous faisons l'hypothèse d'un outil parfait, les dents sont régulièrement réparties angulairement et sur un même rayon. Elles ont alors le même comportement. Nous pouvons donc étudier une unique dent et par principe de superposition, reconstruire à posteriori le signal en effort de la fraise.

On peut décrire la trajectoire d'une dent par une trochoïde allongée (Eq. 1). Le cercle de périmètre «a» roule sans glissement. Le point considéré de l'outil lui se trouve sur un cercle de rayon *b* plus grand (figure 14). Les équations mathématiques suivantes décrivent ce mouvement:

$$\begin{cases} x = a.\theta + b.\cos(\theta) \\ y = a + b.\sin(\theta) \end{cases}$$

Eq. 1

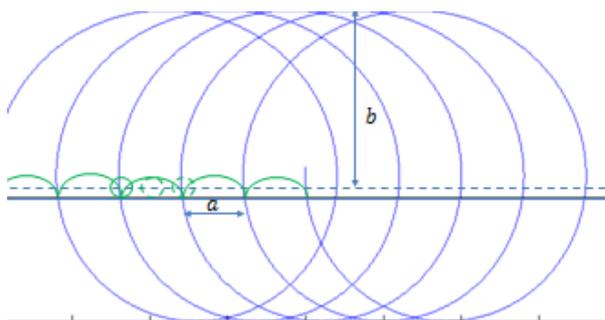


figure 14 : trochoïde allongée

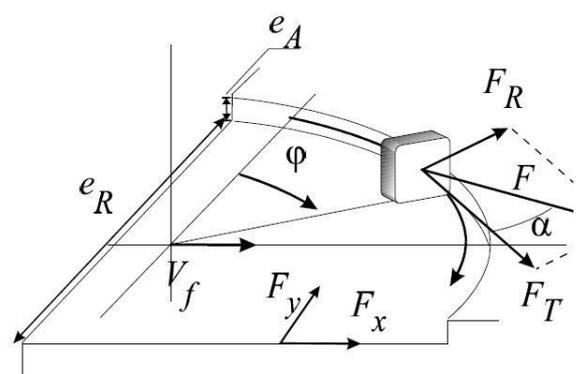


figure 15 : Paramétrage en fraisage

Lors de l'application au fraisage, on effectue des changements de variables afin de se rapprocher de la réalité physique. L'outil effectuant une rotation dans le sens horaire, on pose :

$$\begin{cases} \varphi = \frac{\pi}{2} - \theta \\ a = \frac{z \cdot f_z}{2\pi} \\ b = r \end{cases} \quad \text{Eq. 2}$$

Ou  $z$  représente le nombre de dents de l'outil  $f_z$  l'avance par dent et par tours et  $r$  le rayon de la fraise, ainsi qu'un décalage d'origine de  $(-\frac{z \cdot f_z}{4}; \frac{z \cdot f_z}{2\pi})$ , et une inversion du sens de progression de la trochoïde, on obtient alors :

$$\begin{cases} x = r \cdot \sin(\varphi) + \frac{\varphi}{2\pi} \cdot z \cdot f_z \\ y = r \cdot \cos(\varphi) \end{cases} \quad \text{Eq. 3}$$

Nous pouvons grâce à l'équation 3 avoir la trace exacte décrite par chaque dent de l'outil.

### c Hypothèse de coupe orthogonale

Définissons maintenant l'interaction outil matière afin d'estimer les efforts sur l'outil.

La coupe orthogonale a lieu dans le cas du rabotage (figure 16), nous avons alors uniquement une vitesse de coupe linéaire. Le copeau vient s'enrouler devant l'outil, il frotte alors sur la face de coupe, générant ainsi des efforts de pression et de frottement. Simultanément, la pointe de l'outil est en contact avec la pièce générant elle aussi des efforts. L'ensemble des interactions existantes dans cette zone est complexe. Nous ne détaillerons pas l'ensemble des phénomènes s'y déroulant.

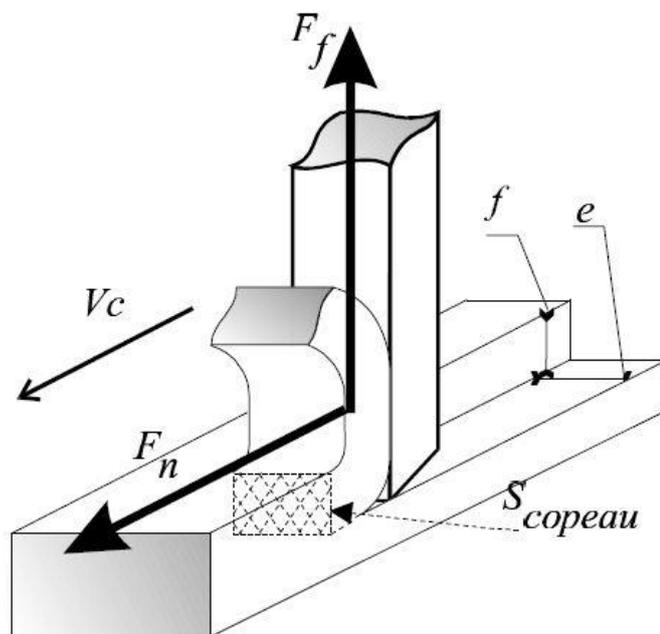


figure 16 : Représentation de la coupe orthogonale

L'hypothèse simplificatrice est de dire que les efforts générés par cette coupe sont proportionnels à la surface du copeau projeté. On obtient alors deux forces : l'une normale à la surface projeté  $F_n$  et une force sur la face de coupe  $F_f$ .

$$\begin{cases} F_n = K_n \cdot S_{\text{copeau}} \\ F_f = K_n \cdot K_f \cdot S_{\text{copeau}} \end{cases} \quad \text{Eq. 4}$$

L'hypothèse principale que nous ferons est qu'en fraisage, malgré une cinématique plus complexe de l'outil, l'hypothèse de coupe orthogonale est respectée. Suivant la position de l'outil nous nous écartons plus ou moins de la coupe orthogonale. En effet, en fraisage la vitesse réelle de l'outil est le résultat combiné de la vitesse de coupe et de la vitesse d'avance, pour  $\varphi = 0$  ou  $180^\circ$  ces deux vitesses sont colinéaires, par contre pour  $\varphi \in ]0; 180[$  ce n'est plus le cas, et à  $\varphi = 90^\circ$  ces deux forces sont perpendiculaires (figure 17). Cependant la vitesse d'avance est généralement inférieure au millimètre par tours alors que la vitesse de coupe, elle, est supérieure à plusieurs dizaines voire centaines de mètres par minute.

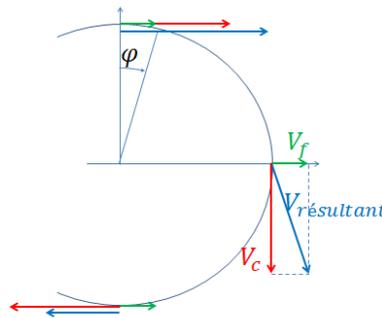


figure 17 : Combinaison des vitesses d'avance et de coupe

Si on combine les équations reliant ces paramètres (Eq. 5 & Eq. 6), on constate que le rapport dépend principalement de l'avance à la dent, du nombre de dents et du diamètre outil. On peut estimer que ce rapport est généralement bien inférieur à 10 (voire les conditions de coupe préconisé par les fabricants d'outil). On constate alors qu'effectivement cette hypothèse est cohérente.

$$f_z \cdot z \cdot N = f_z \cdot z \cdot \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot d} \text{ [mm/min]} \approx f_z \cdot z \cdot \frac{V_c}{\pi \cdot d} \text{ [m/min]} \quad \text{Eq. 5}$$

$$\frac{V_f}{V_c} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{f_z \cdot z}{d} \ll \frac{1}{10 \cdot \pi} \ll 3.2 \cdot 10^{-2} \quad \text{Eq. 6}$$

D'après l'équation Eq. 4 les efforts sont liés à la section de copeau, or en fraisage la section de copeau est liée à l'avance. Il faut estimer l'épaisseur instantanée de copeau au cours de la trajectoire de l'outil pour calculer les efforts.

#### **d Estimation de l'épaisseur de copeau**

Dans le cas du fraisage traditionnel, à l'épaisseur de copeau est noté  $h$ .

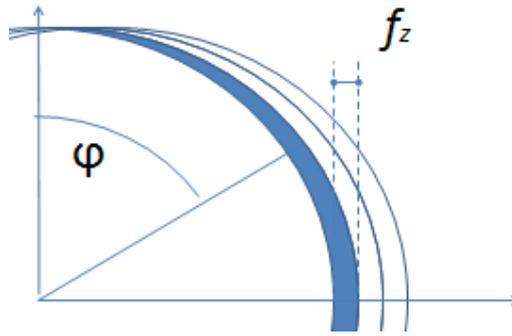


figure 18 : évolution de l'épaisseur de copeau

L'écart entre 2 trajectoires trochoïdales représente l'épaisseur de copeau. Le calcul de cette épaisseur peut être estimé numériquement. Afin d'estimer l'épaisseur de copeau réel, on peut poser le problème numérique de la manière suivante :

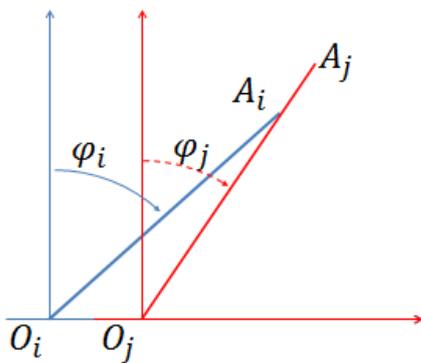


figure 19 : définition du problème numérique

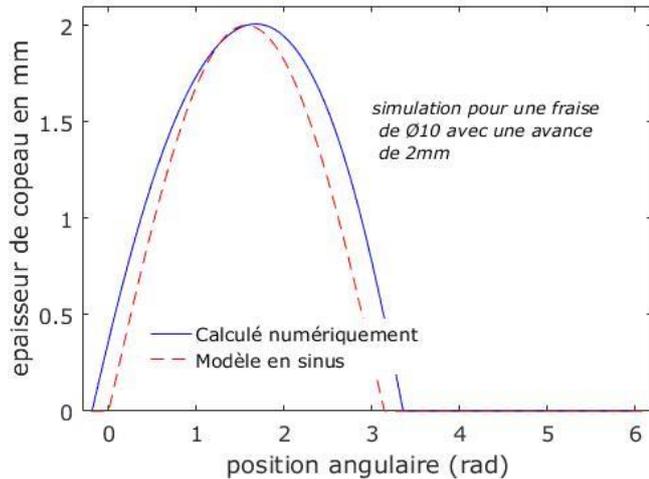


figure 20 : profil de h calculé numériquement, et approximation sinus

On pose au tour i pour la position angulaire  $\varphi_i$  la position du centre fraise  $O_i$  et la position de la dent  $A_i$ . L'indice j représente une nouvelle position de la dent après approximativement un tour de la fraise. Soit  $\alpha$  un réel exprimant la distance entre  $(O_i ; O_j)$  tel que :

$$\|O_i O_j\| = \alpha \cdot f_z \quad \text{Eq. 7}$$

$$\alpha = \frac{2\pi - (\varphi_i - \varphi_j)}{2\pi} \quad \text{Eq. 8}$$

Le problème peut donc s'exprimer ainsi : quelle sera la valeur de  $\alpha$  afin de satisfaire à  $A_i \in [O_j ; A_j]$  ?

$f_z$  étant très petit devant le rayon de l'outil, on obtient une première approximation de la position de  $O_j$  en considérant  $\alpha = 1$ . Connaissant  $(O_i, A_i, O_j)$ , on peut estimer  $\varphi_j$ . On peut

ensuite grâce à l'équation (Eq. 8) réévaluer  $\alpha$ . On réitère jusqu'à obtenir le critère imposé. On déduit ainsi l'épaisseur de copeau réel  $h(\varphi)$  (courbe rouge sur la figure 20). Les valeurs choisies sur ce graphe sont très écartées des valeurs traditionnellement utilisées, elles permettent de mieux visualiser les écarts (diamètre de la fraise 10mm, avance à la dent 1mm).

Afin d'obtenir une approximation, sous forme littérale, Spiewack [10] réalise une étude poussée de l'épaisseur instantanée de copeau. Cependant, le modèle couramment utilisé est assez simple, et proposé par Martelloti en faisant l'hypothèse que  $f_z < \text{Rayon de l'outil}$ ,

$$h(\varphi) = f_z \cdot \sin(\varphi) \quad \text{Eq. 9}$$

Afin d'observer les erreurs commises avec cette approximation, illustrons ces différences en prenant trois avances. Posons les hypothèses suivantes :

- un outil de diamètre  $\varnothing 16\text{mm}$ ,
- une dent,

## 2.2. Avances : 0.32 , 0.2 , 0.1mm/trs/dents

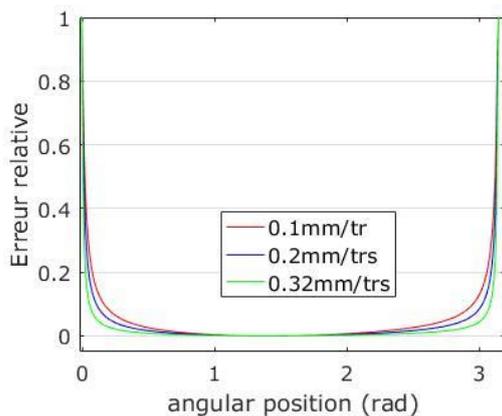


figure 21 : Erreur relative en pourcentage

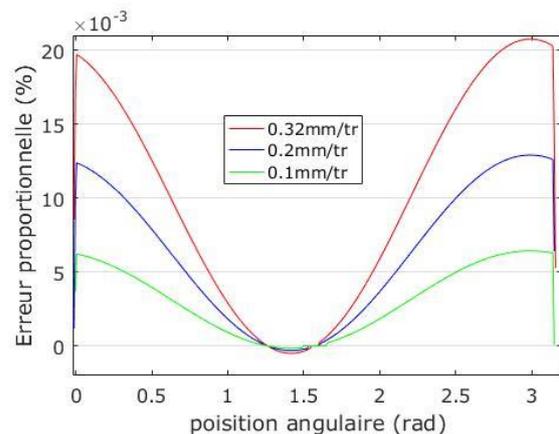


figure 22 : Erreur proportionnelle par rapport à l'avance maximale

Les erreurs relatives (figure 21) et proportionnelles (figure 22) sont définies ci-après :

$$E_{relative} = \frac{|h_{réel}(\varphi) - h_{est}(\varphi)|}{h_{réel}(\varphi)} \cdot 100 \quad \text{Eq. 10}$$

$$E_{proportionnel} = \frac{h_{réel}(\varphi) - h_{est}(\varphi)}{f_z} \cdot 100 \quad \text{Eq. 11}$$

L'effort est suivant le modèle choisi directement proportionnel à l'épaisseur de copeau. En conséquence l'erreur d'estimation pour une faible avance reste acceptable, de l'ordre de 1%. Cependant pour les plus fortes avance, il faudra rester conscient de cette approximation pour ne pas biaiser des interprétations.

Il est à noter que dans bon nombre de modélisations, l'épaisseur de copeau instantanée n'est pas prise en compte mais on évalue le copeau moyen (calcul de la moyenne de l'épaisseur sur un tour). Les écarts entre l'estimation du copeau réel et l'approximation de Martelloti sont alors atténués. Dans la pire des configurations l'erreur reste inférieure à 0.5%.

### a Géométrie réelle de l'outil

Les outils sont cependant assez éloignés d'un modèle simpliste représenté par un plan.

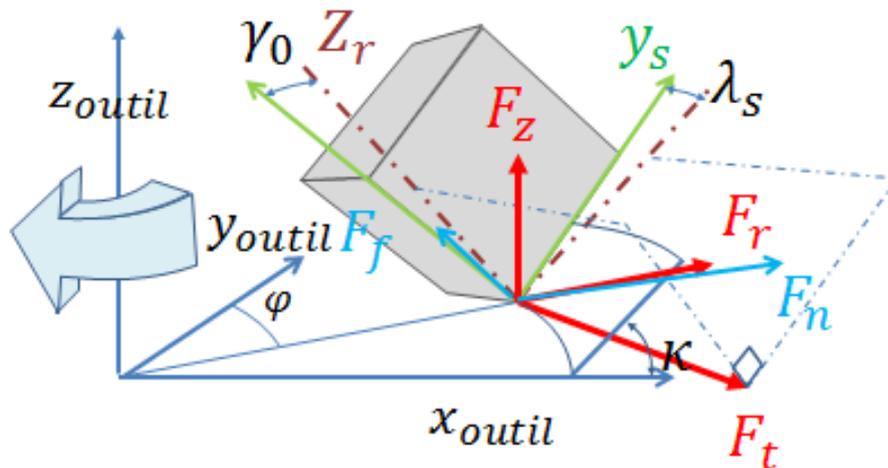


figure 23 : Représentation des angles de coupe

On peut estimer la position réelle de la dent par la construction suivante :

- Une rotation autour de  $x_{outil}$  d'un angle  $\kappa$  l'angle d'attaque, pour un outil cylindrique, il vaut  $90^\circ$  (on obtient un repère  $\{x_r, y_r, z_r\}$ ),
- Une rotation autour de  $z_r$  d'un angle  $\lambda_s$  l'angle d'inclinaison (on obtient un repère  $\{x_s, y_s, z_s\}$ ),
- Une rotation autour de  $y_s$  d'un angle  $\gamma_0$  l'angle de coupe effectif.

Connaissant cette transformation, on peut établir la relation entre les différentes forces liées à l'hypothèse de coupe orthogonale et celles du repère outil.

$$\begin{bmatrix} F_t \\ F_r \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\kappa) & -\sin(\kappa) \\ 0 & \sin(\kappa) & \cos(\kappa) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\lambda_s) & -\sin(\lambda_s) & 0 \\ \sin(\lambda_s) & \cos(\lambda_s) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\gamma_0) & 0 & -\sin(\gamma_0) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\gamma_0) & 0 & \cos(\gamma_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_n \\ 0 \\ F_f \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 12}$$

Les angles de coupe étant fixés pour un outil, cette relation est constante au cours du temps tant que la géométrie est inchangée. Nous utilisons principalement  $\{F_t, F_r\}$  les efforts

tangentiels et radiaux qui sont issus d'une combinaison de  $\{F_n, F_f\}$ . D'après la relation ci-dessus  $F_z$  est redondant, de plus son amplitude est généralement la plus faible des trois donc plus sensible au rapport signal/bruit.

De plus, d'autres paramètres non modélisés peuvent intervenir dans les efforts tels que l'acuité d'arête, les brises copeaux ou encore, dans l'aluminium, les plats de raclage.

On reformule alors la relation Eq. 4, pour obtenir une relation simplifiée entre les efforts tangentiels, radiaux et la section de copeau par :

$$\begin{cases} F_t = K_t \cdot S_{\text{copeau}} \\ F_r = K_r \cdot K_t \cdot S_{\text{copeau}} \end{cases} \quad \text{Eq. 13}$$

Ou  $K_t$  &  $K_r$  sont respectivement les coefficients spécifiques de coupe tangentiels et radiaux.

Ayant posé ce modèle il nous faut évaluer  $S_{\text{copeau}}$ . L'outil est engagé axialement dans la matière d'une profondeur ou engagement axial  $e_a$ .

Considérons les 4 principaux profils : cylindrique, chanfreiné, torique et hémisphérique.

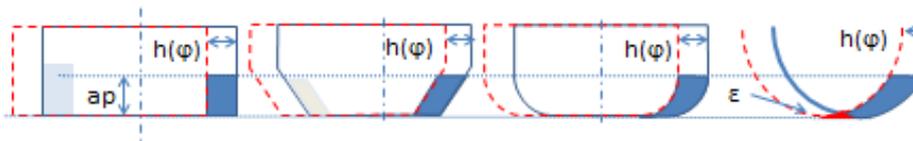


figure 24 : Profil classique de fraise: cylindrique, chanfreiné, torique, hémisphérique



figure 25 : Zoom sur la passe d'une fraise hémisphérique

Sur la figure 24, les profils rouges transcrivent la position de l'outil au tour précédent, soit pour un outil à 1 dent un décalage de  $f_z$ . Pour les trois premiers profils, il n'existe pas de zone non reprise par l'outil, on peut alors écrire :

$$S_{\text{copeau}} = h(\varphi) \cdot e_a \quad \text{Eq. 14}$$

Dans le cas de l'outil sphérique, il y a une zone non recouverte (zone rouge sur la figure 25). On peut afin d'estimer l'erreur commise, la majorer par le calcul de la surface englobante (triangle circonscrit) de base  $f_z$  et de hauteur égale à la hauteur de crête  $h_c$ , soit

$$S_{\text{triangle}} = \frac{f_z \cdot h_c}{2} = f_z \cdot \left( r - \sqrt{r^2 - f_z^2/4} \right) / 2 \quad \text{Eq. 15}$$

Si on suppose  $f_z$  petit devant  $r$  le rayon de la fraise, on a

$$\sqrt{1 - x^2} = 1 - \frac{x^2}{2} + \varepsilon(x) \quad \text{Eq. 16}$$

D'où

$$S_{\text{triange}} = \frac{f_z \cdot r}{2} \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{f_z^2}{4 \cdot r^2}} \right) \quad \text{Eq. 17}$$

$$S_{\text{triange}} = \frac{f_z^3}{8 \cdot r} + \varepsilon \left( f_z / r \right) \quad \text{Eq. 18}$$

L'erreur commise est alors faible. Cependant, l'usinage avec des fraises hémisphériques a généralement lieu en finition où les épaisseurs de copeau sont très faibles, dès lors nous devons prendre des précautions toutes particulières si nous souhaitons avoir une estimation correcte des efforts.

### **b** Généralisation aux outils à géométries complexes

Nous nous sommes limités ci-dessus à considérer que le contact outil matière pouvait être réduit à un point de contact. On ne peut pas pour autant toujours faire cette hypothèse. Dans le cas d'engagement axial important et au vu de l'angle d'hélice, l'hypothèse d'un contact se résumant à un point n'est plus satisfaisante. La solution est alors somme toute assez simple, on découpe en tranche l'outil suivant l'axe outil et on considère l'hypothèse faite ci-dessus comme valide pour cette tranche. Il ne reste alors plus qu'à intégrer le long de l'arête, pour obtenir les efforts résultants [11].

### **c** Les coefficients spécifiques de coupe

Nous avons abordé les deux principaux aspects géométriques du fraisage : l'épaisseur de copeau lié à la cinématique du fraisage, et la géométrie des outils. Afin d'estimer les efforts, nous avons introduit les coefficients spécifiques de coupe. Dans la littérature, on trouve différentes modélisations de ces derniers suivant deux principes : le premier introduit le comportement viscoplastique des matériaux, alors que le second se limite à une description macroscopique de ceux-ci, ces coefficients sont évalués en fonction de la taille du copeau.

Nous privilégierons la seconde méthode. Le niveau de complexité de la modélisation dépend de l'objectif de représentation des efforts au cours de la révolution de l'outil, valeur moyenne ou instantanée. Décrivons les principaux modèles.

Kline et Devor [12] ont choisi, dans leur modélisation, de ne pas faire évoluer  $K_t$  et  $K_r$  en fonction de la position de l'outil, lors de son engagement. Ils définissent un protocole d'essais, afin de déterminer les coefficients spécifiques de coupe avec une fonction polynomiale  $f(e_a, e_r, f_z)$ . De même champs de recherche, Lin et Yang [13], pour leur étude concernant l'usure d'outil, définissent des modèles de  $K_n$  et  $K_f$  fonctions de  $\bar{h}$ , l'épaisseur moyenne du copeau, de  $L$ , la longueur moyenne de l'arête de coupe, et de  $w$ , l'usure en dépouille de l'outil.

Si, au contraire, l'objectif est d'évaluer de manière plus précise l'évolution des efforts lors de la rotation de l'outil, une modélisation moyenne du copeau n'est plus suffisante.

Différentes modélisations de ces coefficients ont été proposées. Sabberwal [14], Sutherland [15], Altintas [16] ont choisi de modéliser le coefficient de pression spécifique de coupe proportionnellement à l'épaisseur de copeau.

$$K = C \times h^x \quad \text{Eq. 19}$$

Dans cette modélisation,  $C$  et  $x$  sont des constantes à identifier et  $h$  représente l'épaisseur de copeau.

Moriwaki et Shamoto [17], dans leur choix de modélisation, ajoutent des constantes à la formulation du coefficient spécifique de coupe décrit dans l'équation Eq. 20.

$$K = a_1 \cdot h^{a_2} + a_3 \quad \text{Eq. 20}$$

Yusecan [18] utilise les coefficients  $K_n$  et  $K_f$  qu'il définit différemment avec des polynômes suivant les matériaux étudiés en fonction de l'épaisseur de copeau, de l'avance par dent et de la position angulaire de l'outil.

Cheng, Tsay & Lin [19], quant à eux, associent des coefficients spécifiques de coupe à chacune des forces  $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ , soit respectivement  $K_n$ ,  $K_v$  et  $K_h$ . Dans les modélisations de chacun de ces coefficients, ils font apparaître la vitesse de coupe  $V_c$  et l'épaisseur de copeau. Dans la modélisation de  $K_v$ , ils incluent la longueur de l'arête de coupe, et enfin pour  $K_h$ , ils ajoutent la dérivée de l'épaisseur de copeau.

Comme nous le verrons par la suite (§2.3), ce choix dépend des objectifs visés. Dans notre cas, nous retiendrons la modélisation de Sabberwal.

#### **d Conclusion**

Nous venons de définir une modélisation détaillée du fraisage en précisant les différentes hypothèses faites tout au long de sa construction, telle qu'on la trouve dans la bibliographie.

La construction de ces modèles a intégré principalement deux aspects :

- le premier est purement cinématique, il permet d'évaluer l'épaisseur instantanée du copeau,
- Le second prend en compte le matériau, notion de pressions spécifiques représentées par les coefficients.

On a donc un moyen d'estimer les efforts dans un cadre général. Ce calcul peut être suffisant dans différentes configurations, comme par exemple, pour estimer la flexion des différents éléments en jeu (outil, pièce), ou encore pour dimensionner les différents éléments du processus (les actionneurs, ou encore le montage de maintien de la pièce).

Dans le cas de la surveillance d'usinage, la dégradation de l'outil peut induire d'autres facteurs à prendre en compte selon l'objectif recherché.

## 2.3. Application à la surveillance de l'usure [6]

### **a Objectif lié à l'estimation en ligne de l'usure**

Nous venons d'exposer les différentes hypothèses retenues pour parvenir à une modélisation des efforts de coupe en fraisage. Dans cette partie, nous allons présenter les travaux réalisés en surveillance d'usinage, en s'appuyant sur le concept SMMS. Nous focaliserons notre attention sur les hypothèses associées à notre modélisation des efforts et les résultats obtenus avec celle-ci.

Dans ces travaux, l'analyse s'est concentrée sur l'exploitation d'un capteur d'effort. Le phénomène surveillé a une évolution assez lente. Dès lors, le temps de traitement de l'information n'est pas une contrainte. L'objectif est de montrer que les dégradations physiques de l'outil (usure en dépouille, en cratère, etc.) ont un impact sur les efforts et qu'il est possible de remonter à cette information via ceux-ci.

La démarche proposée est donc la suivante :

- Dans une première phase, nous mettons en place des essais balayant le spectre des usures,
- Après avoir réussi à isoler l'impact de ces défauts sur les signaux, nous construisons une modélisation adéquate permettant de les représenter,
- Nous définissons alors un protocole permettant l'identification de l'ensemble des paramètres de cette modélisation,
- Ces différents paramètres contiennent les informations sur l'usure qui nous intéressent. Leurs analyses nous permettent d'évaluer le candidat pour représenter notre phénomène,
- Enfin nous validons cette démarche et les hypothèses réalisées.

### **b Constat de l'impact de l'usure sur les efforts**

Afin d'observer l'impact de l'usure sur les efforts, nous avons choisi différents outils montrant les signes de cette usure sur l'outil et nous avons réalisé des essais. Pour ne pas complexifier cette première analyse, les essais ont été réalisés sur un outil à plaquettes sur lequel une seule plaquette est montée. Le fraisage, comme nous l'avons vu, a une cinématique complexe qui induit une variation de l'épaisseur de copeau. Cette variation importante masque en grande partie les effets éventuels de l'usure et est indépendante de cette dernière. À partir des signaux mesurés sur la platine d'effort et connaissant la modélisation (Eq. 21), nous pouvons donc remonter à une représentation sans l'effet de cette cinématique. On observe alors l'évolution des coefficients spécifiques de coupe dans le repère outil.

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^z \delta_i \begin{bmatrix} \cos(\varphi_i) & \sin(\varphi_i) \\ -\sin(\varphi_i) & \cos(\varphi_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{ti} \\ F_{ri} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 21}$$
$$\delta_i = \begin{cases} 1 & \text{si la dent } i \text{ est engagé} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Comme nous n'avons qu'une seule plaquette, nous pouvons simplement extraire les coefficients spécifiques de coupe.

$$\begin{bmatrix} K_t \\ K_t \cdot K_r \end{bmatrix} = \frac{1}{S_{\text{copeau}}} \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) \\ -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix}$$

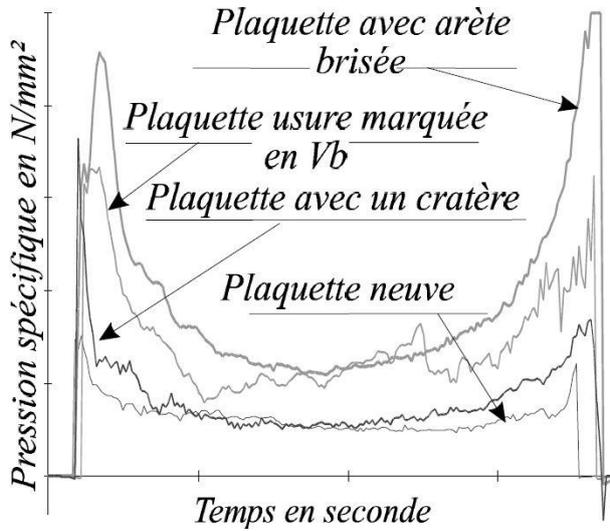


figure 26 :  $K_t$  recomposé pour 1/2 révolution

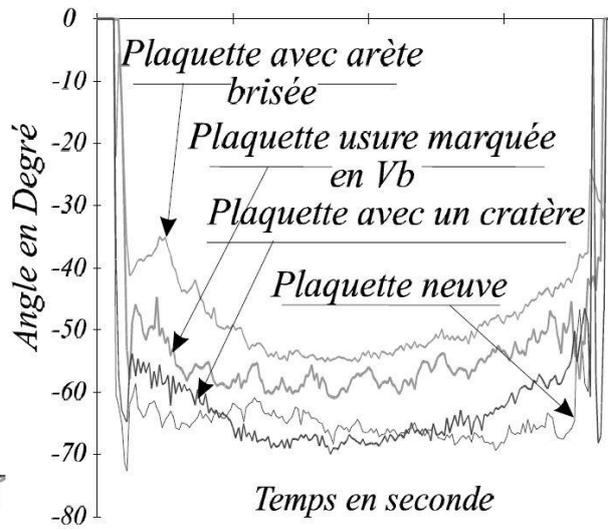


figure 27 :  $K_r$  recomposé pour 1/2 révolution

L'effet de l'usure sur ces coefficients est nettement marqué. On constate une évolution progressive et symétrique de ces coefficients. Il faut donc que l'on trouve le modèle permettant de représenter cette évolution.

Dans la littérature, on trouve principalement deux modélisations qui font évoluer les coefficients spécifiques de coupe en fonction d'une puissance de l'épaisseur de copeau (§ 2.2.c Les coefficients spécifiques de coupe). Dans les deux cas (Eq. 19 & Eq. 20), on peut linéariser en prenant le logarithme de ces modélisations :

$$\ln(K) = x \cdot \ln(h) + \ln(C)$$

$$\ln(K - a_3) = a_2 \cdot \ln(h) + \ln(a_1)$$

On représente alors en ordonnée le logarithme du coefficient spécifique de coupe et en abscisse le logarithme de l'épaisseur de copeau. Le tracé dans ce repère des coefficients spécifiques de coupe réelle peut être parfaitement approximé par une droite représentée par les modélisations proposées.

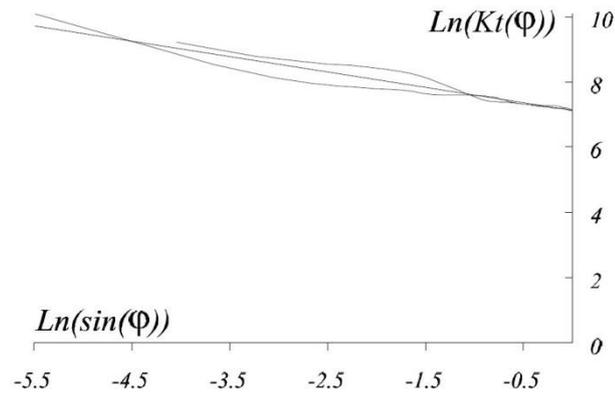


figure 28 : représentation dans l'espace logarithmique d'un coefficient spécifique de coupe

Nous avons donc deux modèles candidats pour représenter l'usure de l'outil. Dans l'absolue, pour représenter une droite, il faut au moins deux paramètres. Le premier est donc adéquate, montrons que le second modèle proposé par Moriwaki est redondant. Ce que nous voulons dire par redondant est qu'il n'est pas robuste dans le sens où il existe une infinité de triplé  $\{a_1, a_2, a_3\}$  satisfaisant à une forme de signal.

Afin de le mettre en évidence, on impose un triplé de références nous permettant de calculer un coefficient  $K_{ref}$ . Puis, on identifie le modèle, celui-ci étant redondant, on peut imposer l'une des valeurs. Nous choisissons d'imposer  $a_3 \in [0; a_1]$ . On obtient alors le coefficient  $K_{id}$ . On estime ensuite l'erreur commise par ce nouveau modèle en calculant :

$$e_{rel}(\varphi) = \frac{K_{ref}(\varphi) - K_{id}(\varphi)}{K_{ref}(\varphi)}$$

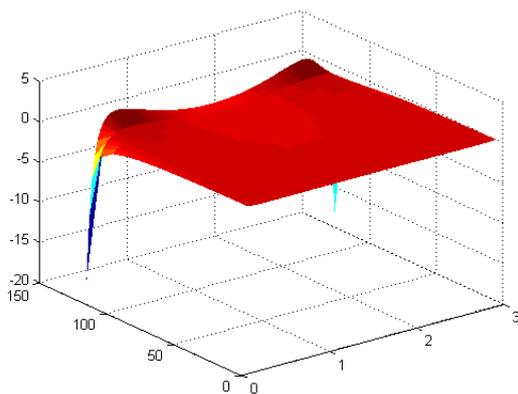


figure 29 : représentation de  $e_{rel}$  en fonction de  $a_3$  &  $\varphi$

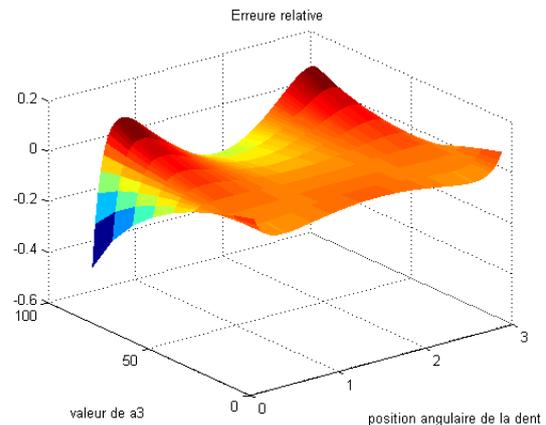


figure 30 : Zoom sur l'erreur relative  $e_{rel}$

On constate que, pour une valeur de  $a_3 \in [0; 0.6 \times a_1]$ , l'erreur est inférieure à 0.5%. On ne peut donc pas garantir sur un signal bruité une unicité de triplé.

En identifiant nos différents coefficients associés aux plaquettes usées, on constate une bonne adéquation du modèle proposé par Sabberval.

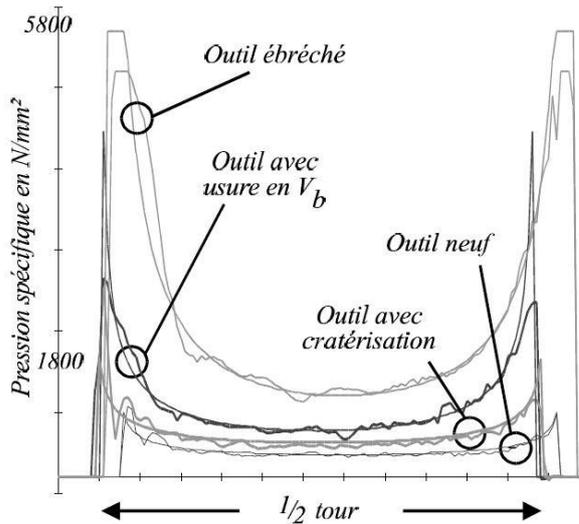


figure 31 : Modèle identifié sur  $K_t$  sur  $1/2$  révolution

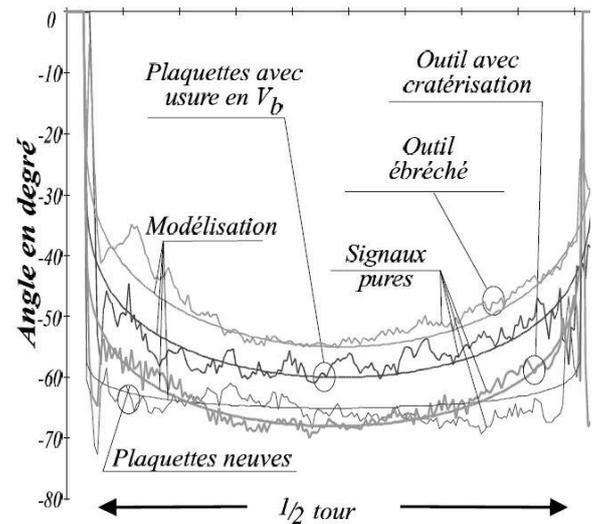


figure 32 : Modèle identifié sur  $K_r$  sur  $1/2$  révolution

$$\begin{cases} K_t(\varphi) = K_{ta} \cdot \sin(\varphi)^{K_{tf}} \\ K_r(\varphi) = K_{ra} \cdot \sin(\varphi)^{K_{rf}} \end{cases} \quad \text{Eq. 22}$$

Pour chaque dent, nous aurons donc 4 coefficients. Deux des coefficients représentent l'amplitude des signaux. En effet, pour  $\varphi = 90^\circ$  (milieu du signal), le sinus vaut 1. On retrouve sur chaque graphe l'amplitude  $K_{ta}$  et  $K_{ra}$ . Les deux autres paramètres représentent eux, la forme du signal  $K_{tf}$  et  $K_{rf}$ .

Les deux premiers points de notre démarche sont validés. Nous avons réalisé des essais permettant de mettre en évidence l'impact de l'usure sur les signaux. Nous avons choisi une modélisation.

### c Mise en place de l'étalonnage de la modélisation

Si le modèle est aisé à identifier pour une seule dent usinant, le problème devient beaucoup moins simple dès que plusieurs dents usinent. En effet, pour un outil à  $z$  dents, nous avons  $4 \cdot z$  coefficients à identifier. De plus, l'aspect discontinu de la coupe complexifie d'autant l'identification puisque nous ne pouvons pas extraire la cinématique de l'usinage comme nous l'avons préalablement fait.

La mise en place d'algorithme tel que du recuit simulé ou encore des algorithmes génétiques auraient pu être un choix pour l'identification de ces coefficients. Cependant nous avons décidé de prendre une autre approche.

Le modèle a une grande sensibilité vis-à-vis des coefficients spécifiques de forme lorsque les signaux d'efforts sont éloignés de la réalité. Si on cherche à les identifier avec un point de départ proche de la solution, la convergence est rapide et stable, dans le cas contraire nous obtenons des valeurs aberrantes. Notre problème est donc de trouver un point de départ de l'algorithme proche de la solution. Pour ce faire, nous avons simplifié le modèle. L'identification de ce modèle simplifié est alors plus robuste. En effet, chercher à optimiser la forme si nous n'avons aucune idée de l'amplitude du signal n'a pas de sens. Ce principe peut être réitéré plusieurs fois.

On peut donc résumer notre approche de la manière suivante. Nous appliquons une succession d'optimisation définie par : l'identification d'un modèle simplifié  $M_i$  avec pour point de départ  $d_i$  et convergeant de manière robuste vers une solution  $f_i$ . A chaque étape  $i$ , le point de départ est égal à la position finale de l'étape précédente  $d_i = f_{i-1}$ . Nous avons donc optimisé ce processus pour parvenir, malgré la complexité de la tâche, à rendre l'optimisation robuste. Nous obtenons alors une séquence se décomposant en 4 étapes, avec une fonction coût mesurant l'écart entre le signal et le modèle tel que :

$$F_{\text{coût}} = (F_{x \text{ modèle}} - F_{x \text{ mesuré}})^2 - (F_{y \text{ modèle}} - F_{y \text{ mesuré}})^2$$

Les étapes d'optimisation se résument à :

1. tout d'abord, uniquement les  $K_{tai}$  de chacune des dents. On obtient ainsi l'amplitude du signal,
2. ensuite, les  $K_{tai}$  et  $K_{tfi}$ . On intègre la forme principale du signal,
3. Les  $K_{tai}$ ,  $K_{rai}$  et  $K_{tfi}$ . On intègre ici le différentiel de répartition entre  $F_T$  et  $F_R$ ,
4. Enfin l'ensemble des coefficients.

Ce processus est appliqué à chaque tour de broche. L'usure évoluant lentement, on peut repartir des données identifiées au tour précédent, ce qui augmente nettement le temps de convergence. Cependant, le point de départ de l'algorithme, lui, a été choisi aléatoirement, ce qui nous assure une indépendance des résultats à chaque tour. Cette stratégie s'est avérée pertinente en montrant une grande stabilité et une bonne cohérence des résultats.

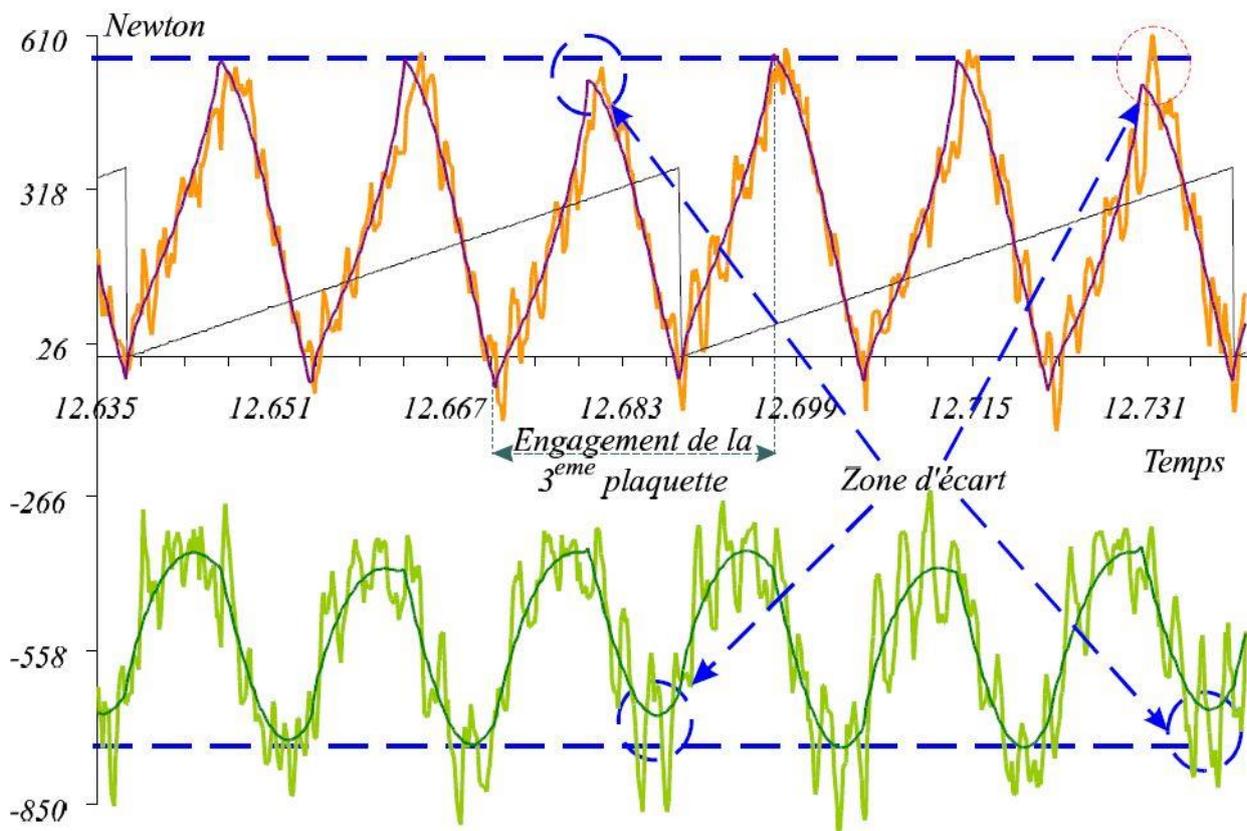


figure 33: Influence d'une variation d'épaisseur de copeau

#### **d Bilan des travaux associés**

Ces travaux ont été basés sur l'expérimentation. Trois plans d'expériences fractionnaires ont été réalisés.

Ces expérimentations ont pu être menées pour étudier les coefficients de cette modélisation. Chaque coefficient a été analysé du point de vue de sa sensibilité et de sa robustesse par rapport aux autres paramètres du processus de coupe tel que :

- le matériau de la pièce,
- la vitesse de coupe,
- la vitesse d'avance,
- la profondeur de passe,
- le diamètre outil,
- le nombre de plaquette.

Suite à ces travaux, différents points ont pu être notés. L'usure doit être étudiée de manière dissociée pour chacune des dents. Le coefficient principal contenant des informations sur l'outil est le coefficient spécifique de coupe tangentiel  $K_T$ . Deux types d'informations peuvent être analysés, la première est contenue dans le coefficient d'amplitude, elle permet d'identifier des incidents survenant sur une plaquette telle que des variations de la géométrie (bris, copeau adhérent (identifier aux cours des expérimentations),...). Le second critère discriminant l'usure a été identifié comme étant le facteur de forme de  $K_T$ . Nous avons montré une très bonne corrélation avec l'usure, et notre capacité à évaluer l'usure de chacune des plaquettes à partir des signaux d'efforts. Le coefficient  $K_{tf}$  dans sa définition est prometteur, cependant l'hypothèse d'une section de copeau équivalente pour l'ensemble des dents est sans aucun doute pénalisante dans la bonne estimation de l'état d'usure de l'outil.

La dernière remarque sur ces travaux porte sur les fréquences de rotation choisies. Ces essais ont été réalisés sur machines CN conventionnelles la fréquence maximale utilisée était de 2000tr/min. A ces vitesses, l'obtention de signaux suffisamment propres est envisageable. Lorsque les vitesses augmentent, l'obtention de signaux non bruités (rapport signal sur bruit) est plus difficile. Cette lecture de l'état d'usure de l'outil est donc plutôt à entrevoir pour l'usinage des matériaux durs. Pour l'usinage de matériaux tendres, tel que l'aluminium, l'usure en décapage n'est pas un facteur bloquant actuellement.

#### **e Conclusion & perspective**

Pour répondre au cahier des charges de l'identification en ligne de l'usure de l'outil, nous avons choisi une modélisation permettant l'expression de ce phénomène. L'une des principales difficultés se situait dans le recalage robuste des coefficients du modèle. Nous avons surmonté cette difficulté en proposant une approche considérant une succession de modèles physiques de complexité croissante maximisant la robustesse de recalage. Ceci nous a permis, à terme, d'identifier les meilleurs critères d'observations de l'usure.

Pour conclure, ces deux coefficients  $K_{ta}$  et  $K_{tf}$  sont riches d'informations quant au bon déroulement de l'usinage. Le coefficient  $K_{ta}$ , comme nous le verrons dans la suite, permet la mise en place d'un suivi du bris d'outil.

Deux directions sont alors envisageables à ce niveau :

- La première est de poursuivre, comme nous l'avons fait, sur la détection de bris avec l'information  $K_{ta}$ , on doit alors envisager des fréquences de rotation plus élevées afin que l'approche ait un intérêt industriel,
- La seconde est de poursuivre avec  $K_{tf}$ , plutôt sur des applications matériaux durs et sans doute avec des outils de plus petites dimensions. Il faudra alors néanmoins envisager un autre moyen de mesure que la platine d'effort, pour que l'application soit industriellement viable.

## 2.4. Application à la surveillance du bris d'outil [7]

### **a Objectif lié à la détection de bris**

Suite aux résultats obtenus, nous avons choisi de poursuivre nos travaux dans la surveillance de bris d'outil [20]. Un point important est la nécessité d'intégrer à la modélisation le faux rond de l'outil. Dans les pages qui vont suivre, l'objectif n'est pas de faire un état des lieux de la surveillance d'usinage[21][22], mais d'exprimer, suivant le concept SMMS, comment exploiter les données capteur et par conséquent comment adapter notre modélisation, afin de répondre aux cahiers des charges d'une surveillance du bris outils.

Le besoin d'un système de surveillance de bris d'outil peut être résumé en deux concepts :

- **Rapidité** : le système doit être capable de réagir rapidement afin d'éviter des dégradations sur le moyen et si possible la pièce. Suite à une étude bibliographique, Mr Ritou a identifié différents critères permettant un suivi évolué du fraisage. Ces critères se sont avérés très rapides à extraire, ceci est dû à leur conception. En effet, ces critères sont issus d'un traitement élémentaire de l'information, on extrait quelques données (pic, creux) puis on calcule à l'aide des opérateurs de base (+, -, \*, /) le critère. Il n'y a pas d'algorithme d'optimisation tel que nous avons pu les mettre en place.
- **Robustesse** : l'effet de détection manqué est évident, cependant l'effet de détection abusive est, à terme, aussi pénalisant. Ces détections abusives vont avoir pour effet des interruptions du processus de production qui va, au final, se chiffrer en perte de productivité. En observant la criticité de ces détections abusives (fréquence fois le coût) à celle des bris d'outil, on a pu constater dans bon nombre d'entreprises la désactivation du système de surveillance. Différents critères de la bibliographie ont été mis en place sur un cas de vidage de poche, tous ont détecté des bris. Ces critères ont été conçus pour permettre de détecter de brusques variations des conditions opératoires, or ces variations peuvent survenir à d'autres moments de la coupe comme lors des transitoires.

Nous devons donc pour obtenir une détection rapide simplifier drastiquement notre modélisation. Notre méthodologie devra être robuste malgré l'existence des transitoires.

On peut donc s'interroger sur ce qu'est une détection abusive ? Et inversement ce qu'est une bonne détection ?

Reprenons le déroulement du processus de coupe :

- Dans le cas d'un bris d'outil : l'usinage se déroule, l'outil est en bon état, un évènement survient, les données acquises sont fortement perturbées, l'usinage se poursuit, l'outil est dégradé,
- Dans le cas d'une détection abusive : l'usinage se déroule, l'outil est en bon état, un évènement survient, les données acquises sont fortement perturbées, l'usinage se poursuit, l'outil n'est pas dégradé,

La différence existante n'est donc pas sur la donnée au moment de l'incident, mais sur l'état de l'outil à posteriori. Notre démarche ne va donc pas être de chercher à identifier un incident, mais d'être capable d'estimer rapidement l'état d'un outil. Cette stratégie, si elle est moins rapide (on attend le retour à des conditions normales de fonctionnement), devrait être plus robuste. Cependant, lors d'un bris d'outils important, la dégradation de celui-ci n'est pas obligatoirement instantanée.

### **b Constat de l'impact de la variation d'état de l'outil sur les efforts**

Sur les figures suivantes, nous observons à gauche un outil neuf à 4 plaquettes, à droite le même ou l'une des dents a été endommagée. Cet outil est partiellement engagé ( $e_a = 10\%$  du diamètre outil).

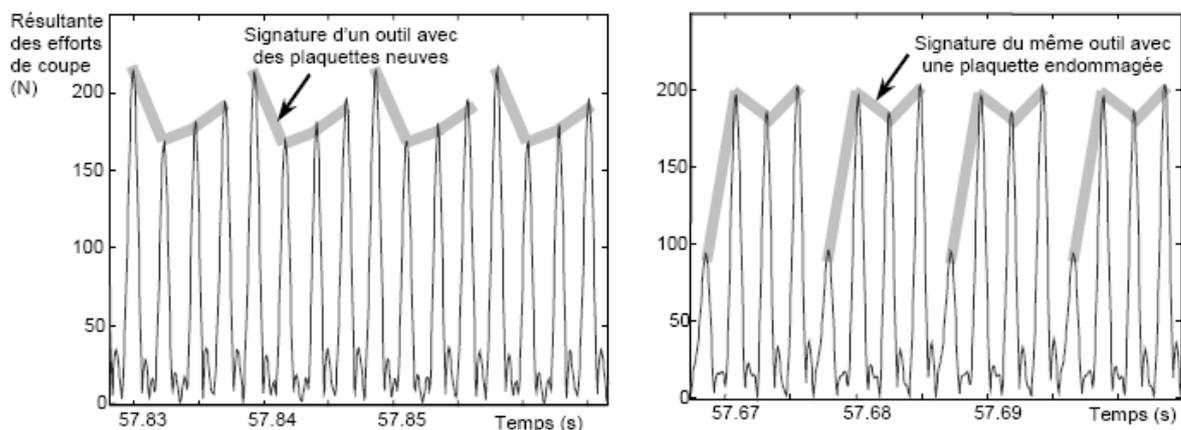


figure 34 : Signature sur les efforts de coupe d'un outil à 4 dents neuf puis endommagé,

Tout d'abord, on remarque que l'outil neuf et l'outil endommagé montrent des variations de niveaux d'amplitudes non négligeables. La signature se reproduit à chaque tour. Afin d'analyser ce qu'il se passe, reprenons l'usinage avec une plaquette. Dans ce cas, l'épaisseur de copeau est liée à l'avance de l'outil, la matière coupée au tour précédent l'a été par la même plaquette. Dans le cas où nous avons plusieurs plaquettes, il faut considérer le travail effectué par une autre plaquette. Donc si la précédente a coupé plus de matière, la suivante en aura moins à retirer et inversement, puisque le déplacement cumulé reste équivalent.

Sur la figure 34, à gauche, la première plaquette est celle qui retire le plus de matière, la suivante est celle qui en retire le moins. Sur la figure de droite, la dent 1 a été endommagée, l'épaisseur de copeau est moindre, la plaquette suivante voit donc la quantité de matière à retirer augmentée nettement, les efforts vont donc croître. Notons que l'écart

entre la deuxième et troisième dent n'a pas changé de même qu'entre la troisième et la quatrième, les niveaux d'effort sur ces plaquettes restent similaires.

Il est donc possible, sans connaître l'évènement qui s'est produit, d'identifier une dégradation sur un outil à l'aide de sa signature.

Avant de poursuivre, analysons ce phénomène via la modélisation.

### c Construction d'une modélisation de la signature outil

Prenons un outil équipé de trois plaquettes. La position des plaquettes est sur un rayon  $+ \varepsilon_i$  avec  $i \in \{1,2,3\}$ . L'outil avance de manière régulière  $f_z$  par tour de bêche, on peut faire deux constats : le diamètre étant plus grand ou plus faible, la durée au cours de laquelle le copeau existe augmente ou respectivement diminue. Pour estimer l'épaisseur du copeau, il faut considérer la différence des écarts.

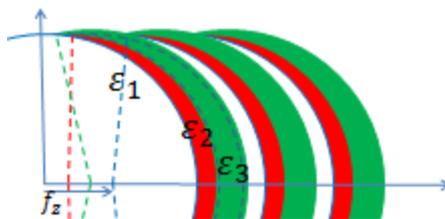


figure 35 : influence du décalage radial sur la section de copeau

Nous utilisons jusqu'ici une approximation de l'épaisseur de copeau, avec

$$h(\varphi) = f_z \cdot \sin(\varphi)$$

[12] Kline et Devor proposent un modèle permettant d'intégrer ce décalage entre les plaquettes, le « run out » en écrivant :

$$\begin{cases} h_{kd}(\varphi) = f_z \cdot \sin(\varphi) + \Delta\varepsilon_j \\ h_{kd}(\varphi) = 0 \text{ si } f_z \cdot \sin(\varphi) + \Delta\varepsilon_j < 0 \end{cases} \text{ avec } \dots \dots \dots \text{ Eq. 23}$$

En reprenant le modèle, et en y intégrant cette variation de l'épaisseur de copeau on obtient :

$$\begin{cases} F_T(\varphi) = K_{ta} \cdot a_p \cdot h_{kd}(\varphi) \cdot \left( \frac{h_{kd}(\varphi)}{f_z + \Delta\varepsilon_j} \right)^{K_{tf}} \\ F_R(\varphi) = F_T(\varphi) \cdot K_{ra} \cdot \left( \frac{h_{kd}(\varphi)}{f_z + \Delta\varepsilon_j} \right)^{K_{rf}} \end{cases} \text{ Eq. 24}$$

Si on reprend les paramètres associés aux signaux de la figure 33 (page 51), on parvient à identifier les paramètres de cet outil (figure 36).

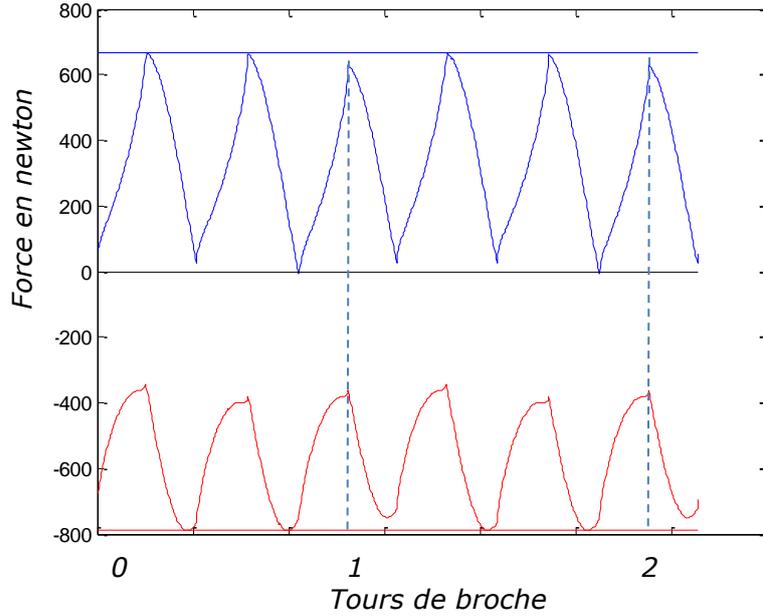


figure 36 : Prise en compte du run-out dans la modélisation

Nous devons construire un critère explicite, c'est à dire issue d'opérations élémentaires, il est exclu d'effectuer une optimisation pour identifier les paramètres. Afin de prendre l'ensemble des informations, nous travaillerons sur la résultante des efforts. Cependant, le modèle des efforts n'est pas linéaire, nous avons dans celui-ci des puissances (Eq. 24). Pour passer outre cette difficulté, choisissons une position particulière à savoir  $\varphi = 90$ , correspondant à l'effort maximum (le sinus est égal à 1), le système (Eq. 24) peut s'écrire :

$$\begin{cases} F_{Tj\max} = K_{ta} \cdot a_p \cdot (f_z + \Delta\varepsilon_j) \\ F_{Rj\max} = F_T(\varphi) \cdot K_{ra} \end{cases}$$

$$F_{resj\max} = \sqrt{F_{Tj\max}^2 + F_{Rj\max}^2}$$

$$F_{resj\max} = K_{res} \cdot a_p \cdot (f_z + \Delta\varepsilon_j) \quad \text{Eq. 25}$$

En posant  $K_{res} = K_{ta} \cdot \sqrt{1 + K_{ra}^2}$ , on obtient une formulation de l'effort maximum qui nous permet sous certaines conditions d'identifier  $\Delta\varepsilon_j$  :

$$\Delta\varepsilon_j = \frac{F_{j\max}}{K_{res} \cdot a_p} - f_z$$

En utilisant, la relation entre les epsilons on peut montrer que

$$\Delta\varepsilon_j = \frac{F_{j\max} - \bar{F}_j}{K_{res} \cdot a_p} \quad \text{Eq. 26}$$

Où  $\bar{F}_j$  est la moyenne des  $F_j$ .

Il nous reste à identifier le maximum dans les signaux d'efforts. Nous pouvons donc mesurer pour chaque dent le maximum associé, et en déduire le  $\Delta\varepsilon_j$  associé à la dent  $j$ .

Durant cette démonstration, nous avons choisi l'angle de  $90^\circ$ . Donc, si lors de l'usinage, cette valeur est présente et qu'une seule dent est engagée à cet instant, nous serons capable en connaissant  $K_{res}$  et  $a_p$  d'identifier les run out.

#### **d Mise en place d'une surveillance de la signature outil**

Nous avons donc un critère crédible pour effectuer une surveillance en ligne, il nous reste cependant de nombreux points à valider. Lors d'un usinage, les conditions opératoires peuvent être amenées à changer, il faut donc que le critère construit soit indépendant des conditions de coupe. Les principaux paramètres de coupe sont l'avance  $f_z$ , l'engagement radial  $a_e$  (valeur de l'angle  $\varphi$ ), et enfin  $a_p$ . Lors de la mise en place de stratégies usuelles de FAO d'ébauche, la grande majorité des parcours est réalisée en 2 axes  $1/2$ , c'est-à-dire des déplacements combinés dans un plan à une altitude figée. Les deux premiers paramètres  $f_z$  et  $a_e$  évoluent alors que la profondeur de coupe, elle, est constante. Nous ferons donc l'hypothèse que  $a_p$  est connu. Le coefficient  $K_{res}$  quand à lui devra être identifié.

Considérons tout d'abord la dépendance à l'avance ici dans cette première évaluation nous avons calculé  $K_{res}$  comme constant et indépendant des conditions opératoires. Traçons  $F_{res}(\varphi)$  en fonction du  $h(\varphi)$ .

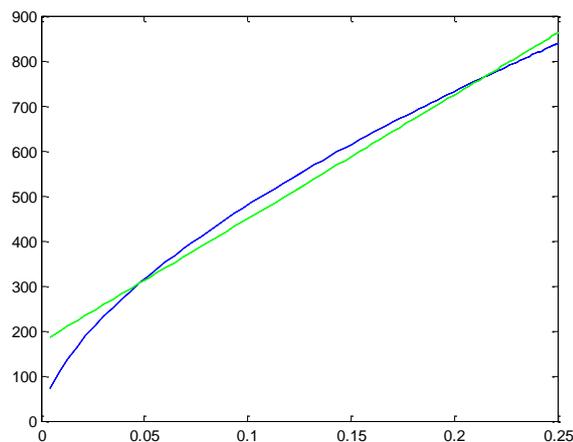


figure 37 : Tracé de  $F_{res}(\varphi)$  en fonction de  $h(\varphi)$  avec les modèles connus

Dans la littérature, on trouve des modélisations simplifiées qui proposent des modèles affines (Altintas [23]), permettant d'intégrer cette variation. Nous proposons de combiner celui-ci avec la prise en compte du run out (Kline [12]) :

$$F_j = a_p \cdot (K_c \cdot (f_z \cdot \sin(\varphi) + \Delta\varepsilon_j) + K_e) \quad \text{Eq. 27}$$

L'intérêt de cette modélisation simplifiée réside dans le nombre réduit de paramètres la décrivant, ce qui induit un faible nombre d'essais pour en avoir une bonne représentation. Un protocole a donc été défini où quatre essais seraient réalisés afin d'estimer le modèle,

les quatre points prenant en comptes des bornes de vitesse d'avance et de variation d'engagement radial.

Plusieurs points restent néanmoins critiques :

1. A faible section de copeau (lié à la vitesse ou à l'engagement radial), le modèle surestime le coefficient  $K_c$  ce qui induira une sous-estimation du battement radial.
2. La position du maximum : si, pour un outil à deux, dents les maxima du signal correspondent à ceux des dents, ce n'est plus le cas avec des outils ayant plus de dent et un engagement plus fort (figure 38),
3. La recherche du maximum est une donnée sensible au bruit, ce qui ne plaide pas pour la robustesse du système de surveillance.

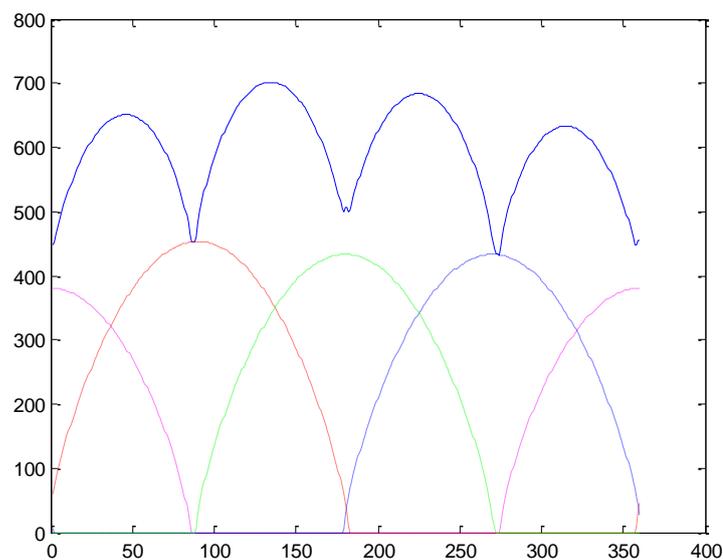


figure 38 : rainurage avec un outil 4 dents

Afin de pallier à l'ensemble de ces trois points, il nous faut plus d'informations. La solution choisie est de borner la surveillance aux programmes de fabrication réalisés par une FAO. En effet, nous pouvons alors simuler l'usinage avec un modèle plus complexe et donc prévoir dans quelle mesure nos estimations avec le modèle simplifié seront biaisées. Cette approche répond au point un.

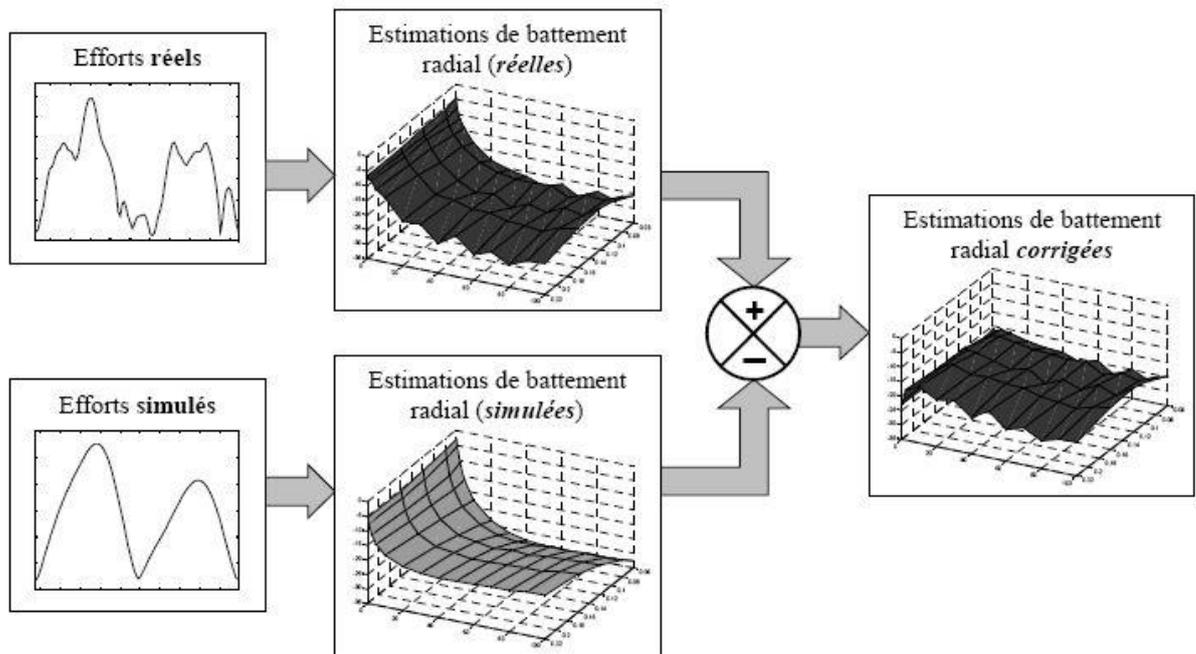


figure 39 : Compensation des variations des estimations, grâce à des simulations numériques

Concernant les deux derniers points, différents critères ont été évalués : Pic d'effort, moyenne autour du pic d'effort, la « quasi moyenne » des efforts proposée par Altintas [16], et enfin la moyenne pour la dent en prise. Dans cette analyse, Il faut étudier la robustesse de l'estimation des écarts et non des entités extraites.

Cette étude nous a conduits à choisir une fréquence de filtrage de 1.5 fois la fréquence de passage des dents ainsi que le critère « moyenne des dents en prise » avec un seuil de 10% (figure 41). Ce critère nécessite de connaître la position de chacune des dents au cours de l'usinage afin de positionner la zone de la moyenne à effectuer (figure 40).

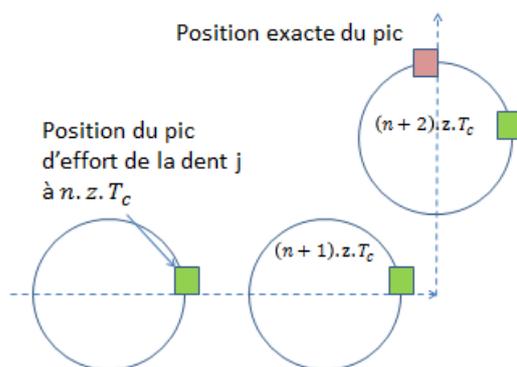


figure 40 : Déphasage des pics d'efforts à la direction d'avance

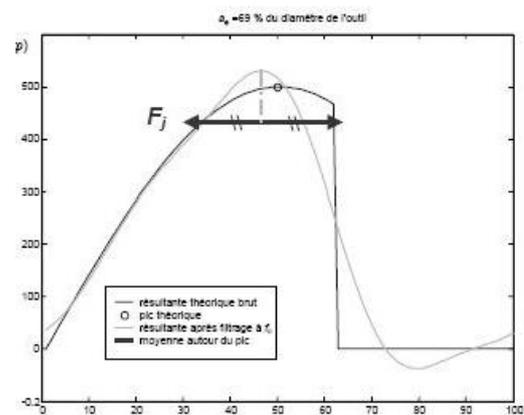


figure 41 : Extraction de l'entité moyenne autour du pic au passage des dents

### e Bilan du principe de surveillance intermittente

Nous venons de définir un critère nous permettant d'effectuer une surveillance de la signature outil quelles que soient les conditions opératoires au cours d'un processus stable.

Le critère défini peut être assimilé à une fonction d'état de l'outil, peu importe les événements préalables. Au cours d'un usinage, les conditions opératoires sont fluctuantes en fonction de la géométrie de la pièce et de la stratégie d'usinage, nous choisissons de suspendre la détection au cours des transitoires, et de la reprendre dès que les conditions sont stabilisées.

La démarche a été appliquée à un cas industriel. Le choix s'est porté sur un outil de  $\varnothing 25\text{mm}$  à trois plaquettes. La vitesse de coupe est de  $600\text{m/min}$  ( $7650\text{trs/min}$ ) et l'avance de  $0.15\text{mm/dent/tour}$ . Sur son parcours ont été disposés des inserts en carbure ayant pour objectif de provoquer un incident. Le protocole suivant a été suivi :

1. 4 Passes sont réalisées afin d'identifier le modèle de coupe associé à la matière et à l'outil,
2. Une simulation a été réalisée afin d'anticiper les signaux et de prédire les corrections à apporter,
3. Ensuite, l'usinage est réalisé,
4. On détermine les zones stables, où la surveillance peut avoir lieu, (les transitoires ne sont pas surveillés),
5. Les signaux sont filtrés, on calcule les moyennes autour des pics et on peut enfin estimer les  $\varepsilon_j$  et identifier un éventuel bris,

Nous pouvons observer l'évolution des  $\Delta\varepsilon_j$  lors de l'usinage. Afin d'estimer les  $\varepsilon_j$ , nous fixons  $\varepsilon_1$  à 0. Dans le cas où l'incident survient sur la dent 1, l'ensemble des autres  $\varepsilon_j$  est simultanément augmenté. Ici, nous constatons un incident sur la dent 3.

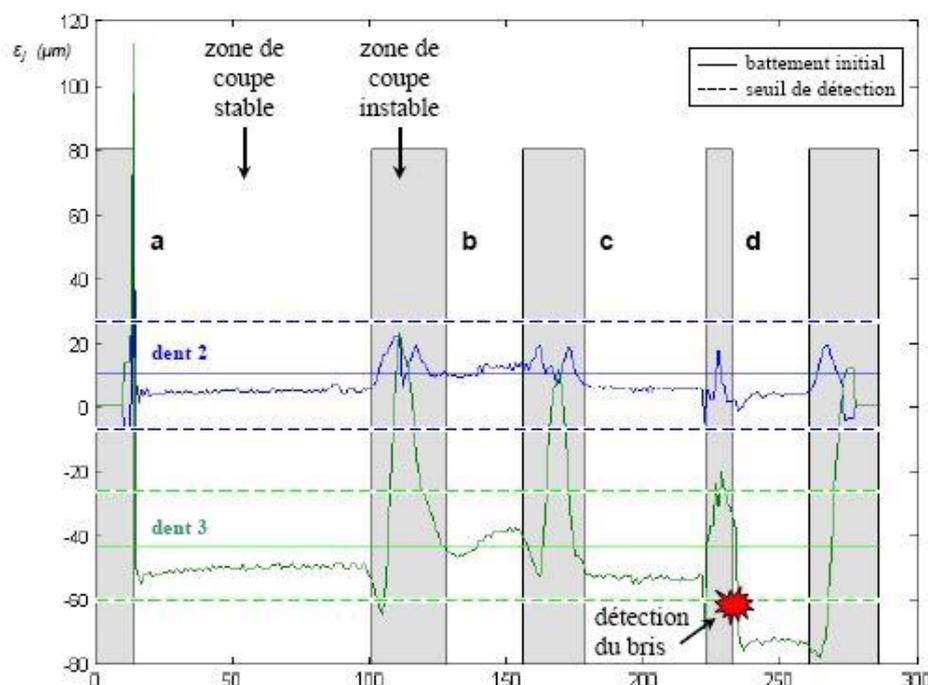


Figure 42 : Carte de contrôle de l'état de l'outil, au cours de l'usinage

Cette détection est automatiquement suivie d'une inspection de l'outil à l'aide d'un système de scanning d'outils, le TOOLSCAN, développé au sein de l'équipe et exploité

dans le cadre du projet COMET. On voit ci-dessous le scanning d'un outil. Ce scanning est fait à l'aide d'un protocole développé à l'origine durant le projet alu composite, et plus spécifiquement utilisé pour les outils à concrétions diamantées. On constate une légère ébréchure sur la dent 3.

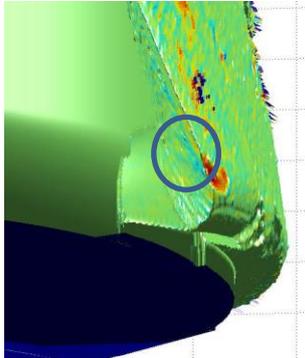


figure 43 : Scan 3D de l'outil

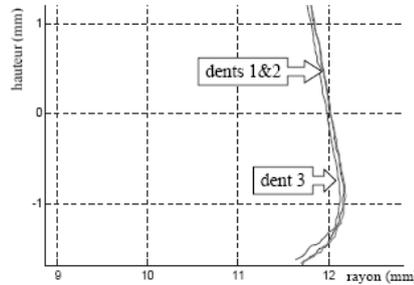


figure 44 : profil des trois dents avant collision

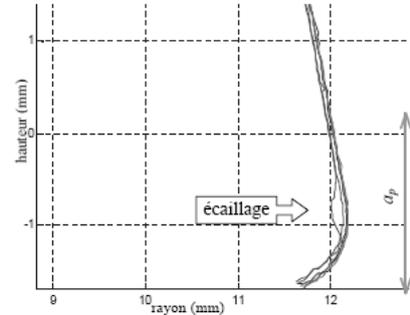


figure 45 : profil des trois dents après collision

Cette approche, si elle montre de très bons résultats et une bonne robustesse, est basée sur les efforts. Si les platines d'efforts sont couramment utilisées dans le domaine de la recherche, leur mise en œuvre dans le cas d'un processus industriel est complexe [24]. Cette information peut être disponible sur d'autre technologie de broche tel que les paliers magnétique [25]. Afin de rendre l'approche SUI (surveillance d'usinage intermittente) viable industriellement, Mathieu Ritou a mis en place un suivi de bris basé non plus sur une mesure directe des efforts mais sur celle des déplacements du porte-outil au niveau du nez de broche à l'aide de capteurs inductifs. Après un protocole permettant d'étalonner ces capteurs à l'aide d'une platine dynamométrique, la méthode a été mise en place avec succès, les résultats de détection à partir des capteurs inductifs sont équivalents à ceux obtenus avec la platine.

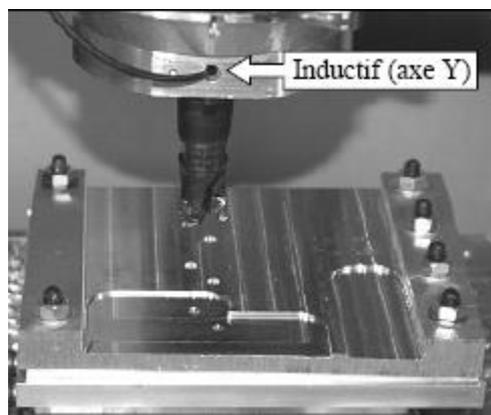


figure 46 : Intégration des capteurs inductifs dans l'outil de production

## **f Conclusion**

Nous avons pour objectif de mettre en place une détection rapide de l'endommagement des outils et cela passait, entre autre, par une simplification du modèle qui a été mise en œuvre. Le second objectif était d'avoir une détection robuste. Dans la littérature, les approches classiques cherchent à identifier l'évènement du bris, ce qui s'avère peu robuste. Nous avons changé de concept en surveillant l'état de l'outil et non plus l'évènement du bris. Ceci nous permet de rendre la détection robuste. Pour l'ensemble des essais mis en place, nous n'avons jamais eu de détection abusive et toutes les dégradations d'outils détectées ont été observées sur l'outil. De plus, nous avons, au cours de la thèse de Mathieu Ritou, montré la faisabilité de la méthodologie de surveillance avec des capteurs inductifs.

En l'état, même si les résultats sont pertinents, la mise en application industrielle de ces procédures est tout de même complexe. Elle nécessite des modifications dans le processus global ce qui y associe un surcoût. Avant d'être déployées, de telles techniques demandent une validation industrielle plus large. C'est ce qui a été fait dans le cadre du projet UsinAE, des machines industrielles implantées chez des partenaires ont été instrumentées afin de tester les protocoles développés. Un système d'acquisition couplé à la récupération de signaux issus directement du contrôleur de la CN a été développé et est aujourd'hui commercialisé, il s'agit du système : EMMATOOLS. Cependant, il faut être capable, pour que le système soit fiable, d'inspecter l'outil pour confirmer la détection et d'agir sur le processus soit en relançant l'usinage, soit en appelant un outil frère. La mise en place d'une telle procédure et du moyen d'inspection fait l'objet d'un projet en partenariat avec l'IRT Jules Vernes, il s'agit du projet COMET dans lequel comme nous l'avons vu, nous continuons le développement du système de scanning direct d'outils.

Nous venons de présenter deux cas d'études portant sur l'item SIMTI Surveillance des défaillances avec une exploitation d'une modélisation diamétralement opposée. A ce jour nous sommes donc capable de suivre et d'analyser le processus de coupe et ceci de manière industrielle. Le diagnostic étant réalisé, deux voies doivent être déployées pour poursuivre nos développements. Deux projets ont été initiés afin d'y parvenir : le projet COMET (décrit ci-dessus), et le projet QUAUSI dans lequel la détection du défaut ou son absence peut être exploitée soit pour conditionner une reprise, soit pour fournir un rapport de contrôle.

Parallèlement au développement de l'item SIMTI, nous développons des recherches sur le pilotage du procédé.

### 2.5. État de l'art : dynamique des transitoires

Abordons un autre item qui est celui du pilotage du procédé. Nous avons vu, au cours de la surveillance d'usinage, l'existence de transitoire. Jusqu'ici dans nos travaux, la dynamique du procédé a été écartée, nous nous situons dans ce que l'on appelle des zones stables.

## **a Introduction**

Nous utilisons ici la terminologie dynamique du procédé car elle peut être décomposée théoriquement en deux points de vue : la dynamique du moyen (cinématique) et la dynamique du chargement (efforts).

Ces changements de dynamique sont généralement regroupés sous l’item de « zone transitoire ». Identifions-les afin de mieux les comprendre. Durant cette partie du manuscrit, la machine est considérée comme rigide, l’outil, malgré sa géométrie imparfaite, peut être considéré comme invariant (aucun bris d’outil, temps d’utilisation restreint durant laquelle on peut faire l’hypothèse que l’état d’usure de l’outil reste inchangé). C’est donc les paramètres opératoires qui évoluent, et/ou la vitesse d’avance (quasiment jamais la fréquence de broche).

	Vitesse constante	Vitesse variable
Chargement constant	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usinage standard,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ralentissement,</li> <li>• Arrêt en matière,</li> </ul>
Chargement variable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entrée matière,</li> <li>• Sortie matière,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Virage,</li> <li>• Plongé, ramping</li> </ul>

*Les zones transitoires sont grisées.*

Bien évidemment, on peut identifier des cas complexes autres où les deux paramètres évoluent en permanence (cas d’usinage de formes complexes). Ces variations induisent des variations de sections de copeau et donc d’efforts, ainsi que des changements de directions de la résultante des efforts.

Dans l’étude que nous abordons, nous nous bornons à l’ébauche (2 axes  $\frac{1}{2}$ ). La machine est considérée comme rigide ces variations n’ont aucun impact sur la géométrie. Par contre, ils auront un impact sur la puissance consommée de la machine et plus particulièrement de la broche.

### **b Vitesse d’avance**

Sur les machines à commandes numériques, on considère classiquement une étude de la position avec trois niveaux de dérivation : vitesse, accélération et Jerk. Le Jerk est considéré comme constant, puis les autres sont issus de l’intégration de cette constante. L’expression de la position peut donc s’exprimer au court du temps par un polynôme de degré trois. Sur les machines les plus classiques d’usinage, la structure est cartésienne, on considère donc les déplacements comme indépendants les uns des autres. L’espace de travail de la machine peut être considéré comme homogène (l’espace opérationnel est identique à l’espace de commande).

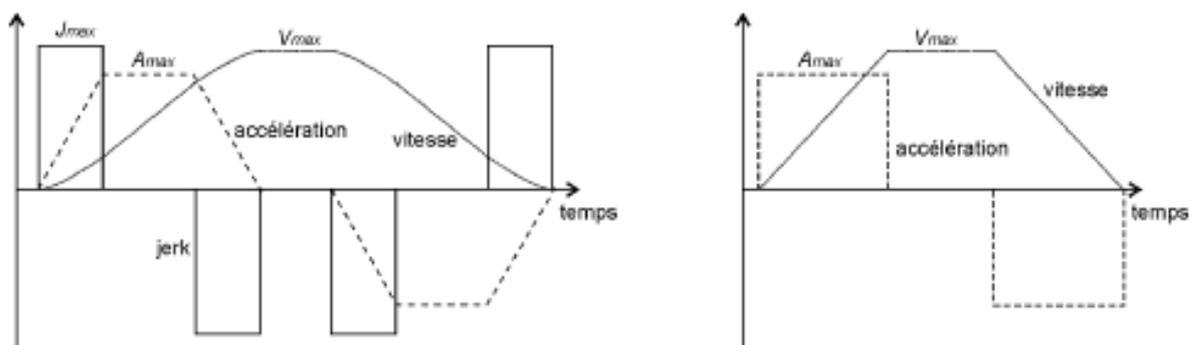


figure 47 : commande en jerk à gauche et en accélération à droite

Les variations vitesses, si elles surviennent au démarrage et à l'arrêt, sont principalement étudiées au cours de changement de direction. Le respect exact de la position de l'outil, dans le cas d'une discontinuité de direction, induit que le déplacement sur le segment suivant commence dès que le premier segment est achevé. Afin que la machine soit plus fluide et que les déplacements soient moins saccadés, on fait alors un compromis entre la précision et la vitesse.

On autorise la trajectoire à s'écarter, ceci permet donc de commencer le déplacement dans la direction du segment suivant avant que le parcours ne soit achevé sur le premier segment. Dans cet exemple, le paramètre ADIS donne la distance à partir de laquelle le déplacement peut avoir lieu.

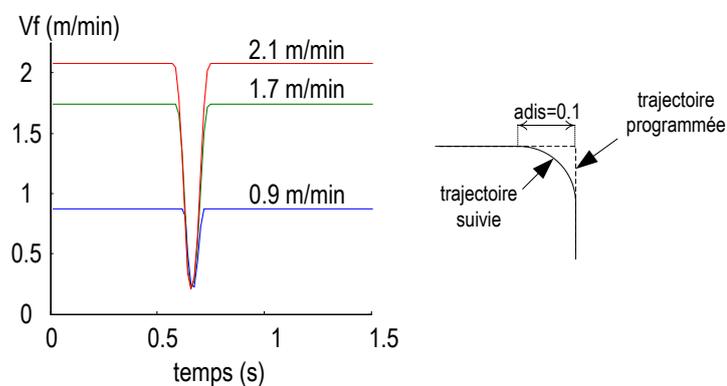


figure 48: profil pour différentes vitesses à une tolérance donnée

Plus l'écart autorisé est important, plus la réduction de vitesse est faible. Ici sur la figure 49, ADIS prend les des valeurs suivantes 10 ; 5 ; 2 ; 1 ; 0,5 ; 0,4 ; 0,3 ; 0,1 ; 0,05 ; 0,02 et 0,01 millimètres. La consigne de vitesse étant de 5m/min, on peut constater l'impact du facteur de lissage sur la vitesse de franchissement du virage.

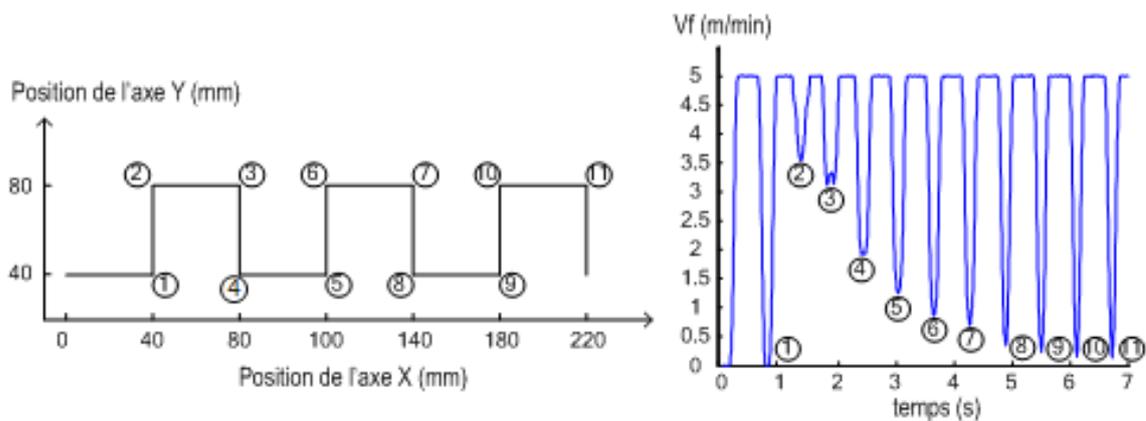


figure 49 : Influence de la précision de suivi du contour (trajectoire programmée à gauche et vitesse mesurée à droite)

Différents paramètres ont une influence sur cette perte de vitesse tel que la discontinuité, la direction principale de déplacement, l'angle entre les segments, etc.

On trouvera dans la littérature ces différents points traités.

Analysons l'impact de ces variations de vitesse sur la modélisation des efforts en fraisage précédemment décrite. Excepté en taraudage rigide, la vitesse de rotation de la broche n'est pas asservie à l'avance, ses mouvements peuvent donc être dissociés, une diminution de l'avance n'induit pas une diminution de la fréquence de rotation de la broche. Cela revient donc à diminuer l'avance par tours de l'outil et donc de la valeur de  $f_z$ . Suivant le rapport entre la vitesse d'avance et la fréquence de rotation de la broche, on pourra faire l'hypothèse d'une évolution de la vitesse par palier et ainsi, à chaque tour,  $f_z$  sera réajustée.

Afin d'illustrer nos propos, prenons un cas pratique classique. Considérons les hypothèses suivantes : un outil à trois dents, une fréquence de rotation d'environ 16000 trs/min, une avance  $f_z$  de 0.1 mm/dent /tours soit une avance de 4.8m/min. Les virages ci-dessus durant approximativement 0.2 seconde, l'outil fait alors 50 tours par virage, soit 25 tours pour le front descendant. Pour chaque dent, l'erreur commise est alors d'environ 4%. Suivant le type d'observation que nous choisissons, nous pouvons ou pas faire cette approximation.

## **c Engagement radial**

Pour étudier les variations d'engagement radial, prenons le cas d'un vidage de poche. L'outil à la passe précédente a fait un passage et a laissé de la matière qu'il faut reprendre.

### **c.1 Faible engagement radial programmé**

Dans ce paragraphe, un engagement radial faible a été choisi. Afin de bien comprendre ce qui se passe, cinq positions d'outil sont définies et représentées (figure 50). Ces positions correspondent à différents instants de passage de l'outil sur sa trajectoire actuelle. La correspondance entre ces positions géométriques et le calcul de l'engagement radial instantané (figure 51) est effectué grâce au repérage des lettres (A, B, C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> et D).

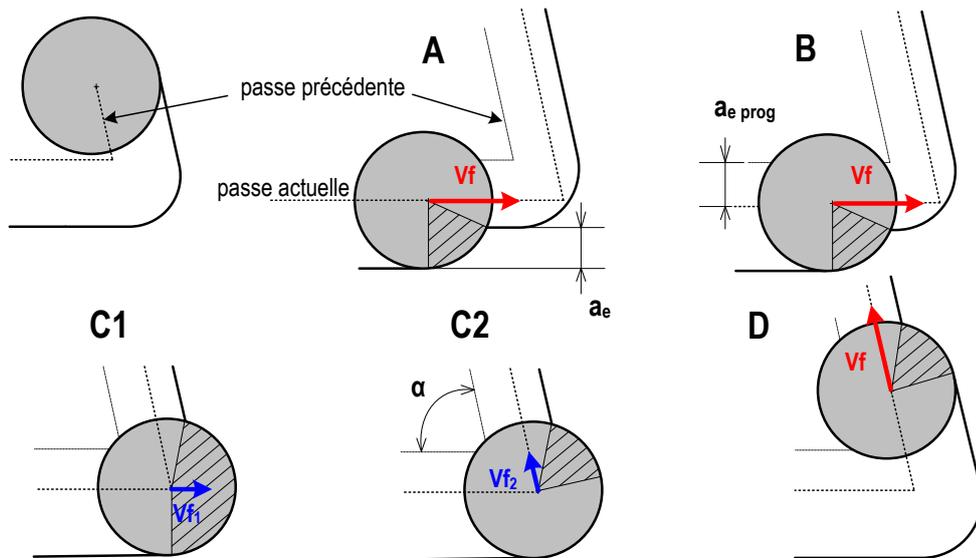


figure 50 : Variation de l'engagement radial au cours de la trajectoire (valeur programmée de 30% du diamètre outil)

Dans la position A, l'outil suit une ligne droite avec un engagement radial constant respectant la valeur programmée (30% du diamètre outil) et se déplace dans la direction du vecteur  $V_f$  ainsi représenté. Ensuite, l'outil commence à rencontrer plus de matière restante de la passe précédente (position B). Ainsi, son engagement radial instantané passe progressivement de 30% à 96% quand il arrive à la position C1. Dans le même temps, il ralentit jusqu'à atteindre une vitesse nulle ( $V_{f1} \approx 0$ ).

Les positions C<sub>1</sub> et C<sub>2</sub> illustrent le passage brutal de 96% à 30% d'engagement. Ceci correspond au changement de direction de l'outil qui passe de la direction définie par le vecteur  $V_{f1}$  à la direction définie par  $V_{f2}$ . Ainsi, l'outil se retrouve dans les conditions d'engagement radial programmé (position D).

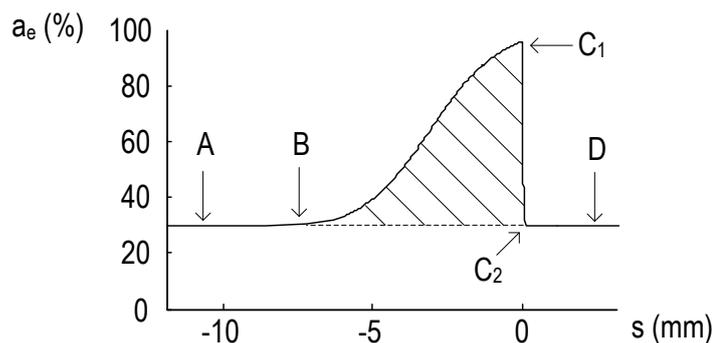


figure 51 : Variations de l'engagement radial instantané (cas où  $a_{e\ prog} = 30\%$ ,  $D = 10\text{mm}$ ,  $\alpha = 90^\circ$ )

Dans ce paragraphe, les variations d'engagement radial instantané avec un faible engagement radial programmé ont été décrites avec précision. Le prochain paragraphe concerne le cas où l'engagement radial programmé est élevé.

## c.2 Fort engagement radial programmé

Afin d'analyser ce qui se passe dans ce cas, sept positions sont représentées sur la figure 52 (A, B, C, D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, E, F). Les mêmes lettres sont présentes sur la figure 53 et permettent donc de faire le lien entre des positions géométriques particulières de l'outil avec les résultats d'un calcul numérique d'engagement radial instantané pour un cas particulier ( $a_{e\text{prog}}=80\%$ ,  $D=10\text{mm}$ ,  $\alpha=90^\circ$ ).

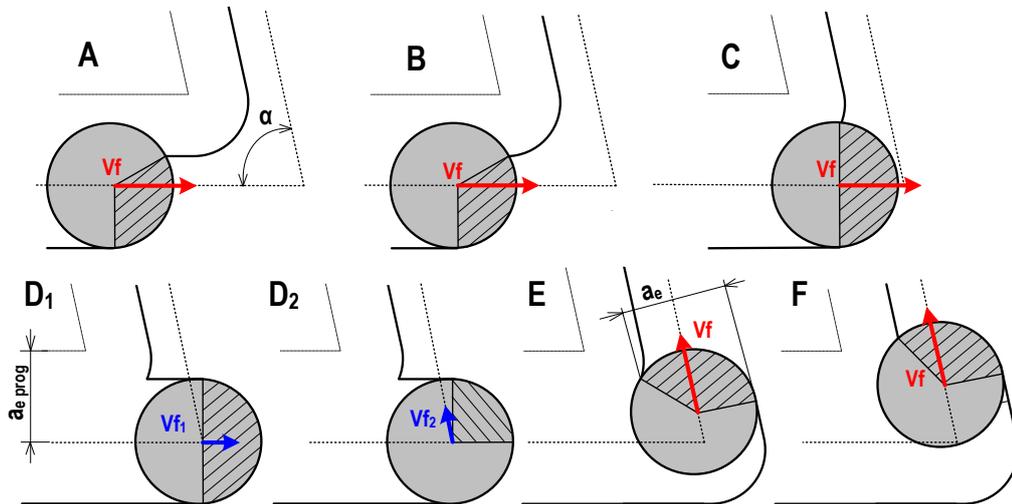


figure 52 : Variation de l'engagement radial au cours de la trajectoire (valeur programmée de 80% du diamètre outil)

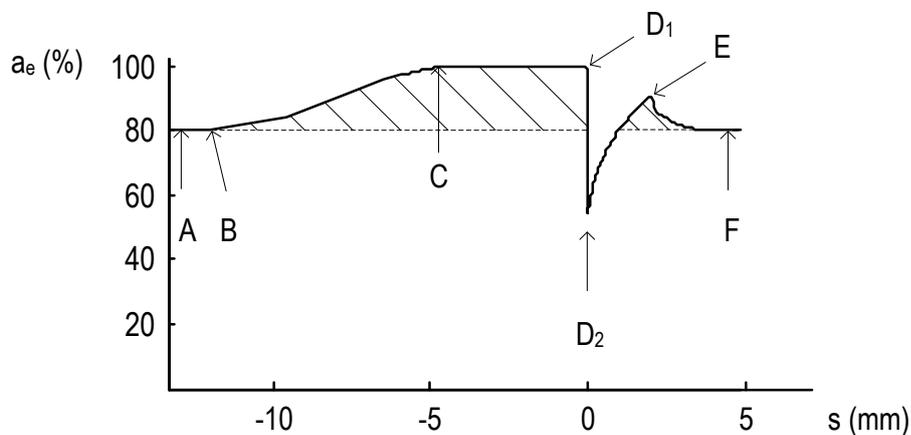


figure 53 : Variations de l'engagement radial instantané (cas où  $a_{e\text{prog}}=80\%$ ,  $D=10\text{mm}$ ,  $\alpha=90^\circ$ )

Dans la position A, l'outil suit une ligne droite avec un engagement radial constant respectant la valeur programmée (80% du diamètre outil) et se déplace dans la direction du vecteur  $V_f$  ainsi représenté. Puis, l'outil commence à enlever plus de matière (reste de la passe précédente entre les positions B et C). Ainsi, son engagement radial instantané passe progressivement de 80% à 100% lorsqu'il est dans la position C1. Il est alors dans les mêmes conditions d'engagement qu'une opération de rainurage, c'est-à-dire complètement engagé dans la matière jusqu'à ce qu'il atteigne la position D1. Il doit alors franchir la discontinuité géométrique (le virage). Après avoir ralenti jusqu'à une vitesse nulle ( $V_{f2}$ ), la

MOCN accélère dans la direction définie par le vecteur  $V_{f2}$ . L'engagement radial instantané chute alors jusqu'à une valeur faible d'engagement (position D2). Dans le cas de la figure 53, l'engagement chute jusqu'à 50% ( $\alpha=90^\circ$ ) et une valeur inférieure à 50% dans le cas de la figure 52 (car  $\alpha < 90^\circ$ ).

L'outil vient alors de franchir le virage. Il va alors prendre de plus en plus de matière. Son engagement radial instantané va augmenter jusqu'à atteindre une valeur maximale (définie par la position E). Cela vient du fait qu'une petite partie de matière restante (de la passe précédente) n'a pas été enlevée avant le franchissement du virage par l'outil. Enfin, l'outil s'éloigne du virage et son engagement diminue jusqu'à atteindre les conditions de coupe programmées ( $a_{e\text{ prog}}$ ).

## 2.6. Application du Pilotage en puissance en fraisage [8]

### **a** *Objectif lié au High Power Milling*

L'un des objectifs en ébauche, en fraisage, est de maximiser le taux d'enlèvement matière. Des choix stratégiques concernant l'outil et les parcours permettent d'y satisfaire. Cependant, l'application de ceux-ci est directement liée au moyen utilisé. Dans le cas d'une machine-outil, l'une des principales limites actuelles est la puissance de broche. Les machines-outils sont caractérisées par leurs courbes de couple et de puissance fonction de la fréquence de rotation. Concernant le taux d'utilisation de la broche à une puissance donnée, nous retiendrons deux valeurs les puissances à S1 et S6 (puissance en continu, respectivement puissance acceptable durant des phases courtes ne dépassant pas 40% du temps d'utilisation).

L'optimisation de la production nous conduit donc à maximiser le niveau de fonctionnement de S1, sans que la puissance ne dépasse le niveau S6. On constate sur le parcours de la figure 54 des pics de puissance conséquents lors des virages.

L'objectif que l'on se donne dans cet item du SMMS du pilotage de machine est donc de définir une modification du profil de vitesse afin de pouvoir, lors des virages, minimiser les augmentations de puissance afin de maximiser l'utilisation de la broche au niveau S1.

Comparativement aux études précédentes, la modélisation de la coupe ne nécessite pas un modèle de coupe aussi pointu que pour la surveillance du bris ou plus encore de l'usure.

Comme nous pouvons le constater sur les transitoires illustrés ci-dessous, la puissance de broche varie progressivement au cours de la transition (rampe, transition entre passe, virage). Les pics d'efforts que l'on a vu lors des études sont lissés à la fois par l'inertie mécanique de la broche, mais aussi par l'asservissement de celle-ci. Le franchissement d'une zone transitoire est assez lent en comparaison de la fréquence de rotation de l'outil. Si l'on considère en plus le ralentissement machine, il faudra compter plusieurs dizaine de tours de broche au cours du phénomène étudié. Afin d'évaluer les changements de puissance, la prise en compte des grandeurs « avance instantanée » et « engagement radial » sera donc suffisante.

### **b** *Constat des fluctuations de puissance lors d'un vidage de poche*

Nous voyons sur la figure 54 le parcours d'un vidage de poche classique, la stratégie part du centre de la poche vers l'extérieur. Le parcours est de type hélicoïdale. Chaque

passé est réalisée avec un engagement radial donné. La première phase correspond à du ramping afin de prendre la profondeur de passe désirée. Durant cette phase l'outil plonge l'avant et l'arrière de l'outil usine, la puissance augmente, puis dans les phases suivantes deux se stabilisent. A chaque virage, on constate une augmentation de puissance liée à la fois au changement d'engagement radial et à la variation de vitesse.

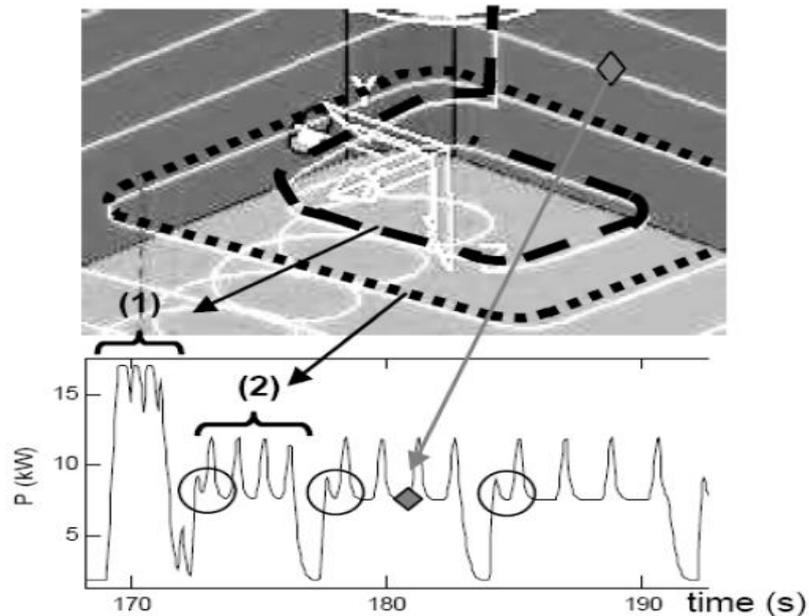


figure 54 : Puissance de broche au cours d'un vidage de poche

## c Construction d'un profil de vitesse lissant la puissance

### c.1 Mise en place du modèle de puissance

Afin d'estimer cette puissance, nous avons choisi de considérer un modèle élémentaire permettant d'estimer la puissance en fonction des paramètres de coupe. On a alors

$$\begin{aligned}
 P &= P_{cut} + P_0 \\
 &= E \cdot Q + P_0 \\
 &= E \cdot V_f \cdot e_a \cdot e_p + P_0
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 28}$$

Ou  $P_0$  représente la puissance à vide [Watt]  
 $E$  l'énergie spécifique de coupe [Watt.min/cm<sup>3</sup>].

Comme le montre Mr Benjamin Havette dans son manuscrit de thèse, ce modèle donne une estimation des plus correctes de la puissance consommée au cours de la coupe.

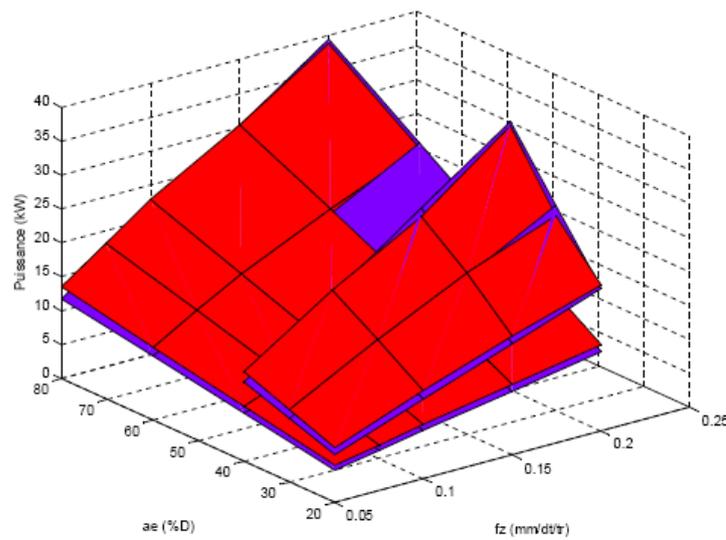


Figure 32 Comparaison modèle (en bleu) / expérimental (en rouge)

figure 55 : Comparaison du modèle (bleu) / expérimentation (rouge)

La mise en place des différentes variations cumulées, engagement et avance, nous permet d'établir le débit instantané  $Q$ , et ainsi d'en déduire la puissance.

### c.2 Conception du pilotage en puissance

Sur la figure 56, nous pouvons observer l'évolution d'engagement radial pour les deux cas, fort et faible engagements, ainsi que pour une faible ou une forte avance  $V_{f1}$  (2m/min) ou  $V_{f2}$  (10m/min). Plusieurs points sont à noter :

- le niveau de puissance : dans le cas du faible engagement, la puissance est multipliée par trois, alors qu'elle n'est augmentée que de 1,2 pour le fort engagement,
- l'impact de la vitesse : si pour  $V_{f1}$  l'effet est relativement faible sur le profil de vitesse, ce n'est pas le cas pour  $V_{f2}$ . Pour autant, on voit que la combinaison des deux paramètres limitent la montées de la puissance pour  $V_{f2}$ ,
- On peut effectuer un parallèle avec les variations de vitesses de deux machines plus ou moins véloces pour une même consigne de vitesse,

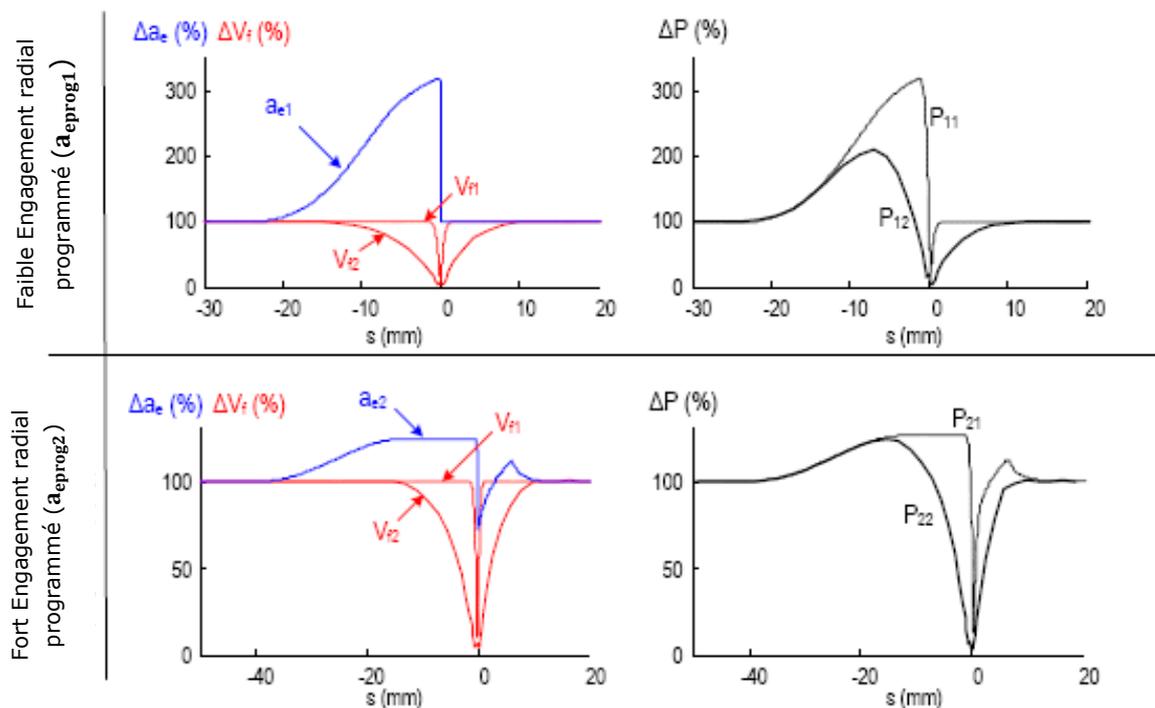


figure 56 : Variation des conditions de coupe pendant le franchissement d'un virage à angle droit ( $D = 32\text{mm}$ ,  $a_{eprog1} = 9.6\text{mm}$ ,  $a_{eprog2} = 25.6\text{mm}$ ,  $V_{f\text{ prog}} = 10\text{m/min}$ ,  $\alpha = 90^\circ$ )

Dès lors, connaissant la variation de puissance, il devient trivial d'agir sur ces éléments afin d'annuler ou, tout au moins, d'atténuer le dépassement de puissance. Il nous est impossible d'agir sur l'engagement radial, c'est la trajectoire qui nous dicte cette évolution. La modification de celle-ci n'est pas une option dans notre analyse, cependant dans la littérature, c'est l'objet de trajectoires telles que les trochoïdes. Dans notre étude, nous agirons donc sur la vitesse d'avance.

En imposant un profil de puissance constante, on obtient la vitesse optimale, en prenant la réalité physique, nous obtenons le profil optimal. La mise en place d'une telle correction nécessite un directeur de commande ayant des commandes de pilotage CN avancées. Il n'est pas pour autant possible d'implémenter exactement ce profil. Nous devons donc effectuer un compromis pour parvenir à la solution la plus proche, sans qu'elle ait pour autant un coût de mise en œuvre inapplicable industriellement. Suivant les possibilités du directeur de commande, une solution dégradée pourra être choisie, il faudra cependant vérifier le gain réel réalisé. Dans cette étude, nous avons mis en place la solution avec une commande de vitesse en spline.

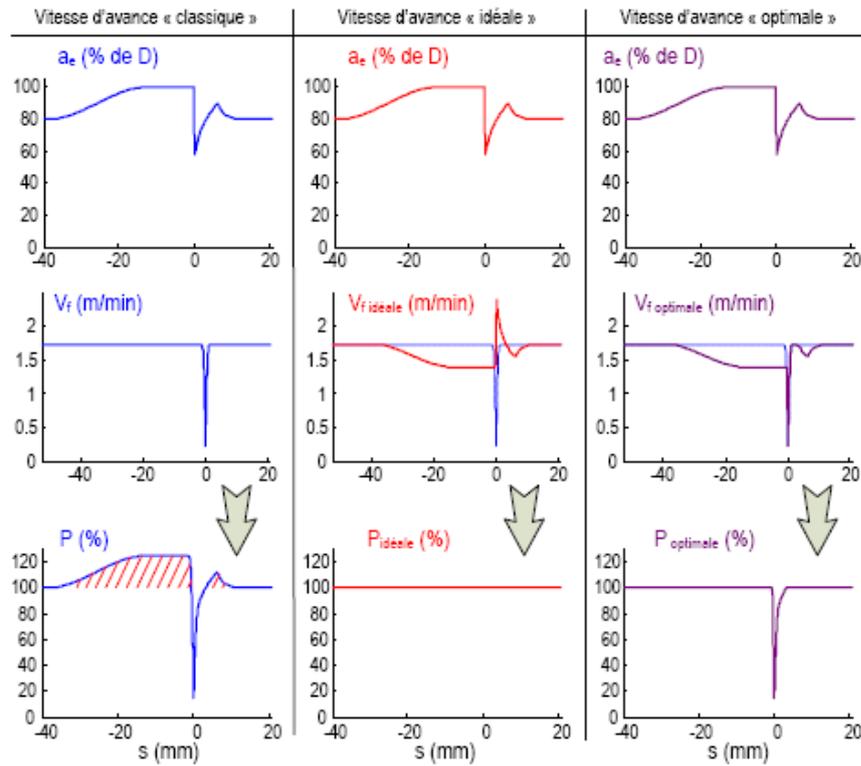


figure 57 : Profils de puissance liés à différentes vitesses d'avance lors du franchissement de virages ( $a_{e\text{ prog}} = 80\%$  -  $D = 32\text{mm}$  -  $\alpha = 90^\circ$ ) en fonction de l'abscisse curviligne

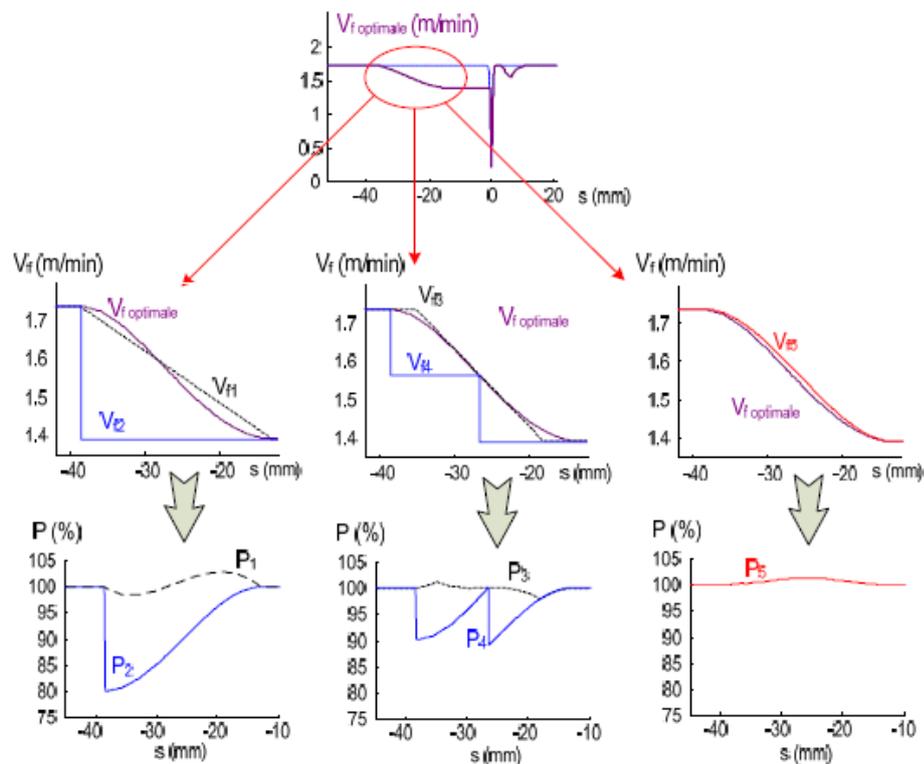


figure 58 : Comparaison de différentes stratégies de programmations de la vitesse d'avance avant le franchissement d'un virage ( $a_{e\text{ prog}} = 80\%$  -  $D = 32\text{mm}$  -  $\alpha = 90^\circ$ )

La mise en place de ces essais est satisfaisante, cependant, on constate une légère montée de la puissance lors du passage du virage. Cet écart est dû au compromis réalisé. La spline, que nous avons implanté dans le programme CN, est pilotée en deux points avec des tangentes horizontales (vitesse stable au départ et à l'arrivée).

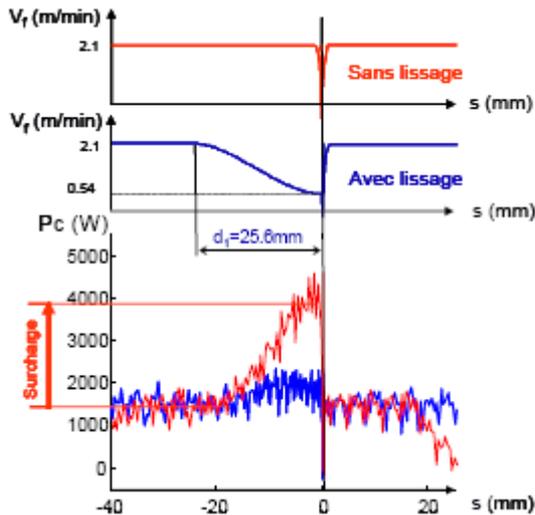


figure 59 :Impact de la modification des avances sur la puissance consommée

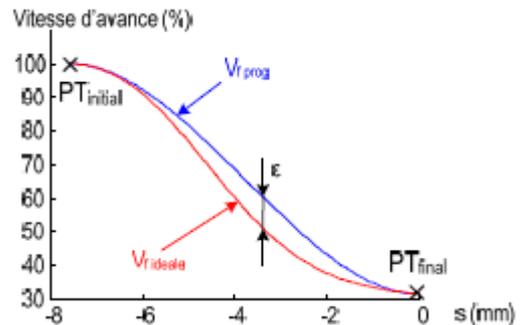


figure 60 : écart constaté entre la vitesse programmée et idéale

Benjamin Havette, dans cette étude, a envisagé une étape supplémentaire, avec l'ajout d'un nouveau point piloté. Cela permet d'améliorer encore la maîtrise du niveau de puissance mais complexifie le traitement.

#### **d Bilan du pilotage en vitesse sur la puissance**

Afin de valider ces corrections, un cas réel de vidage de poche a été envisagé. Cette poche est constituée de quatre cotés avec des angles différents. Nous avons choisi deux sections ( $a_p \times a_e$ ) constantes, soit  $\{32 \times 5\text{mm} ; 16 \times 10\text{mm}\}$ . Ceci nous permet d'envisager les deux cas d'engagement radial faible et fort. Le second cas est très limitant puisque la puissance au passage d'un virage est très fortement augmentée. Le niveau de l'avance a été optimisé afin d'atteindre la limite critique imposée par S6 soit 35kw (condition ci-dessous). Comme prévu la vitesse limite dans le second cas est beaucoup plus faible. La largeur de la poche a été choisie afin d'être un multiple des engagements radiaux.

Sans correction, on constate figure 61 les dépassements de puissance lors des virages.

- $N = 24\ 000\ trs/min, a_p = 5mm, a_e = 80\%, V_f = 12.5m/min$
- $N = 24\ 000\ trs/min, a_p = 10mm, a_e = 40\%, V_f = 6.35m/min$

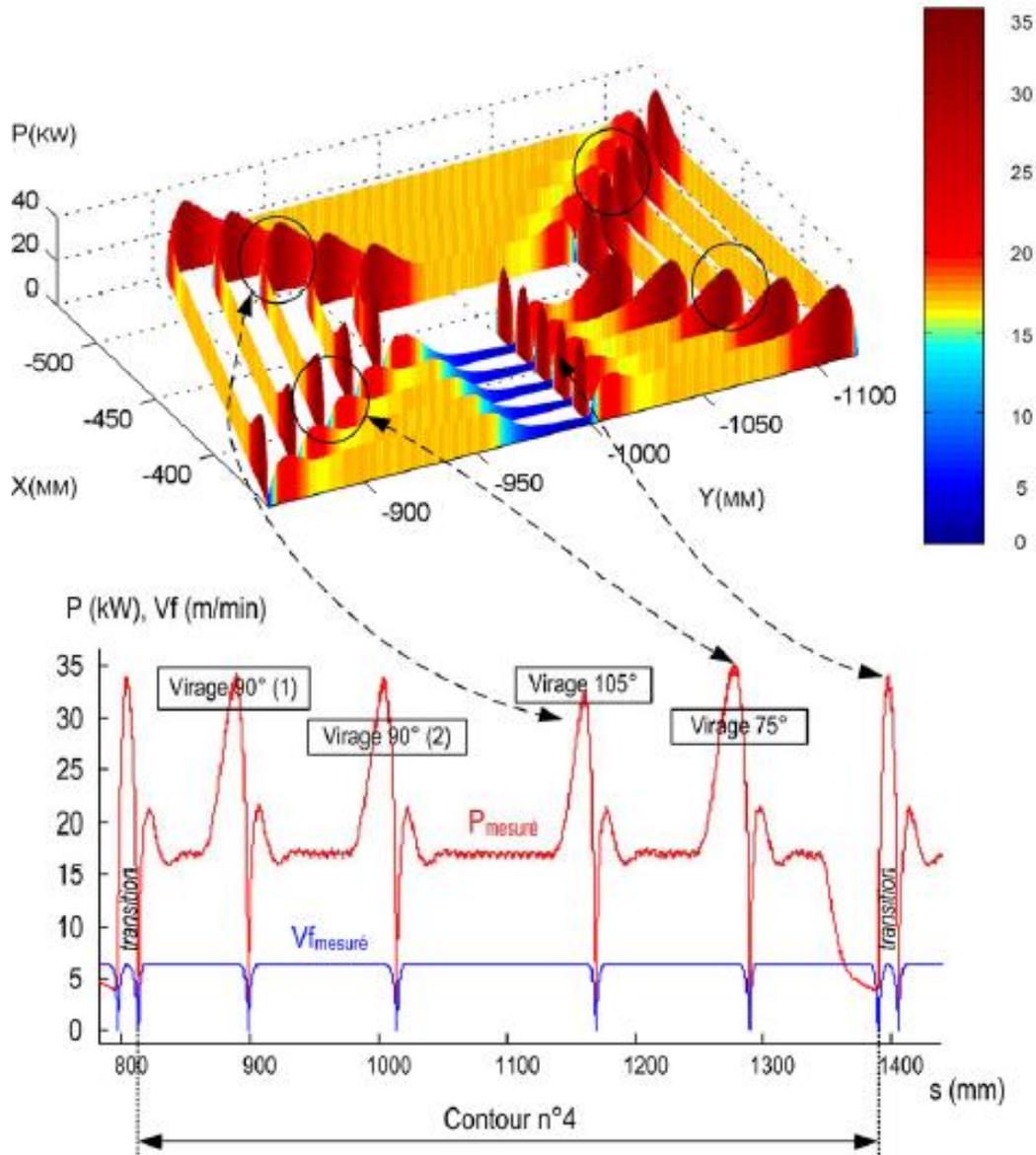


figure 61 : puissance consommée par la broche en fonction de la position de l'outil lors de l'usinage de la poche sans correction de vitesse

En appliquant la méthode décrite, nous pouvons limiter la puissance au passage des virages et donc augmenter la vitesse d'avance afin d'atteindre la limite imposée par S1 soit 30kw. Dans le second cas, pour le fort engagement radial, les gains fait sont mineurs comme attendus. En effet, en ligne droite, la puissance obtenue est proche de S1 soit 29kw. Les nouvelles conditions sont alors :

- $N = 24\ 000\ trs/min, a_p = 5mm, a_e = 80\%, V_f = 13.4m/min$
- $N = 24\ 000\ trs/min, a_p = 10mm, a_e = 40\%, V_f = 13m/min$

Notre objectif est atteint, nous avons, pour les conditions initiales, un rapport des débits de 50%. Après optimisation, l'écart entre les débits des deux conditions est de l'ordre de 3%.

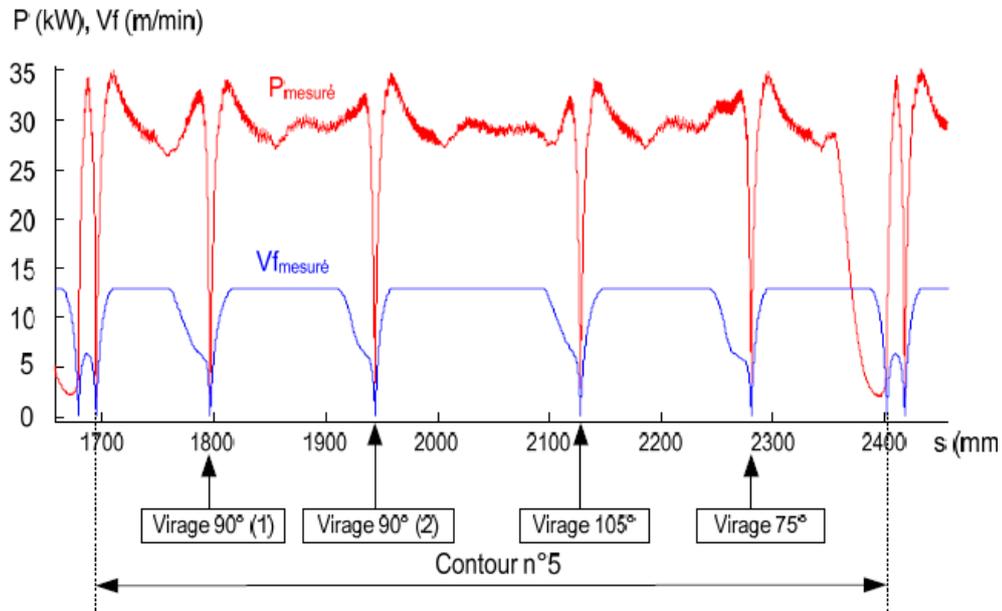


figure 62 : Puissance consommée par la broche en fonction de la position de l'outil

*Lors de l'usinage avec la correction en vitesse*

Les figure 61 et figure 62 illustrent le cas n°2, de faible engagement radial. Sur la figure 61, la puissance avant le virage est deux fois supérieure à celle de la ligne droite. Le pic de puissance après le virage est en comparaison petit et surtout non limitant. Ce n'est plus le cas après correction figure 62.

Comme nous l'avons précisé, pour construire l'exemple, la taille de la poche a été conçue afin d'être un multiple de l'engagement maximum. En effet, lors du choix du ratio de recouvrement, la dimension poche ne permet pas toujours d'obtenir le ratio maximal. Un choix intermédiaire se traduira automatiquement par une dégradation de la productivité. Sans lissage, la vitesse maximale est imposée lors du franchissement du virage par le pic de puissance et le niveau de puissance de S6. En conséquence, si préalablement l'engagement est moindre, la puissance consommée, donc la productivité dans la ligne droite, sera moindre. Si les lignes droites, comparativement aux virages, sont en forte proportion, la productivité sera diminuée d'autant. Sur la figure (figure 63), on calcule le ratio après avoir soustrait une fois le diamètre outil pour équilibrer l'engagement radial des autres passes. On peut alors voir, suivant la taille de la poche, la perte de productivité. Ici la productivité maximale est obtenue pour un ratio de 0.8 du diamètre outil. Au-delà d'une poche de trois fois le diamètre outil, on trouve un ratio qui tombe à 0.6 du diamètre outil soit 25% de perte de productivité.

Dans ce cas, le lissage permet de récupérer cette perte de productivité.

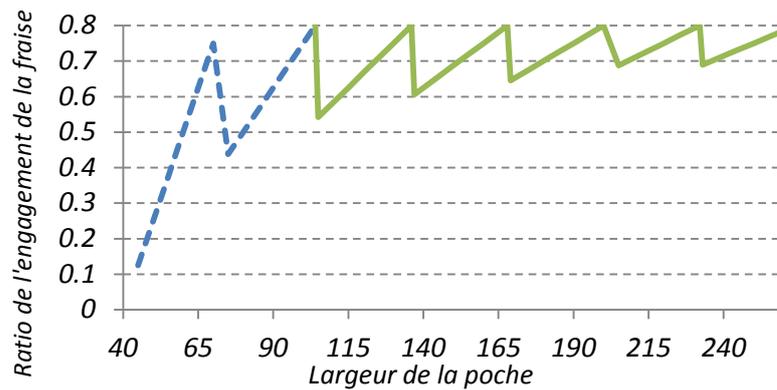


figure 63 : fluctuation du ratio de passe en fonction de la taille de la poche

### e Limitation de la méthodologie

Dans notre étude, la modélisation choisie est celle de la puissance prenant en compte les variations liées aux paramètres cinématique de coupe. Avec cette modélisation, le pic constaté après le virage n'est pas expliqué par la modélisation. En fait, l'origine de ce pic n'est pas mécanique mais électrique. A cet instant, la variation du couple est très brutale, l'asservissement de la broche réagit par pic de courant afin que la fréquence de rotation ne chute pas.

Nous pourrions sans aucun problème éliminer ce second pic en suivant le même principe, cependant actuellement ce n'est plus un critère bloquant.

Le dernier point limitant est l'aspect vibratoire. Pour les exemples pris, le niveau vibratoire pour le faible engagement est plus important, mais la profondeur de passe est doublée. Dans ce cas précis, l'augmentation des niveaux vibratoires va évoluer de pair avec l'augmentation de la vitesse d'avance. Cependant, dans la situation décrite sur la figure 63, l'engagement axial étant le même dans les différentes configurations, l'augmentation des vibrations resterait acceptable.

### f Conclusion

Classiquement, la diminution de l'engagement radial est synonyme de perte de productivité. Avec la méthodologie développée ce n'est plus le cas. Le débit volumique peut rester du même ordre qu'avec un engagement maximal.

Nous avons vu la limite du modèle mécanique choisi, la prise en compte dans la correction d'un modèle plus complexe intégrant une composante électrique permettrait de mieux estimer la puissance. Pour autant, elle ne nous permettrait aucun gain supplémentaire puisque nous parvenons déjà en ligne droite à atteindre S1.

Ici, du point de vue pilotage, l'objectif visé, à savoir lisser la puissance, est sans équivoque une réussite. Il est donc raisonnable de penser que l'on puisse définir d'autres stratégies pour gérer un critère de puissance ou d'efforts durant des phases transitoires. La notion de feature de pilotage pour le franchissement des transitoires prend alors toute sa dimension. Nous reviendrons sur cette notion lors de nos perspectives.

## 2.7. Fraisage des composites avec des meules à concrétions diamantées [9]

Nous venons, au travers de la surveillance d'usinage en fraisage et de son pilotage, d'exposer différentes modélisations nous permettant, soit d'extraire des informations sur l'état de l'outil, soit de piloter l'usinage en lui-même. Au cours de ces travaux, comme nous allons le montrer, bon nombre des hypothèses initialement faites sur l'outil vont devoir être abandonnées. Du point de vue du concept SMMS, nous allons développer une partie de l'item optimisation des paramètres opératoires. Une fois de plus, afin de comprendre et d'optimiser le processus, nous allons devoir définir de nouvelles modélisations.

### **a Objectifs issus de l'usinage avec des meules**

La problématique des fraises à concrétions diamantées est survenue dans le cadre du parachèvement de pièce composite. Cette étude a été développée dans le mémoire de thèse d'Aude Caillaud-Boudelier

Notre objectif est de répondre à la problématique du parachèvement de ces matériaux composites carbone-epoxy. Deux aspects doivent être résolus, le premier concerne le choix des paramètres opératoires et le second porte sur l'estimation des efforts. Pour le choix des paramètres opératoires, la mise en place d'une modélisation macroscopique liée à la puissance nous permet d'y répondre simplement. Le second est plus problématique sur ces pièces de grandes dimensions. Différents moyens sont envisagés dont, entre autre, le parachèvement robotisé. Dans ce cas précis, l'évaluation des efforts est primordiale afin de pouvoir garantir la qualité sur la pièce usinée. Dans la littérature aucune modélisation mésoscopique n'existe, on trouve uniquement quelques travaux sur des modélisation empirique.

Pour finir, à l'aide de l'outil ToolScan développé dans le laboratoire, nous analysons l'une des hypothèses fortes de cette partie afin d'en montrer la limite. Cet outil s'inscrit dans l'item SIMTI sur l'aspect Inspection outil et est, comme cela a déjà été dit, à l'origine du projet COMET.

### **b Mise en place d'une modélisation macroscopique de la puissance**

#### **b.1 Problématique lié à l'outil**

La problématique de l'usinage des matériaux composites, et tout particulièrement des thermo durcissable (carbone /époxy), est que la fibre est fortement abrasive. Les outils classiques carbures ont des durées de vie très réduites. On peut trouver à les remplacer par des outils PCD (Poly Cristallin Diamant), mais le coût d'exploitation de ces outils reste élevé. Tout naturellement les outils à concrétions diamantées ont pris une place importante à la fois pour leur résistance à l'usure et leur coût d'exploitation des plus raisonnables (20 à 30 fois moins cher que le PCD).

La fabrication de ces outils ne nous permet pas de connaître leur géométrie exacte. En effet, les grains de diamant déposés aléatoirement sur le corps de l'outil sont solidarisés au corps de l'outil via un dépôt métallique. En conséquence, la position, la densité et la taille des grains sont différentes d'un outil à l'autre.



figure 64 :Outil avec différente granulométrie

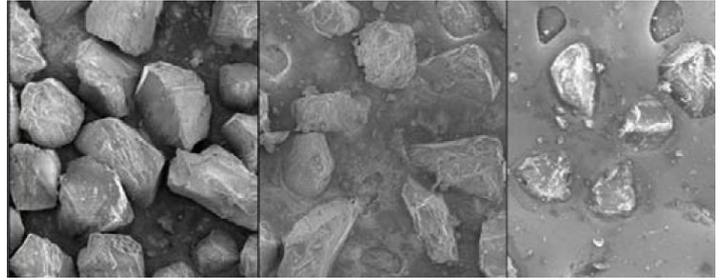


figure 65 : différent taux de sertissage et densité de grains

Dès lors, les modélisations classiques que nous avons exposé ne peuvent plus s'appliquer.

## **b.2 Exploitation d'une modélisation macroscopique de la puissance**

L'approche la plus simple est d'observer l'outil comme un tout sans prendre en compte sa géométrie. On utilise alors un modèle dit macroscopique comme précédemment dans le cas du pilotage.

$$P_c = E_{sp} \cdot Q = E_{sp} \cdot V_f \cdot a_p \cdot a_e \quad \text{Eq. 29}$$

Où  $P_c$  est la puissance de coupe (en W),  $E_{sp}$  l'énergie spécifique de coupe (en  $W \cdot \text{min} / \text{cm}^3$ ),  $V_f$  la vitesse d'avance (en  $\text{cm} / \text{min}$ ),  $a_e$  l'engagement radial (en cm),  $a_p$  l'engagement axial (en cm).

Cette approche est intéressante afin d'optimiser les paramètres opératoires et d'en définir les limites d'utilisation. On peut constater, sur le graphe suivant, l'évolution de l'énergie spécifique de coupe en fonction de l'avance. Plusieurs zones sont remarquables (figure 66), la première, où l'on constate qu'à faible vitesse, le procédé est énergivore, ce qui s'explique par des phénomènes de copeau mini. La seconde zone peut être définie comme la zone normale d'utilisation de la coupe. La troisième zone, quant à elle, devient critique de par le risque important de saturation de copeau. La saturation correspond au fait que l'espace libre entre les grains s'obture, ce qui entraîne alors des incidents catastrophiques de coupe. Afin d'optimiser le débit, il faudra néanmoins se rapprocher de la zone 3, et la limite dépendra fortement, entre autre, de la granulométrie de l'outil. Aude Caillaud-Boudelier explique dans son manuscrit de thèse ces différentes limites, et propose une méthodologie permettant d'effectuer un choix d'outils associant qualité et productivité.

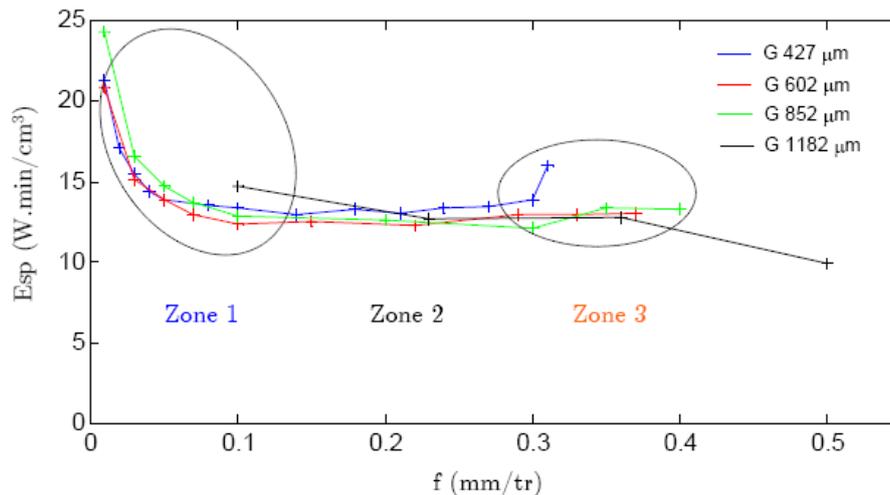


figure 66 : évolution de l'Énergie spécifique de coupe en fonction de l'avance par tour

Cette modélisation nous permet de maîtriser le détournage en associant productivité et qualité. Abordons maintenant l'estimation des efforts.

## 2.8. Construction d'une modélisation des efforts de coupe

Afin d'estimer les efforts de coupe dans les modélisations classiques des fraises, nous déterminons l'effort élémentaire et nous l'intégrons pour chaque outil en fonction de leurs positions angulaires et radiales. Il est envisageable de faire un travail similaire en scannant cet outil. Cependant, durant son cycle de vie, la géométrie évolue, des grains disparaissent ou sont cisailés. Il devient alors évident que nous ne pouvons plus appliquer cette méthodologie. L'hypothèse liée à la connaissance de la géométrie ne peut donc plus être faite.

### a Base scientifique de la modélisation

La première hypothèse forte que nous faisons est celle d'une coupe continue. En effet, on part du principe que, sur la fraise, il y a une certaine densité de grains qui travaillent comme nous le faisons pour l'abrasion. On peut alors l'assimiler à un axe frottant sur la surface. Le choix de cette modélisation rend donc les efforts invariants à la rotation de l'outil, seul l'engagement radial est important. Ces outils sont, dans notre application, dédiés à l'usinage des composites (matériaux hétérogènes), même s'ils peuvent usiner d'autres matériaux tel que la céramique (matériaux homogènes).

La seconde hypothèse concerne donc le matériau : l'hypothèse faite est que le coefficient spécifique de coupe est fonction de l'orientation de la coupe par rapport à la fibre.

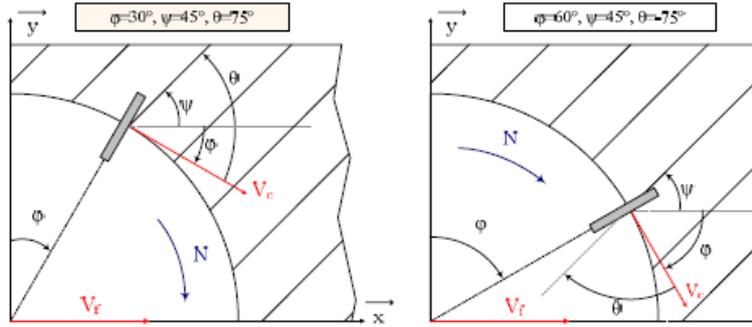


figure 67 : Paramétrage de l'angle  $\theta$  : positif à gauche et négatif à droite

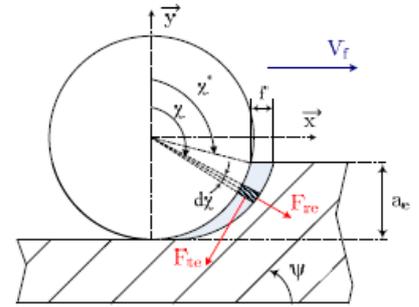


figure 68 : Discrétisation de l'engagemnt outil

Comme on le voit sur la figure 67, l'angle  $\theta$  entre la vitesse de coupe et l'orientation de la fibre évolue suivant le point considéré avec l'angle  $\phi$ , par contre l'angle  $\psi$ , lui, reste constant par rapport à la direction de l'avance, d'où une relation entre ces trois angles. Le modèle d'effort s'écrit alors :

$$\begin{cases} F_{te} = \int_{\chi^*}^{\pi} K'_T(\theta) \cdot a_p \cdot f \cdot \sin(\chi) d\chi \\ F_{re} = \int_{\chi^*}^{\pi} K'_R(\theta) \cdot a_p \cdot f \cdot \sin(\chi) d\chi \end{cases} \quad \text{Eq. 30}$$

Aude Caillaud-Boudelier établit une relation entre le coefficient spécifique décrit ci-dessus et celui plus classiquement utilisé avec des outils à plaquette. Pour ce faire, elle calcule le travail effectué par ces deux outils au cours d'une révolution, statuant qu'il doit être identique. On obtient la relation suivante :

$$K'_T(\theta) = \frac{K_T(\theta)}{2\pi} \quad \text{Eq. 31}$$

Ce modèle étant proposé, on utilise le principe de superposition généralement utilisé et appliqué par Sheikh-Ahmad [26] pour écrire :

$$\begin{bmatrix} F_f \\ F_n \end{bmatrix} = \frac{f}{2\pi} \cdot \sum_{i=1}^m n_{\psi_i} \cdot e_i \cdot \int_{\chi^*}^{\pi} \sin(\chi) \cdot \begin{bmatrix} \cos \chi & \sin \chi \\ -\sin \chi & \cos \chi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_t(\theta) \\ K_r(\theta) \end{bmatrix} d\chi \quad \text{Eq. 32}$$

Avec

- $m$  : le nombre d'orientation de pli,
- $n_{\psi_i}$  : le nombre de pli d'orientation  $\psi_i$ ,
- $e_i$  : l'épaisseur du pli,
- $F_f$  : effort dans la direction des avances,
- $F_n$  : effort normale à l'avance,

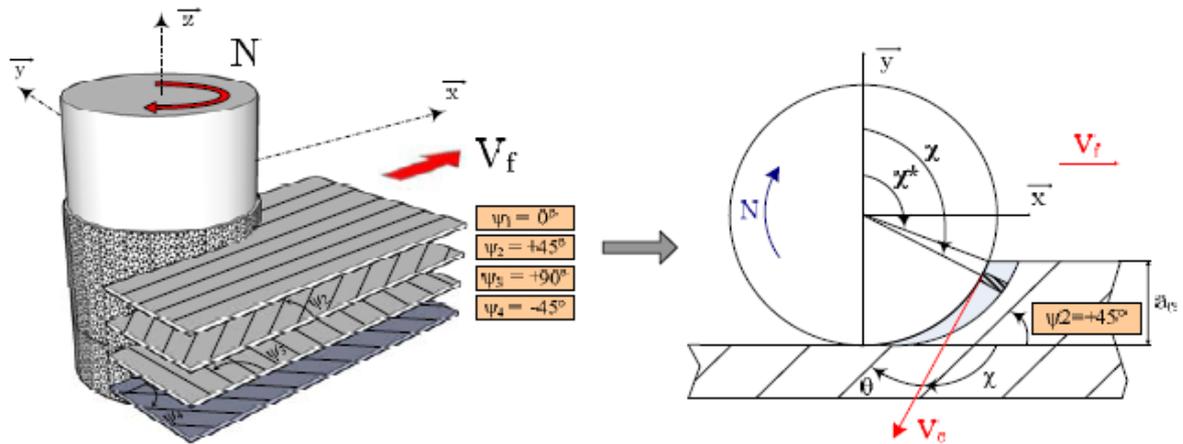


figure 69 : Paramétrage pour le stratifié multidirectionnel

L'hypothèse principale réalisée dans le principe de superpositions ici est que le liant entre chaque orientation des plis composites contribue aux efforts de manière négligeable.

Nous venons d'établir un modèle d'effort permettant de calculer les efforts dans le plan de coupe en fonction du matériau. Concernant celui-ci, nous avons fait l'hypothèse que les coefficients spécifiques de coupe sont constants pour un l'angle  $\theta$ . Il nous reste donc à établir dans quelle mesure ceux-ci évoluent en fonction de ce dernier.

#### **b Modélisation exploratoire des coefficients spécifiques en fonction de $\theta$**

Des études similaires ont été menées avec des outils PCD et non avec des meules à concrétions diamantées. Les modèles sont généralement des régressions polynomiales fonction de  $\theta$  et de  $h$  l'épaisseur de copeau.

Procédons donc par étape, observons tout d'abord l'évolution de ces coefficients puis nous pourrons construire cette modélisation.

Dans la démarche que nous avons poursuivie avec Aude Caillaud-Boudelier, notre première exploration de ces coefficients a été réalisée en minimisant les hypothèses quant à l'évolution de ceux-ci. Nous sommes partis sur un modèle simple, constant, par morceaux.

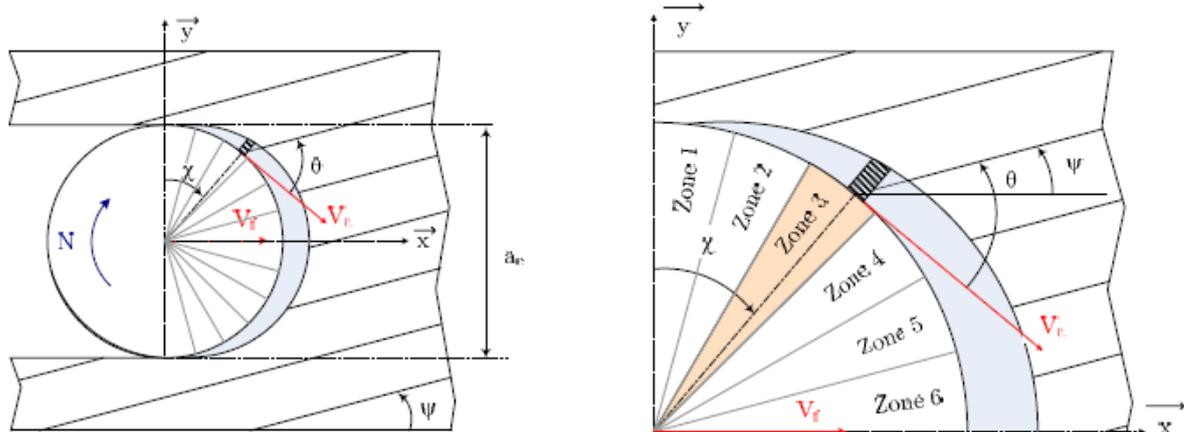


figure 70 : Principe du modèle par « palier » avec un nombre de 12 secteurs

Partant de ce modèle élémentaire, nous avons pu construire une expérimentation permettant le découplage des différentes constantes. On pourra remarquer sur le graphe ci-dessous les différents découpages de zones (de 1 à 12 zones constantes). La déduction de ces différents modèles a pour origine la mesure des efforts. En effet, au vue des hypothèses émises pour chaque engagement et orientation de l'avance par rapport aux plis, nous obtenons un couple constant d'efforts  $F_f$  et  $F_n$ .

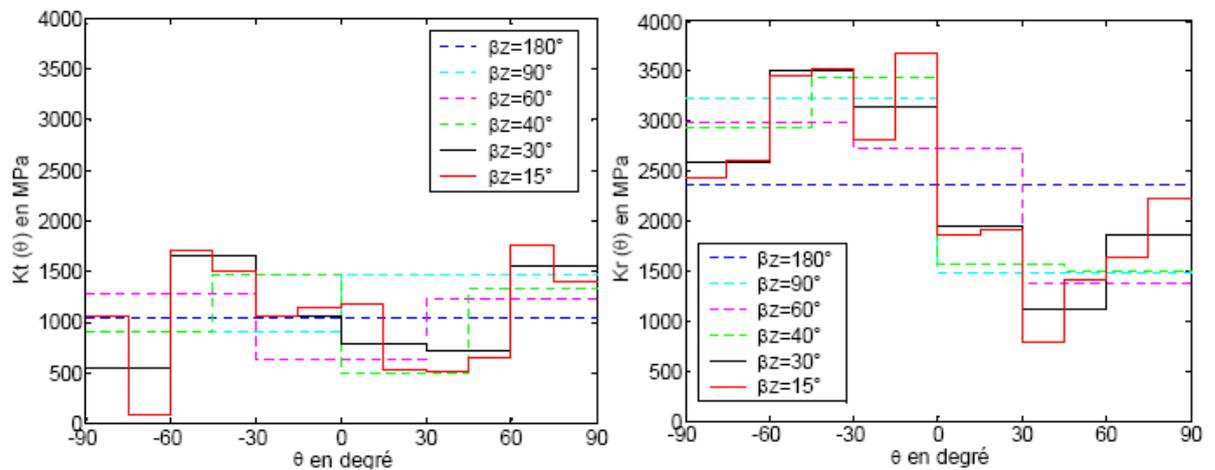


figure 71 :  $K_t(\theta)$  (à gauche) et  $K_r(\theta)$  (à droite) identifiés pour le modèle « palier »

On peut, bien évidemment, reboucler en régénérant les efforts à partir des modèles identifiés. Sur la figure 71, la première constatation faite est la nécessité de prendre en compte l'orientation des fibres dans l'estimation des efforts. Tous les essais confondus, les variations liées à l'orientation sont de l'ordre de 15 à 30% de l'amplitude globale des essais.

La représentation choisie est élémentaire et nous permet de mettre en place les bases d'une réflexion pour construire une modélisation. Cette construction doit satisfaire à plusieurs critères :

- Elle doit permettre une représentation des efforts la plus proche de l'expérimentation,
- Elle nécessite un nombre d'essais réduit pour son identification,
- Elle doit être robuste,
- Et enfin, elle doit avoir un sens physique afin de permettre une interprétation des phénomènes mis en jeu ...

Bien évidemment, toute la difficulté consiste en la gestion de ce compromis. Les critères d'évaluations de la qualité de la modélisation dépendent donc directement des critères qui nous permettront d'effectuer ce choix.

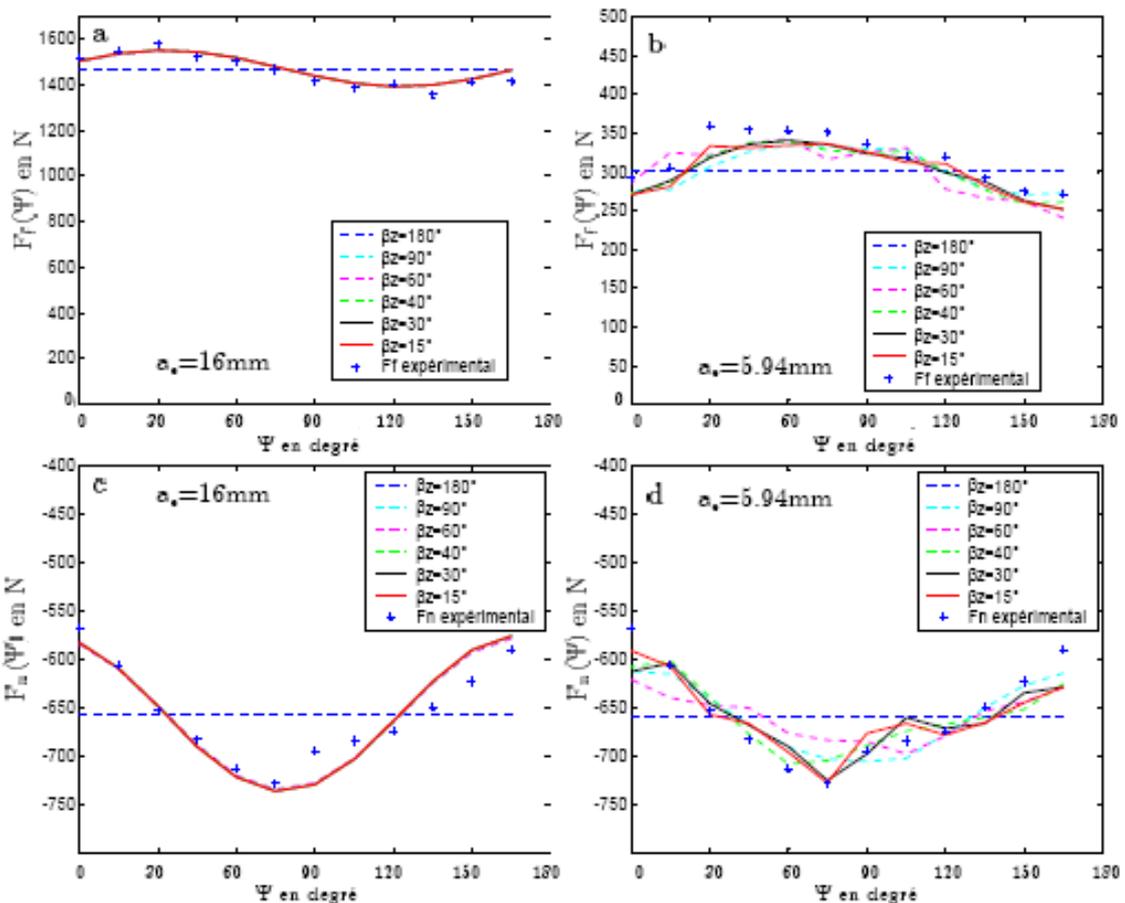


figure 72 : Comparaison entre les efforts d'avance et les efforts normaux expérimentaux et simulés

Le choix des critères doit satisfaire à notre objectif. Ici, nous souhaitons avoir une estimation des efforts la plus fine possible. Cet objectif est en partie lié à l'application robotique envisagée. Nos critères n'observent donc pas les coefficients spécifiques de coupe identifiés mais bien les efforts régénérés avec ceux-ci.

Le premier critère défini est la construction d'un intervalle de tolérance nous permettant d'évaluer la précision de notre modèle. Le second critère est l'analyse du rapport

signal/bruit pour traduire la robustesse de celui-ci. Le troisième est un indice purement mathématique qui est le coefficient de corrélation entre notre modèle et les résultats d'expérimentation.

Précisons les deux premiers critères.

## **c Critère de qualité**

### **c.1 Intervalle de tolérance**

Dans le cas d'un engagement faible ou fort, les efforts vont varier de manière substantielle. Lorsque les efforts diminuent, l'écart en newton diminue aussi. Le critère ne peut donc être satisfaisant en considérant uniquement l'amplitude de l'erreur. C'est donc l'erreur relative qui sera ici utilisée.

$$\varepsilon_r(\psi) = \frac{|F_{\text{expérimental}}(\psi) - F_{\text{simulé}}(\psi)|}{F_{\text{simulé}}(\psi)} \quad \text{Eq. 33}$$

Dans cette évaluation, nous utilisons des valeurs expérimentales exposées à l'acquisition de valeurs aberrantes liées aux processus d'acquisition du système. Afin d'être plus robustes dans l'établissement de cette valeur, nous utiliserons un critère statistique de ces données qui est l'écart type. On peut alors considérer l'intervalle de tolérance défini de la façon suivante :

$$IT = \pm 2. \sigma_{\varepsilon_r} \quad \text{Eq. 34}$$

$$\sigma_{\varepsilon_r} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x(\varepsilon_r(\psi) - \overline{\varepsilon_r(\psi)})^2}{n}} \quad \text{Eq. 35}$$

Avec  $n$  le nombre d'essais pris en compte, et  $\overline{\varepsilon_r(\psi)}$  la moyenne des erreurs relatives.

### **c.2 Robustesse du modèle**

La robustesse est observée via le rapport signal sur bruit tel que utilisé par Pillet [27],

$$S/N = 20. \log\left(\frac{1}{\varepsilon_{rms}}\right) \quad \text{Eq. 36}$$

Où  $\varepsilon_{rms}$  est la valeur efficace de l'erreur

$$\varepsilon_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_{\text{expérimental}}(\psi) - F_{\text{simulé}}(\psi))^2}{n}} \quad \text{Eq. 37}$$

#### **d Analyse des résultats du modèle par palier**

Ces trois critères ont été appliqués aux différents modèles par palier. Comme on peut s'y attendre, les critères nous indiquent bien que plus le nombre de paliers est élevé, meilleur est le modèle. L'intervalle de tolérance, dans le cas d'une considération de matériaux homogènes (valeur moyenne), nous conduit à des erreurs d'estimation des efforts jusqu'à 20%. Dans l'hypothèse d'une discrétisation en 12 paliers, cette erreur est réduite à 6%.

Si, pour l'estimation des efforts, un modèle précis à 6% est raisonnable, le nombre d'essais pour le définir est assez important. Nous allons donc poursuivre en proposant des modèles sans palier.

#### **e Choix de modèles de représentation des coefficients spécifiques de coupe**

Dans la littérature sur la modélisation des efforts de coupe, on trouve principalement des fonctions polynômes de  $\theta$  et de  $h(\theta)$  l'épaisseur de copeau. Ces modélisations concernent principalement des outils PCD et donc  $h(\theta)$  a un sens dans ces modélisations. Comme nous l'avons montré précédemment, nous avons, pour les fraises à concrétions diamantées, construit un modèle de coupe continu. Nous chercherons alors à établir un modèle polynomiale uniquement fonction de  $\theta$ .

Au vu de la forme du signal, nous avons mis en concurrence un modèle sinus.

Dans cette modélisation, l'un des aspects primordial est l'orientation de la fibre par rapport à l'outil. Le domaine d'étude est de fait borné et cyclique. Il faut donc sur ce domaine, établir un lien entre les ordonnées et les tangentes du début et de la fin de celui-ci. Avec les modèles polynomiaux, l'ensemble des scénarii a été envisagé (discontinuité et ou continuité C0 C1 et C2).

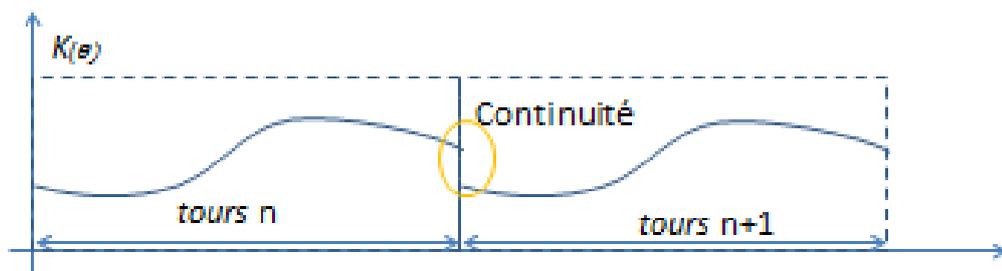


figure 73 : Notion de continuité sur le domaine de  $K(\theta)$

On retrouvera, décrit ci-après, les différentes étapes d'identification et de comparaison. Ce que l'on peut retenir de ces investigations sont les points suivants :

- Le modèle sinus permet de modéliser le phénomène de manière satisfaisante avec uniquement trois paramètres par coefficient spécifique de coupe (niveau moyen des coefficients spécifiques de coupe, amplitude du sinus et déphasage). Cette approche permet la linéarisation du système, ce qui rend l'identification plus robuste. Le niveau de précision ainsi que la corrélation sont identiques aux meilleurs résultats obtenus avec les polynômes. Seule la robustesse est moins élevée mais reste néanmoins plus qu'acceptable.

- Pour ce qui est des modèles polynomiaux, les meilleurs résultats sont obtenus pour des polynômes de degré 5 ou 6 (5 à 6 paramètres à identifier par coefficient spécifique de coupe). Cependant, on constate aux bornes du domaine des valeurs de coefficients spécifiques qui peuvent être négatives, ce qui est difficilement explicable.

		sinus	P=5	P=6
IT %	Ff	20.74	26.69	20.83
	Fn	44.97	60.86	44.99
S/N	Ff	-34.2	-33.9	-33.8
	Fn	-32.5	-32.5	-32.5
corrélation	Ff	0.99	0.99	0.99
	Fn	0.99	0.99	0.99

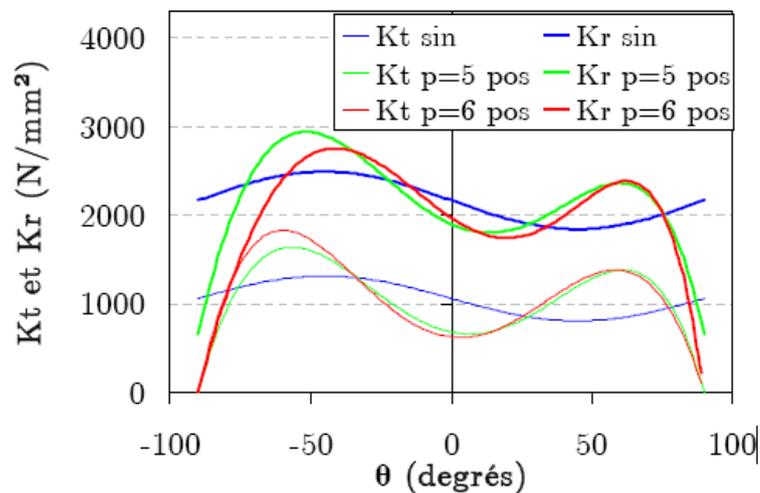


figure 74: évolution des modèles sinus et polynomiaux des coefficients spécifiques de coupe

Il est remarquable de constater une telle différence suivant les modèles pour des écarts somme toute aussi faibles entre les modèles sur la prédiction des efforts. A ce niveau de l'identification, les résultats obtenus ne sont pas meilleurs voire moins bon que la discrétisation en 12 paliers initialement faite.

Au vu des résultats, il nous faut reconsidérer les chemins liés à nos investigations. Deux voies s'offrent à nous. La première consiste à complexifier le modèle polynomiale au dépend du sens physique. La seconde est de conserver un sens physique et de reconsidérer les hypothèses faites.

Quatre hypothèses principales ont été faites :

- La première concerne le principe de superposition : les efforts ne sont pas dus à l'interstice entre les couches,
- La seconde porte sur les coefficients spécifiques de coupe dépendant de l'orientation de la fibre,

- La troisième concerne l'utilisation d'un modèle linéaire de la coupe,
- Enfin l'hypothèse la plus importante : la coupe est continue (contact permanent de l'outil et la pièce).

La première est couramment acceptée, la résistance des résines étant bien moindre en comparaison de celle des fibres, nous n'approfondirons pas cet aspect. La seconde hypothèse a été vérifiée à l'aide du modèle par palier.

Approfondissons les deux dernières. En effet, pour ce qui est de la troisième, le modèle mis en place fait l'hypothèse d'une évolution linéaire de l'épaisseur de copeau, or nous savons que cela est faux pour les outils à dents. Quant à la dernière, afin de valider la coupe continue, nous inspecterons les outils utilisés.

### **f** **Modèle associé à l'épaisseur de copeau**

En effet, en écrivant l'équation suivante :

$$F_{te}(\psi) = K_t(\theta) \cdot a_p \cdot h_c \quad \text{Eq. 38}$$

Quelque soit le modèle de  $K_t(\theta)$ , on fait l'hypothèse d'un effort directement proportionnel à l'épaisseur de copeau.

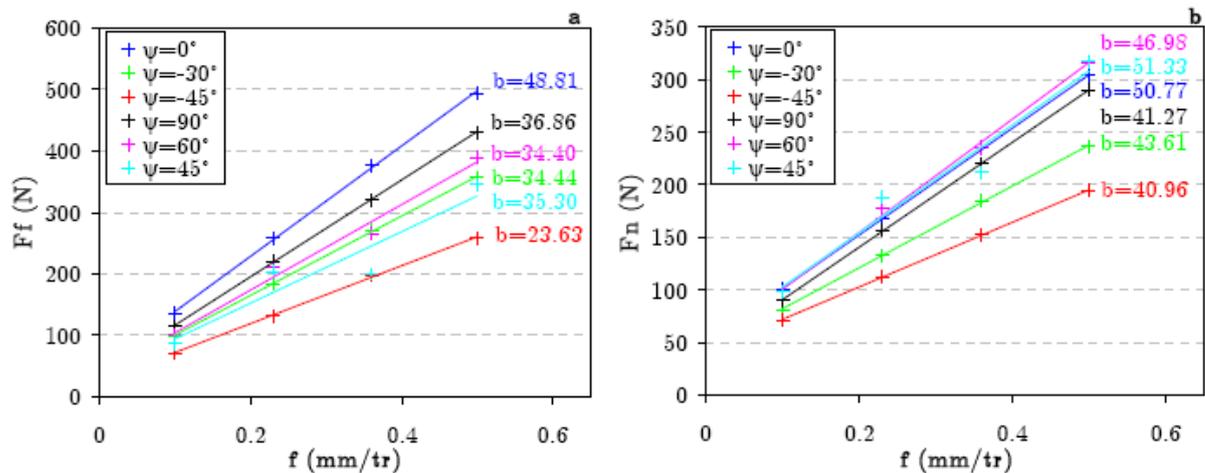


figure 75 : Effort d'avance  $F_f$  et effort normal  $F_n$  en fonction de l'avance par tour

Pour un  $a_e$  partiel, on constate l'inexactitude de ce modèle. En intégrant un modèle affine pour l'épaisseur de copeau, on améliore nettement notre estimation des efforts.

$$F_{te}(\psi) = K_t(\theta) \cdot a_p \cdot (h_c + h^*) \quad \text{Eq. 39}$$

Le modèle précédemment défini pour les coefficients spécifiques de coupe permet alors une estimation des efforts de coupe plus acceptable.

Afin d'illustrer ceci, observons la variation des efforts en fonction de  $\psi$  (orientation du fibrage par rapport à l'avance) ainsi que l'adéquation des efforts prenant en compte la constante du modèle affine de l'épaisseur de copeau.

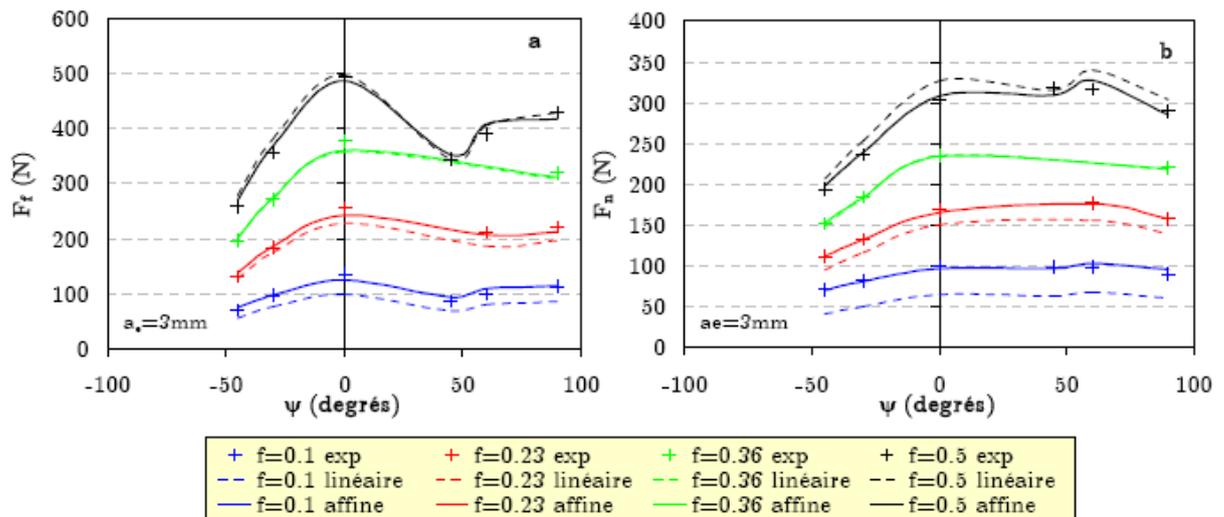


figure 76 : Comparaison des modèles d'effort avec et sans correction de l'épaisseur de copeau et de l'expérimentation

		Ae total	Ae partiel	globale
IT %	Ff	4.45	19.84	14.97
	Fn	10.68	28.58	23.83
S/N	Ff	-30.4	-29.4	-29.9
	Fn	-29.9	-24.7	-27.9
R	Ff	0.99	0.99	0.99
	Fn	0.99	0.99	0.99

Tableau 5 : résultats liés à la prise en compte d'un modèle affine dans la modélisation

Tous les essais confondus, l'ordre de grandeur des erreurs d'estimations est de  $\pm 60N$  (sur 500N) dans la direction des efforts d'avance et de  $\pm 50N$  (sur 350N) dans la direction normale aux efforts d'avances.

### **g Hypothèse liée à la coupe continue et Scan d'outil**

Avant d'explorer cette hypothèse rappelons pourquoi celle-ci a été faite. La modélisation classique présentée précédemment nécessite la connaissance de la position angulaire et radiale de chacun des éléments coupants. Dans le cas d'une fraise à concrétions diamantées, cette donnée n'est pas capitalisable sur une même famille d'outils, elle varie de manière aléatoire. De plus, pour un outil, cette répartition évolue au cours de sa vie.

Afin d'étudier ces outils, un procédé de scanning d'outil a été initié au cours du projet Alu Composite, puis mis au point et perfectionné dans le cadre de la thèse de Caillaud-Boudelier. Le scanning des outils est réalisé simplement par un mouvement de translation et de rotation de l'outil devant un laser. Il suffit ensuite de reconstruire l'outil ainsi numérisé. Si la géométrie n'est pas parfaite du point de vue des métrologues, elle permet

d'avoir une image rapide au pied de la machine en quelques minutes. Cette donnée intègre à la fois la géométrie de l'outil mais aussi le faux rond de l'outil.

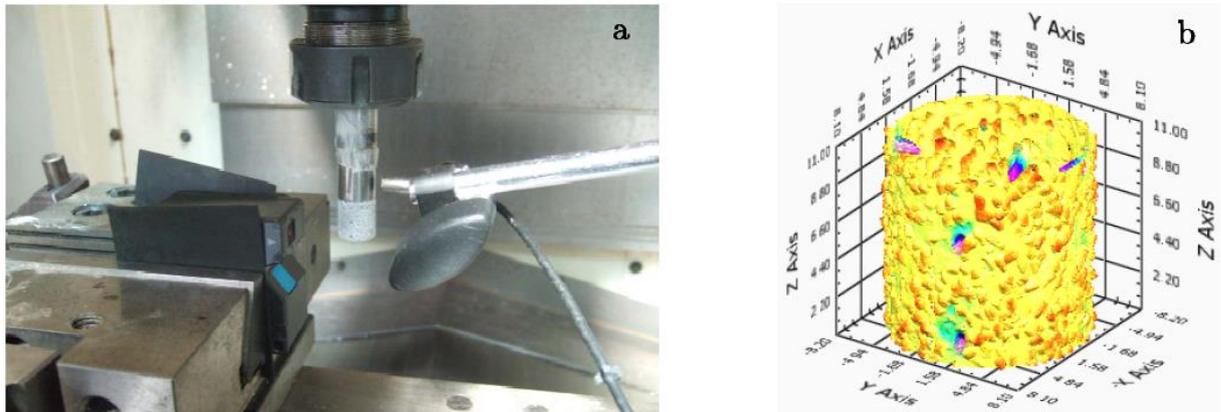


Fig. 77 : principe du scanning de meule

La modélisation du fraisage que nous avons mis en place prend en compte la position angulaire des dents, et les décalages radiaux potentiels. La cinématique de coupe de l'outil meule est la même que pour une fraise, les déplacements sont imposés. Observons dans le graphique suivant une coupe de la meule à une altitude Z donnée.

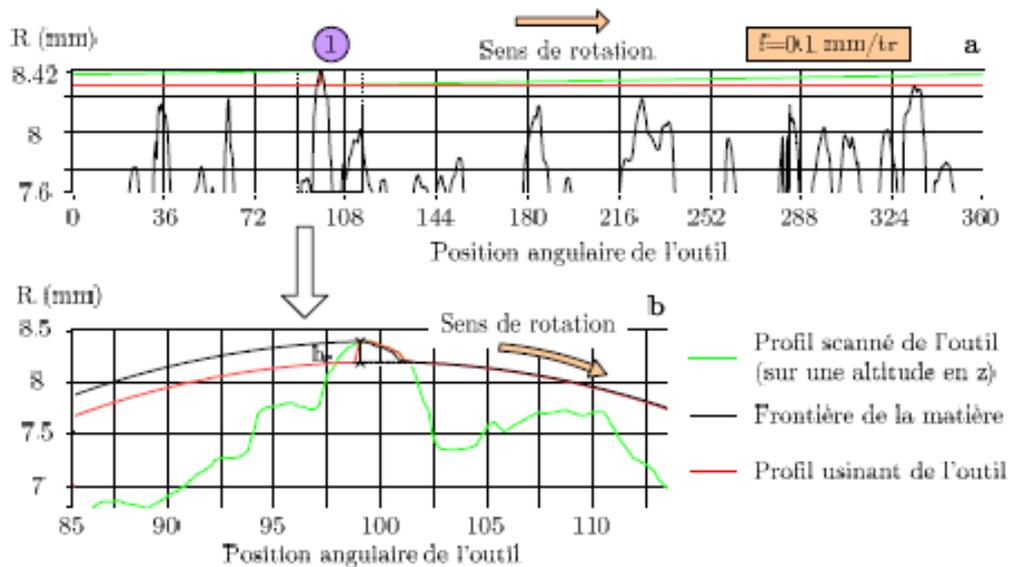


figure 78 : (a) identification des grains, outil n°5 à  $f=0.1\text{mm/tr}$   
(b) zoom sur le grain usinant

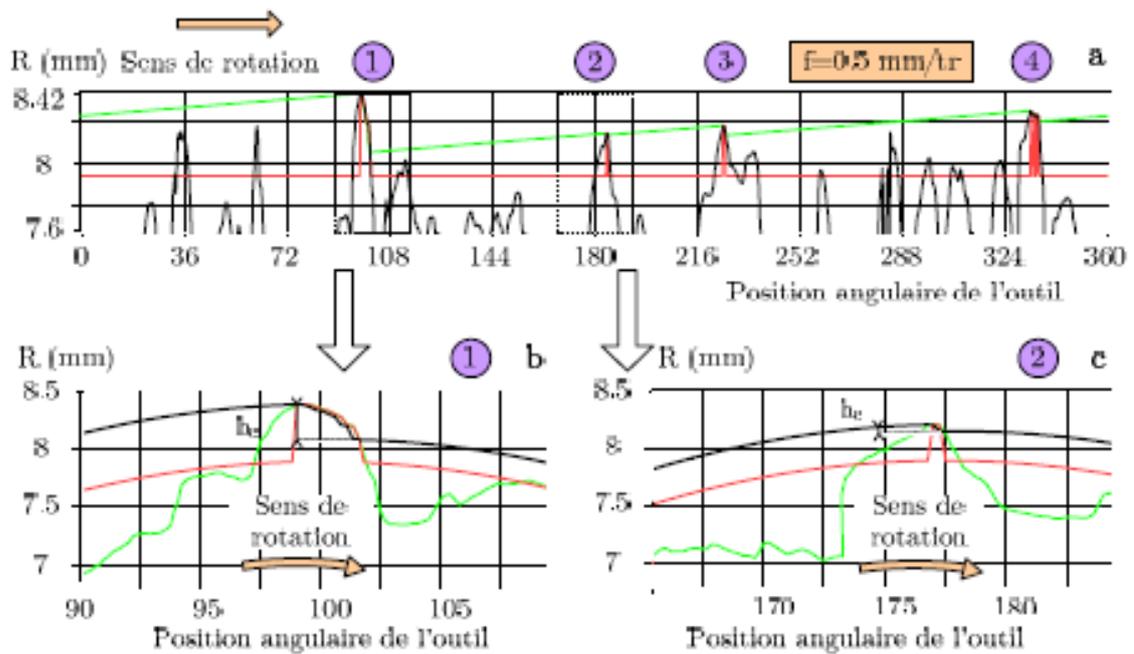


figure 79 : (a) identification des grains, outil n°5 à  $f=0.5\text{mm/tr}$   
(b) zoom sur le grain usinant

Sur ce profil, nous avons envisagé deux avances par tours ( $0.1\text{mm/tr}$ ,  $0.5\text{mm/tr}$ ). On constate que, suivant l'avance, le nombre de grains en prise évolue, un grain dans le premier cas et quatre dans le second. La position angulaire est variable ainsi que l'altitude des grains, ce qui nous donne des épaisseurs de copeau différentes pour chaque grain. De plus, à chaque altitude, cette répartition peut être différente.

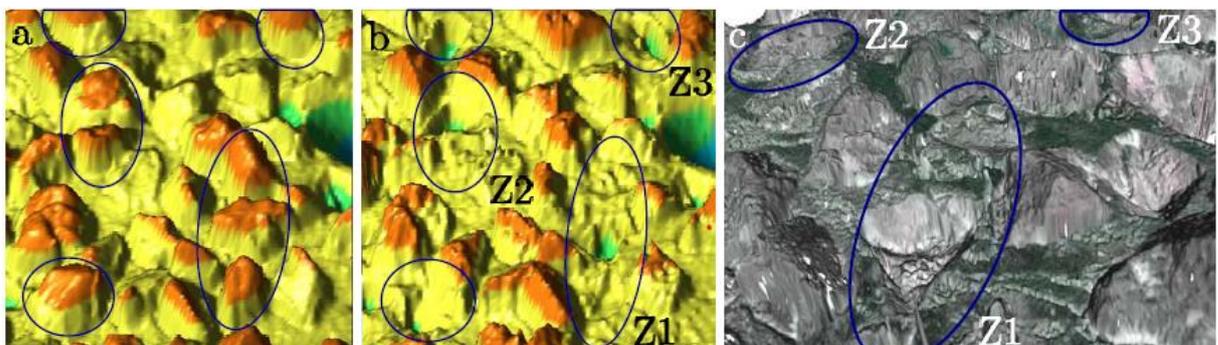


figure 80 : Arrachement de grain sur les deux premières vignettes avec le toolscan sur la dernière avec le microscope confocal

Si on observe le mécanisme d'usure de ces outils, deux phénomènes sont prépondérants, le clivage (le grain se brise) offrant ainsi de nouvelles zones de coupe et l'arrachage (le grain est délogé). Dans les deux cas, le grain en prise subit un recul qui peut l'amener à ne plus être en contact avec la matière. Dès lors, une nouvelle répartition des dents entre en jeu. Comme en usinage avec une fraise, le grain suivant voit l'épaisseur de copeau subitement augmenter, ou un nouveau grain entre en jeu et reprend en partie cette épaisseur de copeau. Ce phénomène est loin d'être borné à la fin de vie de l'outil, la disparition d'un grain ne signifie pas en soi la fin de vie de l'outil. Dans la vie de ces outils,

nous pouvons même définir trois phases : le rodage, parmi les grains exposés, les plus fragiles clivent alors que d'autres sont descellés. Vient ensuite une phase stable où le diamètre de l'outil évolue doucement, pour enfin arriver à la fin de vie et souvent une dégradation rapide de la meule.

On voit donc qu'il est illusoire d'obtenir des résultats plus fins sur ces outils sans la prise en compte de la géométrie de l'outil. La variabilité de la géométrie de l'outil et son évolution dans le temps rendent impossibles l'obtention d'un modèle prédictif exact. Le calcul des efforts en prenant en compte la géométrie exacte de l'outil confirme bien l'écart existant. L'une des pistes d'évolution pourrait être, tout en conservant ce modèle de coupe continue, d'intégrer l'existence d'un faux rond. Nous serions alors plus proche de la réalité des efforts, mais une fois de plus ceci n'est pas prévisible.

A ce point de notre étude, nous sommes conscients de l'inexactitude du modèle, mais à l'échelle de ce que nous souhaitons observer, cette hypothèse est acceptable. Nous considérerons donc que la modélisation des efforts avec le modèle sinus et la fonction affine des efforts est suffisante pour identifier les niveaux des efforts.

## **h Conclusion**

Au cours de ces travaux, nous avons mis en œuvre deux modélisations pour un outil non conventionnel, les meules à concrétions diamantées, dans un matériau de plus en plus présent, le composite. La première est couramment utilisée en fraisage. Elle est macroscopique et fait intervenir l'énergie spécifique de coupe. Elle permet de mettre en évidence les limites de ces outils ainsi que le domaine exploitable. À l'aide de la seconde, on réalise une évaluation des efforts. Pour pouvoir y parvenir, nous avons fait quatre hypothèses :

- La première a été admise : principe de superposition,
- La seconde a été confirmée par nos essais : évolution des coefficients spécifiques de coupe en fonction de l'orientation des fibres,
- Pour la troisième, nous avons montré la nécessité de l'utilisation d'un modèle affine pour obtenir une estimation correcte des efforts et tout particulièrement pour l'effort radial,
- Enfin, l'hypothèse de coupe continue : Ce compromis est nécessaire et suffisant pour l'estimation des efforts.

L'identification de ce modèle est réalisable avec un minimum de 4 essais.

Ces travaux contribuent à l'enrichissement du concept SMMS dans trois volets : l'optimisation de paramètres opératoires (modélisation de la puissance), le pilotage de processus (modèle d'effort) et enfin avec le perfectionnement du ToolScan le module SIMTI (Surveillance Intermittent Manufacturing & Tool Inspection).

## **2.9. Synthèse des travaux en fraisage**

Cette première partie s'est concentrée sur l'exploitation de machine rigide et tout particulièrement sur le fraisage. Dans une première étape, nous avons expliqué les différentes hypothèses couramment réalisées en fraisage, ainsi que leurs limites.

Par la suite, nous avons expliqué la méthodologie utilisée de nos travaux. Notre approche est d'identifier une modélisation la plus adéquate afin de satisfaire aux objectifs attendus. Dans un second temps, nous pouvons réaliser un recalage de celui-ci sur la base de signaux réels. Les valeurs obtenues nous permettent alors soit d'établir un diagnostic soit d'effectuer des choix liés aux pilotages du procédé.

Le premier sujet traite de la surveillance d'usinage. Dans ce cas l'identification s'appuie sur un modèle complexe du fraisage, le traitement ne nécessitant pas une grande vitesse d'exécution puisque le phénomène évolue lentement. Un critère est validé et permet d'établir un diagnostic sur l'état d'usure de chacune des dents de la fraise et ceci au travers d'une interprétation des efforts.

Le second sujet traite du bris d'outil. A l'inverse, du cas d'étude précédent le temps de traitement est une donnée cruciale. La notion de robustesse est dans ce cas primordiale. Afin de satisfaire à ces contraintes, nous construisons un critère basé sur cette modélisation est permettant un traitement ultra rapide. De plus, nous changeons de paradigme concernant la surveillance de bris, nous ne cherchons à détecter un événement critique au risque de le rater, mais le critère mis en place traduit un état de l'outil. Ce critère est mis en œuvre et permet à l'instar des autres coefficients identifiés dans la littérature, de réaliser un diagnostic sûr et robuste.

Le troisième sujet abordé concerne le pilotage processus afin d'optimiser le high power Milling. Nous cherchons à maîtriser les dépassements de puissances qui surviennent principalement au cours des transitoires. La modélisation choisie est ici macroscopique, en effet l'évolution de la puissance se fait sur de nombreux tours de broche, le détail de l'évolution des efforts durant une révolution n'est pas ici pertinent. Le critère de pilotage est l'avance de l'outil, l'étude se focalise sur les virages qui combinent à la fois des changements d'engagement et de vitesse d'avance. La construction d'un profil de vitesse idéal permet de gommer ces surpuissances. On montre que les gains de productivité sont majeurs dans le cas de faible engagement radial pour être quasiment nul à l'engagement maximal.

Les deux dernières parties concernent l'exploitation des fraises à concrétions diamantées. Dans un premier temps, ces nouveaux outils sont étudiés avec une modélisation macroscopique. Celle-ci nous permet d'optimiser ces outils particuliers. Si la fréquence de rotation peut être simplement maximisée, nous mettons en évidence un phénomène de saturation de l'outil lorsque l'avance est trop fortement augmentée.

Dans un second temps, nous nous intéressons à la mise en place d'une modélisation des efforts de coupe. Celle-ci est nécessaire pour la réalisation d'opérations de parachèvement comme nous le montrerons dans la suite. Après avoir montré en quoi la modélisation du fraisage classiquement utilisé est inadéquate, nous proposons une démarche pour construire un modèle. L'hypothèse principale réalisée est de considérer une coupe uniformément répartie autour de l'outil. En prenant en compte les empilages des matériaux composites, nous parvenons à prédire les efforts appliqués par celui-ci. Enfin, nous validons ces dernières par la mise en place d'un protocole de scanning d'outil.

Dans cette première partie de mémoire, le moyen a été considéré comme rigide. Nous nous sommes concentrés sur le procédé de fraisage. Dans la suite, nous étudierons l'impact d'une machine non rigide sur processus de fraisage.

### 3. MACHINES SOUPLES : IDENTIFICATION DES COUPLAGES AVEC LE PROCÉDE

#### Table des matières

3.1.	<i>Le besoin – constat des faiblesses</i>	95
a	Pourquoi utiliser des robots pour le parachèvement ? .....	95
b	L'hétérogénéité .....	95
c	La précision .....	96
d	La rigidité .....	97
e	Synthèse des défauts sur les robots .....	100
f	Quel modèle pour quelle application ? .....	100
3.2.	<i>Analyse expérimentale de structures de robot industriel</i>	101
a	Notre analyse des sources de flexibilité d'un robot Sériel Kuka KR240 .....	102
b	Détermination des flexibilités du rail portant le robot.....	105
3.3.	<i>Mise en place de protocole d'identification du modèle élasto statique</i>	107
a	Modèle et principe d'identification .....	107
b	Application à l'identification d'un KR270.....	111
c	Définition des raideurs d'un robot sur rail.....	113
3.4.	<i>Application à la correction de trajectoire</i>	116
a	Correction de la position robot à l'aide d'un tracker .....	119
b	Correction miroir lié au effort en usinage .....	120
3.5.	<i>Impact de l'hétérogénéité de l'espace de travail du robot sur la qualité</i>	125
a	Impact de la redondance .....	125
b	Impact du posage .....	127
c	Conclusion sur la gestion l'hétérogénéité .....	128
3.6.	<i>Application au pilotage du procédé</i>	128
a	Définition du problème d'optimisation.....	130
b	Modulation des efforts .....	133
3.7.	<i>Conclusion – Machines souples</i>	137

L'hypothèse principale réalisée jusqu'ici dans l'analyse du triptyque machine – outil – pièce est la rigidité de la machine. Dans le cas où celle-ci n'est pas vérifiée comme nous allons le montrer, un couplage se crée. Dans cette partie du manuscrit, nous serons donc amenés à étudier cette machine.

Notre préoccupation n'est pas de définir ce qu'est une machine souple ou encore de décrire les différentes structures existantes. Nous nous situons dans ce contexte comme des utilisateurs de ces structures. Nous nous appuyerons sur des travaux et applications classique en robotique[28]. Nous nous focalisons ici sur l'utilisation de robots sériels.

Mais revenons tout d'abord au contexte qui nous conduit à considérer les robots comme des machines envisageables pour le parachèvement [29][30].

### 3.1. Le besoin – constat des faiblesses

#### **a Pourquoi utiliser des robots pour le parachèvement ?**

La réalisation de pièce de grande dimension avec des exigences en termes de qualité, de plusieurs dixièmes de millimètre, ouvre le champ de l'utilisation de porteurs low cost comparativement aux machines à commandes numériques. Le principal critère sur ces moyens de type robots poly articulés permettant d'entrevoir leur utilisation est leur répétabilité. Des valeurs d'environ un dixième sont annoncées par les constructeurs pour les gros porteurs. Cependant, si effectivement cette valeur permet d'affirmer la capacité du robot à réaliser ces tâches, le protocole, pour y parvenir, peut s'avérer complexe. Dans l'utilisation la plus classique des robots, une trajectoire est calculée hors ligne que cela soit du « pick and place », du soudage ou du suivi de trajectoire, pour être ensuite réajustée sur site.

Dans les nouveaux cas d'applications, la mise en œuvre de ce principe est souvent impossible pour diverses raisons :

- au vue des coûts des opérations à mettre en œuvre (prix de la pièce à parachever, pas d'apprentissage direct),
- le nombre de points générés par ces opérations sont si importants qu'il faut automatiser ce processus d'apprentissage,
- enfin le chargement durant l'opération est variable en intensité et/ou en direction.

En effet, les principales faiblesses de ces structures sont leur hétérogénéité, leur précision et leur rigidité. Précisons ces notions.

#### **b L'hétérogénéité**

Elle concerne différentes grandeurs (vitesse, raideur,...). Elle provient du fait que l'espace articulaire n'est pas identique à l'espace de travail. Pour un robot constitué de  $n$  liaisons l'espace articulaire est de dimension  $n$ , alors que l'espace opérationnel c'est à dire l'espace cartésien est de dimension six. Un corps rigide est alors renseigné par trois positions et trois angles, et un point uniquement par trois coordonnées. De nombreux travaux définissent des critères permettant d'estimer le niveau d'hétérogénéité des robots

[31]. D'une manière générale, les modèles développés par les roboticiens permettent d'intégrer cette variabilité dans l'espace de travail. Nous utiliserons des modèles similaires pour observer cette hétérogénéité lors d'opération d'usinage.

### c La précision

L'interprétation de la précision est fortement liée au domaine d'application. Les robots ont à l'origine été conçus comme des manipulateurs à faible coût pour des tâches où l'apprentissage est possible (pick and place, soudage par point). Le découplage des différents éléments étant complexe et la nécessité d'une bonne précision étant secondaire, c'est donc assez naturellement que les protocoles d'estimation et de recalage des robots se font à partir d'un ensemble de poses statiques (essais définis dans [32]).

À contrario, pour les opérations d'usinage, l'estimation et le recalage des paramètres d'une machine sont réalisés au travers de trajectoires. L'un des outils très couramment utilisés est le ballbar développé et commercialisé par la société RENISHAW. Notre objectif étant d'étudier l'exploitation des robots pour le parachèvement, observons le robot au travers de cet outil.

Ce test consiste à réaliser un cercle combinant le déplacement de deux axes simultanés. L'analyse permet de réaliser un diagnostic à la fois sur des données de type mécanique mais aussi sur l'asservissement du moyen. Ce moyen est d'une grande précision (résolution du capteur  $0.1\mu\text{m}$ ) nécessaire pour les machines outil à commande numérique.

Afin d'illustrer nos propos, nous avons appliqué ce test à un robot de l'IRCCyN (KR120R3900, charge utile 120kg, rayon d'action 3900). On retrouve le tracé sur le graphe figure 81. Il faut bien évidemment prendre des précautions pour analyser les résultats de ce dernier. Trois valeurs sont données : la tolérance de position ( $1,11\text{mm}$ ), le rayon du cercle réalisé ( $299.97\text{mm}$ ), la circularité ( $830\mu\text{m}$ ).

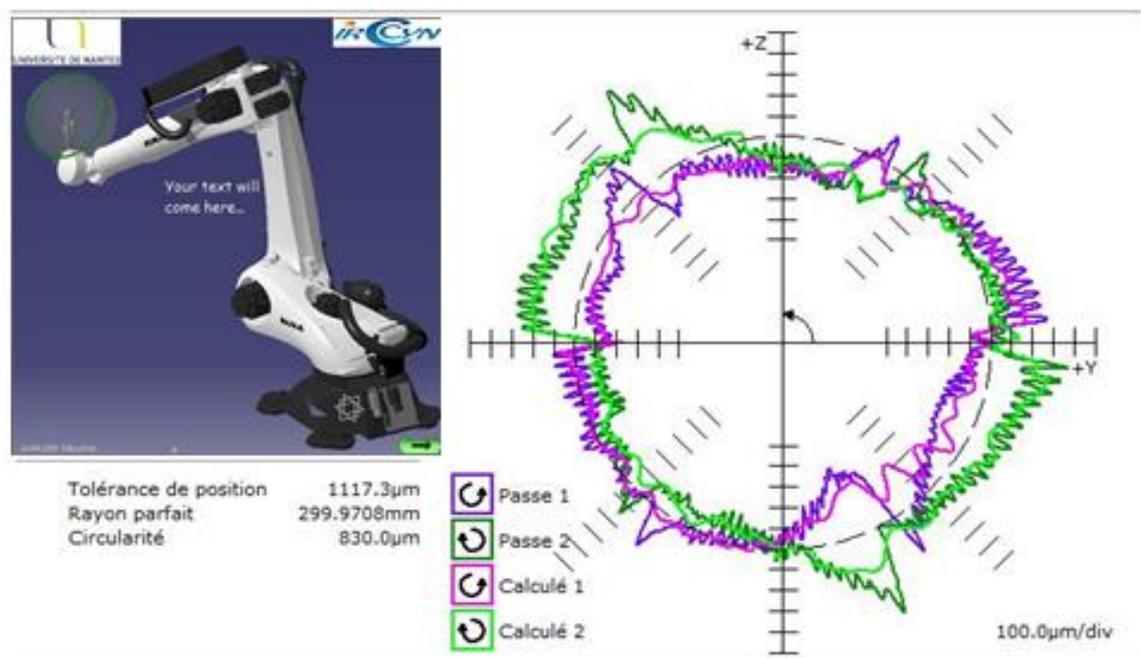


figure 81 : résultat d'un essai BallBar réalisé dans un plan YZ du référentiel principal du robot

Sans détailler l'analyse de ces résultats, nous pouvons faire un certain nombre de remarques. La précision de ce robot de grande dimension est faible comparativement à une machine-outil (de l'ordre de quelques microns à plusieurs dizaines de microns). L'analyse de ces données est bien plus complexe que sur une machine-outil cartésienne. En effet, dans ce cas nous ne pouvons garantir que seul deux axes sont en mouvement, le tracé obtenu dans l'espace cartésien évolue suivant trois dimensions, alors que la mesure est interprétée dans le plan. En effet pour atteindre une position cartésienne, la baie de commande du robot utilise un modèle géométrique inverse (MGI) théorique. Les paramètres du modèle utilisé sont ceux du fichier PID du robot, ces données ne sont pas accessibles simplement. Si le robot est mesuré ces données sont issues d'une optimisation des différents paramètres du robot [33], sinon ce sont celles du catalogue.

On retrouve aussi un certain nombre de discontinuités qui peut être attribué à un ensemble de paramètres tels que des jeux ou encore des frottements. Leurs positions sur le cercle sont liées à l'endroit où il est réalisé. Ces écarts ne peuvent pas être compensés par une commande basée sur mesure puisque l'information n'est pas visible par les codeurs. Sur les figures suivantes, nous pouvons voir une consigne sinusoïdale imposée au premier axe du robot, la mesure réalisée sur la sortie codeur qui suit bien la consigne et enfin la mesure faite en bout d'effecteur où l'on constate des décrochements lors de l'inversion de l'axe.

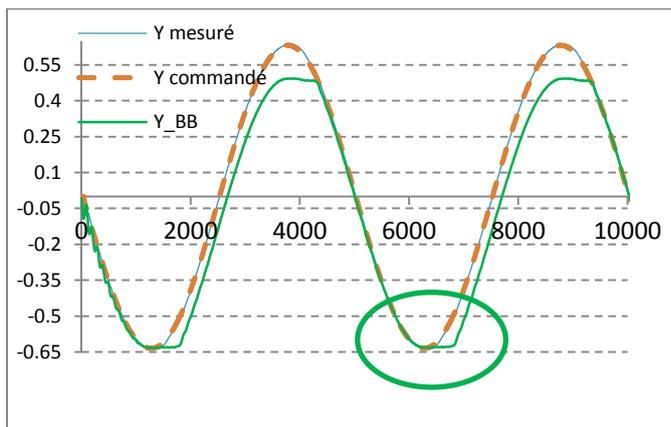


figure 82 : Mesure réalisée sur un robot soumis à une sollicitation sinusoïdale

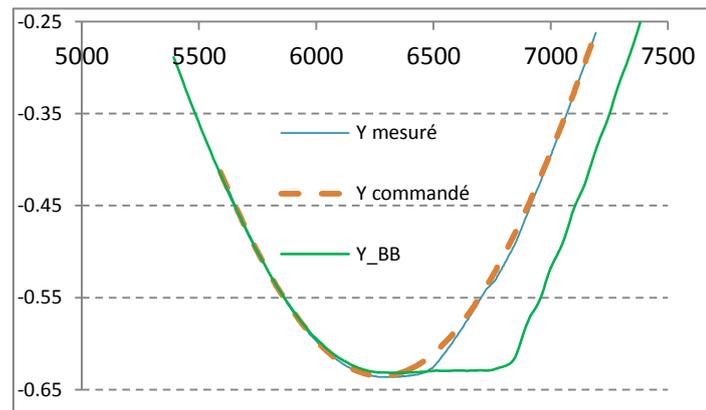


figure 83 : Zoom sur le franchissement d'inversion d'axe

Ces quelques points font partie d'un ensemble qui permet d'expliquer l'imprécision des robots.

Afin d'effectuer des opérations d'usinage avec des robots, nous devons proposer des stratégies de mise en œuvre du processus permettant de prendre en compte ces défauts afin de les minimiser.

#### **d La rigidité**

Avant de mettre en place une modélisation de la souplesse du robot, il convient d'estimer l'ordre de grandeur de la déformation de celui-ci. En effet, lors de l'exploitation d'une machine à commande numérique même si celle-ci se déforme la grande majorité des

travaux la considère comme rigide. Afin de mettre en évidence l'importance de cette déformation, un protocole de mesure a été mis en œuvre.

A l'aide d'un système de mesure par photogrammétrie, nous avons pu évaluer l'amplitude de déformation du robot pour une masse proche de sa charge admissible (ici 200Kg). On constate que l'ordre de grandeur des déformations est de l'ordre de 3.5mm en bout de robot. L'ordre de grandeur de cette déformation ne peut être négligé lorsque l'on souhaite réaliser des pièces avec des tolérances de quelques dixièmes de millimètre avec un procédé qui est sollicitant.

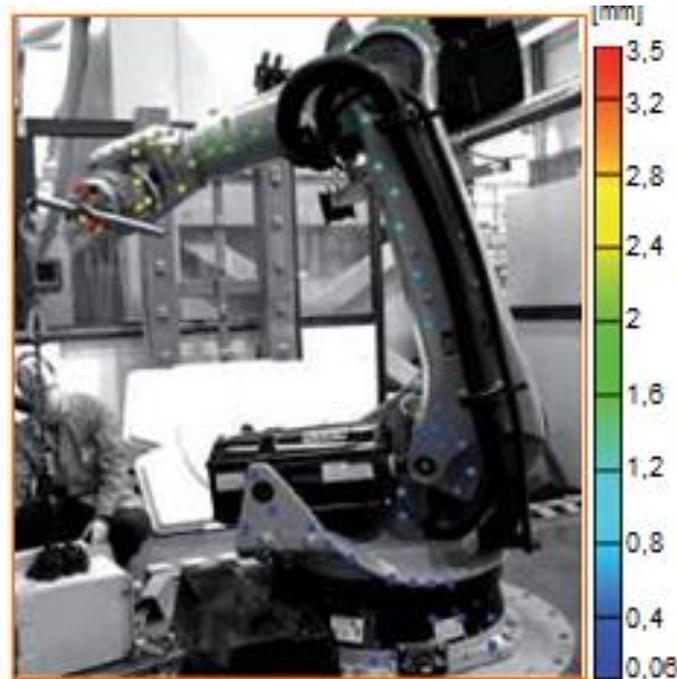


figure 84 : photogrammétrie de la déformé d'un robot KR240 sous 200kg de charge

L'analyse d'un tel mécanisme nous permet d'identifier deux principales causes aux manques de rigidité. La première est structurelle, ce mécanisme est constitué d'une succession de corps élançé. La seconde est liée à l'ensemble commande - actionneur. Précisons succinctement chacun de ces points.

**Raideur de l'architecture robot** : les corps soumis à un chargement vont se déformer en flexion et torsion. Plus l'élément est en amont, plus l'impact de sa déformée aura des conséquences sur l'effecteur. En effet, on peut simplifier chaque corps en considérant deux repères placés à chaque extrémité du corps et observer leur déplacement relatif. Si une translation est notée, son impact est relativement faible alors qu'une rotation sera amplifiée par le bras de levier des corps suivants. Il paraît donc nécessaire d'évaluer la contribution de celle-ci dans le déplacement de l'effecteur, et de définir la manière la plus efficace de la modéliser.

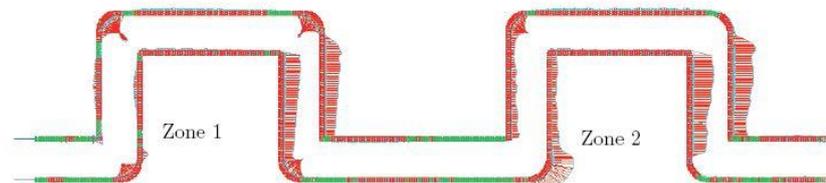
Afin de minimiser en production l'impact de ces déformations, deux voies sont envisageables. La première consiste en une re-conception du manipulateur et la seconde est d'appliquer une correction afin d'éliminer ces déformations dans la mise en place du processus.

La première approche n'est pas dans notre cœur de compétences, nous laisserons donc cette tâche à d'autres collègues. On constate certaines évolutions chez les fabricants dans cette direction.

ABB propose une modification de la structure avec un parallélogramme sur IRB6660. Nous avons réalisé dans un bloc d'aluminium un usinage avec ce robot, sans aucune précaution vis-à-vis du choix de l'opération ou encore de la trajectoire. On peut constater des écarts dépendant des zones qui ne sont pas systématiques.



figure 85 : Robot ABB  
IRB6660



- Zone 1 : Lissage de la trajectoire sur sphère de 1 mm de rayon
- Zone 2 : Zone fine avec temps d'arrêt sur les points de changement de direction

figure 86 : dispersion au cours d'une trajectoire d'usinage de l'IRB6660

**Raideur de la commande** : on peut simplifier en disant que le robot fonctionne en boucle ouverte. Structurellement, les masses sont réparties ou déportées afin de minimiser le poids des éléments en mouvement. Cependant, toutes ne sont pas éliminées, il faut prendre en compte celles restantes. On trouve aussi sur ces structures des compensateurs de gravité[34]. La masse de l'effecteur vient renforcer ce déséquilibre. Le système d'entraînement étant constitué de réducteur et d'arbre de transmission pré chargé par ces diverses masses, le système se déforme. La mesure étant faite au plus proche du moteur, on retrouve un déphasage plus ou moins variable entre la commande et l'engrènement. Ce phénomène se retrouve sur chaque axe du robot. Les constructeurs ont donc mis en place des modèles prédictifs de l'affaissement du robot afin de le compenser. Toute imprécision dans l'estimation de ces charges induit une erreur de correction et donc de position. De même, toute variation du chargement durant le processus induit un écart de position.

Afin de pallier à ces écarts, on peut partiellement fermer la boucle en lui ajoutant un système de mesure extérieur. Cette mesure peut être soit relative, soit absolue. Dans ce cas précis, il faut veiller à ce que la mesure externe reste visible à tout moment. On peut alors augmenter de manière substantielle la précision et la rigidité.

Dans cet esprit, FANUC a déposé un brevet en ajoutant des codeurs après la chaîne de transmission. Cette modification doit permettre de rigidifier le manipulateur. Les codeurs donnent une estimation plus précise de la position de l'effecteur. Il est donc possible de voir et donc de corriger des déviations précédemment absorbées par la souplesse de la

transmission. Cette mesure est cependant moins précise que la mesure de la position de l'effecteur, mais elle est plus intégrée. (Dans le même esprit Electro impact équipé des robots Kuka, et depuis Kuka propose une correction double encodeur sur les trois premiers axes)

Pour chacune de ces évolutions, il faudra évaluer le rapport gain de précision- rigidité par rapport à la solution mise en œuvre.

#### **e Synthèse des défauts sur les robots**

Nous avons rapidement abordé les principales faiblesses des robots. En mettant en relief ces dernières par rapport au processus de production envisagé, nous avons classé la difficulté de prise en compte des défauts par priorité :

- manque de rigidité,
- manque de précision,
- hétérogénéité.

Afin de mettre en place des stratégies permettant l'exploitation des robots dans des processus tel que l'usinage, nous devons préalablement sélectionner ou construire un modèle représentant au mieux les déviations de celui-ci.

#### **f Quel modèle pour quelle application ?**

Nous nous intéressons à l'amélioration du processus de parachèvement. Nous utilisons des robots industriels classiques. Nous ne redéfinissons pas leurs conceptions architecturales ou les principes de leur commande. Notre démarche se focalise sur l'optimisation de chacune des étapes de la mise en œuvre du processus de parachèvement, avec la contrainte de mettre en place des procédures acceptables pour assurer la qualité et la productivité souhaitées par les industriels.

L'observation des premiers essais (figure 86) a mis en évidence que les défauts observés sont importants en terme dimensionnels. Nous attribuons ces écarts dimensionnels aux deux causes connues que sont la précision et la rigidité. Pour évaluer sa précision et sa rigidité, il est nécessaire de s'intéresser à la modélisation des robots afin d'être capable dans l'espace de travail de celui-ci de prédire au moins qualitativement quelles configurations sont les plus optimales. Comme nous avons pu déjà le constater, le choix d'une modélisation impacte la vision que nous avons de la grandeur observé. De plus, l'exploitation industrielle de ces modèles demandera une identification des paramètres les définissant. Il va donc falloir rationaliser afin de permettre une exploitation industrielle simple à mettre en place et pour autant suffisamment pertinente. Certes, un modèle prenant en compte la dynamique, les souplesses et l'ensemble des différents éléments du robot permettrait d'obtenir une précision accrue. Cependant, le coût, la complexité et la robustesse d'identification de l'ensemble des paramètres sont à prendre en compte. Le processus de parachèvement n'est pas dynamiquement très sollicitant par rapport aux caractéristiques dynamiques des robots. La consigne généralement demandée est un déplacement à vitesse constante (à l'inverse du pick and place). Un modèle elasto-dynamique n'est donc pas absolument nécessaire pour corriger les erreurs du premier ordre, il serait sans aucun doute utile dans un second temps pour intégrer des oscillations liées à des changements cinématiques du robot.

Concernant l'aspect rigidité, la bibliographie propose différents modèles de flexibilité (liaison et/ou corps)[35], cependant les protocoles d'identification de ces paramètres ont souvent un point de vue commande (observation des couples et positions codeurs)[36], ne permettant pas une estimation complète des raideurs au niveau de l'effecteur.

Un parachèvement réussi nécessite à la fois une maîtrise de la précision et de la flexibilité du robot. Cependant, l'aspect précision est un problème de robotique indépendant du procédé de parachèvement, il n'y a pas de couplage évident. Nous avons donc choisi, dans un premier temps, d'axer nos recherches sur le couplage qui existe entre le procédé et la souplesse du robot.

Avant de pouvoir minimiser la souplesse du robot au cours du parachèvement, nous devons choisir un modèle nous permettant de l'évaluer. Pour effectuer le choix de notre modèle, nous allons dans un premier temps localiser la source et la part de flexibilité des différents éléments du robot. Fort de ces éléments, nous choisirons notre modélisation. Nous définirons le protocole expérimental d'identification des paramètres de notre modèle.

Ces différentes étapes roboticiennes réalisées, nous pourrons mettre en évidence le couplage entre le procédé et le robot. Nous proposerons alors un ensemble de méthodologie permettant le pilotage du procédé afin d'assurer la qualité des pièces. Du point de vue du concept SMMS, l'identification des paramètres robots fait partie de l'acquisition de données alors que la prise en compte de la correction fait partie de l'item pilotage de processus.

### 3.2. Analyse expérimentale d'architectures de robot industriel

Au sein de la communauté, les principales hypothèses portent sur la flexibilité des corps [37] ou sur la flexibilité des liaisons [38], voire une combinaison des deux [39]. Différents modèles existent pour les robots sériels, on citera principalement celui proposé par Chen en 2003 [40]. Quel que soit le modèle choisi, il faut renseigner ces paramètres. Les méthodes proposées pour l'identification des raideurs (corps ou liaison) font souvent appel à des données difficilement accessibles industriellement (modèle CAO, paramètre du constructeur) ou prennent un point de vue d'observation éloigné de l'effecteur (point de vue commande).

Les flexibilités sont aussi étudiées avec les modèles dynamiques des robots. On trouve les mêmes hypothèses que précédemment, bras souple ou rigide, liaison flexible. Dans le cas où l'ensemble des éléments est souple, l'identification est ardue [41][42]. Pour les modèles où le corps est considéré comme rigide, un certain nombre de travaux proposent des modèles [43], et des méthodologies d'identification. Cependant, les approches utilisées le sont d'un point de vue commande, l'observation est faite via les moteurs des axes. Comme nous l'avons montré figure 82, elles ne traduisent pas entièrement le déplacement de l'effecteur.

La problématique, à laquelle nous nous sommes confrontés, a donc été non pas la création mais le choix d'un modèle représentatif des déformés. Associé à ce choix, nous avons dû concevoir un protocole d'identification acceptable par les industriels.

Notre démarche s'est donc décomposée en deux étapes, la première consiste à une évaluation de ce qui participe à la flexibilité d'un robot sériels, et la deuxième à la mise au point d'un protocole de mesure permettant d'identifier les paramètres du modèles.

Deux cas seront envisagés :

- le premier est celui d'un robot sériel anthropomorphe,
- Dans la seconde configuration, le robot est fixé sur axe linéaire.

### **a Notre analyse des sources de flexibilité d'un robot Sériel Kuka KR240**

Les sources de flexibilité du robot sont connues, elles proviennent de la déformation des corps et de la déformation des liaisons (souplesse du système de transmission). Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à la déformation des corps. Deux approches ont été menées en parallèle, la première expérimentale et la seconde numérique.

#### **a.1 Approche expérimentale**

L'analyse des déformations des corps est complexe, non pas dans la mise en œuvre mais dans l'interprétation. Différents systèmes de mesure ont été mis en place afin de déterminer lequel est le plus capable (photogrammétrie, mesure laser tracker). Il s'est avéré que seul le second nous permettait d'envisager une mesure acceptable pour cette analyse.

Six cibles ont été positionnées aux extrémités des corps 2 et 3 (étant les corps les plus élancés, ce sont eux qui ont la plus grande probabilité d'avoir une déformée observable).



figure 2.3 – Positions des différents repères créés sur le robot

L'objectif est donc, à partir de données mesurées dans le repère  $\mathcal{R}_0$ , d'évaluer la position du repère  $\mathcal{R}_{22}$  dans le repère  $\mathcal{R}_{21}$  (idem pour le corps 3 avec respectivement les repères  $\mathcal{R}_{32}$  et  $\mathcal{R}_{31}$ ).

Cette identification est faite avant chargement et après chargement. La différence de positionnement  $\mathcal{R}_{22}$  dans le repère  $\mathcal{R}_{21}$  traduit potentiellement une déformation. En effet, le moyen de mesure a une précision qui lui est propre, deux mesures successives d'un objet immobile ne seront pas identiques, ce qui ne traduit pas une déformation ou un

déplacement de l'objet observé. Le calcul de ces positions et orientations sont issues de différents calculs matriciels. Nous avons donc appliqué la méthode de Monte-Carlo. Connaissant la répétabilité du tracker laser, nous réalisons l'hypothèse que l'on peut y associer une loi normale  $\mathcal{N}(0; \sigma)$  tel que  $IT = \pm 2. \sigma$ .

On effectue alors un grand nombre de tirages, où l'ensemble des données mesurées est bruité (données d'entrées de notre problème). Pour chaque jeu du tirage, on estime la position et l'orientation de  $\mathcal{R}_{22}$  dans le repère  $\mathcal{R}_{21}$ . On obtient donc une population de repères possibles associés aux bruits de mesure. A partir de ces données, nous pouvons calculer la forme de la répartition de la déformée ainsi que les paramètres qui la caractérisent, ceci dans toutes les directions et pour toutes les orientations. Dès lors, nous sommes capables d'estimer si l'écart mesuré entre la position avant et après chargement est suffisamment grand pour être significatif. On applique le principe statistique de l'hypothèse nulle, on calcule avec un risque de 5% la distance minimale permettant d'affirmer que cet écart est lié au bruit de mesure.

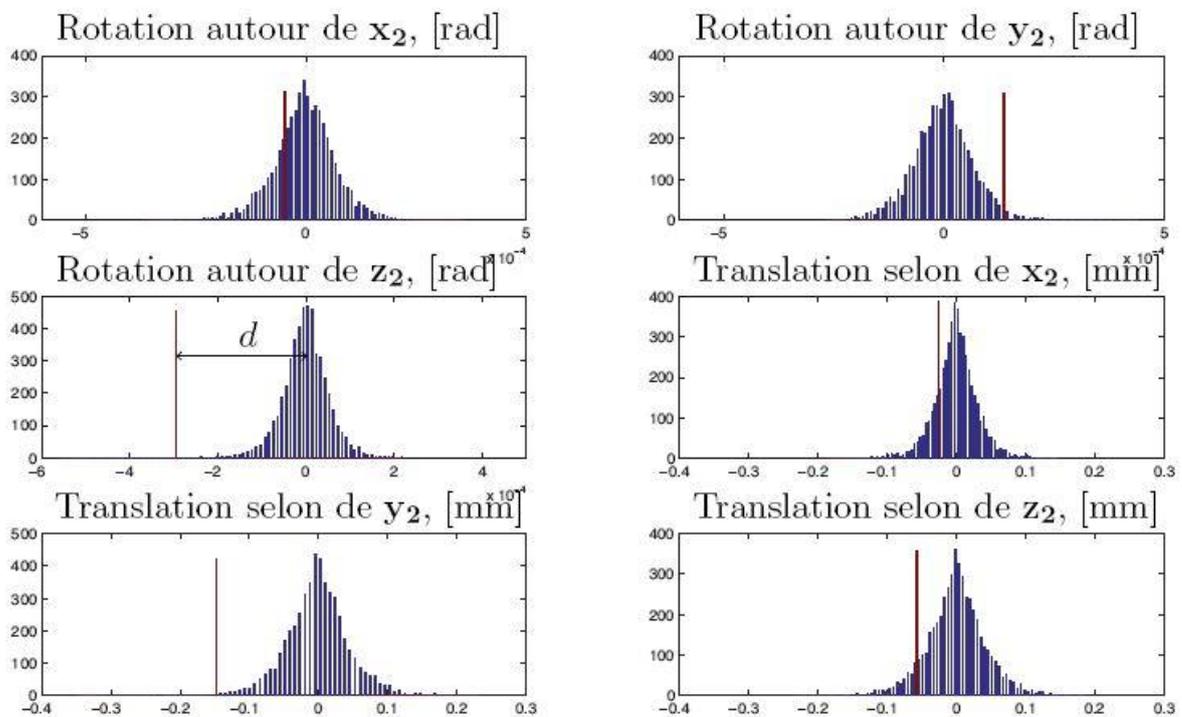


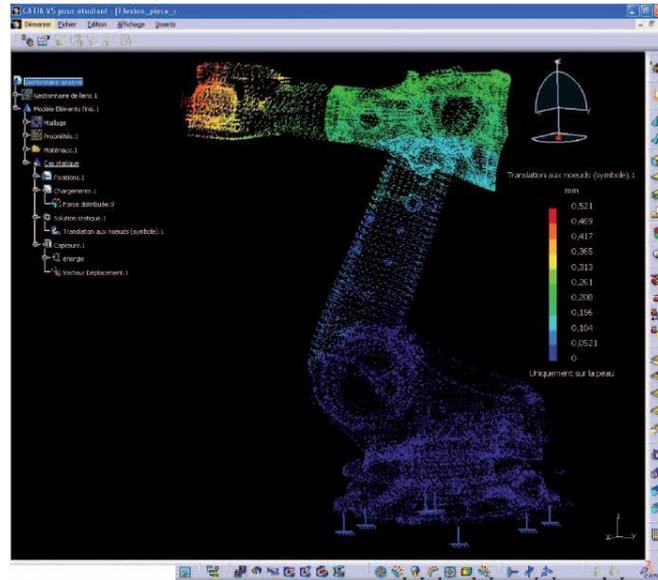
figure 87 : Analyse statistique de l'évaluation des petits déplacements du corps 2

Cette analyse nous permet d'isoler uniquement trois déplacements dans le cas d'un chargement de 2000N qui peut être considéré comme significatif. Nous avons une translation à l'extrémité du corps 2 suivant la direction  $Y_2$ . Ceci induit un déplacement de l'effecteur d'une translation identique. La direction n'est pas dans l'axe principal de déformation, ici sous 2000 Newtons, nous obtenons une flèche d'environ 4mm suivant  $Z_0$ , d'où une contribution au final que nous considérerons comme négligeable (moins de 4% de la déformée). Ensuite, les deux autres valeurs significatives sont des rotations autour des axes du robot  $Z_2$  et  $Z_3$ , au vu des longueurs de bras, ces déformations induisent un

déplacement de l'effecteur dans la direction de déformation de 0.9mm, soit un peu plus de 20% de la déformation total.

### **a.2 Approche numérique**

Nous sommes parvenus après différentes tractations et accord avec le constructeur à obtenir les CAO volumique des corps 2 et 3.



*figure 88 : Modélisation en élément finie du robot KR240 pour 1 pose sous charge*

En modélisant par éléments finis, nous avons pu, dans l'ensemble des configurations testées expérimentalement, appliquer le même chargement aux modèles numériques. Dans ce modèle, les liaisons sont considérées comme rigides. Les déformations sont moindres, mais si l'on compare les déformées des corps 2 et 3 par rapport aux déformées obtenues expérimentalement, on obtient une contribution de 25%.

En conclusion, les deux approches nous permettent de confirmer que les corps ont une contribution non négligeable dans la déformée du robot. Cependant, les déformées ayant le plus d'impact sur le déplacement de l'effecteur se retrouvent être suivant des rotations confondues avec les axes des actionneurs du robot.

### **a.3 Conclusion**

En conclusion, le fait de modéliser le robot avec des corps rigides et des liaisons flexibles devraient nous permettre d'avoir une bonne estimation de la déformée. Il faudra néanmoins prendre garde à l'interprétation car les raideurs identifiées seront apparentes. En effet, elles seront issues d'une combinaison des raideurs d'axes et des déformations des corps. Nous ne pourrons pas appliquer de modèle classique dynamique de corps rigide et de liaison flexible sans le valider. Pour nos besoins (déplacement à vitesse constante), nous avons donc choisi de travailler avec un modèle élasto-statique. L'identification des raideurs devra donc être réalisée par une observation du déplacement de l'effecteur.

Nous allons détailler le modèle que nous utilisons, et justifier nos choix de simplification afin de mettre au point une procédure d'identification.

## **b Détermination des flexibilités du rail portant le robot**

Les robots usineurs anthropomorphe simple sont envisagés pour des pièces de petites ou moyennes dimensions (jusqu'à 2 mètres de long). Cependant, les besoins industriels, et en particulier ceux qui animent l'écosystème en Pays de Loire avec l'aéronautique, le nautisme, les énergies nouvelles et la navale, portent sur des pièces de grandes dimensions (une à plusieurs dizaines de mètres) comme des pâles d'hydroliennes ou d'éoliennes, de coques ou de tronçons de voilures ou de fuselages.

Nous venons d'établir que pour le robot seul un modèle prenant comme hypothèse des corps rigide et des liaisons flexible devrait apporter satisfaction. Afin d'envisager le parachèvement sur des grandes dimensions, prenons le cas du robot sur rail. Déterminons quel type de modèle nous devons prendre pour modéliser le rail.

Les travaux sur ce robot interviennent dans le cadre du projet Robofin que nous avons créé au sein de l'IRT Jules Verne et ce, quasiment 4 ans après nos premiers travaux sur l'identification du comportement des robots. L'équipement est constitué d'un robot Kuka KR500MT installé sur un rail Sud Ouest Systèmes de 18m.



*figure 89 : Mise en place de la voilure de DAHER pour son parachèvement*

Nous avons donc une liaison prismatique située avant la première liaison rotoïde.

Le robot se déplace sur un rail, nous devons donc statuer sur la raideur de celle-ci dans les autres directions. Nous avons deux raideurs de translation et deux raideurs en rotations.

### **b.1 Rigidité structurelle du rail : raideur en translation**

Le rail est fixé au sol tous les 500mm, nous avons fait l'hypothèse dans une première étape que le sol est rigide. Nous avons choisi de nous placer sur une position intermédiaire entre 2 appuis afin de maximiser la souplesse de rail. Les mesures sont réalisées à l'aide d'un tracker utilisé précédemment.

Dans la direction normale au rail, nous avons appliqué un effort de traction de 480kN en s'arrimant sur la base du robot, et n'avons constaté aucune variation significative. Pour ce

qui est de la direction z, nous avons chargé le robot. Une fois de plus, nous n'avons pas mesuré d'écart significatif statistiquement parlant (nous restons dans le bruit de mesure du tracker). Nous en déduisons que dans cette direction aussi on peut considérer le rail comme rigide comparativement au robot.

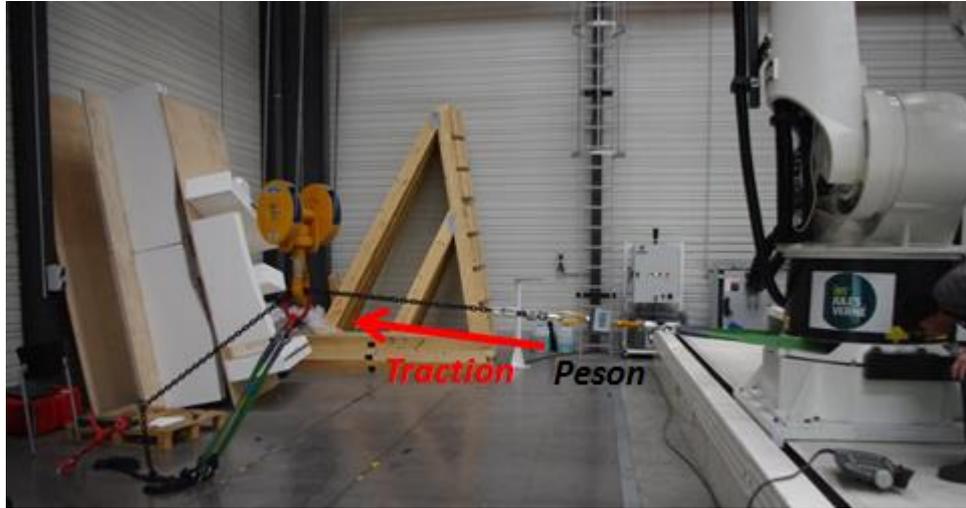


figure 90 : Application d'un effort de traction perpendiculaire au rail

#### **b.2 Rigidité structurelle du rail : raideur en rotation**

Au vue des symétries du rail, nous avons estimé qu'il existait deux directions principales normales entre elle. Si ces raideurs sont significatives, nous pouvons donc les représenter par un cardan.

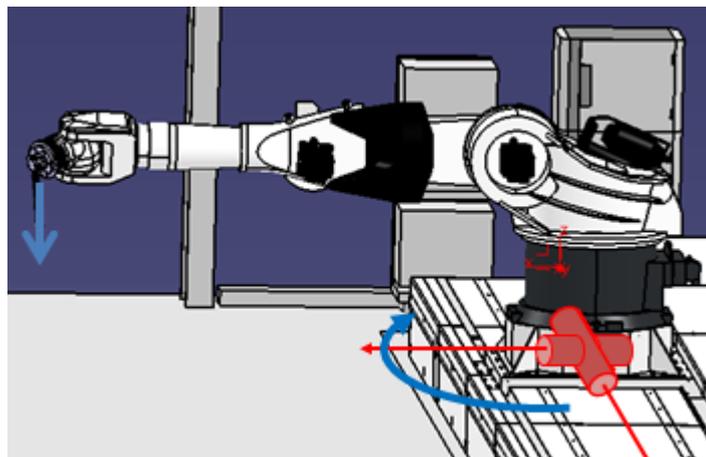


figure 91 : modélisation par cardan de la rigidité du robot

Afin de mettre en évidence les flexibilités du rail, nous avons réalisé une rotation normale au plan défini par les axes des cardans et ceci avec différentes charges. Les mesures relevées projetées dans le plan Z nous permettent de conclure sur la rigidité du rail.

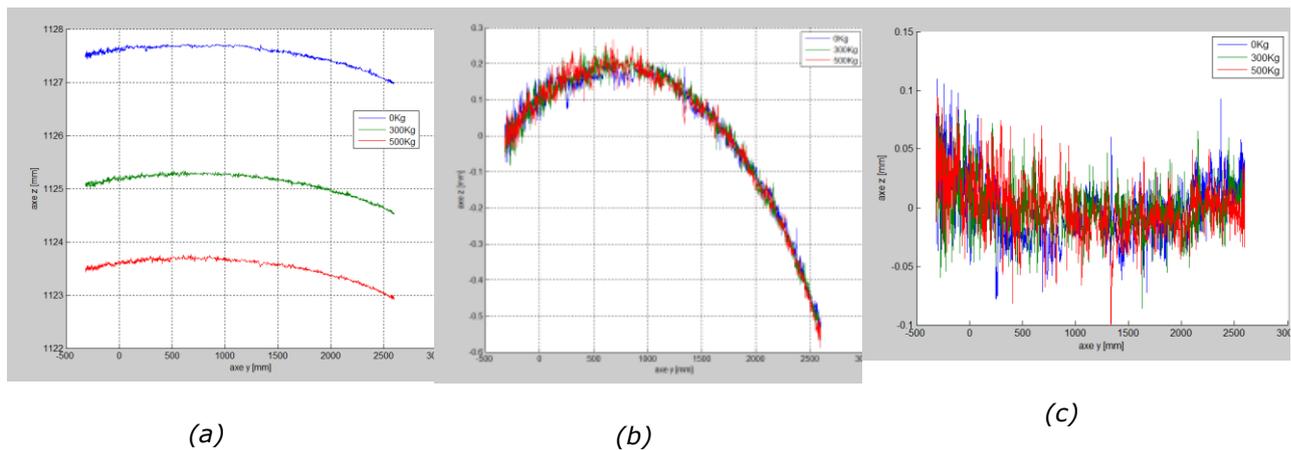


figure 92 : déformé de l'effecteur projeté dans le plan  
 (a) sans correction  
 (b) en prenant en compte la déformé du robot  
 (c) en corrigeant le défaut géométrique

Lors de la mise en charge, différents éléments se déforment simultanément aux rails. Le premier, qui est simple à corriger, est le robot. On mesure la flexion du robot lors de la mise en charge dans le repère du robot fixé sur le rail. Lors de la rotation autour de l'axe 1 du robot, cette flèche ne change pas, on peut donc soustraire cet offset à chaque mesure (figure b). La dernière correction est géométrique, la direction de l'axe 1 n'étant pas verticale, on peut l'identifier afin de la soustraire. Lorsque l'on observe les variations résiduelles pouvant être attribuées au cardan, elles sont dans l'ordre de grandeur de la précision du tracker ( $0.03\text{mm} + 0.01\text{mm/m}$ ). Dans l'éventualité où l'on souhaiterait poursuivre ces investigations, l'ordre de grandeur est cent fois plus faible que la déformée du robot (5mm), nous serions alors dans le bruit de mesure de l'ensemble.

C'est pourquoi nous ferons l'hypothèse dans la suite que le rail est rigide.

### 3.3. Mise en place de protocole d'identification du modèle élasto statique

Au cours de ces dernières années, deux protocoles ont été mis en place afin d'identifier la matrice de raideur des robots. Le premier est basé sur l'application d'un effort (ici une masse) puis d'une mesure du déplacement, et le second à l'inverse nous imposons un déplacement et mesurons un effort d'application.

Mais présentons préalablement le modèle issu de la littérature.

#### **a** *Modèle et principe d'identification*

Afin d'écrire le modèle élasto-statique, nous posons d'abord la matrice des raideurs apparentes, tel que :

$$K_{\theta} = \begin{bmatrix} k_{\theta_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{\theta_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{\theta_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{\theta_4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{\theta_5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{\theta_6} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 40}$$

En reprenant, la démarche définie par *Chen* [40], et comme décrit dans la thèse de Claire Dumas, on peut établir une relation entre la matrice de raideur cartésienne  $K_X$  et la matrice des raideurs apparentes  $K_{\theta}$ . Dans cette relation intervient aussi la matrice jacobienne et la matrice de raideur complémentaire  $K_C$ .

$$K_X = J^{-T} \cdot (K_{\theta} - K_C) \cdot J^{-1} \quad \text{Eq. 41}$$

Avec

$$K_C = \begin{bmatrix} \frac{\partial J^T}{\partial \theta_1} \cdot \omega & \frac{\partial J^T}{\partial \theta_2} \cdot \omega & \frac{\partial J^T}{\partial \theta_3} \cdot \omega & \frac{\partial J^T}{\partial \theta_4} \cdot \omega & \frac{\partial J^T}{\partial \theta_5} \cdot \omega & \frac{\partial J^T}{\partial \theta_6} \cdot \omega \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 42}$$

Lorsqu'une force et/ou un moment est/sont appliqué(s) sur l'effecteur du robot, le vecteur  $K_C$  n'est pas nulle et a une influence sur la matrice de raideur cartésienne  $K_X$ . Il est donc nécessaire de la prendre en compte et de ne pas se limiter au modèle proposé par Salisbury développé en 1982 et communément utilisé.

Afin d'identifier les raideurs  $K_{\theta}$ , nous imposons un chargement  $\omega$  et nous mesurons le déplacement  $\partial d$ . Nous avons la relation reliant ces paramètres.

$$\omega = K_X \cdot \partial d \quad \text{Eq. 43}$$

L'approche directe est d'effectuer une optimisation de l'ensemble tel que proposé par [38]. La difficulté dans ce type d'approche est l'existence de minima locaux. Le point de départ choisi détermine la solution trouvée. Donc on peut trouver des jeux de réponses différentes pour un même jeu d'entrées. Il existe bien évidemment des méthodes d'optimisation permettant de minimiser ce risque.

L'autre voie est de simplifier le modèle, afin de parvenir à une solution plus directe. On peut exprimer ce problème de la manière suivante :  $K_C$  est un terme nous empêchant de linéariser notre problème et donc de simplifier sa résolution. Sans pour autant le faire disparaître, existe-t-il des configurations où  $K_C$  est négligeable? Et dans cette éventualité, quelle erreur commettons-nous ?

Afin d'être capable de statuer sur ces deux questions, nous avons défini deux critères. Pour mettre en place une méthode afin d'évaluer le déplacement sous charge, deux éléments nous intéressent : la position de l'effecteur et son orientation. Afin de comparer les écarts, nous calculerons donc la position du point avec  $K_C$  soit  $\delta p_{K_C}$  et sans  $\delta p_{\overline{K_C}}$ . Idem pour les rotations, nous calculerons les petites rotations  $\delta r_{iK_C}$  et  $\delta r_{i\overline{K_C}}$  autour de l'axe  $i$  avec et sans  $K_C$ . Afin de normaliser ces résultats, nous définissons les deux critères suivant :

$$v_p = \frac{|\delta p_{K_C} - \delta p_{\overline{K_C}}|}{\max(\delta p_{K_C}, \delta p_{\overline{K_C}})} \quad \text{Eq. 44}$$

$$v_r = \max(|\delta r_{xK_C} - \delta r_{x\overline{K_C}}|, |\delta r_{yK_C} - \delta r_{y\overline{K_C}}|, |\delta r_{zK_C} - \delta r_{z\overline{K_C}}|) \quad \text{Eq. 45}$$

Pour évaluer ces critères, nous avons imposé un vecteur de chargement maximal pour le robot afin d'augmenter l'impact de  $K_C$ . Les valeurs des axes du poignet ont été imposées à  $45^\circ$  pour s'écarter au plus des singularités. L'axe  $\theta_1$  a été imposé à 0 car il est indifférent pour un chargement vertical. Les valeurs des  $k_{\theta_i}$  ont été choisies à l'aide de la littérature.

$$\omega = [0 \quad 0 \quad -2000N \quad -200N.m \quad 200N.m \quad 0]$$

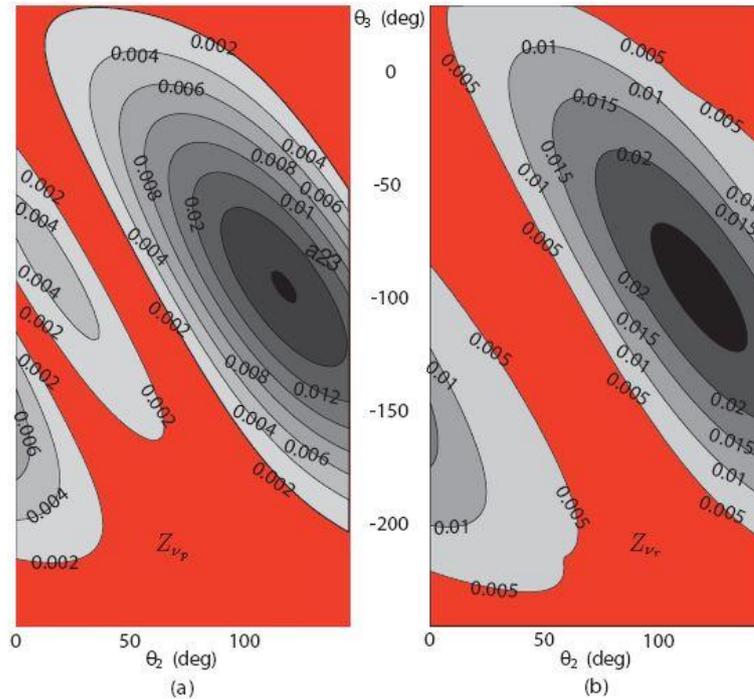


figure 93 : Iso contours de (a)  $v_p$  et (b)  $v_r$ , dans l'espace articulaire  $(\theta_2, \theta_3)$  du robot

Ces graphes nous permettent de conclure qu'il existe des zones pour lesquelles on peut négliger  $K_C$  devant  $K_\theta$ . L'erreur commise dans ces zones sera très faible. Pour simplifier notre problème d'identification, nous pouvons donc choisir des configurations dans ces zones dès lors le modèle est simplifié[44]. On peut écrire :

$$K_X = J^{-T} \cdot K_\theta \cdot J^{-1} \quad \text{Eq. 46}$$

On en déduit alors

$$\partial d = (J^{-T} \cdot K_\theta \cdot J^{-1})^{-1} \cdot \omega = J \cdot K_\theta^{-1} \cdot J^T \cdot \omega \quad \text{Eq. 47}$$

Le deuxième point qu'il faut aborder dans le cas d'une identification est sa sensibilité. En effet, on sait que

$$\Gamma = \mathbf{J}^T \cdot \omega$$

Eq. 48

Les couples  $\Gamma$  vue par les moteurs pour un vecteur  $\omega$  imposé dépendent de la Jacobienne, et donc de la position du robot. Il existera donc des configurations optimales pour l'identification de ces paramètres. Il ne faut pas qu'une petite variation du vecteur  $\omega$  induise de grandes variations sur  $\Gamma$ , car nous aurions alors une grande incertitude sur l'identification des raideurs.

Afin d'analyser le conditionnement de la Jacobienne, nous allons utiliser une méthode communément utilisée : maximiser  $\kappa_F(\mathbf{J}_N)^{-1}$ . Dans cette expression,  $\kappa_F$  représente la norme de Frobenius et  $\mathbf{J}_N$  la Jacobienne normalisée. On définit la norme de Frobenius d'une matrice  $\mathbf{M}$  comme :

$$\kappa_F(\mathbf{M}) = \frac{1}{m} \sqrt{\text{tr}(\mathbf{M}^T \cdot \mathbf{M}) \cdot \text{tr}[(\mathbf{M}^T \cdot \mathbf{M})^{-1}]} \quad \text{Eq. 49}$$

La matrice  $\mathbf{J}_N$  est la Jacobienne normalisée. En effet, la Jacobienne  $\mathbf{J}$  manipule des données de grandeurs différentes (longueur et orientation). On normalise celle-ci à l'aide d'une longueur caractéristique  $L$ .

$$\mathbf{J}_N = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \cdot \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{J} \quad \text{Eq. 50}$$

Ce qui nous intéresse est une localisation relative afin d'identifier les zones où la matrice est la mieux conditionnée, le protocole n'est donc pas sensible à  $L$ , même si cette dernière est nécessaire. Afin de déterminer cette zone, nous avons comme pour l'analyse de  $K_c$ , concentré notre observation sur  $\theta_2$  et  $\theta_3$ .

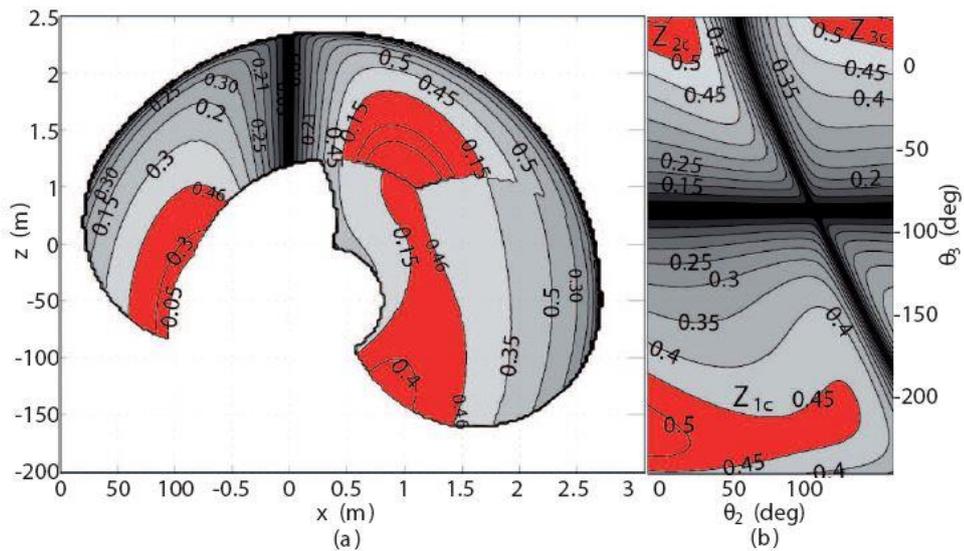


figure 94: Iso contours du conditionnement inverse de  $\mathbf{J}_N$  :  
 (a) dans l'espace cartésien du robot  
 (b) dans l'espace articulaire( $\theta_2, \theta_3$ )

Sur ces deux graphes, on voit apparaître les zones où la Jacobienne est la mieux conditionnée, les essais pour l'identification devront être choisis dans ces zones.

Revenons à notre problème simplifier, et extrayons les compliances articulaires sous forme d'un vecteur. D'après l'équation Eq. 47, en développant on obtient :

$$\partial d = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^6 \left( x_j \cdot J_{1j} \cdot \sum_{i=1}^6 J_{ij} \cdot \omega_i \right) \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^6 \left( x_j \cdot J_{6j} \cdot \sum_{i=1}^6 J_{ij} \cdot \omega_i \right) \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 51}$$

Avec  $x_j = 1/k_{\theta_j}$ , on peut alors ré écrire cette expression avec le vecteur des souplesses,

$$x = \left[ \frac{1}{k_{\theta_1}} \quad \frac{1}{k_{\theta_2}} \quad \frac{1}{k_{\theta_3}} \quad \frac{1}{k_{\theta_4}} \quad \frac{1}{k_{\theta_5}} \quad \frac{1}{k_{\theta_6}} \right]^T$$

$$A \cdot x = \partial d \quad \text{Eq. 52}$$

Ou

$$A_{ij} = J_{ij} \cdot \sum_{k=1}^6 J_{kj} \cdot \omega_k \quad \text{Eq. 53}$$

Dans cette expression, la matrice A est définie par les positions du robot et le chargement, elle est donc entièrement connue pour un essai donné.

Dans cette configuration, le résultat pour un essai est direct, six équations, six inconnues. Le fait d'utiliser un unique essai n'est pas satisfaisant, car la probabilité d'être proche de la valeur vraie est assez faible.

Nous avons donc choisi d'utiliser la matrice pseudo-inverse proposée par Golub & Van Loan (1983) qui permet d'effectuer cette résolution en identifiant 6 inconnues avec nx6 équations, avec une minimisation des moindres carrés. Le système donne l'optimum  $x_0$  en écrivant :

$$x_0 = (B^T \cdot B)^{-1} \cdot B^T \cdot c \quad \text{Eq. 54}$$

Avec

$$B = \begin{bmatrix} A_{\text{expérimentation}_1} \\ \vdots \\ A_{\text{expérimentation}_p} \\ \vdots \\ A_{\text{expérimentation}_n} \end{bmatrix} \quad c = \begin{bmatrix} \partial d_1 \\ \vdots \\ \partial d_p \\ \vdots \\ \partial d_n \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 55}$$

Ou  $A_{\text{expérimentation}_p}$  est la matrice 6x6 de l'essai  $p$  et  $\partial d_p$  sa déformée mesurée.

## **b Application à l'identification d'un KR270**

Nous avons donc défini le protocole, pour lequel nous disposons d'un effecteur permettant à l'aide d'une masse d'appliquer le torseur (force + couple). La position de l'effecteur est mesurée à l'aide de trois points nous permettant d'estimer la position et

l'orientation de celui-ci à l'aide un tracker laser. Le robot est mis en configuration, sa position est mesurée freins non serrés (la raideur est différente dans le cas des freins serrés). On applique ensuite la charge, et on vient ensuite à nouveau mesurer les trois cibles. La charge est mesurée ainsi que le point d'application. Un certain nombre de contraintes mécaniques a été ajouté lors du choix des essais. Pour ce qui est de l'axe 1, nous sommes obligés de mettre en place des essais supplémentaires permettant de tirer radialement sur le robot.

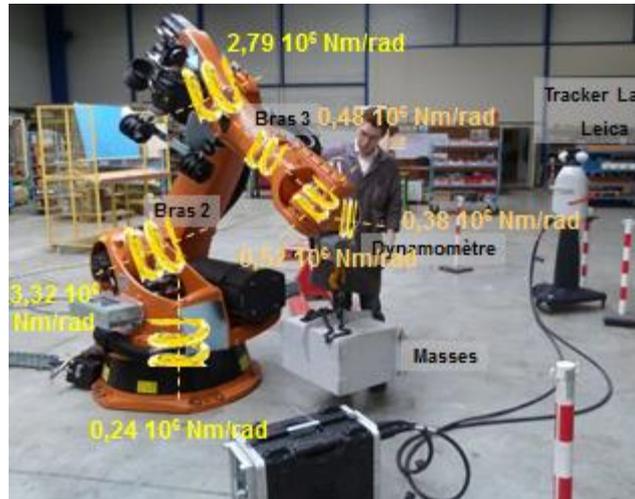


figure 95 : Illustration du protocole et des résultats obtenus

Dans ces travaux, différents aspects du protocole ont été étudiés :

- Nombres d'essais justes nécessaires à l'estimation des raideurs,
- Estimation de l'étendue de l'erreur aux vues de la précision des moyens de mesures,
- Prise en compte du nombre de poses du tracker laser,

Le protocole a été appliqué sur différents robots sur lesquels on peut observer la qualité de prédiction du modèle.

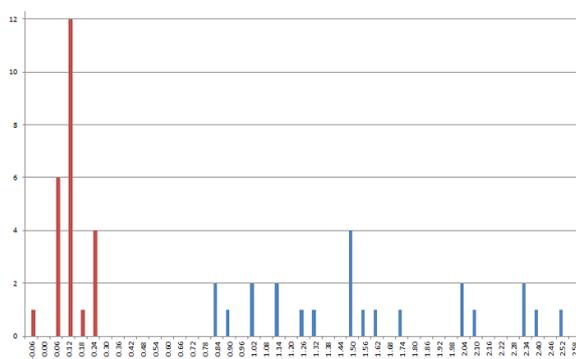


figure 96 : Précision avec et sans l'estimation de déformé suivant l'axe Z

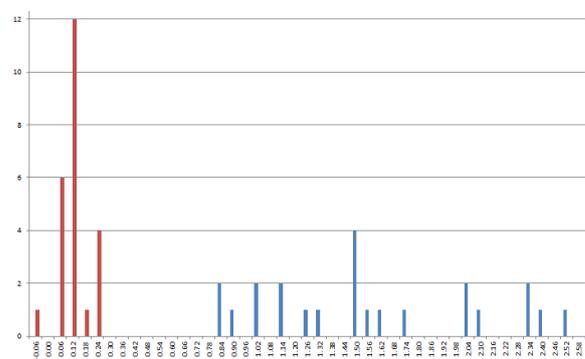


figure 97 : Précision avec et sans l'estimation de déformé dans le plan XY

Les graphes ci-dessus représentent des graphes de fréquence. En abscisse, on retrouve la différence d'estimation de la position en charge et en ordonnée, le nombre

d'occurrence associé à cette erreur. La courbe en bleu représente l'erreur commise sans correction et en rouge en prenant en compte les corrections liées à notre modèle.

Cette identification nous permet donc d'évaluer la déformée pour tout chargement dans l'espace de travail du robot. C'est un point crucial dans les travaux sur la rigidité du robot car nous pouvons, dès lors, envisagé d'effectuer des choix entre plusieurs configurations et ou posage.

### c Définition des raideurs d'un robot sur rail

Le modèle, à présent, compte sept liaisons. Pour le rail, comme pour les autres parties du robot, la structure sera donc considérée comme rigide, la flexibilité du rail se limitera à l'actionneur, à savoir la translation.

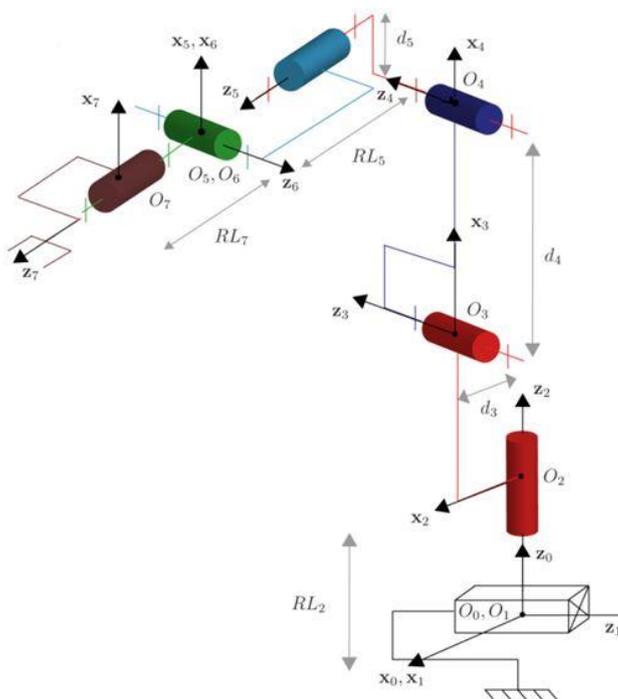


figure 98 : Modèle d'un robot anthropomorphe sur rail



figure 99 : Cellule ROBOFIN : robot sur rail à l'IRT Jules Verne

Analysons le protocole d'identification des raideurs avant sa mise en œuvre. Pour mener ces essais, nécessaires à l'identification du comportement élasto-statique des robots, nous utilisons :

- un système de chargement (container recevant jusqu'à 750Kg de charge),
- un effecteur permettant de déporter la charge afin de créer un effort et un moment,
- un tracker laser pour mesurer les déviations de cibles installées sur l'élément terminal du robot.

Si la procédure précédente a été éprouvée, plusieurs points restent à améliorer :

- la procédure découple l'identification de l'axe 1 des autres axes,
- direction de la charge toujours dans le sens de la gravité,
- la raideur est évaluée avec une seule valeur de charge (hypothèse de linéarité de la raideur),
- d'un point de vue plus pratique, la manipulation de la charge est assez contraignante et il y a nécessité de mobiliser un tracker laser.

Le premier point est d'autant plus critique qu'ici deux axes ne seront pas identifiés. Nous avons donc revu notre protocole d'identification. Lors de la première conception du processus, nous avons opté pour l'application d'une charge, qui nous garantissait de ne pas dépasser la charge admissible par le robot. Pour la définition de ce nouveau protocole, l'ordre de grandeur des déplacements auxquels nous nous attendons est mieux connu. La solution d'appliquer un déplacement et de mesurer une charge est donc moins problématique.

Nous avons choisi de placer un point d'accroche au sol, et d'effectuer un effort de traction depuis ce point vers le robot. Afin de permettre un choix avisé, nous avons intégré cette dimension (position au point du sol) à notre problème d'optimisation ainsi que le positionnement de la mesure.

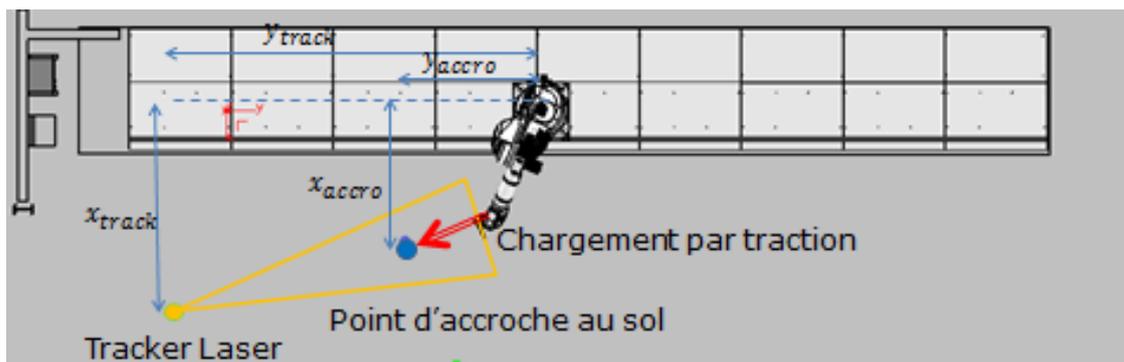


figure 100 : Configuration de positionnement des éléments pour l'étalonnage

Lors de l'identification, le nombre d'essais à réaliser reste problématique. Dans cette optique Caro, Furet et Paschevitch proposent une méthodologie permettant d'optimiser le nombre d'essais, ces travaux ont été réalisés dans le cadre des travaux de thèse de Yier WU.

Détaillons les hypothèses associées à cette méthodologie. La méthode nécessite de définir une ou plusieurs poses stratégiques pour le parachèvement. Ensuite, un algorithme permet de rechercher, pour un nombre d'essais définis, les configurations de chargement (position + efforts) à appliquer afin de minimiser les erreurs liées aux imprécisions de l'ensemble des éléments intervenant dans la chaîne de mesures.

L'analyse du contexte nous a permis d'identifier trois poses permettant de représenter au mieux les cas de parachèvement.

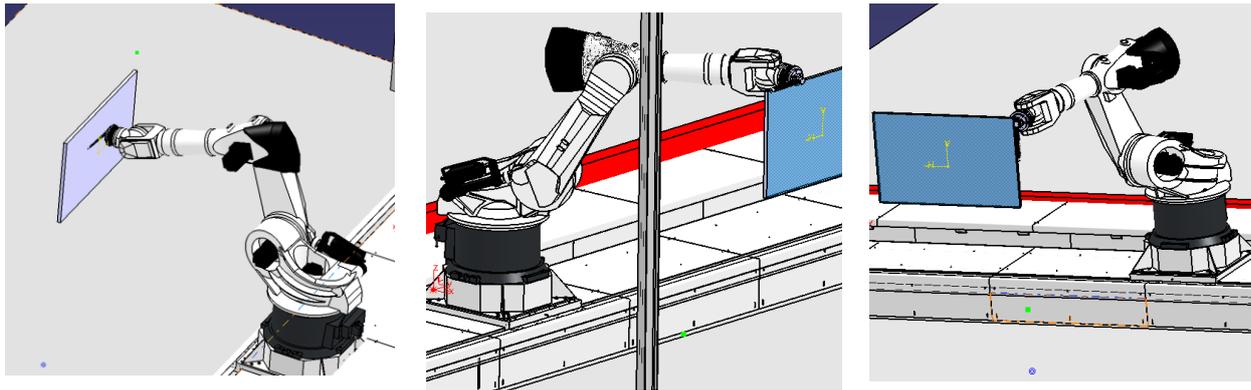


figure 101 : Choix des poses cibles à identifier

Une expérimentation a été menée et a permis d'effectuer l'identification des différentes raideurs. Pour cette première expérimentation, nous avons préalablement optimisé la position du point d'attache et la position du tracker. L'identification a été faite avec douze essais. Douze autres essais ont servi à la validation. On retrouve les raideurs identifiées à l'aide de ce protocole (Tableau 6).

$10^6[N/m]$	$10^6[N.m/radm]$					
$K_{r1}$	$K_{\theta2}$	$K_{\theta3}$	$K_{\theta4}$	$K_{\theta5}$	$K_{\theta6}$	$K_{\theta7}$
41	4.9	6.6	5	1.5	0.87	0.53

Tableau 6 : raideurs identifiées du robot sur rail

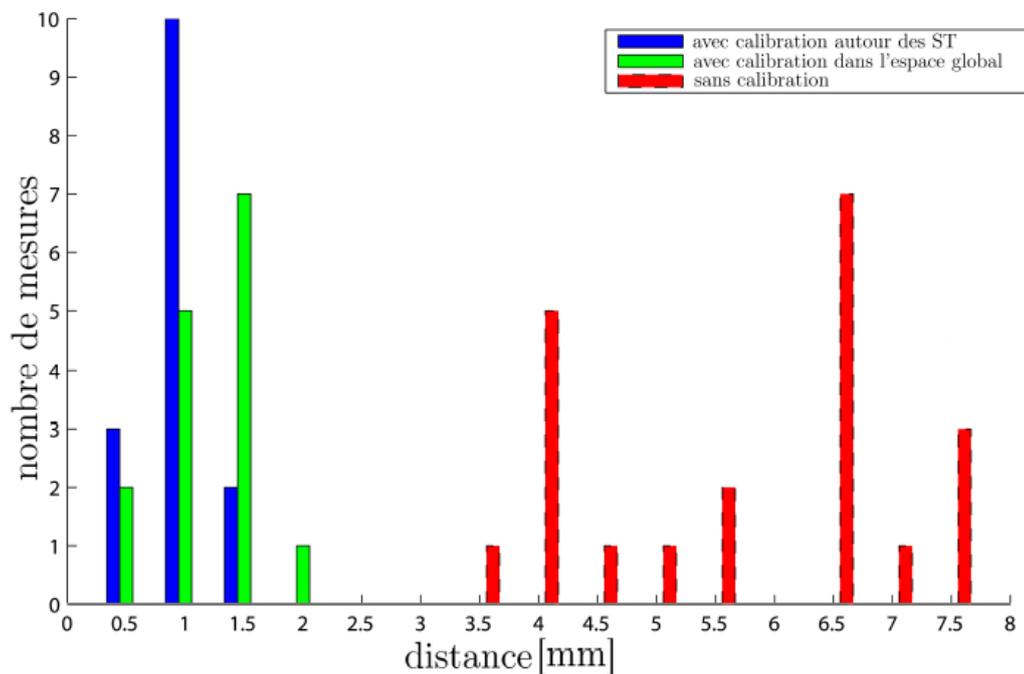


figure 102 : Différences entre, l'estimation de la position de l'effecteur près et loin des situations de travail et la mesure de l'effecteur sans étalonnage élastique

Sur la figure ci-dessus nous pouvons visualiser les dispersions de positions (en bleu) sous un effort de traction imposé par la chaîne de l'ordre 4800N. Après étalonnage des

différentes raideurs, le modèle nous permet de réduire notablement ces dispersions (histogramme rouge sans calibration et vert dans l'espace globale).

### 3.4. Application à la correction de trajectoire

Nous disposons maintenant d'un modèle nous permettant de représenter la machine dans le triptyque Machine-Outil-Pièce. Nous pouvons donc espérer estimer les déviations pour ensuite les corriger. Pour que cette stratégie fonctionne, il est nécessaire que le processus soit répétable.

Afin d'établir les différentes possibilités qui s'offrent à nous pour effectuer une correction, rappelons brièvement la chaîne des consignes, corrections, perturbations et mesures possibles (figure 102).

Nous partons de la trajectoire de consigne cartésienne pour arriver à la position réelle du robot. La liste des perturbations n'est pas exhaustive mais indique celle dont la contribution nous semble majeure. Leur contribution est schématiquement de manière séquentielle, bien qu'il existe des couplages. On retrouve aussi sur ce schéma des points de mesure potentiellement disponibles sur des robots industriels.

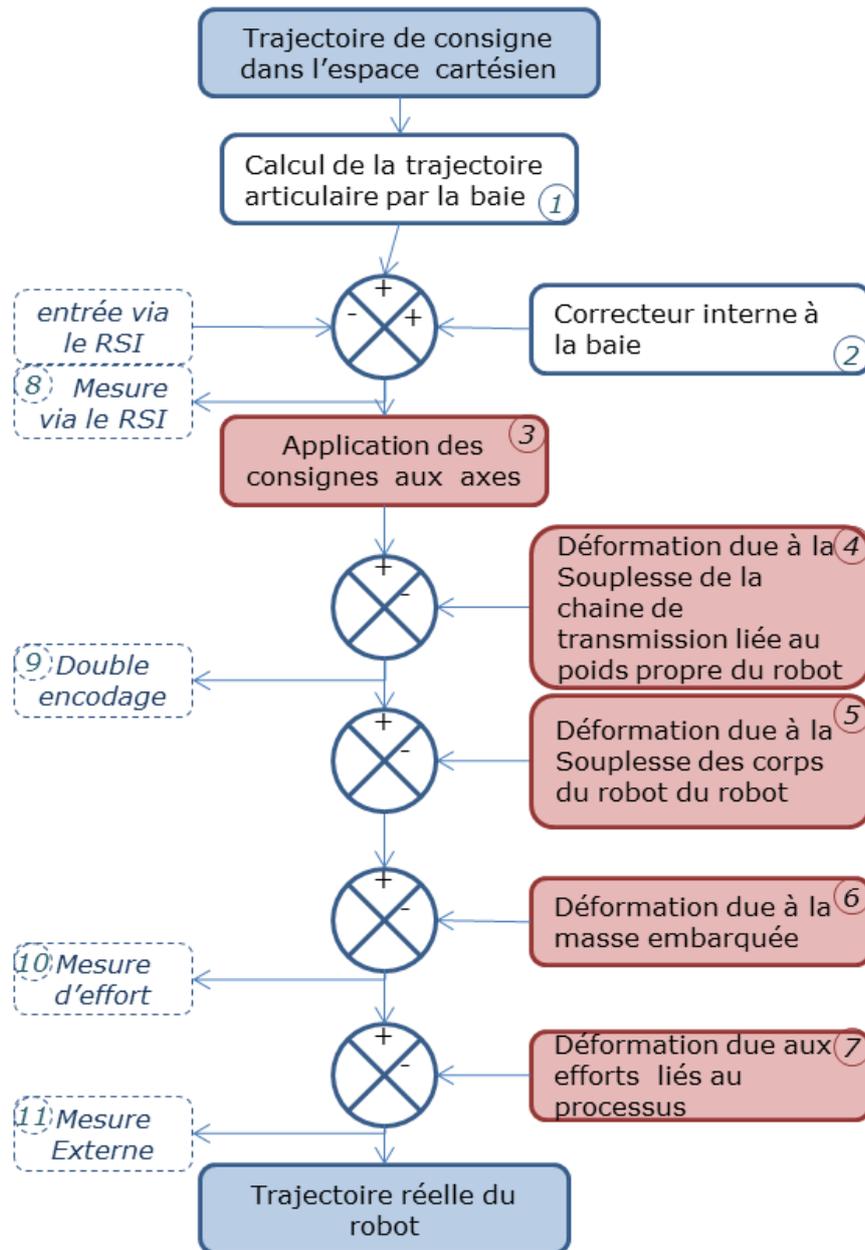


figure 103 : Représentation schématique des lieux de corrections, perturbations et mesures accessibles sur un robot classique industriel

1. La première opération consiste en la résolution du MGI du robot, les paramètres étant ceux du PID renseigné dans la baie,
2. Le constructeur applique ensuite un certain nombre de correcteurs afin de compenser les déviations qui lui semblent importantes. La qualité de la correction est alors fortement liée aux modèles plus moins complexes qu'il utilise. Ceci reste pour un utilisateur industriel une boîte noire,
3. Les données angulaires sont ensuite transmises au codeur. Ces valeurs ne sont alors plus celles issues du MGI,
4. La première déformation que nous considérons est celle liée au poids propres des corps du robot. Chaque partie du robot vient contribuer à appliquer des couples

- sur les moteurs d'axes, la chaînes de transmission étant souple, le robot s'affaisse,
5. La seconde déformation est liée à la déformation structurelle du robot (nous l'avons estimé sur le KR240 de vingt à vingt-cinq pourcent de la déformation totale),
  6. Vient ensuite la masse de l'effecteur, (celle-ci est en tout ou partie prise en compte par la baie, on renseigne le centre de masse, la masse ainsi que la matrice d'inertie de celle-ci),
  7. Enfin, le chargement qui, dans notre cas, est variable et multidirectionnel au cours du temps,
  8. Différents points de mesure peuvent être réalisés, et peuvent être fourni par les fabricants de robot. Le premier et le plus complet est situé sur la baie de commande, chez KUKA il s'agit du RSI. Ce point d'accès est bidirectionnel et permet d'agir sur la consigne afin d'envisager une correction en ligne,
  9. Le double encodage est actuellement disponible sur quelques robots, comme les FANUC et les KUKA, cette technologie est assez récente et permet d'envisager des développements avenir intéressant,
  10. La mesure via un capteur d'effort permet une prise en compte des efforts liés aux processus, comme l'a fait dans le projet COROUSSO Gabriel ABBA, ou encore la mise en place d'une compliance,
  11. Et enfin une mesure externe, classiquement utilisé comme décrit dans le paragraphe précédent.

Afin de lister l'ensemble des possibilités reprenons les points un à un. Chaque correction peut être statique, on effectue une mesure puis on applique une correction lors de l'exécution du parcours.

Cette stratégie est appliquée par les industriels, une mesure de position est réalisée (point 11) puis une correction est appliquée. Nous avons montré la validité de cette approche sur une pièce de grande dimension dans le cadre du projet ROBOFIN. Nous exposerons succinctement les résultats obtenus sur cette application.

On peut aussi réaliser une correction de position en ligne. Il faut alors introduire des notions d'asservissement pour que la correction soit efficace.

La correction à partir d'une mesure d'effort (point 10) est plus complexe. En effet, la mesure de déformé est indirecte. Il faut interpréter la mesure d'effort à l'aide d'un modèle élasto-statique afin d'estimer la déviation due à la déformation de la structure. Dans ce cas, on raidit virtuellement le robot. Cependant, dans ce cas, la position, elle, n'est pas corrigé. Cette correction a été mise en œuvre dans le cadre du projet COROUSSO, Gabriel ABBA propose une correction suite à une mesure d'effort dans une application de Friction Stir Welding.

Les solutions utilisant un double encodeur (point 9) sont récentes et nous n'avons encore que peu de retour sur ces dernières. Leur potentiel est intéressant. Leur étude sera sans aucun doute un axe d'investigation.

Nous arrivons au point 8, le nombre d'informations que l'on peut obtenir est important. De nombreux travaux exploitent ces données, on peut citer entre autre les identifications dynamiques des robots. On applique des déplacements sollicitant, on peut alors, au travers des couples, recalculer les modèles, ce qui permet a posteriori d'effectuer des trajectoires mieux maîtrisées.

Nous sommes ici remonté jusqu'à la limite de l'information lié à l'instrumentation. On peut donc redescendre vers l'effecteur en mettant en place des modèles permettant d'estimer les déformés et donc de prédire une correction.

La première étape est de connaître les modèles utilisés par la baie. En effet, comme nous l'avons vu, un phénomène peut être représenté par des modélisations plus ou moins complexes. Un modèle élémentaire corrigera le premier ordre d'un défaut, mais induira un biais au second ordre. Les robots sont étudiés depuis plusieurs décennies, il est donc évident que différents modèles de correction ont été instanciés. On peut citer, par exemple, la correction de facteur de charge. Ce modèle réalise une correction purement en Z ce qui explique pourquoi nous avons défini un nouveau modèle élasto-statique. Cependant, l'application que nous envisageons nécessite sans aucun doute des modèles plus fin. Nous aborderons rapidement ce point.

Sans connaître les données de la baie, nous pouvons néanmoins mettre en place des stratégies de correction. En identifiant, de manière plus fine la géométrie du robot, on peut à partir des données codeur obtenu dans le RSI prédire l'erreur de positionnement du robot. Ceci sous-entend que notre identification soit plus précise que celle réalisée par le constructeur. On peut, à ce niveau, intégrer le modèle élasto-statique pour prendre en compte les déformées liées à la charge. Ceci doit permettre d'estimer les informations obtenues par les doubles encodeurs. Il faudra mettre en évidence que le modèle géométrique directe utilisé apporte un gain pour la précision du robot.

Enfin, nous arrivons aux efforts appliqués par le processus. On peut ici les modéliser afin de prédire avec le modèle élasto-statique les déformés du robot.

Abordons les résultats obtenus avec ces approches.

#### **a        *Correction de la position robot à l'aide d'un tracker***

Ces mesures ont été réalisées dans le cadre du projet ROBOFIN sur différentes pièces, dont une voilure de 14m de long, ou encore une coque de bateau.

La trajectoire est réalisée à la valeur théorique, et mesurée soit à vide soit en charge (si la production le permet). Dans notre étude, ces mesures ont été réalisées avec un tracker laser LEIKA. Sur l'extrados, soit une pièce de quatorze mètres, les écarts ont été mesurés à plus ou moins deux millimètres. En calculant la trajectoire, nous avons pu estimer la déviation de chaque point de la trajectoire. On peut alors créer une trajectoire miroir, le nouveau point est le symétrique de l'erreur évaluée par rapport à la trajectoire théorique.

Cette trajectoire reconstruite a pu être jouée et mesurée à nouveau. La déviation a été évaluée à plus ou moins deux dixièmes. Le gain est substantiel même si nous ne pouvons atteindre la répétabilité du robot. L'usinage a été réalisé et une mesure a été faite. Nous avons pu constater une déviation de l'ordre de trois dixième.

La déviation due aux efforts n'est pas corrigée ici.

Cette pratique est actuellement couramment utilisée lors de l'utilisation de robot. La mesure peut être réalisée de manière périodique ou systématique pour recalibrer le robot.

## ***b***      ***Correction miroir lié au effort en usinage***

Afin de parvenir à corriger une trajectoire déformée par le chargement du processus, il faut estimer ces efforts. Dans un second temps il nous faut choisir ce que l'on souhaite corriger. Procédons à ces deux étapes préliminaires.

### ***b.1***      ***Choix et hypothèses associés au modèle d'efforts***

Les modèles de coupe, que nous avons présentés dans la première partie, nous permettent d'estimer les efforts en fonction des conditions d'exploitation de l'outil avec des modèles complexes prenant en compte la géométrie de l'outil et des matériaux. Nous devons donc déterminer quel niveau de détail nécessite l'estimation des efforts afin de simplifier ou non le modèle.

La flexibilité du robot est changeante sur une trajectoire et dans l'espace de travail du robot. Cependant, à l'échelle du déplacement par tour de l'outil (inférieur aux millimètres), on peut la considérer comme constante durant un tour d'outil, principalement si on reste éloigné des singularités du robot. Ce travail est réalisé hors ligne dans un premier temps, nous n'avons pas de considération temps réel à prendre en compte. Du point de vue du robot, les informations utiles sont les estimations des efforts afin de pouvoir calculer la déformée du robot. Pour ces différentes raisons, notre choix de modélisation des efforts s'est porté sur un calcul de la moyenne des efforts à chaque tour de broche. Cette enveloppe des efforts s'avère suffisante pour évaluer la déformée du robot le long de la trajectoire.

Dans cette approche, le modèle de déformation du robot que nous avons choisi d'utiliser est un modèle dit élasto-statique. Nous ne prenons pas en compte les aspects dynamiques liés aux processus du point de vue du robot (estimation de raideurs apparentes), de la même manière nous ne prendrons pas en compte la dynamique du processus de coupe.

Nous avons validé lors des travaux de thèse de doctorat Claire Dumas, qu'au cours d'un usinage se passant correctement (sans problème de broutement) le niveau vibratoire mesuré sur la broche (figure 104) reste équivalent en terme de valeur efficace de la vitesse  $V_{rms}$  à ce que l'on a sur une machine à commande numérique. Nous savons, à l'aide d'une étude théorique, que les fréquences propres du robot évoluent de manière conséquente sur l'espace de travail du robot, figure 105 (étude faites avec des flexibilités localisées aux liaisons et corps rigides).

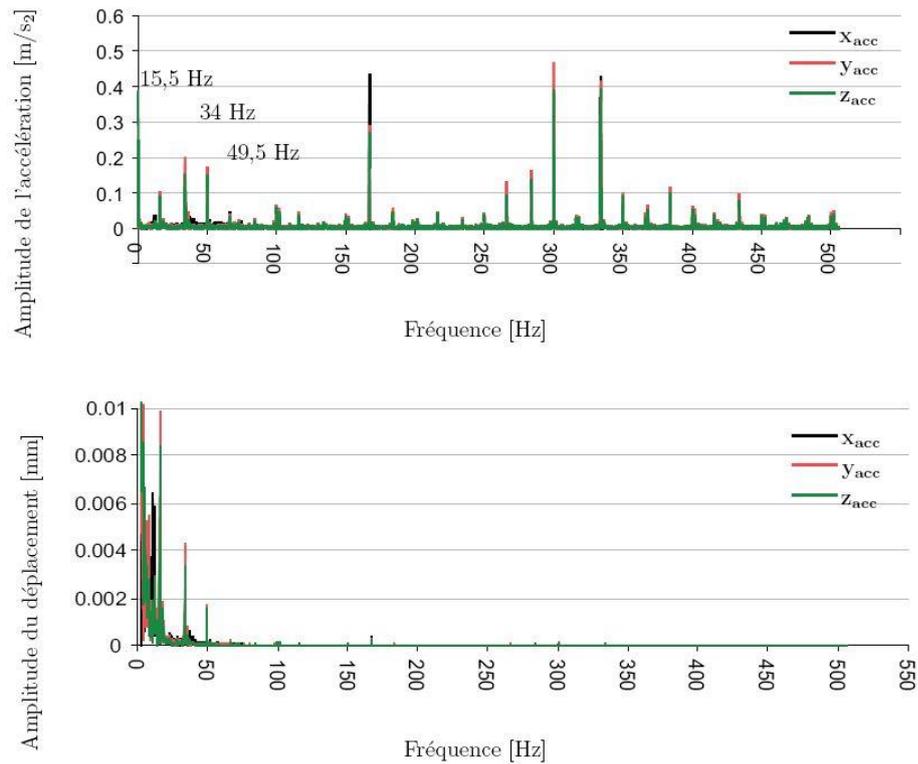


figure 104 : Déplacements et accélérations relevés sur la broche

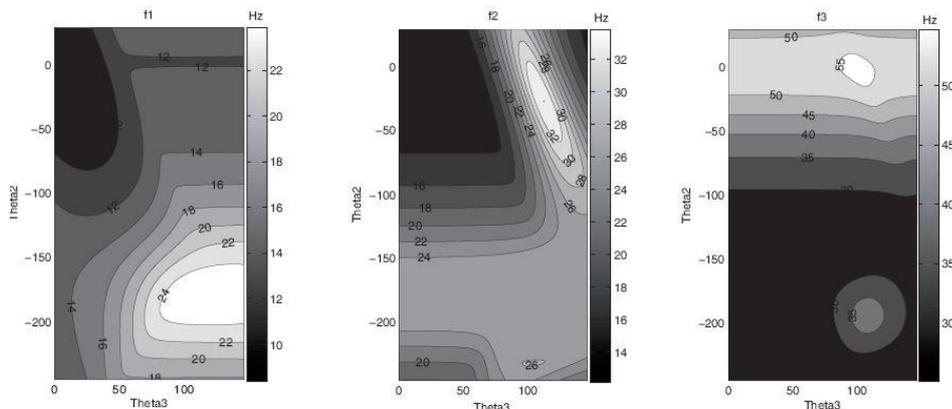


figure 105 : iso contours des trois premières fréquences propres dans l'ensemble articulaire ( $\theta_2, \theta_3$ )

Comme nous l'entrevoyons, l'étude du comportement dynamique des robots est complexe. Il devra faire l'objet d'investigation plus approfondie. Durant nos applications futures, pour le choix de nos outils et de nos conditions de coupe, nous serons donc très vigilants. Nous nous placerons dans des conditions validées expérimentalement afin de satisfaire à une bonne stabilité du processus de coupe.

Afin de simplifier la lisibilité des résultats, nous nous plaçons dans un problème plan, détourné d'une plaque. Nous ferons donc différentes hypothèses où nous considérerons :

- des coefficients spécifiques de coupe constants, ce qui est suffisant puisque nous observons des efforts moyens,

- les efforts selon l'axe outil comme négligeables. Deux raisons expliquent notre choix tout d'abord, un effort suivant l'axe outil entrainera principalement une déformation dans la direction de celui-ci, or cette translation n'a aucun impact sur la qualité du détournage puisque le bout d'outil est hors matière. Deuxièmement, nous avons choisi un outil avec un  $\kappa_r = 90^\circ$  et un angle d'hélice de  $10^\circ$ , ce choix nous permet de minimiser la contribution de l'effort axial en rapport des efforts radiaux (environ 20%).

Ceci nous amène donc à considérer le modèle d'effort suivant :

$$\begin{cases} F_x = K_t \cdot a_p \cdot f_z \cdot \left( \frac{\cos(2\varphi_e) - \cos(2\varphi_s)}{4} + K_r \cdot \frac{\sin(2\varphi_e) - \sin(2\varphi_s)}{4} + K_r \cdot \frac{\varphi_s - \varphi_e}{2} \right) \\ F_y = K_t \cdot a_p \cdot f_z \cdot \left( \frac{\sin(2\varphi_s) - \sin(2\varphi_e)}{4} + K_r \cdot \frac{\cos(2\varphi_e) - \cos(2\varphi_s)}{4} + \frac{\varphi_e - \varphi_s}{2} \right) \end{cases} \quad \text{Eq. 56}$$

Avec

$\varphi_e, \varphi_s$  : Respectivement les angles d'entré et de sortie de la fraise à chaque tours de broche,

$K_t, K_r$  : Respectivement les coefficients spécifiques moyens de coupe tangentielle et radiale,

$a_p$  : La profondeur de passe ou engagement axial,

$f_z$  : La vitesse d'avance qui peut être modulée à chaque tour,

## b.2 Critère de qualité

Nous venons ainsi de définir le modèle d'efforts, celui-ci va être utilisé afin d'estimer la déformée du robot lors d'opérations de contournage. Nous avons un défaut associé à chacun des paramètres de position de l'outil, soit trois erreurs de position et trois erreurs d'orientation. Suivant l'opération d'usinage, nous pourrons combiner différemment ces paramètres afin d'estimer la qualité de l'opération.

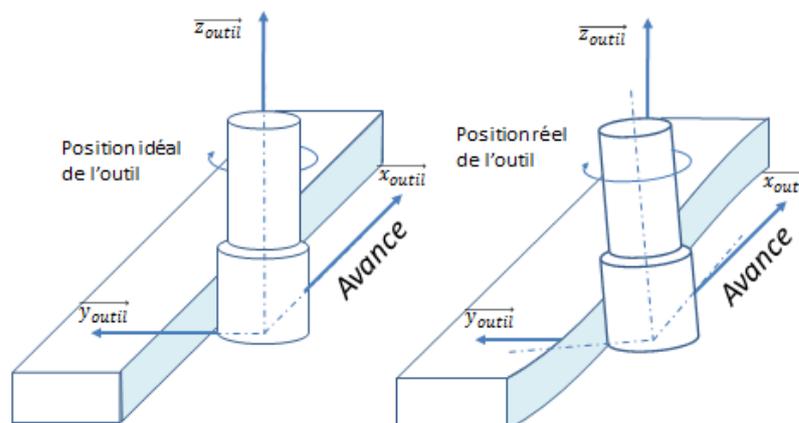


figure 106 : Influence des déplacements outils sur la qualité pièce

Dressons la liste des différents déplacements, afin de définir en quoi ils peuvent impacter la qualité dimensionnelle des surfaces:

usinage Déplacement		sur le flanc	En bout
Translation suivant	$x_{outil}$	Aucun	aucun
	$y_{outil}$	Directement proportionnel	aucun
	$z_{outil}$	Aucun	Directement proportionnel
Rotation autour	$x_{outil}$	Dépend de la hauteur usinée	Dépend du diamètre outil
	$y_{outil}$	Aucun	Dépend du diamètre outil
	$z_{outil}$	Aucun	aucun

Tableau 7 : Définition des critères de qualité

Dans le cas abordé, nous effectuons un contournage d'une plaque de faible épaisseur, nous retiendrons donc uniquement le déplacement suivant  $y_{outil}$ .

### **b.3 Correction de trajectoires**

Ayant défini la modélisation des efforts ainsi que notre critère d'évaluation, nous pouvons appliquer une correction.

Connaissant la déformée induite par les efforts, on décale le point considéré de la valeur de la déformée dans la direction opposée à celle-ci (suivant la direction principale de notre critère qualité). On propage cette correction à l'ensemble des points de la trajectoire. Cependant, un bouclage est nécessaire. En effet, la trajectoire ayant été modifiée, les engagements et donc le chargement évoluent, d'autant plus si l'outil est partiellement engagé et de petit diamètre.

Pour mesurer l'impact effectif, prenons un exemple concret. Nous avons réalisé un rainurage avec un virage à 90°.

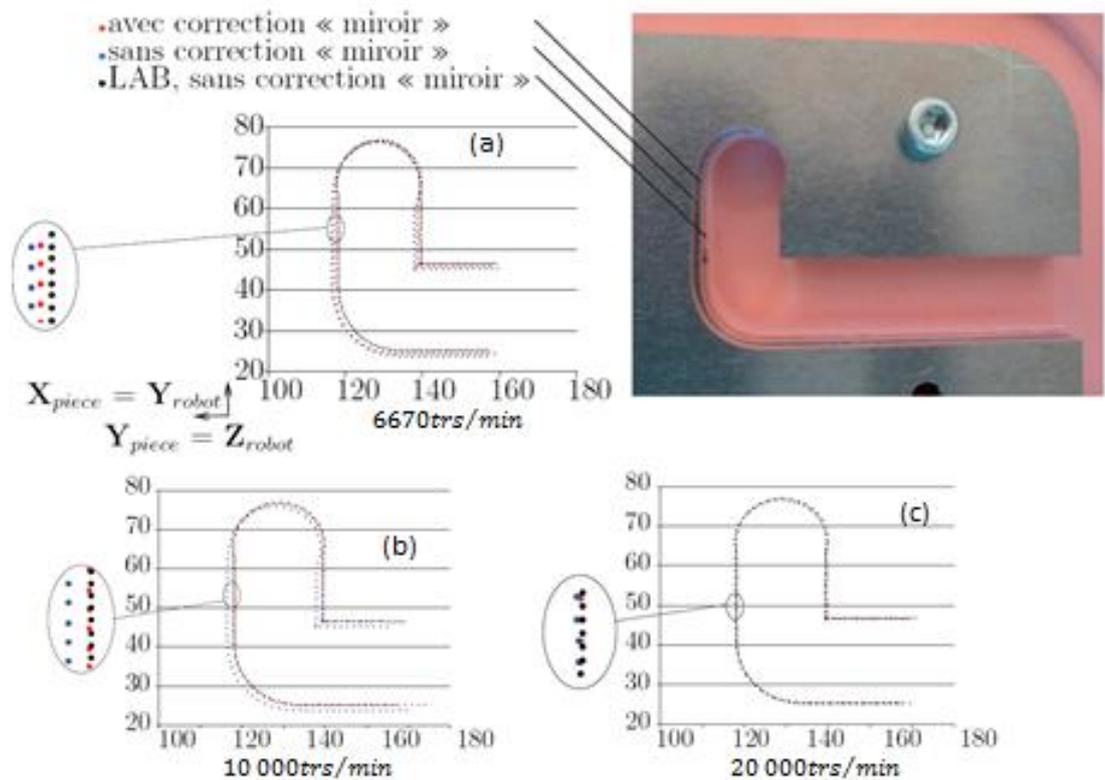


figure 107 : écart entre l'usinage dans le lab et celui dans l'alliage d'aluminium réalisés avec et sans correction – (a)  $N = 6670 \text{ tr/min}$   
 (b)  $N = 10\,000 \text{ tr/min}$  (a) –  $N = 20\,000 \text{ tr/min}$

Les coefficients spécifiques de coupe utilisés ont été les mêmes quelques soit les conditions opératoires. A 20 000 trs/min (c), la déformée est faible, l'écart entre l'usinage de l'aluminium et le lab est faible, la nécessité même d'une correction est discutable.

A 10 000 trs/min, le modèle d'effort est bien identifié, la correction est optimale. L'estimation des coefficients spécifiques convient particulièrement à l'estimation des efforts à cette vitesse.

Enfin, à 6670 trs/min, on constate que la correction n'est pas optimale. Dans ce cas, le modèle d'efforts sous-estime ceux-ci, la correction est moindre. Ici, si l'estimation des efforts est biaisée, la correction l'est tout autant.

Dans la mesure où cette correction est envisageable, on peut traiter les erreurs systématiques sans intégrer les transitoires car de petites corrections rapides peuvent entraîner des oscillations du robot qui, au final, seront plus néfastes que le défaut lui-même. Les transitoires peuvent alors être gérés en fluctuant la vitesse afin d'atténuer et/ou de faire disparaître le défaut. On parlera ici de « feature de correction », nous reviendrons, durant les perspectives, sur ce types corrections.

### 3.5. Impact de l'hétérogénéité de l'espace de travail du robot sur la qualité

L'hétérogénéité du robot a, dans notre application, deux conséquences majeures très locales et plus globales.

La première est directement liée à notre application. En effet, en fraisage, l'outil tourne sur son axe. Le positionnement de l'outil ne nécessite alors que 5 degrés de liberté, la position du point piloté ainsi que deux angles pour orienter l'axe outil. Or, le robot utilisé dispose de 6 liaisons pivot. Nous avons donc six degrés de liberté, d'où une redondance. Pour une position et orientation données de l'outil, il existe une infinité de configurations possible pour ce dernier. Chaque position a des données qui la caractérisent différentes (manipulabilité, raideur, cinématique, etc.) .

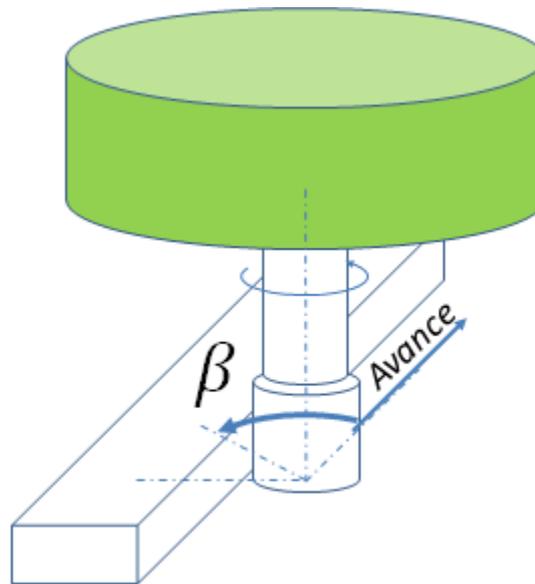


figure 108 : Définition de l'angle de redondance  $\beta$

La seconde concerne le positionnement de l'opération. Classiquement, sur les machines à commande numérique cartésienne, le positionnement de la pièce n'est étudié que du point de vue de l'accessibilité ou encore par rapport à la dimension de l'espace de travail. Ici, la conséquence est plus fondamentale, des posages différents mèneront à une qualité différente.

Etudions successivement ces deux aspects.

#### **a Impact de la redondance**

Avant de pouvoir explorer l'ensemble des solutions de redondance, il faut définir les limites articulaires, les singularités, les collisions de corps, etc. RobotMaster est un des logiciels de FAO que nous utilisons pour réaliser les trajectoires des robots utilisés pour différents procédés. Il propose une interface permettant de visualiser ces différentes contraintes de singularités ou autres (figure 109). Il suffit ensuite de tracer une courbe dans l'espace libre qui est sans contrainte.

Nous avons inséré dans cette interface une colormap permettant de visualiser la déformée dans la direction  $y_{outil}$  (figure 106) pour chaque position du robot et pour

l'ensemble des positions redondantes (figure 110). Deux chemins ont été définis l'un maximisant la raideur (courbe blanche), l'autre la minimisant (courbe noire).

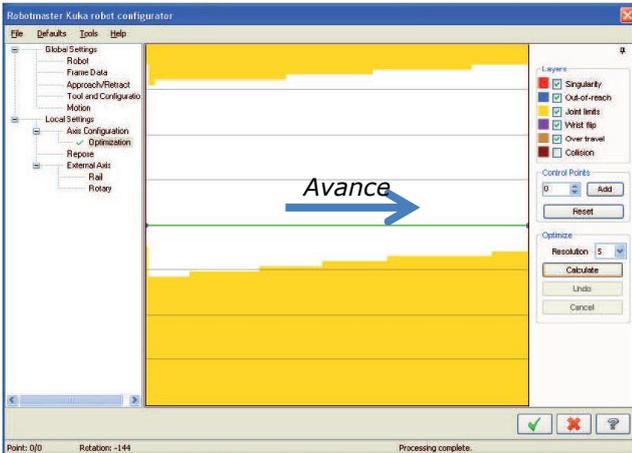


figure 109 : Visualisation dans robot master d'une trajectoire robot

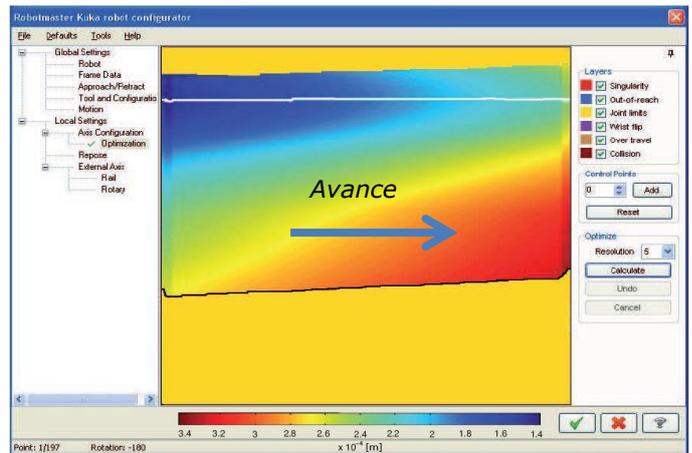


figure 110 : Adaptation de l'interface pour visualiser la gestion de redondance

On peut constater, qu'effectivement, la redondance a un impact non négligeable sur la qualité de la pièce (figure 111). Comme précédemment, les deux trajectoires sont tracées relativement à la première pièce réalisée dans le « lab » (planche usinable de polyuréthane moussé). Lors de l'estimation (figure 110) l'écart entre la courbe blanche et noire s'accroît (différence de couleur). Sur la phase de test, cet écart n'évolue pas de manière aussi continue, cependant qualitativement la courbe noire donne une moindre qualité que la blanche. Dans l'absolu, nous obtenons des différences conséquentes (écart max : courbe blanche < 0.7mm, courbe noire < 1mm).

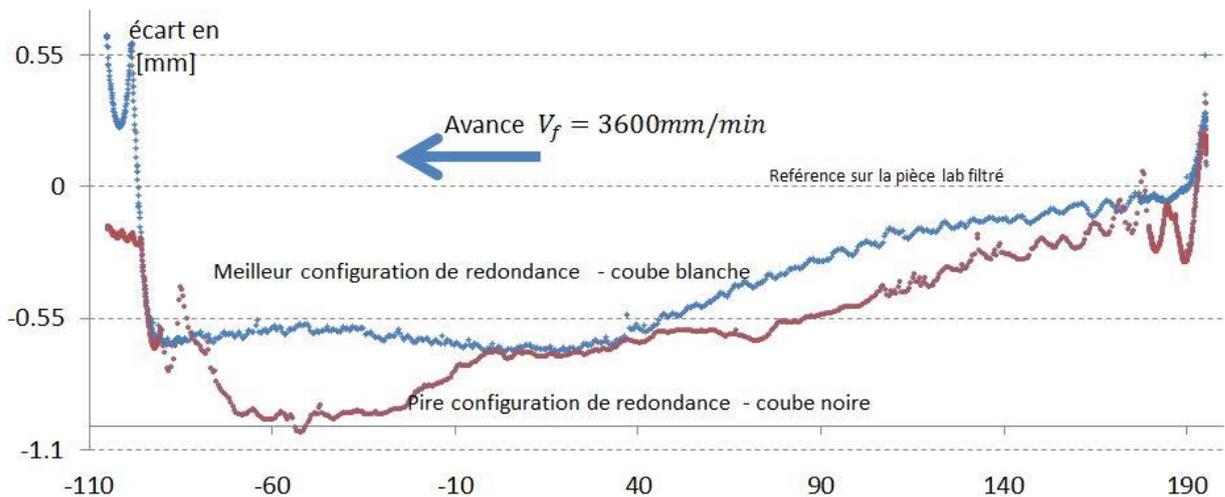


figure 111 : Effets de la redondance sur la perte de raideur du robot lors de la réalisation d'un détourage

## b Impact du posage

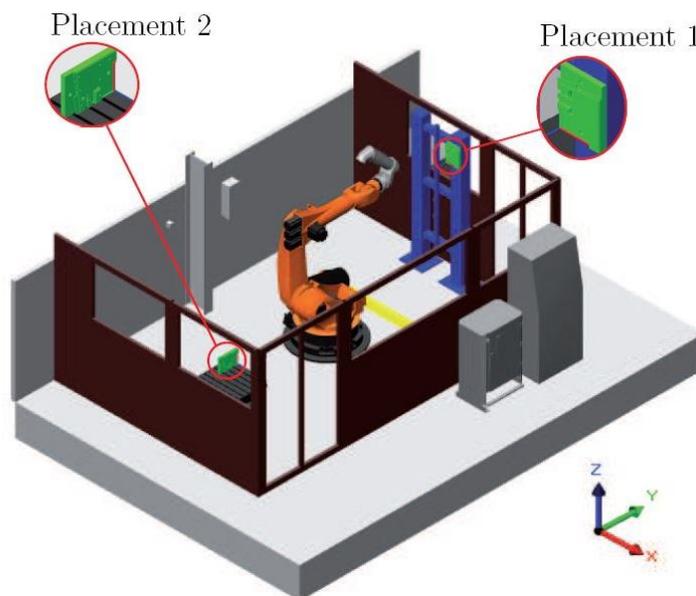


figure 112 : deux placements de la pièce dans l'espace de travail du robot

Nous avons choisi deux posages, sollicitant a priori des axes différents (figure 112). Le premier sollicite l'axe 1 alors que le second le sollicite peu. Sur ces deux posages, on réalise une nouvelle fois cette ligne droite. On choisit ici, pour le posage 2, le meilleur des parcours. Par contre, dans le cas du posage 1, le meilleur parcours impose un changement de posture en cours de ligne droite. Le fait de changer de posture implique un dégagement de la pièce, une reconfiguration du robot, puis un ré accostage, d'où des transitoires, il est donc évident que cela entraînera un défaut sur la pièce. Nous avons alors choisi un parcours optimum mais qui doit être réalisé avec une unique posture.

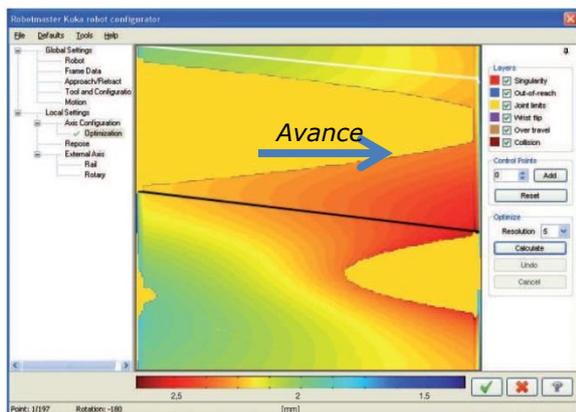


figure 113 : déformé suivant  $y_{outil}$  pour le placement 1

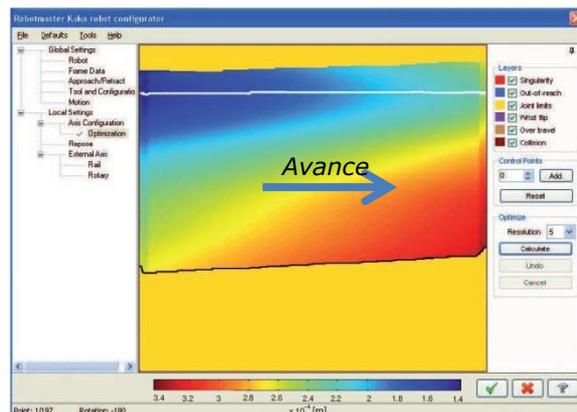


figure 114 : déformé suivant  $y_{outil}$  pour le placement 2

A nouveau, comme pour les deux étapes précédentes, la mesure nous confirme bien l'impact du posage suivant la position sur le parcours, les écarts peuvent être du simple au double.

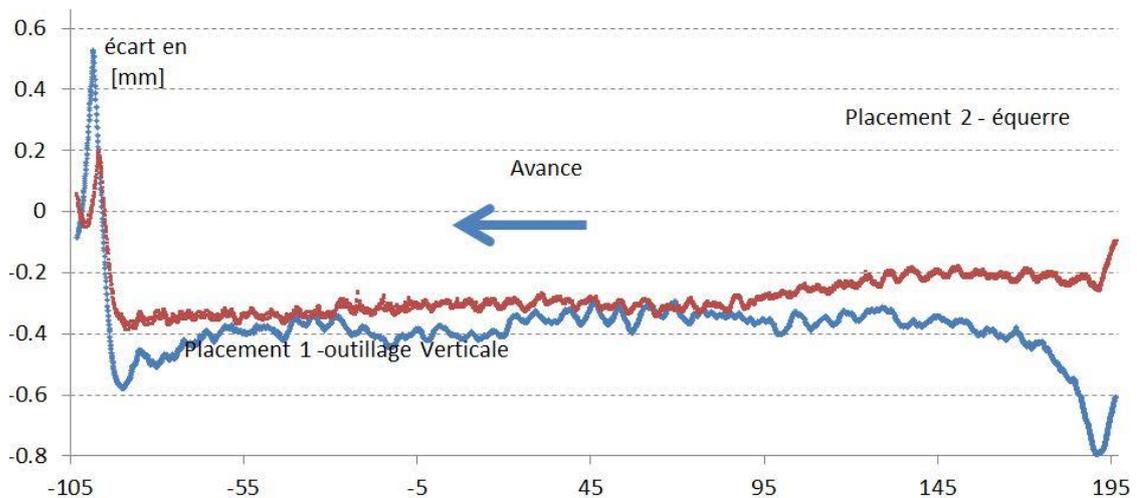


figure 115: Validation expérimentale de l'estimation de la déformé associé au posage

### **c Conclusion sur la gestion l'hétérogénéité**

Nous venons de mettre en évidence l'impact de l'hétérogénéité sur la qualité de production d'une pièce. Lors de la réalisation d'une pièce, nous devons donc prendre en compte le posage et la redondance afin de minimiser les défauts qualités de la pièce à réaliser.

### **3.6. Application au pilotage du procédé**

Le parachèvement d'une pièce réalisée avec une structure souple tel qu'un robot peut être décomposé de la manière suivante. Dans une première phase, il faut effectuer un choix d'outil avisé afin de sécuriser le processus de production. La seconde phase cherche à minimiser les défauts. Et seulement dans une dernière étape, si la qualité obtenue n'est pas suffisante, on pourra envisager des corrections.

Afin d'illustrer nos propos, prenons l'exemple exposé dans l'article présenté à la conférence ICRA en Allemagne [45]. Nous considérerons uniquement ici l'opération de détourage. Sur la pièce présentée (figure 116), nous définissons un contournage découpé en 5 segments. Sur chacun de ces segments, nous sommes capables d'identifier les engagements radiaux (figure 117). Nous en déduisons, dans le repère outil défini par l'axe outil et la direction d'avance, les efforts radiaux de cet outil (figure 118). Enfin, pour un posage donné, on peut projeter ceux-ci dans les différentes directions pour obtenir la variation de chargement dans l'espace de travail du robot (figure 119).

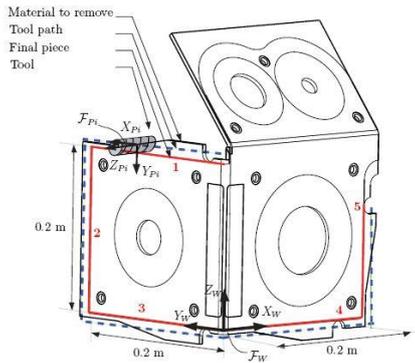


figure 116: Exemple de détournage

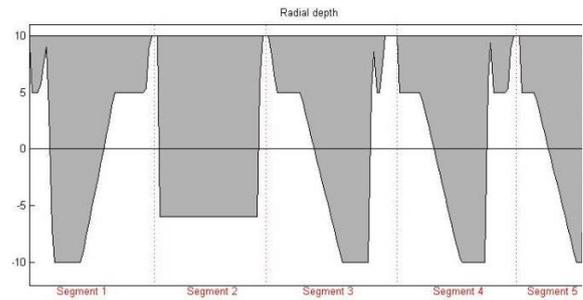


figure 117 : variation de l'engagement radial sur l'abscisse curviligne du parcours

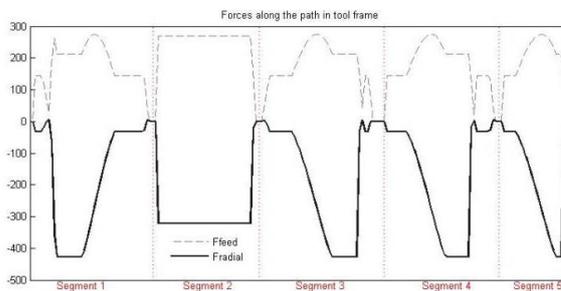


figure 118 : Efforts radiaux et d'avance le long de l'abscisse curviligne dans le repère outil

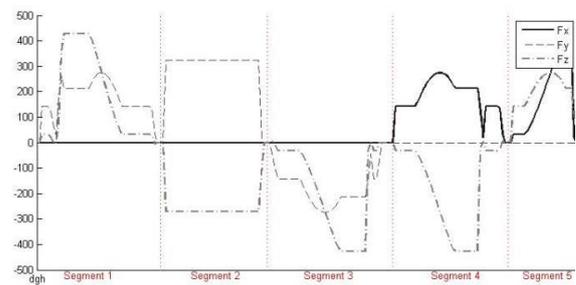


figure 119 : Efforts radiaux et d'avance le long de l'abscisse curviligne dans le repère robot

Connaissant le posage et les efforts, nous pouvons, en chacun des points du parcours, calculer, en fonction de la redondance, la déformée du robot. Sur les figures ci-dessous (figure 120 & figure 121), on peut visualiser cette déformée. En abscisse, nous retrouvons l'ensemble des points du parcours. Dans la seconde direction nous voyons l'angle  $\beta$  traduisant la redondance de l'outil. Suivant la colormap et/ou l'altitude, on note la déformation estimée du robot.

Il faut alors choisir un chemin. Si on peut, visiblement sur la pièce (figure 116), enchaîner le contournage des trois premiers segments, on constate sur le graphe que celui-ci ne nous permet pas d'obtenir la meilleure qualité. La lecture de cette cartographie nous indique qu'au moins, à la fin du second segment, un changement de configuration est préférable.

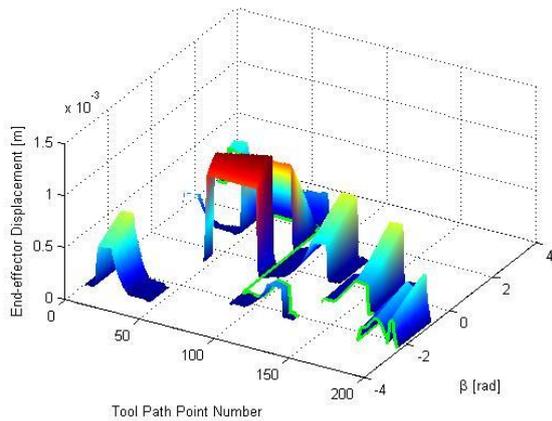


figure 120 : vu 3D de la déformé le long de l'abscisse curviligne

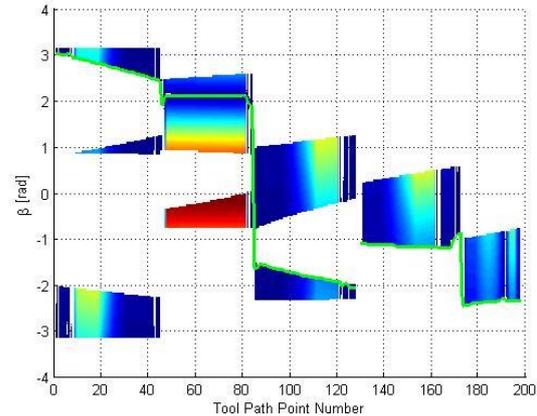


figure 121 : vu de dessus de la déformé le long de l'abscisse curviligne

L'algorithme choisi ici est simpliste :

- Il impose une configuration par segment,
- il choisit l'angle  $\beta$  conduisant au défaut minimum,

Dans le cas présent, sur le premier segment de  $[0 ; 45\text{mm}]$ , on distingue trois zones, soit trois configurations,

Seulement deux permettent de parcourir le segment sans changement de configuration. Dans chacune de ces zones, on détermine les valeurs de  $\beta$  minimisant l'erreur, ensuite on choisit celui dont le maximum est le plus faible. Nous reviendrons ultérieurement sur ce critère.

Ce travail étant réalisé pour tous les segments, on peut attribuer une note globale au posage.

Dès lors, nous pouvons définir un algorithme d'optimisation comme suit.

### **a Définition du problème d'optimisation**

Pour définir un problème d'optimisation, nous devons définir un vecteur d'un ensemble de paramètres décrivant une situation. Ceci étant fait, on décrit une fonction coût. Dans la littérature roboticienne, on trouvera différents critères permettant d'optimiser des objectifs différents tel que la manipulabilité [46]. On peut ajouter, en dernier lieu, des contraintes afin de borner le problème. Il peut s'agir, par exemple, des limites articulaires, d'un espace réduit pour le positionnement de la pièce, ou encore, de considération robotique telles qu'éviter de s'approcher de singularité. Il ne reste ensuite qu'à exécuter un algorithme d'optimisation afin d'obtenir une solution.

Constituons notre vecteur caractérisant une pose.

Tout d'abord, l'origine de notre pièce est définie par sa position  $(x_{0w}, y_{0w}, z_{0w})$  et son orientation, soit les angles d'Euler  $(\phi, \theta, \psi)$  (utiliser dans la thèse de Claire Dumas), soit l'utilisation des quaternions définis à l'aide d'un vecteur directeur  $u$  et d'un angle  $\theta$ .

Comme nous l'avons évoqué précédemment, le robot peut potentiellement réaliser une même trajectoire dans différentes postures (théoriquement, il en existe huit pour un robot anthropomorphe). Nous choisissons d'interdire, en cours de réalisation de l'entité, de changer de posture. Une entité peut être comprise comme un ensemble d'éléments successifs du contour (ligne, arc) ayant entre eux une continuité en tangence. On représentera alors celle-ci par le vecteur  $\mu$  de dimension  $m$  définissant le nombre d'entité de la pièce étudié, ici 5 :

$$\mu = [\mu_1 \quad \dots \quad \mu_m]^T \quad \text{avec } \mu_j \in [1, \dots, 8]$$

Enfin, nous avons défini la position de la pièce, ainsi que la posture du robot, il ne reste alors que la redondance. On définit alors le vecteur, qui en chacun des  $n$  points du parcours donne l'angle de redondance, soit :

$$\beta = [\beta_1 \quad \dots \quad \beta_n]^T \quad \text{avec } -\pi \leq \beta_j \leq \pi,$$

Notre vecteur décrivant un usinage de pièce s'écrira alors

$$x = [x_{ow} \quad y_{ow} \quad z_{ow} \quad \phi \quad \theta \quad \psi \quad \mu^T \quad \beta^T]^T \quad \text{Eq. 57}$$

Nous devons maintenant choisir un critère d'optimisation, différents critères ont été proposés et mis en œuvre. Nous avons choisi de minimiser l'écart maximum

$$\text{Minimiser } f = \max[c_i], i = 1, \dots, n \quad \text{Eq. 58}$$

$$\text{Avec } c_i = \|\delta d_i(u_{avance} \wedge z_{outil})\|$$

Où  $\delta d_i$  est la déformée du robot au point  $i$ ,  $u_{avance}$  est la direction au point  $i$  de l'avance outil,  $z_{outil}$  est l'axe outil.

Dans l'article d'ICRA [45], nous utilisons une moyenne quadratique,

$$\text{Minimiser } f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \quad \text{Eq. 59}$$

Cette étude a été menée avec ce dernier critère sur la pièce présentée figure 116. L'espace de travail a été borné pour l'origine pièce à un cube se trouvant au-dessus d'une table et seule la rotation de la pièce a été autorisée autour de l'axe  $z$  (figure 122).

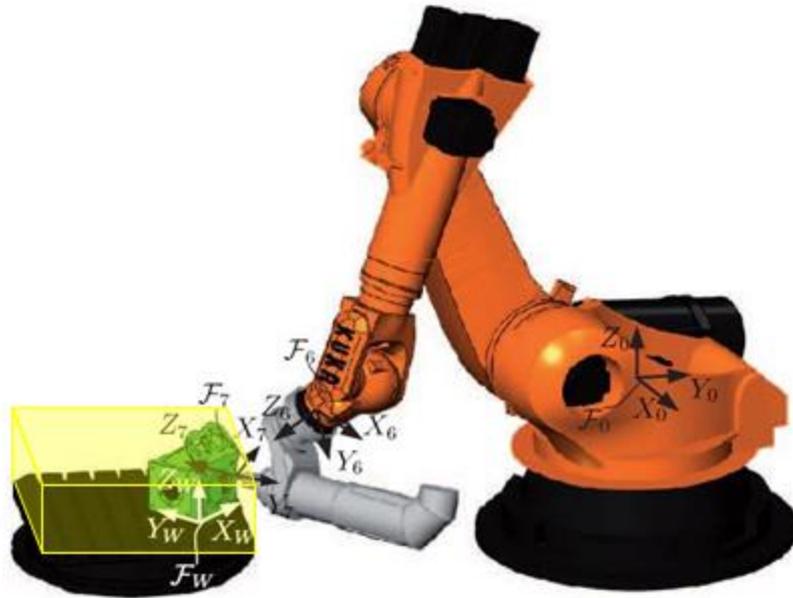


figure 122 : Volume d'optimisation du placement pièce

Afin d'illustrer les différences obtenues théoriquement sur la flexibilité du robot, nous avons considéré quatre cas et estimé la valeur de la fonction quadratique. Les cas considérés sont le meilleur et le plus mauvais posage, et pour chacun d'eux la meilleure et la pire gestion de la redondance

Posage résultat	meilleur	meilleur	pire	pire
	meilleur	pire	meilleur	pire
Gestion de la redondance	meilleur	pire	meilleur	pire
$f_{MQC}$ [mm]	0.083	0.35	0.82	1.2

Prenons le profil le long de l'abscisse de l'erreur estimée dans l'un des cas.

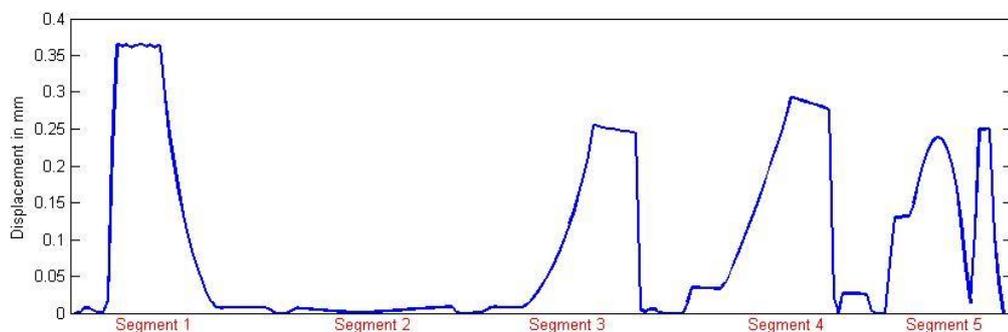


figure 123 : Déviation estimée le long de l'abscisse curviligne sur les cinq segments de notre pièce

On constate que le déplacement latéral, avec cette stratégie, permet d'obtenir sur le segment 1, une erreur de l'ordre de 0.36mm. À supposer que la qualité souhaitée soit moindre, quelles sont les stratégies disponibles afin de corriger cet écart ?

Deux stratégies sont envisageables :

- Modifier le parcours d'usinage afin de respecter, malgré la déformée, l'intervalle de tolérance (stratégie miroir décrit dans le paragraphe, Correction de trajectoires page 123). Cette stratégie peut induire un certain nombre de bouclage. En effet, modifier le parcours revient à modifier l'évolution des engagements et donc à terme la déformée (particulièrement pour de petit outil). Cette stratégie peut être complexe et créer une sollicitation vibratoire du robot,
- Diminuer les efforts afin de limiter la déformée. Cette stratégie est simple à mettre en œuvre, mais elle induit une perte de productivité. Nous poursuivons néanmoins cette analyse,

### **b Modulation des efforts**

Suivant l'équation (Eq. 43) la déformée est proportionnelle aux efforts. Le modèle d'efforts (Eq. 56) induit une relation directe entre l'avance et les efforts. L'action la plus élémentaire est donc de diminuer la vitesse de consigne du programme. Une diminution globale de la vitesse d'avance induit une augmentation du temps de réalisation directement proportionnelle à la perte de vitesse.

Cependant, plutôt que d'exécuter cette diminution de manière globale, on peut la réaliser localement. Sur la figure 124, on observe les efforts dans le repère outil. L'effort d'avance est positif et l'effort radial est négatif. On peut donc limiter l'avance dès que la norme de l'effort radial est supérieure à une valeur donnée. On peut voir les courbes vertes, marron, magenta, bleu claire limitant respectivement l'effort -400,-300,-200 et -100 Newton. Ces courbes sont obtenues en modulant localement le profil de la vitesse d'avance (figure 125). On voit bien ici que l'impact sur le défaut maximum est bien diminué respectivement à 0.34, 0.26, 0.24 et 0.2mm (figure 126). Cependant, lorsque l'on observe la déformée, on constate que celle-ci est diminuée à des endroits où elle ne nécessitait aucune diminution. Si on considère le segment 2, à aucun moment les écarts géométriques ne justifient une diminution du chargement et donc de l'avance. Pour autant, sur ce segment, la norme des efforts radiaux est supérieure à 300N.

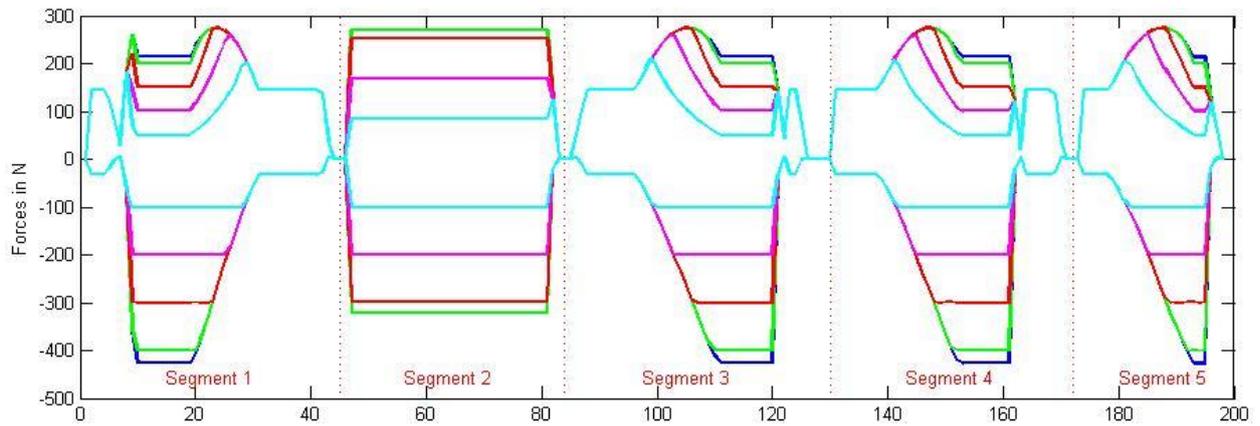


figure 124 : Limitation de l'effort radial le long du parcours

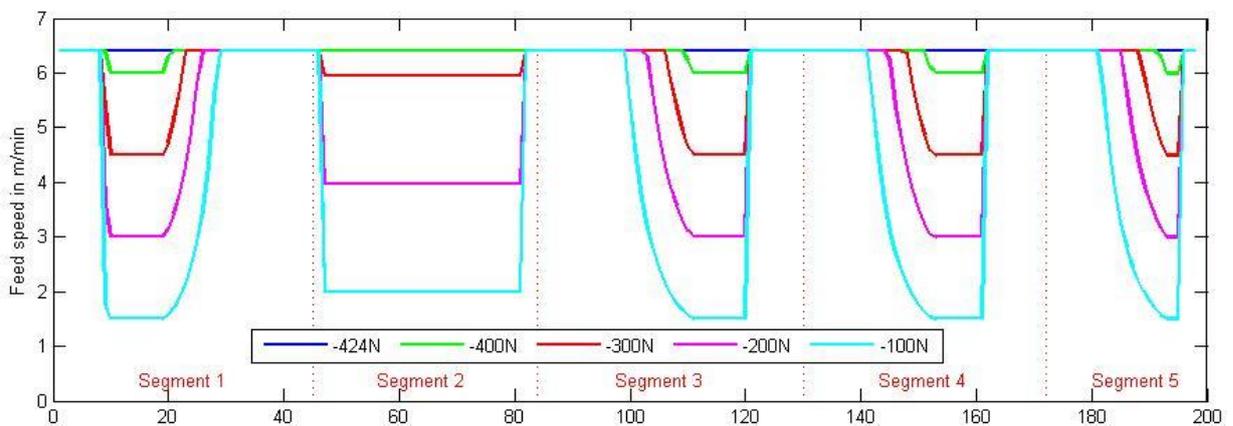


figure 125 : profil de vitesse le long des segments permettant la majoration de l'effort radial

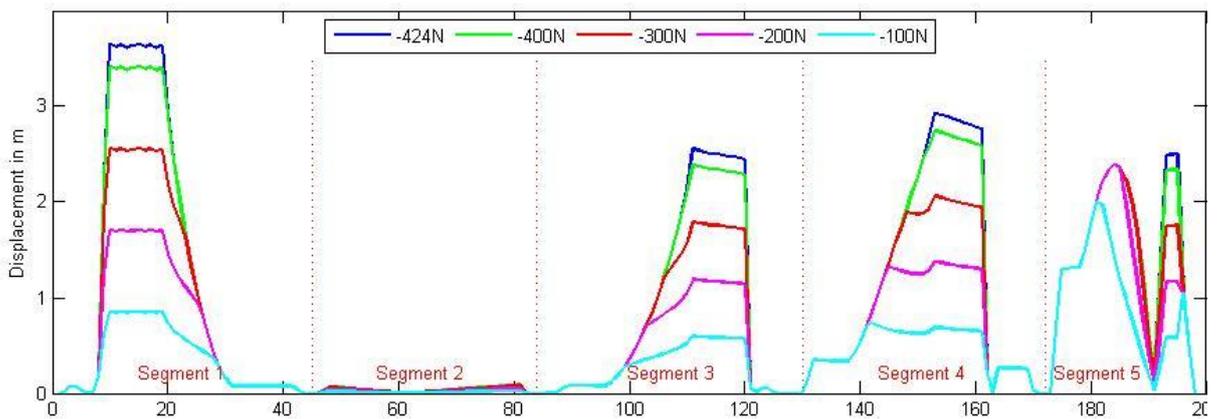


figure 126 : diminution des écarts sur la pièce en fonction de la limitation de vitesse fonction des efforts

En effet dans cette approche, on ne prend pas en compte la raideur localisée du robot évoluant au long de l'abscisse curviligne de l'usinage. Dans l'équation Eq. 43, la raideur du robot intervient et n'est pas constante le long de la trajectoire.

Afin d'intégrer celle-ci, il faut donc moduler la vitesse par rapport à la déformée. On est alors capable sur un robot de se donner un objectif de qualité et de l'assurer quelque soit le posage et le chemin de redondance. Il faudra néanmoins valider que cette augmentation du nombre de bloc, pour faire varier la vitesse, ne perturbera pas la trajectoire [47].

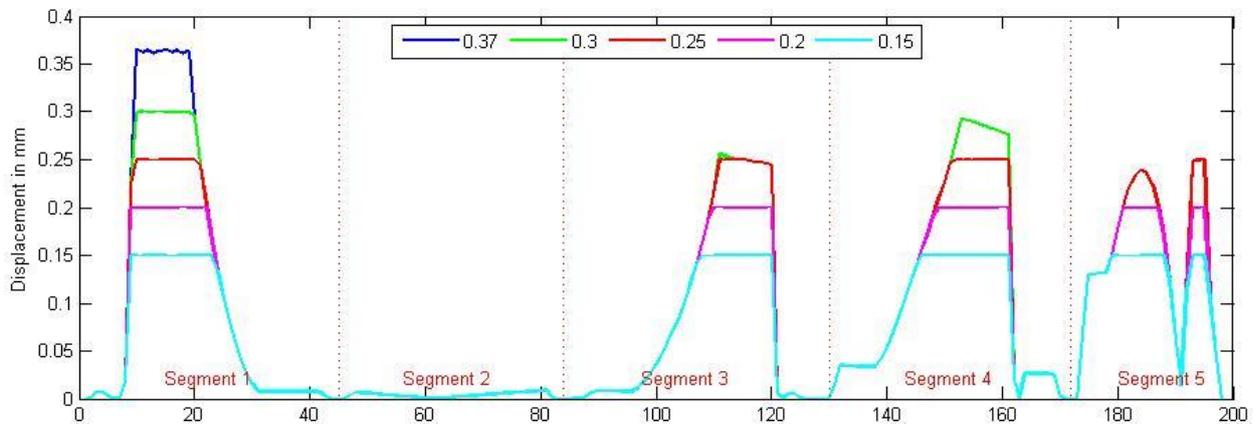


figure 127 : Définition d'un seuil de qualité le long du parcours

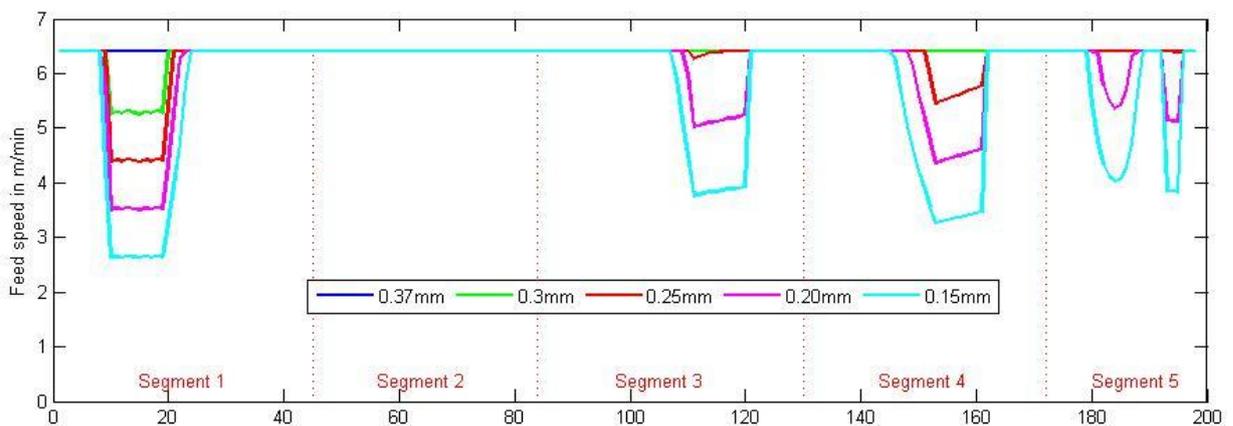


figure 128 : profil de vitesse le long des segments pour assurer la qualité

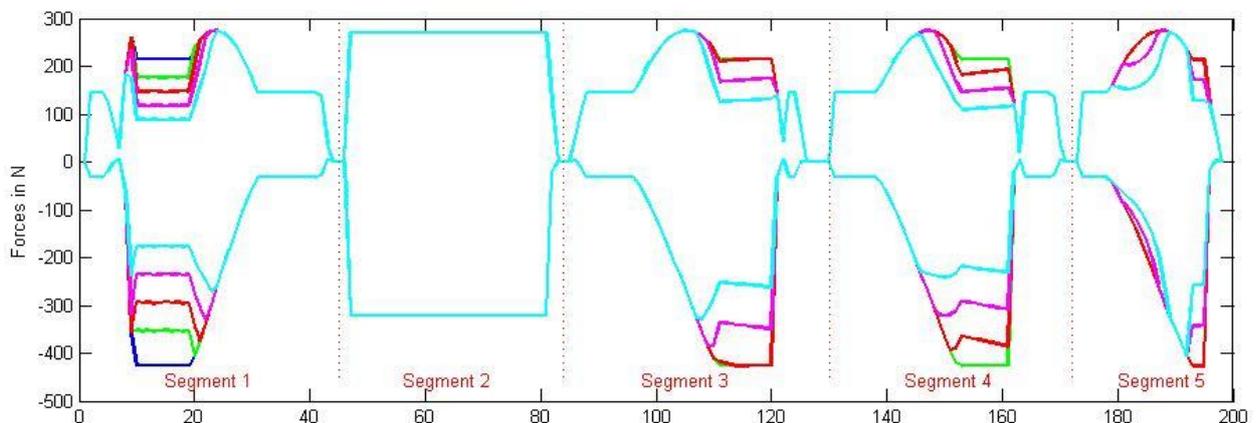


figure 129 : Effort résultant de la limitation de vitesse fonction de la qualité

On peut alors estimer la perte de productivité juste nécessaire associée à chacune des approches. On définit cette perte de productivité à l'aide de la formule suivante :

$$\eta = 1 - \frac{A_{IT}}{A_{max}} \quad \text{Eq. 60}$$

$A_{IT}$  représente le temps d'usinage associé au profil de vitesse. On définit alors :

$$A_{IT} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta l}{V_i}$$

Avec  $\Delta l$  (en mètre) le pas de discrétisation de l'abscisse curviligne et  $V_i$  la vitesse instantanée au point  $i$  (en m/min).  $A_{max}$  représente alors le temps de réalisation sans réduction de vitesse.

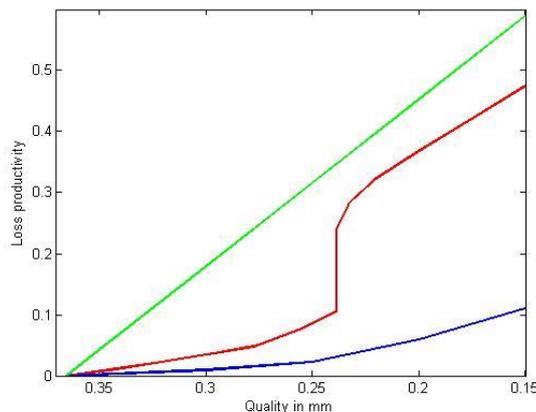


figure 130 : évolution de la perte de productivité en fonction de la stratégie adoptée

Comme on le voit sur cette courbe, la perte de productivité reste minimale pour des gains de qualité notable. On parvient, avec cette stratégie, à augmenter par plus deux fois la qualité (nous passons de 0.37mm à 0.15mm) pour une perte de productivité à peine supérieure à 10%.

L'intérêt de cette approche est sa robustesse. En effet, la correction est peu sensible aux erreurs de mesures. Cette robustesse est liée aux calculs relatifs qui sont réalisés.

On peut alors construire un critère d'optimisation du placement de tâches en s'inspirant de cette approche où l'on estimera à iso qualité la productivité théorique du parcours.

Soit  $Q$  le niveau de qualité cible ou  $Q = \frac{IT}{2}$ , et  $\delta d_{max}$  la déformée maximale calculée le long de l'abscisse curviligne pour le posage considéré.

On peut décrire la fonction coût  $f$  comme :

- si  $\delta d_{max} > Q$ , on calcule le vecteur des vitesses  $V = [V_1 \dots V_n]$  et on déduit  $f = \eta = 1 - \frac{A_{IT}}{A_{max}}$ ,
- si  $\delta d_{max} \leq Q$ ,  $f = \frac{Q}{\delta d_{max}}$ , ceci revient virtuellement à augmenter la vitesse sur l'ensemble du parcours afin de créer un défaut équivalent à la qualité estimée.

Ce critère est sans unité et peut alors traduire, pour une valeur inférieure à 1 une perte de qualité, et pour une valeur supérieure, un gain de qualité. Cependant, dans tous les cas, la qualité visée théoriquement est respectée.

### 3.7. Conclusion – Machines souples

Ce dernier chapitre nous a permis d'étudier l'impact d'une machine souple, et tout particulièrement les robots sériels, dans le triptyque machine-outil-pièce. Notre analyse, au regard de la qualité pièce, a fait ressortir trois faiblesses majeures : la précision, la souplesse, et enfin l'hétérogénéité.

Pour répondre à ces trois points, plusieurs étapes ont été nécessaires :

- La sélection d'un modèle adapté à nos objectifs représentant la souplesse des robots,
- La mise en place d'un premier puis d'un second protocole permettant d'identifier les différentes grandeurs du modèle. Ce processus doit être exploitable industriellement,

Les modèles des robots étudiés étant définis, nous avons exploré différents axes permettant de minimiser l'impact des faiblesses du robot sur la pièce.

Le premier axe s'appuie sur une extension de l'apprentissage appelé ici correction miroir. Nous avons déployé celle-ci sur un premier exemple d'une pièce de grande dimension par mesure directe de la déformée pièce. Dans un second exemple, nous avons traité la déformation induite par des efforts de coupe dans un cas de détournement. Nous avons pu montrer que nous sommes capables, dans les deux cas, de diminuer voire supprimer les écarts. La difficulté réside dans l'estimation des différentes grandeurs à corriger. Par ces approches, nous avons en partie répondu à la problématique de manque de précision des robots.

Le second axe traite de la souplesse du robot. Etant capable d'estimer la déformation du robot, nous avons pu, au vu du procédé, définir des critères liés à la qualité pièce. Ceci nous permet :

- De calculer l'estimation d'une correction (stratégie miroir) étudiée dans l'axe un,
- Pour un posage et un parcours donnés, d'envisager un pilotage du processus permettant de garantir une qualité pièce,
- Enfin de fournir, pour l'axe trois, une possibilité de mieux appréhender la qualité d'une trajectoire,

L'axe trois a mis en évidence l'impact sur la qualité des configurations multiples pour réaliser une pièce que ce soit au travers de la redondance ou du placement de la tâche. La mise en place des outils issus de la robotique permet de prendre en compte l'hétérogénéité du robot. Cet éclairage nous permet alors de mettre en place des stratégies de placement de pièce et de gestion de la redondance afin d'accroître la qualité obtenue.

#### 4. CONCLUSION – BILAN DES ACTIVITES DE RECHERCHE

La rédaction de ce mémoire a été l'occasion de prendre du recul sur les différentes activités de recherche que j'ai pu mener durant ces quinze dernières années.

Mon activité de recherche est fortement marquée par l'expérimentation et l'application industrielle. Le concept de Smart Machining & Monitoring System a été présenté et expliqué. Dans la structuration de ma démarche, nous trouvons, au centre, l'acquisition de données de haut niveau (étalonnage du juste modèle), acquisition qui dans un second temps, peut être mise à contribution suivant différents objectifs d'optimisation opératoire, de surveillance, de pilotage, ou encore de big data. Chaque approche permet de transcender cette donnée primaire afin de pouvoir la prendre en compte dans les autres activités.

J'ai commencé par détailler la construction de la modélisation du fraisage en exposant les différentes hypothèses effectuées. Cette description étant faite, j'ai abordé successivement quatre thématiques gravitant autour du fraisage. Pour chacune d'entre elles, le besoin a été exprimé, sa description a permis d'orienter et choisir la modélisation permettant d'y répondre. Revenons brièvement sur chacune d'entre elles afin d'en extraire l'essentiel des points marquants.

Pour la surveillance de l'usure en fraisage, nous avons analysé et proposé une modélisation des coefficients spécifiques de coupe permettant l'estimation de l'usure par l'observation des efforts. Différents critères ont été proposés et étudiés. Au-delà de l'état d'usure, nous avons mis en évidence la nécessité de différencier les dents de l'outil et montré l'opportunité d'une détection des bris d'outil.

Nous avons alors poursuivi sur la détection du bris et des incidents de coupe. L'analyse du contexte nous a permis de mettre en évidence l'inadéquation de la modélisation précédemment utilisée. En effet, l'usure est un phénomène évoluant lentement. La détection d'incidents demande un traitement rapide et robuste. L'approche classiquement utilisée consiste en la détection d'un événement des plus éphémères. Nous avons proposé une approche radicalement différente en proposant de définir une surveillance de l'état de l'outil, qui n'est plus lié au temps. Nous avons bâti notre critère pour répondre à ces caractéristiques. Nous avons pu montrer son efficacité en développant la notion de surveillance intermittente afin d'augmenter la robustesse du système en évitant les zones dites transitoires. Nous avons montré la potentialité de réaliser celle-ci à l'aide de capteurs permettant d'envisager une surveillance industrielle. En ce qui concerne la surveillance, comme nous l'avons expliqué, la poursuite dans cette voie demande une capitalisation des cas afin d'industrialiser une solution (projet Usinae). Après la détection, l'un des scénarii envisageable est d'ajuster les paramètres opératoires. On parlera alors de pilotage. Les travaux suivants ont développé cet axe. Nous nous sommes alors intéressés aux cas particuliers des transitoires.

Les transitoires sont issues des variations à la fois de la cinématique machine et du chargement de l'outil. Comme nous l'avons montré, ces variations induisent des pics de puissances non souhaités, qui peuvent obliger l'opérateur à diminuer sa productivité pour garantir l'état de sa broche. Nous nous sommes donc intéressés au cas le plus complexe, à savoir, le virage pour lequel la cinématique et le chargement de la broche évoluent simultanément. Après une étude de l'évolution de ces différents aspects, nous avons

proposé une stratégie de correction basée sur une modélisation macroscopique de la coupe plus adaptée à cette étude. Nous l'avons mise en place sur un cas industriel d'UGV et avons montré que nous étions capables de maîtriser la puissance consommée. Des gains substantiels de productivité sont réalisés dans des configurations défavorables.

La proximité du monde aéronautique nous a amenés à nous intéresser au détournage des matériaux composites (carbone/époxy) de forte épaisseur. Ce travail étant à l'origine réalisé avec des outils PCD( Poly Cristallin Diamant), le coût de ce détournage était très coûteux. L'outil de remplacement s'est avéré être une fraise à concrétions diamantées. Les données sur cette typologie d'outil étaient très parcellaires et insuffisantes à une optimisation des conditions opératoires. C'est donc tout naturellement qu'étant spécialistes du fraisage, nous nous sommes intéressés à ce dernier. L'analyse de cet outil nous a permis de dégager deux principaux objectifs.

Le premier concerne l'optimisation des conditions opératoires. Pour ce faire, nous avons utilisé une modélisation macroscopique. Une procédure a été mise en place afin de permettre une optimisation des conditions opératoires pour ce type d'outil.

En second lieu, cet outil étant utilisé pour détourner des matériaux composites et ces pièces étant de taille toujours croissante, la possibilité d'une exploitation de ce procédé dans des cellules robotisées est plus que probable. Dès lors, aux vues des défauts des porteurs, il devient primordial d'être capable d'estimer les efforts de coupe. L'analyse de l'outil ainsi que du matériau usiné nous ont conduit rapidement à conclure que différentes hypothèses réalisées sur les fraises n'étaient plus valides. Nous avons alors bâti une nouvelle modélisation. Celle-ci a dû, à la fois, prendre en compte des spécificités de l'outil et du matériau. Le principal point problématique rencontré pour les matériaux composites est leur hétérogénéité. En effet, les efforts nécessaires à l'usinage de ce matériau sont modifiés à la fois par l'orientation du fibrage de la pièce et par la direction d'usinage. En ce qui concerne l'outil, les principales différences avec les fraises sont : la géométrie qui évolue au cours de sa vie et la répartition aléatoires des grains. Prenant en compte ces différences, nous avons proposé une nouvelle modélisation de ce procédé. Un système de scanning d'outils a été mis en place, et nous sommes parvenus à la fois à estimer ces efforts mais aussi à prédire la qualité réalisée par ces outils.

Cette première partie du manuscrit a traité des procédés et du choix d'une modélisation en fonction du contexte. Dans ces travaux, l'une des hypothèses souvent admise est la rigidité de la machine. Nous nous sommes ensuite intéressés à cette hypothèse en considérant l'étude des robots sériels.

Une première analyse a mis en évidence des différences majeures par rapport à une exploitation des machines à commande numérique. Trois causes principales ont été identifiées : la précision, la souplesse et l'hétérogénéité.

Pour répondre à ces faiblesses et améliorations de la qualité pièce, nous avons préalablement sélectionné un modèle permettant de mieux appréhender le comportement des robots sériels. Nous avons construit différents protocoles pour recalibrer ces modèles, le premier basé sur l'application d'un effort et le second sur l'application d'une déformation.

Les modèles de nos robots étant connus, nous avons proposé différentes approches permettant en partie de répondre aux faiblesses de ce type de porteur.

Concernant la précision, deux propositions et applications ont été mises en œuvre. La première est une correction par stratégie miroir, une mesure de l'écart à la consigne est effectuée, puis une correction est apportée. Le cas d'application traité était une voilure de quatorze mètres réalisée dans le cadre du projet Robofin pour DAHER. Le second cas d'application concernait sur une correction miroir dû à la déformation du robot suite aux sollicitations du processus de fraisage. L'application a été réalisée sur une pièce de démonstration dans le cadre du projet ANR COROUSSO.

Concernant l'hétérogénéité de l'espace de travail des robots, la mise en place du modèle élasto statique permet de prendre en compte cette dimension. Deux aspects majeurs sont abordés : (i) la gestion de la redondance et (ii) le placement de tâche. La mise en place d'essais a permis de confirmer la justesse de ces analyses.

Enfin, le traitement de la souplesse a été traité en l'intégrant au pilotage du processus de fraisage. Une modulation de vitesse d'avance a été réalisée afin d'assurer la qualité pièce. La perte de productivité comparativement à une commande numérique a été faite.

Je viens de décrire en grande partie mes activités de recherches passées et présentes. Je vais maintenant aborder l'avenir en décrivant l'ensemble des aspects que je souhaite développer dans la continuité de mes travaux.

## 5. PERSPECTIVES

Je viens d'exposer mon cheminement durant ces quinze années de recherche. Les thématiques des sujets abordés sont diverses, ceci est dû à la proximité que nous avons avec le milieu industriel et la diversité des besoins présents dans l'écosystème en Pays de Loire avec l'aéronautique, le nautisme, ou encore les énergies nouvelles...

Mon expertise des processus de coupe s'est d'abord faite sur des machines de production standard, puis s'est focalisée sur les machines souples (robot) où il se crée un couplage entre le procédé et le moyen. L'intérêt grandissant de ces processus robotisés est lié aux gains financiers potentiels qui peuvent être faits pour les pièces de grandes dimensions. Les procédés de parachèvement sont divers, ils concernent principalement le détournage, le perçage mais aussi les opérations de préparation de surface.

C'est dans cette direction que je me projette.

Différents scénarii sont envisageables et progressifs. Ils doivent prendre en compte la dimension de la pièce. On considèrera que la tâche est de faible dimension, si elle peut être incluse dans l'espace du robot sans que celui-ci ne soit déplacé. Le premier scénario est classique, le robot est fixe et il réalise sa tâche. Le scénario opposé est lui aussi évident, le robot effectue ses opérations de manière mobile (omnimove de « KUKA »). Si le premier scénario ne répond pas à l'ensemble des configurations de pièce possible, son opposé de par sa complexité de mise en œuvre et son coût ne peut être une réponse universelle. Il existe un ensemble de solutions dégradées permettant de répondre à ces problématiques. Cela va du robot sur des axes supplémentaires aux robots simplement déposés lestés.

Voici les scénarii à court et moyen terme que j'envisage. La définition même de ce découpage peut prendre plusieurs formes temporelles ou non. Ce n'est cependant pas une vision temporelle que je vais développer ici. Je considèrerai donc par la suite, que les travaux à court terme concernent des actions déjà initiées. Les actions à moyen terme définissent mes futures priorités non encore initiées.

Dans cette démarche, il me semble primordial de mener en parallèle différentes approches. Le premier axe est curatif, le constat est fait de l'imperfection d'un robot, le second axe est préventif, nous devons mettre en place une méthodologie permettant de modéliser et de prendre en compte l'ensemble des défauts du robot.

Nous conserverons dans nos démarches une contrainte d'industrialisation de nos méthodes, même si la solution paraît sous optimale. Nous devons identifier les processus juste nécessaires afin d'être industriellement viables.

### 5.1. vision à court terme

Deux axes sont actuellement menés:

- Le premier concerne les pièces de faible dimension (tâche incluse dans l'espace opérationnel du robot), nous avons mis en évidence l'impact du placement et de la redondance du robot suivant un point de vue raideur. Nous devons élargir notre vision et prendre en compte les non qualités dues à d'autres phénomènes

que la raideur, afin de définir des stratégies miroir plus efficaces, notre approche ici est curative,

- Comme nous l'avons décrit dès le début de ce manuscrit nous construisons notre analyse sur les données brutes et/ou transformées. La potentialité d'exploitation de celle-ci est directement liée à la façon dont nous extrayons cette dernière. Nous aborderons donc l'extraction des données représentatives du robot. Ces données sont cruciales dans la mise en place de systèmes prédictifs et donc préventifs.

### **a Critères d'analyse de la redondance vis-à-vis de la qualité pièce**

Durant les travaux que nous avons menés, nous avons focalisé notre attention sur la prise en compte de la souplesse des robots. Si ce point de vue permet des gains, l'amélioration de qualité n'est pas aussi importante qu'estimée, d'autres aspects non prépondérants initialement le deviennent. Nous devons donc élargir notre point de vue de la gestion de la redondance.

Avant de citer les méthodologies de gestion de la redondance, il faut la définir. Dans la littérature, on peut décrire trois espaces d'évolution :

- le premier est celui de la tâche, dans le cas du fraisage, il est de degré cinq (trois degrés pour la position de l'outil, deux autres pour l'orientation),
- le second est celui dans lequel nous évoluons, on parle du degré de spatialité, il est donc de degré six,
- et enfin pour le dernier, celui du robot, nous parlerons du degré de mobilité,

Suivant les espaces que nous comparons, nous parlerons de redondance fonctionnelle, de redondance cinématique, ou de redondance structurale.

Lors de la réalisation d'une tâche, on pourra alors choisir différents critères afin de gérer cette redondance puisqu'il existe un grand nombre de solution pour une pose donnée de la tâche. On trouvera par exemple un état des lieux de ces méthodes dans la thèse Kevin Subrin, pour gérer l'espace de travail :

1. L'éloignement des butées,
2. la gestion des collisions,
3. le parcours d'une trajectoire continue sans changement d'aspect,

Ou encore pour améliorer les performances du robot :

1. l'amélioration des performances cinématiques ou de dextérité,
2. l'amélioration des performances mécaniques,
3. la prise en compte de la rigidité,
4. la minimisation de la puissance mécanique,
5. la minimisation des déplacements, vitesses accélérations, jerks,
6. la minimisation des vibrations.

Ces différents critères agissent soit sur le comportement spatial du robot (1,5,6), soit sur la gestion de sollicitation (2,3,4). Ces deux grandes dimensions conduisent souvent à des solutions contradictoires.

Afin de gérer différents points de vue, il convient de mettre en place une optimisation. La tâche ayant un degré inférieure à celle du degré de mobilité du robot, la matrice Jacobienne est rectangulaire. Dans le cas du fraisage avec un robot anthropomorphe, le degré de la tâche est de cinq et le degré de mobilité est de six (la jacobienne est de dimension 5x6). Pour un robot anthropomorphe sur rail, le degré de redondance est de deux et la matrice jacobienne est de dimension 5x7.

Afin de gérer cette redondance, deux espaces sont créés. Le premier permet d'établir les relations pour positionner le robot et le second permet de gérer la redondance. On utilise la relation utilisant la jacobienne :

$$t = \begin{bmatrix} \dot{P} \\ \omega \end{bmatrix} = J \cdot \dot{Q}$$

Où  $\dot{P}$  est le vecteur vitesse de translation et  $\omega$  le vecteur de vitesse angulaire.

A l'aide de la pseudo-inverse de  $J^+$ , on établit une relation entre les vitesses articulaires à partir des vitesses cartésiennes.

$$\dot{Q} = (J^T \cdot J)^{-1} \cdot J^T \cdot t = J^+ \cdot t$$

Baillieul propose en 1985, d'exploiter le projecteur orthogonal de la pseudo inverse afin de parcourir la ou les redondances.

$$\dot{Q} = J^+ \cdot t + (I - J^+ \cdot J) \cdot v$$

Dès lors pour une vitesse cartésienne donnée  $\dot{P}$ , le vecteur  $v$  permet de parcourir la redondance associée au couple tâche robot.

On peut alors envisager d'effectuer une optimisation dans cette espace. Suivant la méthode utilisée pour parcourir la redondance, la convergence est plus ou moins efficacement. Le critère s'écrit au travers du vecteur  $v$ . On peut citer la méthode GPM (méthode du gradient projeté). Robin et Subrin utilisent celle-ci avec un gradient combinant différents critères à l'aide de pondération évolutive.

Huo et Baron proposent une décomposition pour les redondances de type fonctionnelles avec une décomposition de l'espace spatial. L'orthogonalité n'est pas propre au robot mais à la tâche. La Jacobienne est alors projetée sur cet espace ainsi que sur l'espace perpendiculaire sur lequel on exprime le critère que l'on souhaite optimisé. Dans le cas particulier d'un robot effectuant un détournage, on utilise l'axe de l'outil pour définir l'espace de la redondance. Le premier espace est formé par le plan normal à l'axe et le second le long de l'axe de l'outil.

Dans les deux cas, les fonctions définies sont des fonctions d'état utilisant la jacobienne.

Dans le monde de la commande numérique, l'analyse de la trajectoire est généralement réalisée en effectuant l'analyse des vitesses mais aussi et surtout de l'accélération et du jerk [duc hascoet ...]. Ces aspects apparaissent dans les travaux menés à Lille par Gibarou Bearee Damak et Olabi. Ces travaux portent sur les aspects planifications de tâche, ils

mettent en place des lois de type spline et pointent les effets néfastes d'une mauvaise gestion des accélérations et jerks sur la qualité pièce.

Après ce bref état de l'art sur la gestion des redondances pour des trajectoires, définissons notre approche pour parfaire la qualité à l'aide de ces approches. Lors de la réalisation d'une trajectoire, on constate des écarts induits par les paramètres non gérés, ci-dessous les jeux d'inversion. Ceux-ci apparaissent quelque soit le critère choisi dans la mesure où leur modélisation n'est pas prise en compte.

L'utilisation de trajectoire miroir permet un premier pas dans l'amélioration de la qualité. Sur cet exemple, la circularité passe de huit cent cinquante micron à cinq cent quarante. Le gain est limité par l'apparition de pic d'inversion. Ceux-ci sont issus par l'introduction de discontinuités dans la trajectoire.

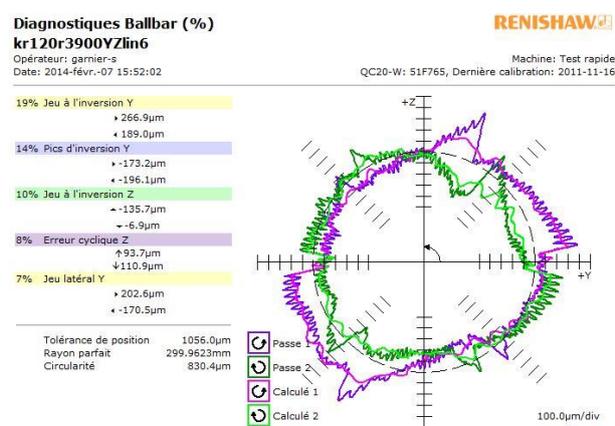


Fig 131 : Mesure Ballbar effectuée sur un robot KR120

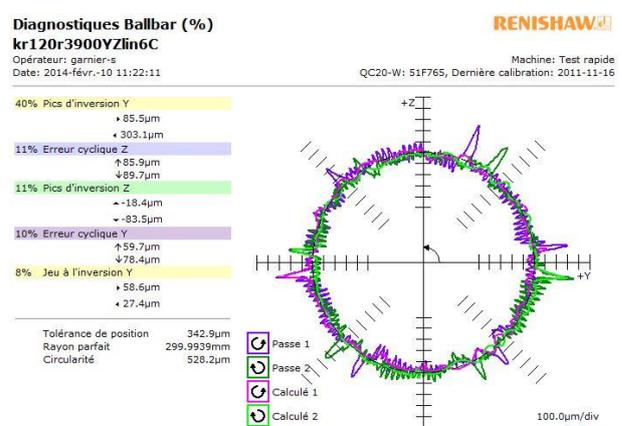


Fig 132 : Trajectoire miroir du Ballbar effectuée sur un KR120

Ces discontinuités dans l'espace cartésien induisent des fluctuations de vitesse et d'accélération dans l'espace cartésien. Nous nous proposons donc à l'aide de la gestion de la redondance, d'atténuer les discontinuités introduites dans l'espace articulaire. Cependant, la redondance ne pourra sans doute pas complètement effacer celle-ci, un compromis pourra alors être envisagé en créant dans l'espace cartésien un écart à la consigne permettant de poursuivre l'atténuation des discontinuités de vitesse et d'accélération. Cette approche devra être validée par un protocole expérimental.

L'étape suivante est d'intégrer la notion de feature. En effet, lors de la réalisation d'un parcours donné, le processus, au même titre que le robot, subit des variations rapides et ponctuelles liées à des phénomènes transitoires. Dans ce cas, pour chaque discontinuité, nous sommes capables d'identifier le type de défaut, et donc de donner une réponse a priori plus efficace. Ici, la discontinuité peut être appliquée à l'axe concerné. Ensuite, on effectue une optimisation localisée afin d'atténuer les pics de vitesse et d'accélération à l'aide de la redondance.

Nous avons montré le cas des « jeux d'inversion », on peut aussi définir comme feature un virage en usinage. Durant un virage, nous avons une discontinuité en effort (vue dans le cas du pilotage en puissance d'une machine outil), celle-ci induira une déviation de

trajectoire. La mise en place d'une trajectoire miroir contiendra donc des discontinuités en position et donc en vitesse et accélération.

La mise en place d'une bibliothèque de défauts permettrait d'envisager des corrections adaptées permettant d'atténuer localement des défauts liés à des transitoires ou des défauts machine, en gérant les redondances et les vitesses accélérations et jerk si nécessaire.

La gestion systématique de ces défauts n'est pas forcément pertinente, elle pourra être gérée en fonction de l'apparition du défaut sur la pièce.

Nous venons de définir une approche curative de la gestion du défaut. Abordons à présent une approche préventive. La mise en place d'un modèle préventif pertinent est très fortement lié à l'exploitation de données obtenues sur le robot. Obtenir un jeu de données plus riches permettrait sans aucun doute de parfaire notre estimation des robots. Analysons donc cette dernière proposition de thématique de recherche.

### ***b Moyens de mesure innovant pour l'obtention de données à fort potentiel pour l'identification des robots***

Concernant les robots poly articulés de type anthropomorphes, les erreurs de positionnement et d'orientation sont assez importantes. Ces erreurs sont dues à différents paramètres non réévalués ou non pris en compte dans les algorithmes de commande. Dans la majorité des applications, cela ne pose pas de problème car les programmes sont réalisés par apprentissage. On utilise alors la capacité de répétabilité des robots.

On peut lister sommairement les sources d'erreurs comme étant dues aux valeurs des paramètres:

- géométriques (dimension des longueurs de bras, etc.),
- non géométriques (prise en compte des jeux, aspect mécanique frottement, etc.),
- du modèles élasto statique (de la structure, de la transmission),
- dynamiques,
- de l'asservissement (justesse de mesure angulaire, synchronisation des axes, etc.)
- thermiques,
- etc...

Afin de concevoir un moyen permettant de répondre à l'identification des robots, dressons un rapide bilan des solutions existantes dont celles que nous avons déjà développées.

#### ***b.1 Les principes de calibration***

La première des actions est de calibrer au mieux les paramètres géométriques. Il existe un certain nombre de méthodologies pour réaliser cette identification. La bibliographie décrit bien ces approches. Hollerbach et Wampler [54] définissent trois familles de méthodologie :

- Point Cercle : on détermine les positions une à une des axes et on peut, via des mouvements autour de chaque axe, les identifier et déterminer, suivant les relations, l'ensemble des paramètres,
- Boucle ouverte : N poses du robot sont mesurées avec un moyen de métrologie extérieur, puis un calcul est réalisé permettant l'optimisation des paramètres à identifier,
- Boucle fermée : l'effecteur est bridé sur le sol ou au mur, on réalise alors un robot en boucle fermée, les positions des codeurs permettent alors de déterminer les éléments manquants.

La boucle ouverte peut néanmoins être considérée comme une boucle fermée virtuelle, puisque le point de mesure permet de fermer la boucle sans contrainte. La précision de mesure est l'une des principales conditions à un recalage de qualité. En effet, quand la boucle est ouverte, le volume accessible par le robot est grand. Il en résulte qu'il est nécessaire de disposer d'un moyen de mesures de grandes dimensions. Dès lors, la précision de mesure devient plus faible (Précision volumétrique : pour un laser tracker Leika  $\pm 15\mu\text{m} + 6\mu\text{m}/\text{m}$ , le système Gom C-track380 ou 780 respectivement  $57\mu\text{m}$  et  $65\mu\text{m}$ ).

L'intérêt d'une mesure en boucle fermée est qu'elle ne nécessite pas d'instruments de mesure, elle demande, pour autant, des précautions et donne une « bonne estimation » autour de la pose choisie. La multiplication du nombre de poses permet une estimation dans l'espace de travail, la difficulté est la localisation relative des poses. Néanmoins, l'une des hypothèses fortes dans ces approches est la prise en compte d'un modèle rigide (corps avec/ou sans liaisons flexible).

Ces méthodes peuvent être combinées. Des objets (marbre) ou des instruments (palpeur) sont utilisés permettant physiquement de fermer cette boucle. Ces instruments donnent de manière précise une information sur la boucle fermée. L'information obtenue est partielle (une ou plusieurs coordonnées dans l'espace cartésien plus les coordonnées articulaires réalisées). Afin d'améliorer l'extraction, le choix des configurations peut s'avérer nécessaire. Ilian Bonev [55] [56] propose l'exploitation d'un moyen de grande précision classiquement utilisé pour les machines à commandes numériques : le BallBar (résolution  $0.1\mu\text{m}$ ). Cette approche permet d'obtenir de très grandes précisions de poses améliorant ainsi de manière significative la calibration. Cependant, cette technique demande de nombreuses manipulations et une mise en œuvre complexe pour des robots de grandes dimensions au vue de leur précision intrinsèque et de la faible plage de mesure du BallBar.

Ces méthodes sont parfaitement décrites par bon nombre d'experts de la robotique, on pourra citer les différents ouvrages et publications de Khalil et Gautier.

Bonev [33] [56] et Zhou [57] montrent aussi que, pour accroître la précision, le modèle doit intégrer la souplesse des liaisons. Cette information est en soi cruciale. En effet, faire une identification du modèle géométrique sans prendre en compte l'élasticité du modèle ou encore les jeux d'inversion biaise partiellement le résultat. Les variations dues à ces facteurs non pris en compte sont alors vues par le système observé comme au mieux un bruit et au pire un biais et ceci indépendamment de la précision de l'instrument de mesure.

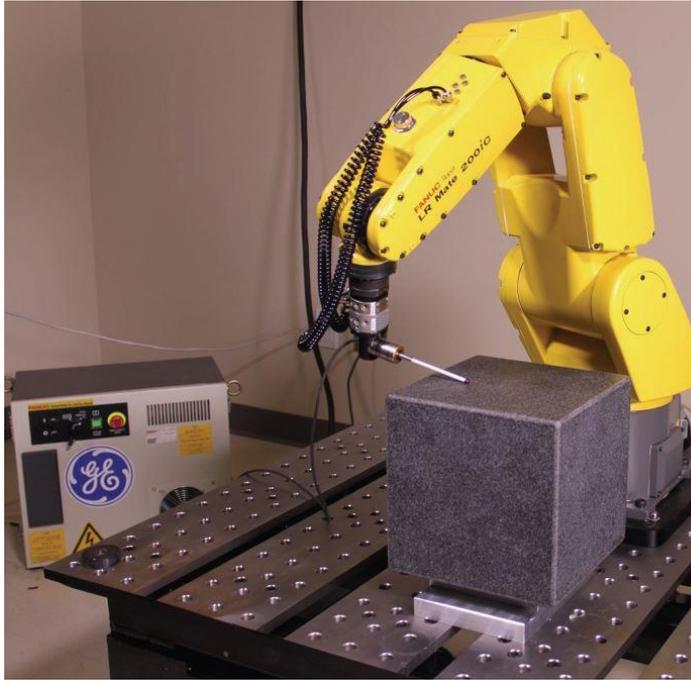


figure 133 : Calibration géométrique par mesure d'un cube



figure 134 : Calibration à l'aide du système BallBar

D'autres types de moyen de mesure peuvent être utilisés comme la stéréo vision où les points de vue des caméras sont variables : Korayem utilise des caméras parallèles [58], alors que Svaco utilise des caméras portées par le robot à  $90^\circ$  [59].

On trouve aussi l'utilisation de structures de mesure par câble legnani [60]. (lille ??)

Quel que soit le moyen utilisé, l'identification des paramètres géométriques utilise l'ensemble des paramètres articulaires du robot et/ou les mesures complètes ou partielles de la pose. Ces mesures sont statiques, elles restent donc découplées des autres phénomènes.

D'autres paramètres du robot peuvent être identifiés comme sa raideur, nous avons déjà fait un état des lieux de ces approches. Lors de ces estimations, il convient d'intégrer, quand il existe, le compensateur de gravité. Dans les travaux menés par Caro, Pasckevich, Klmichik et Wu, le compensateur est étudié. Ils montrent que, suivant la posture du robot, la raideur articulaire de l'axe compensé ne peut plus être considérée comme constante [61].

Il existe aussi la calibration dynamique des robots, qui consiste en la détermination des grandeurs des masses en mouvement, de leurs centres de gravité et d'inertie.... Les informations sur les moteurs d'axes sont aussi évaluées. Le principe consiste généralement à charger le robot et à effectuer des trajectoires choisies sollicitantes judicieusement choisies.

## **b.2** *Voie d'amélioration*

Pour toutes les méthodologies décrites dans la littérature, la qualité de l'étalonnage est directement liée à la précision du moyen utilisé. L'ordre d'étalonnage est lui aussi primordial, une mauvaise calibration géométrique aura un impact sur les suivantes.

Pour éviter les biais dus à une identification découplée des éléments, Il faut faire simultanément l'identification de l'ensemble des paramètres. Cependant, ceci est très complexe voire irréalisable. Le danger inhérent à cette approche est que plus nous groupons de variables à identifier, plus il existe de minimum local améliorant le critère global mais nous éloignant des valeurs vraies des paramètres.

Du point de vue acquisition de données, il faut donc tenter de scinder l'étalonnage. Les hypothèses réalisées en robotique sur ce point divergent de celles réalisées pour les machines à commandes numériques.

En robotique, l'identification s'effectue avec une succession de poses statiques, ceci permettant d'annuler les effets des inerties du robot. Dans ce cas, les jeux sont vus comme une perturbation, ils sont difficilement identifiables à l'aide de poses statiques.

Sur les machines à commande numérique avec un étalonnage réalisé au BallBar, on procède à l'inverse : on effectue des déplacements dans un premier temps très lents afin de réduire l'impact de la dynamique et on identifie les jeux et les autres paramètres. Ensuite on sollicite la dynamique.

L'un des axes que nous nous proposons de développer est d'appliquer cette stratégie en robotique.

## **b.3** *Adaptation du principe d'étalonnage d'un Robot avec un BallBar*

L'étalonnage du modèle est généralement réalisé en plusieurs étapes. Tout d'abord, les axes sont observés deux par deux, un premier test est réalisé à vitesse très lente afin de minimiser l'influence des paramètres dynamiques, puis un second est réalisé pour solliciter la dynamique du robot. Dans le cas des machines à commande numérique, ce sont les paramètres de l'asservissement qui sont observés plutôt que les paramètres inertiels.

La trajectoire n'est pas réalisée dans l'espace cartésien sinon nous ne pouvons garantir le déplacement uniquement de deux axes.

La trajectoire à réaliser est simple, elle résulte de l'intersection de la sphère du rayon du BallBar avec la surface générée par la combinaison de deux axes, les quatre autres étant figés.



figure 135 : trajectoire à réaliser avec un BallBar

Le point principal reste l'utilisation d'un appareil de mesure d'une grande précision. En effectuant des mouvements successifs de deux axes combinés, sans bouger le BallBar, nous allons pouvoir identifier :

- des combinaisons de paramètres géométriques avec une grande précision, l'erreur étant affectée non pas à chacun des termes, mais à la somme de ces termes,
- les erreurs non géométriques telles que les jeux, mais aussi celles d'offsets,
- des informations sur l'asservissement des retards entre les axes, des erreurs cycliques, ou encore les facteurs d'échelles.

Si, pour l'instant, certains de ces défauts ne peuvent être corrigés, ceci nous donne des informations sur la qualité de suivi d'une trajectoire et sur l'évolution de l'état comportemental du robot dans le temps.

Cependant, si dans le principe ces corrections semblent triviales à identifier, dans la pratique, nous sommes confrontés à différentes difficultés :

- Lors de l'identification classique, les positions articulaires sont connues, et ensuite, les positions cartésiennes du manipulateur sont mesurées. Inversement, on peut imposer une position cartésienne, puis relever les positions articulaires. Dans le cas présent, la trajectoire doit être générée dans l'espace articulaire (pour s'assurer qu'uniquement deux axes bougent) en respectant des contraintes cartésiennes. Cette trajectoire doit rester mesurable dans la gamme disponible avec un BallBar,
- Le second problème est l'estimation de la position, même si nous parvenons à maîtriser les vitesses articulaires, nous ne pourrions connaître la position cartésienne puisqu'à cette étape, le modèle est inconnu,
- Le pilotage de la vitesse n'est pas absolu mais relatif (valeurs données en pourcentage),

Théoriquement, on peut dérouler la méthode, la première difficulté pouvant être contournée si la gamme de mesure de l'instrument est plus importante. La seconde nécessite une mesure de la position angulaire du BallBar afin de pouvoir localiser le point

dans l'espace de travail. Enfin, la vitesse étant relative à la position du robot, elle devra être mesurée.

#### ***b.4 Cahier des charges d'un instrument d'étalonnage***

Sur une machine à commande numérique, le BallBar mesure de manière très précise la déviation de longueur de la barre sur une trajectoire ayant lieu sur plan à l'aide d'un mouvement de deux axes. Cette mesure n'a que peu d'intérêts si nous ne sommes pas capables d'estimer la position de l'effecteur afin de localiser à la fois la position et la direction de celui-ci. C'est pourquoi, lors de la réalisation du BallBar, on effectue l'hypothèse d'une vitesse stabilisée. Connaissant le point de départ, on peut positionner le défaut. Ici la taille de la machine importe peu.

Or, dans notre étude, le modèle n'est pas étalonné, il est donc difficile d'estimer les vitesses et encore plus la position du robot. La transposition n'est donc pas si aisée. Retenons néanmoins qu'il faut connaître la position du défaut et sa position dans l'espace. Dans la mesure où ces données sont connues, effectuer la cartographie des robots à l'aide du déplacement le long d'une trajectoire est envisageable.

De telles données nous permettraient d'étalonner les paramètres géométriques et non géométriques du modèle du robot. Pour étendre cet étalonnage, il faudrait être capable d'appliquer des charges sollicitant le modèle élasto-statique. Ce modèle est, pour autant, parfois insuffisant comme a pu le montrer Alexandr Klimchick. L'existence d'un compensateur de gravité modifie la raideur de l'axe compensé de manière non linéaire. Il doit donc être pris en compte.

Dans la mesure où nous serions capables de réaliser à faible vitesse ces essais, nous pourrions envisager une identification simultanée des paramètres des modèles géométriques, non géométriques et élasto-statiques.

La dernière étape est de permettre l'étalonnage du modèle dynamique. Pour ce faire, ces essais peuvent être répétés à grande vitesse. Dans cet espace particulier, différents critères ont été définis afin d'optimiser l'identification des paramètres du modèle. La sollicitation vibratoire du robot serait aussi une piste afin d'étudier les paramètres du robot.

De tels essais sont actuellement envisageables avec un tracker laser et des masses embarquées, cependant lors du tracking, la précision de positionnement diminue de manière significative et la mise en œuvre est complexe (masse en mouvement, coût du tracker, visibilité des cibles...).

#### ***b.5 Proposition d'un système innovante d'étalonnage sous charge des robots***

Le principe que je vais présenter a fait l'objet d'un dépôt de brevet fin 2014. Afin de réaliser la mesure de la position avec une précision importante, j'ai choisi d'effectuer une mesure par contact. Nous inversons ici le principe de fixation du BallBar, et venons emprisonner un vérin entre deux sphères. Cette configuration permet d'envisager de grands déplacements angulaires dans la mesure où les deux sphères sont suffisamment dégagées. Le vérin permet d'appliquer au robot un chargement qui peut être important et dépendant de la sortie du vérin. La donnée qu'il est important de maîtriser est la position cartésienne. Il faut donc mesurer la sortie du vérin, différentes technologies de mesure de distance étant

envisageables. L'amplitude de la sortie du vérin doit être de plusieurs dizaines de millimètres. Ceci permet de garantir une plage de variation des efforts suffisante et de pouvoir accepter les dispersions de gros porteurs non calibrés.

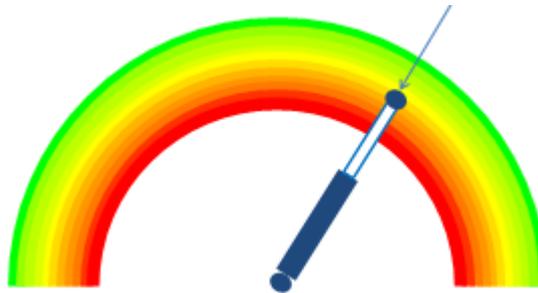


Fig. 136 : Zone de chargement du robot croissant vers le centre

Ce vérin emprisonné entre les deux sphères ne nous permet pas cependant de remonter à la position et orientation du vérin. Les données qui nous sont fournies sont la distance entre la sphère et la charge appliquée. Nous devons donc instrumenter cet actionneur afin de pouvoir estimer la position de l'effecteur dans l'espace. Si nous faisons l'hypothèse que le point centre est imposé lors de la mise au point, l'information que nous recherchons devient relative, et les paramètres minimalistes qu'il nous reste à identifier sont les deux premiers angles d'Euler (figure 137).

L'instrumentation peut alors être directe à l'aide par exemple de codeur voire d'un gyroscope ou un gyromètre, ou indirecte à l'aide d'une mesure de déplacement de l'un des points de l'instrument ou encore via l'impact qu'à l'effort sur la platine fixée au sol.

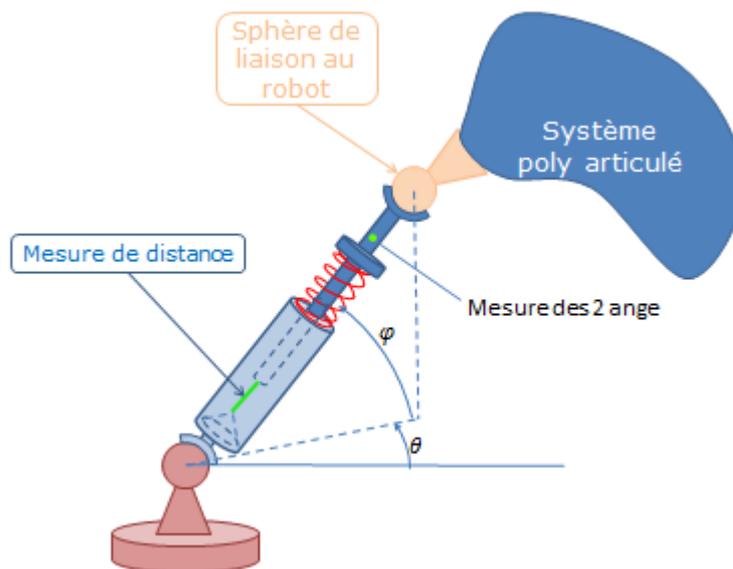


figure 137 : système du vérin prisonnier

La mesure directe est triviale. La mesure indirecte par le suivi d'un des points du vérin posera comme principale difficulté la visibilité, on peut bien évidemment multiplier les points de vue. Les systèmes de mesures classiques sont envisageables (mesure par câble, caméras, tracker laser, etc.).

La mesure indirecte par l'impact de l'effort sur la platine peut être mesurée par des moyens traditionnels de mesures d'efforts comme des piézo-électriques, ou au travers d'une pièce se déformant. À l'aide de la mesure de déplacement de la platine, la position de la sphère de la platine est réévaluée et la direction de l'effort appliqué calculée. La position de la sphère sur le robot peut alors être estimée.

Les liaisons rotules peuvent aussi être remplacées par des cardans.

À court terme, la conception de ce système est réalisée par un fond de maturation de l'université afin de trouver le juste compromis technico-économique.

A moyen terme, différents travaux découleront de ce nouveau moyen de mesure, analysons ces derniers.

#### ***b.6 Bilan méthodologique d'identification***

Le système envisagé nous permettra la réalisation d'essais non statique avec ou sans chargement. Les données collectées auront une précision et une cohérence importante. Le protocole d'essais devrait permettre de découpler les différents paramètres à l'aide d'essais choisis. A terme, nous devrions nous rapprocher de la notion de valeur vraie. Ceci ne garantit pas une meilleure optimisation du critère, mais il diminuera la variabilité de valeurs identifiées. On pourra alors choisir de complexifier les modèles afin d'augmenter la prédiction de position et orientation du robot.

### **5.2. Vision à moyen terme**

À cet étape, nous nous projetons dans des travaux à venir, l'une des premières étapes sera bien évidemment d'établir une bibliographie des travaux sur ces items. J'exprime ici ma vision des grandes étapes à venir :

- Exploitation du capteur d'étalonnage robot,
- Analyse des contraintes de robotisation grande dimension,
- La robotisation permet généralement de venir accomplir des tâches diminuant la pénibilité. L'un des axes forts qu'il nous faudra développer est la robotisation du ponçage. Cependant, avant de s'intéresser à la robotisation il nous faudra prendre en compte les caractéristiques du procédé. C'est pourquoi, je propose pour le ponçage, de développer une modélisation mésoscopique qui nous permettra de mieux maîtriser la robotisation de ce procédé, ces travaux ont été initiés lors de la thèse de Raphaël Poirée.

#### ***a Analyse des axes de recherche associé au nouveau capteur***

L'exploitation d'un tel système aura plusieurs débouchés éventuels. Le premier est métrologique. Il faudra établir une liste des défauts pouvant s'exprimer sur une trajectoire. Nous devons les cartographier, et mettre aux points les trajectoires permettant de les identifier au mieux. La réalisation d'une trajectoire complexe utilisant l'ensemble des axes du robot est envisageable, mais ce n'est clairement pas la direction que nous choisirons.

Dans un premier temps, nous axerons nos recherches sur l'élaboration de trajectoires n'utilisant que deux actionneurs. On pourra réduire l'étude à un robot de type RR spatial.

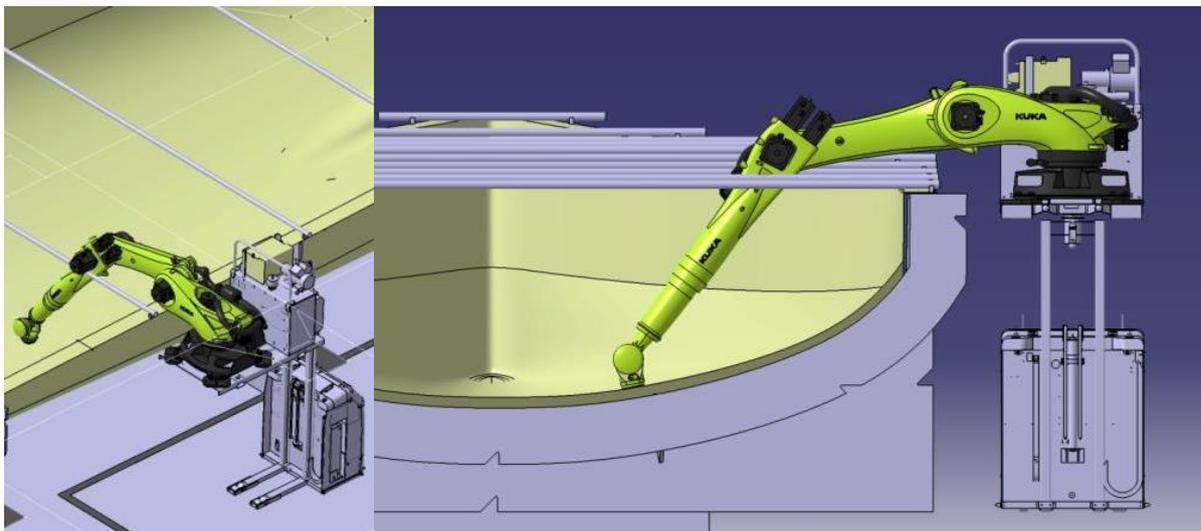
La validation de l'étalonnage d'un robot RR spatial permettra d'envisager différentes voies :

- l'exploration des différentes configurations RR et l'expression des défauts dans l'espace articulaire,
- la généralisation de l'identification d'un robot N axes en couplant différents parcours spatial RR,
- la généralisation de l'identification pour des robots couplant des liaisons prismatiques et/ou rotoïdes,
- L'identification du modèle dynamique à l'aide du solliciteur élasto-dynamique, afin d'être apte, avec un outil, d'effectuer l'ensemble des identifications.

Ce programme s'étend à la fois à moyen et long termes.

### **b Analyse des besoins robotisés pour des structures de grandes dimensions**

Comme nous l'avons évoqué préalablement, les solutions pour parachever des pièces de grandes dimensions sont diverses et de complexité dégradée. Les tâches suivant le type d'opérations à réaliser ont, soit un besoin de rigidité et de précision de placement (détourage, perçage,...), soit une maîtrise de la vitesse et de l'application d'efforts avec une précision toute relative (préparation de surface, ponçage, polissage,..).



*figure 138 : scenario de ponçage de coque de bateau*

Dans ces scénarii, nous retrouvons généralement des systèmes robotisés de grandes dimensions. Principalement pour les tâches de préparation de surfaces, le niveau de sollicitations en bout d'effecteur est faible. L'une des problématiques à laquelle nous sommes confrontés est l'accessibilité à la tâche en rapport avec les problèmes de basculement. Effectivement, le robot n'étant plus fixé au sol, il faut en permanence considérer les masses en jeu et la dynamique du système.

Dans cette vision, le robot est un élément prépondérant dans l'équilibre du système. En effet lors de sa conception, l'une des hypothèses faites est l'ancrage de ce dernier au sol.

Il faut donc redéfinir les données d'entrées pour ce type de solution. La masse à la base du robot doit être relativement importante (voire lestée) afin de donner de la stabilité au robot. Les bras doivent être de grande dimension en minimisant le produit masse flèche. La manipulabilité de l'effecteur doit rester optimales (position + orientation de l'effecteur). Les sollicitations en bout d'effecteur doivent être définies.

L'objectif à moyen terme est donc de créer un groupe de travail permettant de définir le ou les cahiers des charges en lien avec les tâches à réaliser, afin de satisfaire à nos objectifs.

### **c      *Modélisation mésoscopique du ponçage***

Nous n'avons pas abordé ce procédé durant ce mémoire. Sa maîtrise est un enjeu scientifique et économique majeur. Tout d'abord, ce travail n'est actuellement quasiment pas automatisé, il reste donc principalement manuel et réalisé par des compagnons. Les critères de qualités sont principalement visio-tactile, ce qui rend la capitalisation autour de ce procédé complexe à acquérir. Pour l'instant, ces actions de conformage (rectification des défauts principalement ondulation et facettisation) ou de préparation de surface (rendu de la surface, élimination des rayures) sont encore réalisées en France. Le nombre de compagnons reste faible pour deux raisons : de nombreuses années sont nécessaires pour acquérir ce savoir-faire, et ce travail est d'une grande pénibilité (mouvement répétitif et évolution dans la poussière entraînant des risques de Trouble Musculo Squelettique).

À court terme, un aspect non scientifique est développé via des fonds de maturation sur des travaux antérieurs de surveillance du ponçage que nous avons brevetée. En effet, l'usure rapide des papiers induit des changements fréquents et une forte augmentation des incidents : problèmes d'aspiration, papier abrasif déchiré, ou saturé. La criticité de ces événements est un frein à l'automatisation de ce procédé. Ayant un processus sécurisé et stabilisé, nous pourrions sereinement poursuivre nos recherches.

Les paramètres de pilotage de ce dernier sont l'effort de pression et la vitesse d'abrasion, et non la précision de la machine. La taille des pièces ainsi que les paramètres opératoires pilotant le procédé rendent les robots particulièrement à même de remplir cette mission. L'utilisation des compliances (actives ou passives) permettent une grande maîtrise de l'effort de pression.

Cependant, le principal obstacle à cette automatisation est le manque de connaissances détaillées du processus de ponçage. Actuellement, les travaux sur ce procédé prennent un point de vue microscopique ou macroscopique. Dans le premier cas, on s'intéresse au phénomène d'enlèvement matière associé à quelques grains. Dans l'analyse macroscopique, on s'intéresse globalement au pouvoir coupant du procédé ainsi qu'au suivi de l'usure. Ces points de vue sont nécessaires à la compréhension des phénomènes de coupe ou au pilotage global du procédé mais restent néanmoins insuffisants à une parfaite maîtrise du parachèvement.

Les travaux actuels ont porté sur le ponçage roto orbitale qui est le moyen le plus répandu. L'automatisation engendre nécessairement une phase de programmation hors ligne, il faut donc être capable de prévoir et de comprendre l'enlèvement matière. Les verrous scientifiques, avec ce procédé, sont multiples. L'analyse de ce dernier met en

évidence un bouclage complexe à résoudre. Pour déterminer l'enlèvement matière sur la zone de contact outil pièce, le taux d'abrasion  $\dot{h}$  doit être évalué. Suivant la loi de Preston, il dépend de la vitesse de coupe, de la pression de contact et d'un coefficient lié au couple abrasif matière. L'estimation de la vitesse de coupe nécessite de connaître la vitesse de rotation libre. Cette dernière est fonction de la surface en contact ainsi que de la pression de contact localisée sur cette surface. Enfin, la zone de contact est liée à l'enfoncement de l'outil sur la pièce, proportionnel lui-même à la force de pression et conditionné par la vitesse libre du plateau. Dans le cas d'un plan, la surface est simple et la pression uniforme. Le taux d'enlèvement matière est alors prévisible sur un plan ou une surface de faible courbure. Sur une surface plus complexe, un couplage se crée entre vitesse de rotation libre et profondeur d'enfoncement et ceci avec une grande dynamique. La notion même de point piloté devient problématique car l'outil est souple. La quantité de matière enlevée sur cette surface n'est pas homogène car la pression de contact ne l'est pas. Pour avancer, sur la cohérence d'une modélisation de ponçage sur une surface complexe, nous pouvons simplifier notre étude en considérant le ponçage à la cale. Les compagnons effectuent actuellement ce travail manuellement sur des coques de bateau. La cale est une lame flexible allant un à trois mètres et manipuler par un ou à plusieurs compagnons. Le mouvement est une translation ayant pour objectif d'atténuer les défauts de forme.

À moyen terme, je propose de débiter notre étude sur le cas du ponçage à la cale. Je propose d'étudier une modélisation mésoscopique qui permettrait d'associer au papier un pouvoir abrasif différent en prenant en compte l'outil. La pression localisée sur l'outil serait estimée et ainsi l'enlèvement matière prédit. Ce procédé plus simple est mieux maîtrisé car il n'existe pas de mouvement libre et donc de bouclage. Cette opération est réalisée pour le conformage des pièces. La vitesse de coupe n'est plus une inconnue comme sur le ponçage orbital (plateau libre). La surface de l'outil en contact avec la pièce est très grande comparativement à la ponceuse (diamètre de ponceuse  $\varnothing 0.15\text{m}$ , cale  $0.1\text{m} \times 1\text{m}$ ). Sur cet outil, nous proposons de développer une modélisation mésoscopique qui devra prendre en compte une pression localisée fonction du contact outil pièce. Cette modélisation devrait nous permettre de choisir, en connaissant la pression de contact, l'orientation à donner à l'outil. Ceci nous permettra la mise au point d'une gamme hors ligne en optimisant le positionnement de l'outil afin d'homogénéiser le conformage de la pièce.

#### **d**      ***Procédés foam***

L'impression 3D est une activité qui suscite de nos jours un intérêt certain. Nous avons initiés quelques travaux dans ce domaine en couplant l'impression de mousse expansive avec de la robotique de grande dimension. Nos Premières applications pas ont été effectués en 2015 au travers d'un projet pédagogique

#### **e**      ***Synthèse des perspectives***

Les problématiques qui me semblent nécessaire de poursuivre dans les années à venir concernent quatre axes majeurs : (i) l'amélioration des stratégies correctives, dans un objectifs d'accroître la maîtrise du processus, (ii) la mise au point d'un moyen de mesure efficace afin d'accroître notre connaissance et la maîtrise des robots pouvant être exploités industriellement pour suivre l'étalonnage avec le vieillissement des robots, (iii) le développement de solutions robotisées (avec rail, robots déplaçables travaillant par

fenêtrage, robots portés sur robots mobiles...) pour le parachèvement des pièces ou outillages de très grandes dimensions,, (iv) un travail de fond sur une amélioration de la modélisation du processus de ponçage de matériaux tendre, et enfin, (v) poursuivre par des approches scientifiques de modélisation les travaux initiés sur le couplage procédé/robot en FAM (Foam Additive Manufacturing)..

## 6. BIBLIOGRAPHIE

- [1] W. Khalil and E. Dombre, "Chapter 2 - Transformation matrix between vectors, frames and screws," in *Modeling, Identification and Control of Robots*, W. Khalil and E. Dombre, Eds. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2004, pp. 13–34.
- [2] W. Khalil and E. Dombre, *Modeling, identification and control of robots*. 2004.
- [3] C. Dumas, "Développement de méthodes robotisées pour le parachèvement de pièces métalliques et composites," Université de Nantes, 2011.
- [4] Y. Wu, *Optimal pose selection for the identification of geometric and elastostatic parameters of machining robots*. Nantes, Ecole des Mines, 2014.
- [5] M. Cherif, *Modélisation générique des efforts de coupe en fraisage pour la CFAO et la surveillance de l'usinage*. Nantes, 2003.
- [6] S. Garnier, "Détermination de paramètres descriptifs de l'état d'usure d'outils pour le développement d'un système de surveillance automatique de l'usinage en fraisage.," Université de Nantes ; Ecole Centrale de Nantes (ECN) (ECN) (ECN) (ECN), 2000.
- [7] M. Ritou, "Surveillance d'usinage en fraisage de pièces complexes par un suivi de la broche," Université de Nantes ; Ecole Centrale de Nantes (ECN) (ECN) (ECN) (ECN), 2006.
- [8] B. Havette, "Contribution méthodologique au high power milling," Université de Nantes ; Ecole Centrale de Nantes (ECN) (ECN) (ECN) (ECN), 2011.
- [9] A. Boudelier, "Modélisation et optimisation des opérations de parachèvement de pièces en matériaux composites," 2011.
- [10] S. Spiewak, "An Improved Model of the Chip Thickness in Milling," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 44, no. 1, pp. 39–42, Apr. 1995.
- [11] S. Engin and Y. Altintas, "Generalized modeling of milling mechanics and dynamics: Part II - inserted cutters," *Am. Soc. Mech. Eng. Manuf. Eng. Div. MED*, vol. 10, no. 1984, pp. 353–360, 1999.
- [12] W. A. Kline and R. E. DeVor, "The effect of runout on cutting geometry and forces in end milling," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, vol. 23, no. 2–3, pp. 123–140, May 1983.
- [13] S. C. Lin and R. J. Yang, "Force-based model for tool wear monitoring in face milling," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 35, no. 9, pp. 1201–1211, Apr. 1995.
- [14] A. J. P. Sabberwal, "Cutting forces in down milling," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, vol. 2, no. 1, pp. 27–41, Apr. 1962.

- [15] J. W. SUTHERLAND, G. SUBRAMANI, R. E. DeVor, and S. G. KAPOOR, "An investigation into the effect of tool and cut geometry on cutting force system prediction models," 1988, pp. 264–272.
- [16] Y. Altintas and I. Yellowley, "In-Process Detection of Tool Failure in Milling Using Cutting Force Models," *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 111, no. 2, pp. 149–157, Apr. 1989.
- [17] T. MORIWAKI and E. SHAMOTO, "Modeling and parameter identification of end milling for estimation of dynamic cutting force," *Pacific*, pp. 97–103, 1994.
- [18] G. YUSECAN, Q. Xie, and A. E. BAYOUMI, "determination of process parameters through a mechanistic force model of milling operation," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, pp. 627–641, 1992.
- [19] P. J. Cheng, J. T. Tsay, and S. C. Lin, "A study on instantaneous cutting force coefficients in face milling," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, vol. 37, no. 10, pp. 1393–1408, Apr. 1997.
- [20] S. Y. Liang, R. L. Hecker, and R. G. Landers, "Machining Process Monitoring and Control: The State-of-the-Art," pp. 599–610, Mar. 2002.
- [21] K. Jemielniak, "Commercial Tool Condition Monitoring Systems," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 15, no. 10, pp. 711–721, Mar. 1999.
- [22] A. G. Rehorn, J. Jiang, and P. E. Orban, "State-of-the-art methods and results in tool condition monitoring: a review," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 26, no. 7–8, pp. 693–710, Mar. 2004.
- [23] S. Engin and Y. Altintas, "Mechanics and dynamics of general milling cutters.: Part II: inserted cutters," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, vol. 41, no. 15, pp. 2213–2231, Jun. 2001.
- [24] S. S. Park and Y. Altintas, "Adaptive Control and Monitoring Using the Spindle Integrated Force Sensor System," pp. 41–48, Mar. 2004.
- [25] S. Auchet, P. Chevrier, M. Lacour, and P. Lipinski, "A new method of cutting force measurement based on command voltages of active electro-magnetic bearings," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, vol. 44, no. 14, pp. 1441–1449, Mar. 2004.
- [26] J. Y. Sheikh-Ahmad, J. P. Davim, and L. Nicolais, "Cutting and Machining of Polymer Composites," in *Wiley Encyclopedia of Composites*, John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [27] M. Pillet, "Contribution à la maîtrise statistique des procédés — Cas particulier des petits séries," l'Université de Savoie, savoie, france, 1993.
- [28] W. Khalil and D. Creusot, "SYMORO+: A system for the symbolic modelling of robots," *Robotica*, vol. 15, no. 02, pp. 153–161, Mar. 1997.

- [29] S. Matsuoka, K. Shimizu, N. Yamazaki, and Y. Oki, "High-speed end milling of an articulated robot and its characteristics," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 95, no. 1–3, pp. 83–89, Mar. 1999.
- [30] H. Zhang, J. Wang, G. Zhang, Z. Gan, Z. Pan, H. Cui, and Z. Zhu, "Machining with flexible manipulator: toward improving robotic machining performance," in *Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2005, pp. 1127–1132.
- [31] I. Mansouri and M. Ouali, "A new homogeneous manipulability measure of robot manipulators, based on power concept," *Mechatronics*, vol. 19, no. 6, pp. 927–944, Apr. 2009.
- [32] "Robots manipulateurs industriels - Criteres de performance et methodes d'essai correspondantes.," 1998, 1998.
- [33] A. Nubiola and I. Bonev, "Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 29, no. 1, pp. 236–245, Apr. 2013.
- [34] S. C. Alexandr Klimchik, "Stiffness modeling of robotic manipulator with gravity compensator," 2013.
- [35] E. Abele, M. Weigold, and S. Rothenbücher, "Modeling and Identification of an Industrial Robot for Machining Applications," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 56, no. 1, pp. 387–390, Jul. 2007.
- [36] M. T. Pham, M. Gautier, and P. Poignet, "Identification of joint stiffness with bandpass filtering," 2001, vol. 3, pp. 2867–2872.
- [37] M. H. Ang Jr., W. Wang, R. N. K. Loh, and T.-S. Low, "Passive Compliance from Robot Limbs and Its Usefulness in Robotic Automation," *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 20, no. 1, pp. 1–21, Jul. 1997.
- [38] G. Alici and B. Shirinzadeh, "Enhanced Stiffness Modeling, Identification and Characterization for Robot Manipulators," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 21, no. 4, pp. 554–564, 2005.
- [39] A. Pashkevich, D. Chablat, and P. Wenger, "Analyse de la rigidité des machines outils 3 axes d'architecture parallèle hyperstatique," *arXiv0811.3536 [cs]*, Jul. 2008.
- [40] S. F. Chen, "The 6x6 Stiffness Formulation and Transformation of Serial Manipulators via the CCT Theory," *IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 4042 – 4047, 2003.
- [41] Z. Yang and J. P. Sadler, "A one-pass approach to dynamics of high-speed machinery through three-node lagrangian beam elements," *Mech. Mach. Theory*, vol. 34, no. 7, pp. 995–1007, Mar. 1999.

- [42] T. Yoshikawa, A. Ohta, and K. Kanaoka, "State estimation and parameter identification of flexible manipulators based on visual sensor and virtual joint model," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA*, 2001, vol. 3, pp. 2840–2845 vol.3.
- [43] M. Gautier and W. Khalil, "On the identification of the inertial parameters of robots," in *Proceedings of the 27th IEEE Conference on Decision and Control, 1988*, 1988, pp. 2264–2269 vol.3.
- [44] J. Wang, H. Zhang, and T. Fuhlbrigge, "Improving machining accuracy with robot deformation compensation," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009*, 2009, pp. 3826–3831.
- [45] S. Caro, C. Dumas, S. Garnier, and B. Furet, "Workpiece placement optimization for machining operations with a KUKA KR270-2 robot," 2013, pp. 2921–2926.
- [46] S. Kucuk and Z. Bingul, "Comparative study of performance indices for fundamental robot manipulators," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 54, no. 7, pp. 567–573, Mar. 2006.
- [47] A. Olabi, R. Béarée, O. Gibaru, and M. Damak, "Feedrate planning for machining with industrial six-axis robots," *Control Eng. Pract.*, vol. 18, no. 5, pp. 471–482, Mar. 2010.
- [48] Y. Guo, H. Dong, and Y. Ke, "Stiffness-oriented posture optimization in robotic machining applications," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 35, pp. 69–76, Jun. 2015.
- [49] J. Qi, L. Hao, R. Sun, and J. Xiao, "Study on the mechanism and kinematics of a hybrid robot for blowout preventer assembly," in *2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 2014, pp. 1046–1051.
- [50] B. Vemula, G. Spampinato, T. Brogardh, and X. Feng, "Stiffness Based Global Indices for Structural Evaluation of Anthropomorphic Manipulators," in *ISR/Robotik 2014; 41st International Symposium on Robotics; Proceedings of*, 2014, pp. 1–8.
- [51] U. Schneider, J. Ricardo, D. Posada, M. Drust, A. Verl, J. R. Diaz Posada, M. Drust, A. Verl, and J. van der Zwaag, "Combining holistic programming with kinematic parameter optimisation for robot machining," in *ISR/Robotik 2014; 41st International Symposium on Robotics; Proceedings of*, 2014, pp. 1–7.
- [52] M. Nordin and P.-O. Gutman, "Controlling mechanical systems with backlash—a survey," *Automatica*, vol. 38, no. 10, pp. 1633–1649, 2000.
- [53] M. Gautier, A. Jubien, A. Janot, and P. P. Robet, "Dynamic Identification of flexible joint manipulators with an efficient closed loop output error method based on motor torque output data," in *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2013, pp. 2949–2955.

- [54] J. M. Hollerbach and C. W. Wampler, "The Calibration Index and Taxonomy for Robot Kinematic Calibration Methods," *Int. J. Rob. Res.*, vol. 15, no. 6, pp. 573–591, Jul. 1996.
- [55] A. Nubiola, M. Slamani, and I. Bonev, "A new method for measuring a large set of poses with a single telescoping ballbar," *Precis. Eng.*, vol. 37, no. 2, pp. 451–460, Apr. 2013.
- [56] A. Nubiola and I. Bonev, "Absolute robot calibration with a single telescoping ballbar," *Precis. Eng.*, pp. 1–9, Apr. 2014.
- [57] J. Zhou, H.-N. Nguyen, and H.-J. Kang, "Simultaneous Identification of Joint Compliance and Kinematic Parameters of Industrial Robots," 2014.
- [58] M. H. Korayem, M. Irani, and A. Hashemi, "Application of Stereo Vision on Determination of End-Effector Position and Orientation of Manipulators," *J. Control Eng. \dots*, vol. 4, pp. 9–16, 2014.
- [59] M. Švaco, B. Šekoranja, F. Šuligoj, and B. Jerbić, "Calibration of an Industrial Robot Using a Stereo Vision System," *Procedia Eng.*, vol. 69, pp. 459–463, Apr. 2014.
- [60] G. Legnani and M. Tiboni, "Optimal design and application of a low-cost wire-sensor system for the kinematic calibration of industrial manipulators," *Mech. Mach. Theory*, vol. 73, pp. 25–48, Apr. 2013.
- [61] Y. Wu, "Optimal Pose Selection for the Identification of Geometric and Elastostatic Parameters of Machining Robots," 2014.

## **Partie III. ANNEXE**

### 1. PROJET PÉDAGOGIQUE

#### 1.1. Plateforme MicroCar

**Le demandeur** : l'usine Microcar sur le site de Boufféré

**Enseignant encadrant** : GARNIER Sébastien

**Nombre d'étudiants** : 8

**Contexte** : dans le cadre d'une procédure de contrôle de vieillissement de la structure d'une voiture sans permis, la procédure classiquement utilisée est de faire rouler la voiture sur des rouleaux sur lesquels sont fixés des obstacles. La société jugeant cette pratique dangereuse et coûteuse (consommation d'essence, gaz d'échappement), elle cherche à pratiquer ces tests différemment.

**Objectif** : Réaliser une machine permettant de simuler le vieillissement d'une voiture Microcar

**Réalisation des étudiants** : ce projet était très ambitieux, le nombre de fonctions à réaliser très importante. C'est grâce à une équipe très motivée d'étudiants restée en partie jusqu'à mi-juillet pour finaliser cette plateforme Microcar.



*Figure 139: Mise en place de la voiture sur la machine de sollicitation*



*Figure 140 : Voiture prête à être sollicitée*

Ce projet a été un succès et a été livré en juillet. Il a été suivi l'année suivante par la réalisation d'une structure permettant le soutien de la voiture lors de la rupture d'une de ces pièces, et l'arrêt de la machine.

## 1.2. Micro turbine

**Le demandeur** : Club de modélisme soutenu par un enseignant du département GTE

**Enseignant encadrant** : GARNIER Sébastien

**Nombre d'étudiants** : 7



Figure 141 : maquette des modélistes

**Contexte** : La demande a été réalisée par une association de modélistes qui dispose d'un avion (Figure 1) déjà équipé d'une turbine. Ceux-ci souhaitent faire évoluer leur prototype

**Objectif** : l'objectif était double la numérisation et la reproduction d'une turbine ainsi que la réalisation d'une chambre acoustique permettant la mise au point de celui-ci.

**Réalisation des étudiants** : Ce projet n'a atteint que partiellement son objectif. La numérisation du réacteur (Figure 142) a été faite ainsi que l'enceinte acoustique (Figure 143). Le prototype a été en grande partie réalisé, mais à la fois les matériaux (inox, inconel 718) et la complexité des usinages (usinage 5 axes) étaient hors de portée des étudiants de ce niveau. Ce projet n'a pas été reconduit les années suivantes.

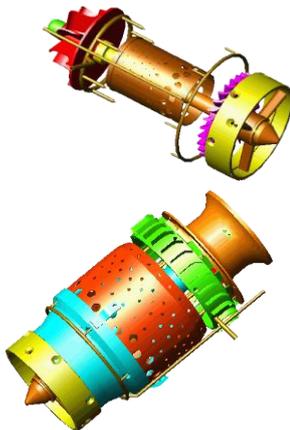


Figure 142 : différentes parties numérisées de la turbine



Figure 143 : chambre acoustique pour le réglage de la turbine

Le point positif est que les étudiants ont pu être initiés à la réalisation de ces pièces complexes, et que la turbine a été en grande partie reproduite.

### 1.3. Bouche artificielle

**Le demandeur :** ENITIAA (école Nationale d'ingénieurs des Techniques des industries agricoles et alimentaires)

**Enseignant encadrant :** GARNIER Sébastien

**Nombre d'étudiants :** 7



Figure 144 : Système d'extraction des arômes par bain marie

**Contexte :** L'équipe de recherche de l'ENITIA travaille sur l'analyse gustative des aliments. Très classiquement, les nouveaux produits sont proposés à des échantillons d'individus qui remplissent des grilles d'appréciations. Un procédé existait déjà permettant d'extraire les arômes de manière qualitative cependant celui-ci est très éloigné de la réalité d'une mastication (bain marie). L'objectif était donc de s'approcher d'une mastication réelle.

**Objectif :** Réaliser une extraction des arômes d'aliments par un procédé reproduisant la mastication humaine.

**Réalisation des étudiants :** après une étude de la cinématique de la mastication (Figure 146), les étudiants se sont orientés vers la réalisation d'un mouvement réalisé dans une étuve par une came (Figure 145).

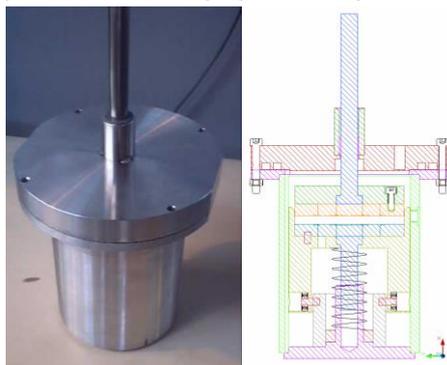


Figure 145 : étuve permettant le passage du vérin et coupe du système

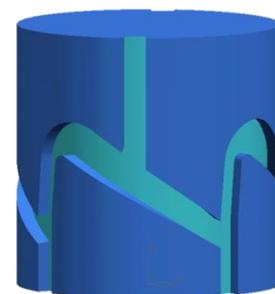


Figure 146 : Came permettant la cinématique de mastication

Lors de la mise en œuvre du système, après seulement quelques cycles, la came a dysfonctionné et seule la translation s'effectuait. Excepté ce problème, l'ensemble des fonctions a été réalisé.

## 1.4. Prototype d'UPA (Unité de perçage autonome)

**Le demandeur :** Mecarec

**Enseignant encadrant :** GARNIER Sébastien

**Nombre d'étudiants :** 7

**Contexte :** Lors de cette étude, l'ensemble des Unité de perçage utilisé par airbus était à énergie pneumatique. La principale problématique concernant ce moyen est là non maîtrise des conditions opératoires avec des variations lié au couple et à l'alimentation pneumatique.



Figure 147 : Prototype d'UPA pneumatique de la société Mecarec

**Objectif :** L'objectif était de proposer une version électrique d'une UPA, afin de pouvoir adapter la vitesse de coupe et d'avance indépendamment, tout en respectant les contraintes d'accessibilité aux pièces, et de portabilité du système.

**Réalisation des étudiants :** L'une des contraintes fortes de ce projet a été de permettre la transmission de la puissance dans un espace aussi restreint et avec un poids aussi faible. Les étudiants ont su astucieusement contourner cette difficulté en dissociant la partie motorisation de l'UPA elle-même en utilisant des flexible pour transmettre la puissance. Après la revue de conception, le client a souhaité restreindre la réalisation à l'UPA afin de valider ce concept. Les étudiants sont parvenus à réaliser celle-ci et à valider le concept par une série de perçage.

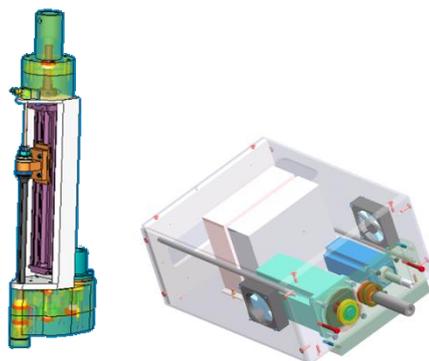


Figure 148 : Modèle numérique de l'UPA et de sa valise



Figure 149 : UPA électrique en phase d'essais de perçage

## 1.5. Système de mise à l'eau de bateau

**Le demandeur** : COIC Tanguy - SUAPS

**Enseignant encadrant** : GARNIER Sébastien  
LE LOC'H Sébastien

**Nombre d'étudiants** : 7



Figure 150: Bateau J22 sur remorque

**Contexte** : Lors de rendez-vous de compétition, le SUAPS peut être amené à se déplacer avec plusieurs bateaux. Ils doivent alors attendre parfois une journée complète la mise à l'eau des bateaux ce qui entraîne des surcoûts lors des compétitions. L'objectif est donc de supprimer cette attente.

**Objectif** : Réaliser un système de mise à l'eau autonome d'un bateau J22 (Longueur 6.85m poids 850kg, Figure 150). L'équipe doit pouvoir transporter le matériel de mise à l'eau démonté réparti à la fois sur la remorque et dans le véhicule tractant le bateau. Une parvenue à quai, les sportifs doivent monter ce système de mise à l'eau en moins d'une heure à 2. Il faut ensuite soulever le bateau, le déplacer et pouvoir le descendre à l'eau en envisageant un dénivelé de plusieurs mètres.

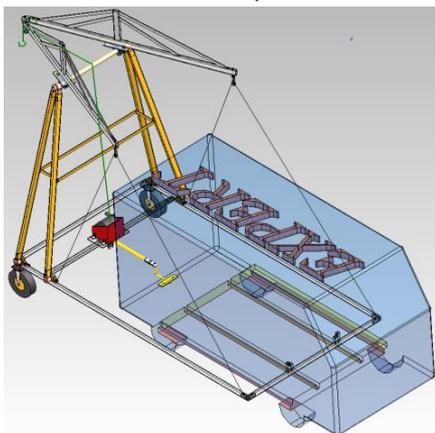


Figure 151 : mise en situation de la CAO



Figure 152 : Réalisation du palan

**Réalisation des étudiants** : Après une étude des divers scénarii, celui choisi par les étudiants a été d'exploiter le véhicule de traction comme contre poids et système de déplacement (Figure 151). Le système a été fabriqué et à montrer que s'il était capable, la sécurité de l'opérateur était trop faible (Figure 152). En effet, le sportif se trouve entre treuil et le bateau. Dans les faits, ce système n'a pas été exploité par le SUAPS.

## 1.6. Banc test pour validation de joint hydraulique

**Le demandeur** : Société SAH LEDUC

**Enseignant encadrant** : GARNIER Sébastien  
FOUCHER Éric

**Nombre d'étudiants** : 8

**Contexte** : Ce projet s'est limité à une conception et un dimensionnement de la solution. La raison principale est le niveau de compétence et les moyens de production requis pour réaliser ce banc test.

**Objectif** : l'objectif est principalement de permettre à la société de tester en interne les nouveaux joints d'étanchéités et d'estimer leur durée de vies pour des vérins hydrauliques. 2 principaux tests sont réalisés : le premier est statique (mesure de l'étanchéité sous 330bars durant 24h), le second est dynamique (usure du joint, pression 330bars, Vitesse de déplacement 1m/s, sur une course de 500mm, et durant 200km).

**Réalisation des étudiants** : ce projet était complexe au vue des efforts colossaux potentiels (piston de diamètre 150mm sous 330bars se déplaçant à 1m/s) et de part les débits et donc la puissance hydraulique. Durant cette année d'étude, 2 idées originales ont permis aux étudiants d'effectuer des avancées significatives qui ont eu pour conséquence, une remise à plat de leur conception. On peut alors parler de 3 phases de maturation du projet.

- La première a été élémentaire. La démultiplication était mécanique. Cette solution était peu satisfaisante puisqu'elle induisait à la fois une reprise d'efforts colossaux ainsi qu'une puissance hydraulique démesuré (Figure 153).
- Durant la seconde phase, l'alignement de l'actionneur avec le vérin test a permis dimensionnement de la structure moindre (Figure 154) sans pour autant, diminuer la puissance hydraulique.

Enfin, la solution finale a permis de répondre entièrement au cahier des charges via une solution n'engendrant sur la structure aucun effort important autre que ceux du frottement

- (Figure 155). La complexité du système a été relayée au niveau de la commande hydraulique. La puissance hydraulique étant transporté dans une chambre complexe ce déplacement aux vitesses imposées. On simule alors les pressions vue par le joint au cours d'un déplacement supposé.

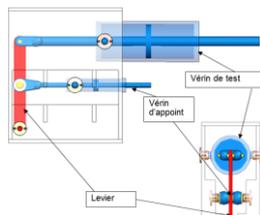


Figure 153 : Premier principe de sollicitation

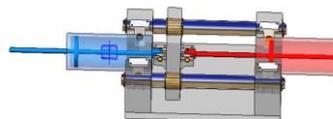


Figure 154 : Second principe de sollicitation

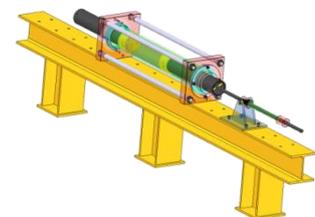


Figure 155 : Principe finale proposé par les étudiants

Ce projet a donc été un succès.

## 1.7. Projet Course En Cours (version GAZ)

**Le demandeur** : IUT de Nantes-Département GMP

**Enseignant encadrant** : GARNIER Sébastien  
CARDIN Olivier

**Nombre d'étudiants** : 5

**Contexte** : Le projet Course en Cours est une compétition nationale de collégien et lycéen ayant pour objectif la découverte des métiers de la mécanique. La propulsion de ces voitures est à gaz. Dans ce contexte, le Département GMP s'est engagé afin d'être centre de compétence. L'investissement d'un Charlie robot a été fait, afin de pouvoir fournir aux établissements une solution clef en main afin d'usiner leur voiture.

**Objectif** : Les objectifs donnés aux étudiants étaient multiple. En priorité, ils devaient définir un processus d'usinage permettant la réalisation des maquettes avec un maximum d'efficacité. Produire un podium et enfin réalisé une épreuve CAO.



**cours**e  
Grand Prix  
des Collèges  
et Lycées  
**en**  
**cours**



Figure 156 : Présentation du concept de Course En Cours

**Réalisation des étudiants** : Les étudiants ont parfaitement rempli leur mission, en proposant un processus d'usinage sous CATIA prenant en compte le montage qu'ils avaient conçu et réalisé. Ce processus est effectué en trois phases, le montage permettant un positionnement de la pièce sur trois faces sans démontage. 6 exemplaires de montage ont réalisé.

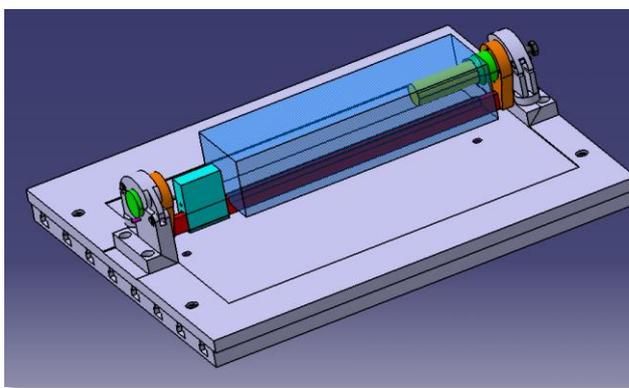


Figure 157 : CAO du montage d'usinage



Figure 158 : présentoir des voitures

## 1.8. Transmission VOISINE

**Le demandeur** : Particulier –Mr VOISINE

**Enseignant encadrant** : GARNIER Sébastien  
BREHANT Yves

**Nombre d'étudiants** : 7

**Contexte** : Mr VOISINE est un inventeur à la retraite ayant conçu un système mécanique permettant la transformation d'un mouvement de translation en mouvement de rotation avec un rendement amélioré (Figure 159).

**Objectif** : Concevoir un système permettant de valider le concept cinématique et réaliser la maquette de celui-ci afin de mesurer les gains éventuels.

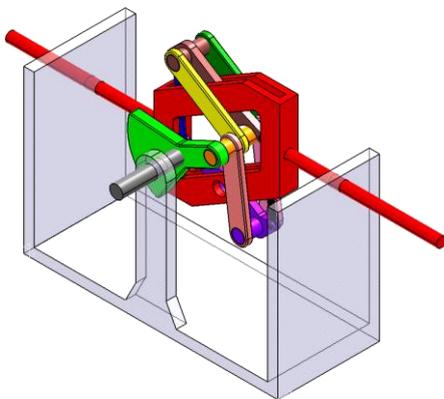


Figure 159 : CAO du principe de Mr VOISINE

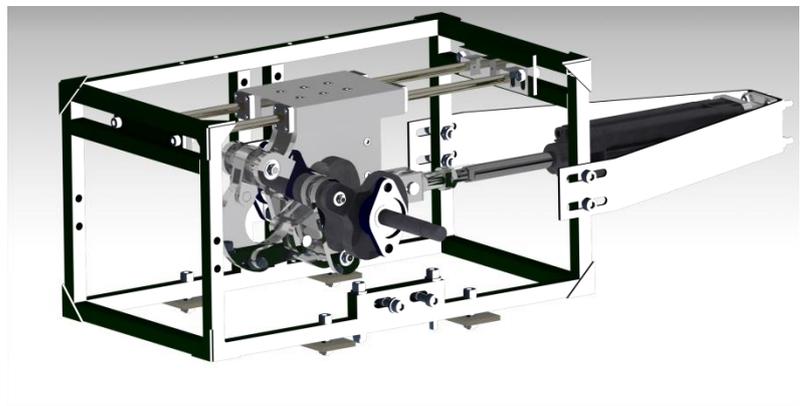


Figure 160 : CAO du nouveau concept bielle manivelle réalisé par les étudiants

**Réalisation des étudiants** : La compréhension du système a été compliquée pour les étudiants, le système a été conçu et fonctionnait cinématiquement (Figure 160). Pour ce qui est de la réalisation, les étudiants ne sont pas parvenus à achever ce système dans sa globalité. Nous avons pu néanmoins avec le travail préparatoire des étudiants achever celui-ci. Au final, sur cette maquette des problèmes d'arc-boutement n'ont pas permis de conclure sur les gains éventuels de ce système. Ce projet a alors été reporté, et une re-conception a eu lieu l'année suivante.

## 1.9. Prototype de parachèvement robotisé portable

**Le demandeur** : IRCCyN

**Enseignant encadrant** : GARNIER Sébastien

**Nombre d'étudiants** : 7

**Contexte** : Dans le cadre de nos recherches, le concept de Robot compagnon est développé. Afin de réaliser ceci il faut être capable d'amarrer ce petit robot, d'une vingtaine de kilogramme sur une structure afin qu'il puisse réaliser sa tâche. Cet axe de développement a fait l'objet d'investissement dans le cadre de ROBOTEX.

**Objectif** : Concevoir un système autonome en énergie permettant l'exploitation de ce type de robot.

Il faut donc à la fois gérer les aspects d'autonomie et positionnement du robot sur la structure.

**Réalisation des étudiants** : Cette mission n'a pas été menée à son terme du point de vue de la réalisation. La phase de conception du système, gestion de l'autonomie, système transportable (Figure 161), ancrage du robot à la structure (Figure 162) ont été abouti. L'ensemble du chariot a été réalisé, cependant le mode de fixation du robot sur la structure n'a pas été finalisé. Le robot est fixé par un système de ventouse ainsi que trois stabilisateurs. Le système de ventouse a été identifié et validé, seul le système de stabilisation n'a pas été achevé.



Figure 161 : Chariot de manutention



Figure 162 : principe d'accroche par ventouse du robot

## 1.10. Découpe de joint de cardan

**Le demandeur** : Société Trelborg

**Enseignant encadrant** : GARNIER Sébastien  
FOUCHER Jacky

**Nombre d'étudiants** : 9

**Contexte** : Durant la phase de contrôle de sa production de soufflet (Figure 163), les opérateurs doivent découper dans chaque soufflet trois bandes de 10mm de large sur toute la longueur. Ce travail préalable au contrôle entraîne des TMS ainsi que des accidents du travail, et ce, suivant le mode de découpe choisi.

**Objectif** : réaliser une machine permettant la découpe de ces trois bandes en moins de 30s et ceci toutes les 2 minutes. Le nombre de soufflet ainsi que leur géométrie sont très variés (plus de 30 références)



Figure 163 : Gamme de soufflet à découper très varié en terme de dimension et morphologie

**Réalisation des étudiants** : Après une batterie de test sur les efforts nécessaires à cette découpe, le client a choisi un mode de découpe par compression (Figure 164). La complexité de ce projet a été à la fois technique et relationnel avec le client. Les étudiants sont parvenu a réalisé le démonstrateur et à le livrer.



Figure 164 : système de découpe des soufflets par compression

## 2. LISTES DES THESE ENCADREES

### 2.1. Thèse de Mr Mathieu Ritou

Titre : *Surveillance d'usinage en fraisage de pièces complexes par un suivi de la Broche*

Soutenue le 13 décembre 2006

Président et rapporteur : Henry PARIS, Professeur, Université de Grenoble I  
Rapporteur : Olivier CAHUC, Maître de Conférences HDR, Université de Bordeaux I  
Examineurs : Bernard ANSELMETTI, Professeur, IUT de Cachan  
Directeur de thèse : Jean-Yves HASCOET, Professeur, Ecole Centrale de Nantes (30%)  
Co-encadrants : Benoît FURET, Professeur des Universités, IUT de Nantes (30%)  
Sébastien GARNIER, Maître de Conférences, IUT de Nantes (40%)  
Membre invité : Alain AUFFRET, Directeur Technique, Fischer Précise France

Résumé :

Pour sécuriser le processus de fabrication, garantir la qualité des pièces et atteindre une pleine productivité, des Systèmes de Surveillance Automatique de l'Usinage (SSAU) sont nécessaires. Cependant, si des solutions sont proposées pour la production en grandes séries, il n'existe pas actuellement de SSAU pour les systèmes de production flexible en fraisage (ces derniers fabriquant notamment les pièces complexes à forte valeur ajoutée). L'objectif des travaux de thèse a été de répondre à ce besoin industriel en proposant une solution efficace et fiable de Surveillance Automatique de l'Usinage pour la production flexible par fraisage.

Tout d'abord, plusieurs critères issus de la bibliographie et susceptibles de résoudre la problématique, ont été testés dans des conditions de coupe et de trajectoires industrielles, ce qui n'avait pas été fait auparavant. L'analyse de leur comportement a permis de mettre en évidence leurs faiblesses et de faire évoluer notre réflexion, avant de proposer une nouvelle méthode : la Surveillance d'Usinage Intermittente. L'état de l'outil est estimé à partir des efforts de coupe, puis reporté sur une carte de contrôle. Pour plus de fiabilité, seules les zones où la coupe est stable sont surveillées. Afin d'augmenter la précision, la robustesse et le domaine de validité de la méthode, des améliorations ont ensuite été apportées, quant au conditionnement et à l'analyse des signaux d'efforts. Par ailleurs, les estimations de l'état de l'outil sont affinées pendant l'usinage, grâce à des simulations numériques effectuées au préalable. Des expérimentations ont validé l'approche, par des détections fiables de l'état d'un outil possédant 5 dents (dont une endommagée ou non). Enfin, nous avons montré que notre méthode permet de détecter de très faibles endommagements de l'outil, survenant au cours de l'usinage d'une pièce. Nous proposons également de coupler notre SSAU à un système d'inspection des outils hors-usinage pour confirmer les détections. Nous avons ensuite montré que notre méthode n'est pas perturbée par l'usure des outils. Une table dynamométrique n'étant pas viable industriellement, nous avons cherché des alternatives. Nous avons finalement montré que la mesure d'efforts peut être réalisée en instrumentant la broche par des capteurs inductifs. L'application de notre méthode permet alors, dans un cadre industriel, de détecter de très faibles endommagements de l'outil, lors de production flexible en fraisage.

## 2.2. Thèse de Mr Benjamin Havette

Titre : *Contribution méthodologique au High Power Milling*

Soutenue le 14 janvier 2011

Président :	Olivier CAHUC, Professeur des Universités, Université de Bordeaux 1,
Rapporteur :	Patrick MARTIN, Professeur des Universités, Arts et Métiers Paristech, Henri PARIS, Professeur des Universités, Université Joseph Fourier,
Directeur de thèse :	Benoit FURET, Professeur des Universités, IUT de Nantes (40%),
Co-encadrants :	Sébastien GARNIER, Maître de conférences, IUT de Nantes (30%) Mathieu RITOU, Maître de conférences, IUT de Nantes (30%)
Membre invité	David GUILLOTIN, Ingénieur, Société AIC, Carquefou

### Résumé :

Le contexte économique actuel pousse les entreprises à rechercher sans cesse des gains de productivité. L'usinage de pièces aéronautiques métalliques requiert des opérations de vidage de poche où l'on recherche à enlever un maximum de matière en un minimum de temps (elles représentent entre 30 à 60% du temps total de fabrication). Ces opérations sont principalement limitées par la puissance que peut fournir l'électro-broche équipant le moyen de production. La contribution de cette thèse consiste à proposer une méthodologie permettant d'optimiser l'exploitation de ces électro-broches UGV (Usinage Grande Vitesse).

Dans un premier temps, un constat de l'exploitation des moyens de production actuels dédiés aux opérations de HPM (High Power Milling) est dressé. Une analyse fine des variations de conditions de coupe est alors menée lors des zones transitoires que l'on retrouve dans les stratégies couramment utilisées. A partir d'un modèle classique de prédiction de la puissance de coupe issu de la bibliographie, les principaux facteurs induisant des variations de puissance de coupe sont identifiés. Une méthodologie dédiée aux opérations d'usinage haute puissance est alors proposée et finalement validée à partir de l'usinage d'une géométrie de poche typique que l'on retrouve fréquemment dans les opérations d'usinage de pièces aéronautiques.

## 2.3. Thèse de Mme Aude Caillaud-boudellier

Titre : *Modélisation et optimisation des opérations de parachèvement de pièces en matériaux composites*

Soutenue le 1 décembre 2011

Rapporteur : Jean-François CHATELAIN, Professeur titulaire, Ecole de Technologie Supérieure de Montréal  
Examineur : Joël RECH, Maître de Conférences, ENISE, Saint-Etienne  
Gérard POULACHON, Professeur des Universités, Arts et Métiers Paristech,  
Directeur de thèse : Benoit FURET, Professeur des Universités, IUT de Nantes (40%),  
Co-encadrants : Sébastien GARNIER, Maître de conférences, IUT de Nantes (30%),  
Mathieu RITOU, Maître de conférences, IUT de Nantes (30%),  
Membre invité : Didier LEBORGNE, Expert Usinage des Composites, AIRBUS Nantes

Résumé :

La diversité des matériaux composites rend difficile la problématique de sélection qui permet d'associer à chaque pièce, le ou les procédés les plus adaptés à son parachèvement (détourage à la fraise, découpe jet d'eau, usinage au disque, découpe laser ...). C'est pourquoi une méthodologie globale, basée sur une analyse locale des entités géométriques de la pièce a été définie.

Afin d'alimenter la base de données nécessaire à son fonctionnement, un protocole doit être établi pour chaque procédé afin de déterminer les conditions opératoires optimales. Pour cela, la productivité doit être maximisée tout en respectant l'intégrité de la matière et l'état de surface requis. C'est pourquoi une approche complémentaire à la méthodologie globale, basée sur l'étude de l'influence des paramètres opératoires sur les phénomènes de coupe limitants et sur la qualité de la pièce a été développée, puis appliquée au détourage à l'aide de fraises à concrétions diamantées. De nombreuses expérimentations en conditions industrielles ont été analysées au travers des efforts de coupe, de mesures thermiques, de la qualité des surfaces usinées et de la géométrie réelle des outils.

Afin de pouvoir dimensionner les équipements associés à ce procédé (outillage, robot...), un modèle de prédiction des efforts, basé sur l'hypothèse d'un engagement continu de l'outil, a été construit. Les influences de l'orientation des fibres dans les CFRP stratifiés, de l'engagement de l'outil et de la vitesse d'avance ont été intégrées. Ce modèle a été perfectionné et validé sur des critères de précision et de robustesse, en confrontant les simulations à nombre d'expérimentations.

## 2.4. Thèse de Mme Claire Lecerf-Dumas

Titre : *Développement de méthodes robotisées pour le parachèvement de pièces métalliques et composites*

Soutenance le 7 décembre 2011

Rapporteur : Gabriel ABBA, Professeur des Universités, ENIM,  
Pascal RAY, Professeur des Universités et directeur de l'IFMA,  
Examineur : Pierre-Jean BARRE, Professeur des Universités et directeur de l'ENSAM,  
Directeur de thèse : Benoit FURET, Professeur des Universités, IUT de Nantes (40%),  
Co-encadrants : Stéphane CARO, Chargé de recherche CNRS, IRCCyN (30%),  
Sébastien GARNIER, Maître de conférences, IUT de Nantes (30%)  
Membre invité : Patrice RABATE, Responsable Assemblage Robotique, EADS IW,

Résumé :

Le parachèvement de pièces métalliques ou composites est une opération aux enjeux économiques importants pour lequel le risque de délocalisation est présent. Dans ce contexte, la robotisation est une alternative permettant de conserver une production locale, les robots industriels poly articulés ayant vu leurs prix diminués et leurs performances améliorées. Néanmoins leur raideur intrinsèque n'est pas suffisante pour réaliser ces opérations dans les conditions minimales requises par les procédés nécessitant à la fois précision et raideur importantes du robot. Cette thèse a permis de développer et valider une méthodologie de maîtrise et d'optimisation de l'exploitation de robots industriels sériels pour le parachèvement de pièces métalliques ou composites. Le premier chapitre présentait les enjeux de la robotique de production ainsi que la synthèse des travaux scientifiques du domaine. Dans la seconde partie, les sources de flexibilité des robots sériels 6-axes ont été étudiées afin de développer un modèle élasto-statique adapté à la problématique. Un protocole d'identification des raideurs articulaires, exploitable industriellement, a été développé puis mis en œuvre dans le troisième chapitre. Ce modèle élasto-statique a été validé expérimentalement au moyen de l'usinage de pièces tests. Dans la quatrième partie des travaux, le comportement élasto-dynamique du robot a été étudié. Enfin, deux méthodes de travail permettant de réaliser des opérations de parachèvement avec un robot industriel sériel, testées expérimentalement, ont été menées et présentées dans la dernière partie de cette thèse : (i) optimisation du placement de la pièce à usiner et gestion de la redondance cinématique du robot ; (ii) correction de la consigne de trajectoire du robot.

## 2.5. Thèse de Mr Raphaël Poirée

Titre : *Automatisation du ponçage roto-orbitale*

Thèse débutée le 1er septembre 2011

Thèse non soutenue

Directeur de thèse : Benoit FURET, Professeur des Universités, (50%),  
Co-encadrant : Sébastien GARNIER, Maître de conférences (50%),

Résumé :

L'axe principal des travaux de thèse porte sur l'automatisation du ponçage roto-orbitale utilisé pour la préparation de surfaces de pièces de grandes dimensions dans des domaines tels que l'aéronautique, le nautisme, l'éolien ou le BTP. Afin d'automatiser le ponçage roto-orbitale, procédé encore essentiellement manuel, des verrous technologiques et scientifiques sont à lever. Une ponceuse roto-orbitale est fixée sur un robot anthropomorphe via un capteur d'effort ou une compliance active afin de piloter le procédé en effort. Ce type de ponceuse est équipé d'une rotation libre du plateau ce qui permet d'obtenir une meilleure répartition du pouvoir abrasif. Le pouvoir abrasif du ponçage roto-orbitale dépend de nombreux facteurs comme l'abrasif, les matériaux travaillés, l'effort, la vitesse du plateau libre ou encore l'inclinaison de ce dernier. Afin de maîtriser la répartition d'enlèvement de matière sur toute la surface poncée, la mise en place de simulations réaliste en corrélation avec des lois d'abrasion (loi de Preston) est primordiale. L'évolution du pouvoir abrasif sera estimée via une loi d'usure qui sera préalablement validée. Nous pourrions ensuite valider les simulations à l'aide de modèle élémentaire sur des surfaces planes. Dans une seconde phase, nous envisagerons des surfaces complexes afin de confirmer ou non la généralisation à ce type de surface.

## 2.6. Thèse de Mr David Guerin

Titre : *Optimisation de la configuration du fenêtrage du travail en couplant le procédé utilise, la qualité souhaitée et le comportement des moyens robotisés*

Thèse de doctorat de l'Université de Nantes financée par l'IRT Jules Verne dans le cadre du projet ROBOFIN

Thèse débutée le 1er octobre 2012

Directeur de thèse : Stéphane CARO, Chargé de recherche CNRS, IRCCyN (40%),  
Co-encadrant : Sébastien GARNIER, Maître de conférences, IUT de Nantes (30%),  
Industriel : Alexis GIRIN, Ingénieur docteur de l'IRT Jules Verne (30%)

Résumé :

La première étape d'identification et de calibration concerne les paramètres géométriques de la cellule robotisée. Plusieurs méthodes ont déjà fait leur preuve, nous avons optés pour la méthode développée par W. Khalil et E. Dombre et présentée dans [1] [2] pour obtenir la correction à réaliser sur l'ensemble des valeurs articulaires afin

d'améliorer la précision du positionnement de l'effecteur dans l'espace de travail. L'un des défis technologique de la thèse est l'identification et la calibration des paramètres élasto-statique de la cellule qui doivent être viable industriellement. L'intérêt de cette étape est de pouvoir anticiper les déformations de la cellule robotisée lorsqu'elle est soumise à des efforts importants. Des travaux ont déjà été effectués sur un robot 6R dans le cadre de la thèse de Claire Dumas [3]. Pour optimiser le temps nécessaire à la réalisation des mesures les travaux de Yier WU [4] ont permis d'améliorer cette phase de calibration en optimisant la pose du robot lors de la mesure des déplacements quasi-statiques de l'effecteur du robot. L'apport de cette thèse est d'étendre les travaux précédents à notre cellule robotisée à sept degrés de libertés (P6R) Robot KUKA KR 500 monté sur un rail Sud Ouest Système de 18 mètres de long.

Dans une dernière phase, nous qualifierons la capabilité du moyen suivant l'exploitation des méthodes de correction.

## 2.7. Thèse de Mr Alexandre Ambiehl

Titre : *Génération conditionnelle de trajectoires de parachèvement robotisé*

Thèse de doctorat de l'Université de Nantes financée par la société Gébé2-Productique dans le cadre du projet QUAUSI

Thèse débutée le 1er mars 2014

Directeur de thèse : Benoit FURET, Professeur des Universités, (50%),  
Co-encadrant : Sébastien GARNIER, Maître de conférences (30%),  
Industriel : David CORBEL, Ingénieur Docteur de Gébé2 (20%).

Résumé :

La thèse proposée se déroule dans le cadre du projet F.U.I. QuaUsi, dont le but est d'accroître la maîtrise de la qualité des pièces métalliques usinées dans le domaine de l'aéronautique. Les partenaires sont Dassault Aviation, Figeac Aéro (sous-traitant aéronautique de rang 1), Mécachrome (sous-traitant aéronautique de rang 1), Fischer Precise (fabricant de broches), Spring Technologies (logiciel NC Simul), Europe Technologies (système de surveillance d'usinage EMMAtools), Gébé2-Productique (intégrateur de robots), le CETIM, le LAMPA (Arts & Métiers Angers) et l'IRCCyN (Université de Nantes). Le projet QUAUSI vise à innover en supprimant des opérations de contrôle et de parachèvement, après usinage, sur les grandes pièces structurelles aéronautiques. Les recherches seront basées sur une exploitation optimale des données issues de dispositifs de surveillance des opérations d'usinage. L'objectif est de définir des opérations de parachèvement conditionnel sur des zones de la pièce. Afin d'optimiser les opérations de parachèvement, il faudra étudier les procédés avec leurs moyens, les conditions opératoires et leurs effets suivant les typologies de défauts à corriger sur les différents zones de la pièce. Il faudra concevoir et développer une cellule de parachèvement spécifique au cas traité dans le cadre du projet QuaUsi mais en proposant une méthodologie permettant de rendre ce développement adaptable à tout cas de pièces usinées. Enfin, il s'agira de développer un moyen permettant de créer, de manière automatique, les trajectoires que le robot devra suivre pour réaliser ces reprises.

### 3. LISTE DES PROJETS COLLABORATIFS

#### 3.1. Projet UGV/Alu Composite (FUI)

*Date : 2004 à 2007*

Ce projet avait pour objectif de permettre des améliorations significatives des performances d'usinage pour les alliages d'aluminium composites. Trois grands axes ont été développés : la maîtrise des durées de vie et de lubrification des outils coupants, leur comportement vibratoire et enfin la programmation et les méthodes industrielles associées. Ma contribution dans ce projet a concerné l'encadrement du master d'Aude Caillaud/Boudelier, ainsi qu'une expertise sur les actions de parachèvement robotisé.

*Partenaires : Airbus, Europe Technologies, Cetim, Precise-Fisher, Université de Nantes (IRCCyN), Synervia, AOB, Bretagne Composites, FFDM-Thomas, Num, Unil Opal, Vogel, SKF*

*Budget de 870K€ pour l'IRCCyN.*

#### 3.2. Projet Usinae (FUI)

*Date : 06/2007 à 11/2011*

Ce projet fait suite au projet UGV/Alu Composite. Deux objectifs sont affichés : le premier est la fiabilisation et l'amélioration des performances de l'UGV pour les pièces réalisées en matériaux "classiques" et en composites complexes à haute valeur ajoutée. La seconde porte sur l'un des éléments les plus fragiles de la machine à savoir la broche. Le résultat marquant de ce projet est la mise au point de la Stormibox (Commercialisé par Europe Technologie sous le nom d'EMMATools), ce système permet de faire du BIG DATA à l'aide de l'ensemble des données capteurs présent sur la machine. On peut donc rejouer l'usinage d'une pièce complète. Cette source de donnée est précieuse afin d'effectuer toute analyse sur la coupe du point de vue de la pièce, de l'outil ou encore de la broche (machine). Ma contribution dans ce projet se situe principalement sur l'analyse des défaillances de la broche, et l'encadrement de thèse de Mr Benjamin HAVETTE.

*Partenaires : Europe Technologies, AIRBUS, DASSAULT Aviation, EADS CCR, FOREST-LINE, PCI, PRECISE France S.A., S2M, Université de Nantes (IRCCyN), Synervia.*

*Budget de 5780 K€ dont 852 K€ pour l'IRCCyN*

### 3.3. Projet défi Composite (FUI)

*Date : 03/2009 à 05/2012*

Ce projet s'articulait autour du parachèvement d'une pointe avant d'AIRBUS. Les principaux axes de recherches ont porté sur le choix de processus de parachèvement de matériaux composite constituant cette pointe d'avion, mais aussi la mise au point de parachèvement robotisé de ces structures. Pour ce qui est du parachèvement, les travaux portaient à la fois sur la préparation de surface (ponçage roto orbitale, flammage,...) mais aussi sur l'optimisation de condition opératoire des fraise à concrétion diamantées et le lien avec la qualité. Du point de vue parachèvement robotisé, différents essais ont pu être mené afin de mettre en évidence les problèmes de rigidité. Suite à ce constat, différents scenarii ont pu être développé afin d'envisager le parachèvement robotisé de la pointe avant de l'avion. Ma contribution dans ce projet a concerné l'encadrement de la thèse d'Aude Caillaud/Boudelier, ainsi qu'une expertise sur les actions de parachèvement robotisé.

*Partenaires : AIRBUS, Europe Technologies, Besne Mécanique, Université de Nantes (IRCCyN), Synervia.*

*Budget de 810 K€ pour l'IRCCyN.*

### 3.4. Projet Ecowingbox (FUI)

*Date : 05/2009 à 10/2013*

Le projet ECOWINGBOX (ECO composite WING BOX) est un projet de coopération, initié et coordonné par Daher Aerospace, concernant la conception, la fabrication et la validation d'un démonstrateur de caisson d'avion d'affaires en composite. Ce caisson, majoritairement en matériaux composites, doit permettre une réduction sensible de la masse du sous-ensemble, par rapport à son équivalent métallique. Il doit ainsi apporter une économie de carburant et une amélioration des performances de l'avion. La conception et la réalisation du démonstrateur permet de progresser au niveau de l'automatisation de procédés polyvalents, au juste coût, capables de fortes cadences.

L'IRCCyN a dû prendre en charge, sur ce projet, le développement du parachèvement des pièces composites tel que le détournage, et la préparation des surfaces avant collage ou peinture, ainsi que la robotisation de tous ces procédés. Un prototype d'une voilure de 14 mètre de long tout composite et entièrement collée a servie de démonstrateur. Les différents éléments constituant cette voilure ont été parachevés. J'ai apporté ma contribution à ce projet à travers l'encadrement de la thèse de doctorat de Claire Dumas qui a traité du développement de méthodes robotisées pour le parachèvement de pièces métalliques et composites.

*Partenaires : Europe Technologies, ESTACA, Université de Nantes (IRCCyN), Coriolis Composites, Allio, Chastagner Delaize, Ajilon, le CEMCAT, LAUM, CERPEM.*

*Budget de 20.9M€ dont 1,7M€ pour l'IRCCyN.*

### 3.5. Projet ANR COROUSSO

*Date : 10/2010 à 06/2014*

Ce projet intitulé " Commande de RObots d'USinage de pièces composites de grandes dimensions et de Soudage FSW" a consisté à fournir des résultats théoriques et expérimentaux sur la mise au point de cellules robotisées d'usinage de pièces en matériaux composites et de soudure FSW (Friction Stir Welding) de pièces métalliques. Les essais expérimentaux choisis par les partenaires industriels pour mettre en lumière les opérations critiques et les plus significatives pour le procédé considéré ont conduit à faciliter le transfert technologique dans le secteur de la production et à envisager la robotisation d'autres procédés de fabrication. Mes contributions scientifiques principales dans COROUSSO ont été : (i) le développement d'une méthodologie pour l'identification des paramètres de raideur de robots d'usinage industriels et d'architecture sérielle ; (ii) la mise au point d'une démarche pour la sélection optimale de poses pour l'identification des paramètres géométriques et élastiques de robots d'usinage ; (iii) le développement d'une procédure pour déterminer le placement optimal de la pièce à usiner ou à souder tout en gérant la redondance cinématique du robot vis-à-vis de la tâche à accomplir. J'ai eu en charge la réalisation de la tâche 3 portant sur l'identification, la mesure ainsi que les stratégies de pilotages des procédés usinant avec un robot.

Partenaires : Europe Technologies, Institut de Soudure, Université de Nantes (IRCCyN), LCFC.

*Budget de 1,2 M€ dont 333K€ pour l'IRCCyN.*

### 3.6. Projet IRT Jules Vernes: RoboFin

*Date : 10/2012 à 10/2015*

Ce projet intitulé ROBOFIN, la ROBOTisation de la FINition des pièces métalliques ou composites de grandes dimensions a pour but de développer les moyens robotisés de demain nécessaires à la finition des pièces de grandes dimensions (de 3 m à 100 m). La finition correspond à l'usinage, le perçage, le détournage, la préparation de surfaces, le ponçage. Le principal moyen est le robot sur rail de l'IRT qui a permis la finition de la voilure du projet ECOWINGBOX. Les principaux axes de recherches tendent à définir le protocole d'estimation de la capacité de tels matériels et à définir des procédures industrielles de correction de trajectoire. Ceci permettra à terme à un industriel d'effectuer un choix sur son moyen de production au vue de sa production. Je participe à l'encadrement de la thèse de doctorat de David GUERIN dans le cadre de ce projet.

Partenaires : IRT JV, Université de Nantes (IRCCyN), Coriolis Composites, Europe Technologies, Multiplast, STX, LoireTech.

*Budget de 844 k€ pour l'IRCCyN.*

### 3.7. Projet IRT Jules Vernes: COMET

*Date : 2012 durée prévu 36mois*

Ce projet s'intitule COMET (COntrol and MEasurement of Tools). La durée de vie d'un outil coupant est aujourd'hui gérée à partir du temps que passe l'outil en phase d'usinage. Or les états d'usures de l'outil ne dépendent pas uniquement du temps passé à usiner. Les autres paramètres qui agissent sur l'usure sont les parcours et trajectoires, les vibrations, les chocs, la lubrification, la rigidité de l'ensemble pièce, etc. C'est pourquoi Airbus, l'IRCCyN, DCNS et Europe Technologies, en partenariat avec l'IRT Jules Verne, proposent de développer une nouvelle méthode d'exploitation plus performante des outils coupants. Elle repose sur l'élaboration d'un moyen de mesures 3D et d'analyse de l'usure des outils. Ce projet a pour but d'optimiser la durée de vie de l'outil, en observant leur état d'usure après chaque séquence d'usinage. A chaque contrôle, l'outil sera réutilisé ou non, suivant des critères de qualité de pièces définis et vérifiés lors des essais. Une fois les essais terminés, nous entamerons la mise en place d'un banc de mesures prototype, de manière à mesurer les outils et réaliser les algorithmes nécessaires à l'automatisation du banc. Cela permettra d'accompagner le futur opérateur préparateur d'outils coupant, lors de ses contrôles d'outils. Ma contribution dans ce projet concerne la mise en place de la procédure de scanning de l'outil et des algorithmes d'identification d'état d'usure.

*Partenaires : IRT Jules Verne, Université de Nantes (IRCCyN), Europe Technologies, AIRBUS, DCNS.*

*Budget de 906 k€ pour l'IRCCyN.*

### 3.8. Projet QuaUsi (FUI)

*Date : 03/2013 durée prévu 36mois*

Ce projet fait suite aux projets Usinae, il s'agit ici de maîtriser la QUALITÉ d'USINAGE. L'optimisation du processus de fabrication n'est pas bornée à l'usinage de la pièce, il faut y ajouter l'ensemble des coûts environnant dont le contrôle et la reprise des pièces. Les deux principaux axes de développement de ce projet peuvent être décrit de la manière suivante : connaissant l'ensemble des informations obtenues lors de l'usinage (EMMATools), on doit pouvoir garantir la conformité de la pièce pour processus stabilisé. Dès lors le contrôle devient facultatif ou tout au moins orienté. De même ayant détecté des défauts sur la pièce, la reprise de ces pièces par un robot peuvent être automatisé. Dans ce projet deux thèses sont réalisés. La première consiste à corréler la qualité de la pièce par l'analyse des signaux capitalisés au cours de l'usinage. La seconde consiste à automatiser la création de parcours de reprise (vibration, ressaut, cassage d'arêtes) sur robot. Ma contribution sur ce projet concerne l'encadrement d'Alexandre Ambiehl sur ce deuxième axe.

*Partenaires : Dassault Aviation, Figeac Aéro, Q.S.A., Fischer Precise Spring Technologies, Europe Technologies, Gébé2, CETIM, Arts & Métiers Angers( LAMPA) et Université de Nantes (IRCCyN)*

*Budget de 398K€ pour l'IRCCyN.*

### 3.9. Projet CROX (DGA)

*Date : 07/2014 durée prévu 36mois*

La société CORIOLIS s'est spécialisée dans la fabrication de machine de drapage pour la fabrication de pièce composite depuis une quinzaine d'année. Naturellement, la mise en place d'un moyen de contrôle de leur pièce est un enjeux stratégique. Le projet a donc pour objet la conception d'une cellule robotisé de contrôle. Le procédé retenue est le contrôle par Rayon X. Ce procédé est particulièrement bien adapté au contrôle d'assemblage. Il permet de détecter différents défauts tout particulièrement sur les pièces composites (défaut lié à la fabrication de ceux-ci). L'objectif est de mettre en place une cellule flexible pour le contrôle de d'assemblage de grande dimension. La source et le récepteur étant portés par deux robots collaborant. Ce projet met en œuvre différentes compétences : La programmation robotique, l'intégration de cellule, la reconstruction par tomographie et la mesure des différentes positions. Dans ce projet, nous sommes en charge d'étudier et de proposer une méthodologie de positionnement de la source d'émission par rapport au récepteur ainsi qu'une estimation de la position du défaut sur la pièce. Le challenge est d'envergure au vue des contraintes de positionnement demandés (de l'ordre de 5 $\mu$ ).

*Partenaires : CORIOLIS, CEA LIST, Université de Nantes (IRCCyN)*

*Budget de 215K€ pour l'IRCCyN.*

### 3.10. Projet COROMA (projet Européen)

*Date : 09/2016 durée prévu 36mois*

COROMA est un effort intersectoriel introduisant les technologies robotiques dans les entreprises de fabrication de pointe par une approche innovante. L'objectif de ce projet vise à démontrer et à valider des technologies habilitantes clés à travers trois secteurs industrielles. L'impact industriel et la pertinence du projet COROMA seront établis par le développement de démonstrateurs industriels:

- Le premier représentera le secteur de l'énergie dans le but de fabriquer de grandes pièces métalliques,
- Le second représentera l'industrie aérospatiale en se concentrant à la fois sur les pièces de métal et de CFRP,
- Le troisième représentera l'industrie navale avec la fabrication de pièces GFRP.

Ces trois démonstrateurs auront pour objectif de faire en sorte que les besoins spécifiques des secteurs cibles soient pris en compte par le projet COROMA et de présenter les innovations technologiques qui profiteront à l'industrie manufacturière européenne.

*Partenaires : Ik4-Ideko, Benetea, Convergent Information Technologies GMBH, BA Systemes, Shadow Robot Company LTD, Soraluece, Europe Technologies, Ensa, Aciturri, DIN, IT+Robotics, Université de Sheffield, Stäubli, DFKI, KTH royal institute Techology, Université de Nantes*

*Budget de 541k€ pour l'IRCCyN.*

### 3.11. Projet RODEO (Projet Européen)

*Date : 09/2016 durée prévu 36 mois*

L'objectif principal du projet RODEO est de proposer un équipement robotisé de forage orbital léger et des conditions de fonctionnement et des outils, pour permettre le perçage de trous de petit diamètre étroitement espacés dans l'aluminium avec le contrôle des contraintes résiduelles induites. Cela sera accompli par:

- la modélisation des phénomènes impliqués dans le forage orbital qui influent sur les contraintes résiduelles,
- le développement d'un outil combiné de forage et de brunissage et des conditions de fonctionnement associées pour atteindre les contraintes résiduelles voulues,
- poursuivre le développement d'une unité de forage orbitale à grande vitesse (existant dans le consortium) capable d'appliquer les conditions prescrites,
- intégrer l'unité de forage orbitale développée sur un robot industriel léger
- définir les conditions de fonctionnement du robot léger à utiliser pour assurer l'opération de forage,

Pour atteindre cet objectif, des outils de simulation numérique (déjà développés dans le consortium) seront utilisés pour poursuivre l'étude et déterminer les mécanismes modifiant les propriétés du matériau pendant le forage orbital et l'impact sur la durée de vie. En conséquence, des solutions pour augmenter les contraintes résiduelles dans les trous d'aluminium seront suggérées en termes de conditions de coupe, de géométrie de l'outil et de stratégie de forage (y compris le brunissage). De ce fait, un outil de forage orbital innovant, combinant les pièces actives de coupe et de brunissage seront développés et des conditions seront proposées. Pour conduire cet outil le long de la trajectoire attendue aux vitesses requises, le développement d'une unité de forage orbitale à grande vitesse (fournie par PRECISE) sera poursuivie. Cela nécessitera l'adaptation de l'équipement pour permettre le brunissage, et l'intégration des dispositifs de surveillance pour les forces de coupe, la vitesse de broche, les mesures de vitesse d'alimentation.

L'unité de forage orbital sera manipulée par un robot industriel léger qui permettra de percer des trous sans avoir besoin d'un foret.

*Partenaires : PRECISE France SAS, MITIS, KUKA System Aerospace France, Université Paul Sabatier Toulouse III, Université de Nantes,*

*Budget de 50k€ pour LS2N.*

### 3.12. Projet BatiPrint

*Date : 05/2016 durée prévu 12mois*

Les deux laboratoires IRCCyN/GeM de l'Université de Nantes et la SATT Ouest Valorisation ont breveté un ensemble constitué d'un système et d'un procédé de réalisation

de murs ou d'éléments structurants de construction par fabrication additive automatisée et robotisée à triples parois isolantes et structurantes.

Cette nouvelle solution se présente comme un nouveau procédé de fabrication de murs et d'habitations dans le domaine de la construction par procédé de fabrication additive.

Le but de cette maturation est de développer un prototype fonctionnel complet à partir de briques technologiques robotiques déjà exploitées pour partie aux laboratoires et de tester l'ensemble à l'échelle 1 en réalisant un habitat réel.

*Partenaires, Université de Nantes (IRCCyN)*

*Budget de 327K€ pour l'IRCCyN.*

## Habilitation à Diriger des Recherches

Sébastien GARNIER

Identification et modélisation pour le développement de la surveillance d'usinage et de la robotique de production

Identification and modeling for the development of machining monitoring and robotics production

### Résumé

Ce manuscrit présente des travaux portant sur la fabrication. L'approche choisie est ascendante. On observe les grandeurs physiques liées à la fabrication, on les modélise, pour enfin optimiser l'exploitation du moyen.

Deux grands thèmes sont abordés dans le document. Le premier concerne le fraisage sur machine rigide, le second, le parachèvement sur machine souple.

Au cours du premier thème, la modélisation du fraisage est décrite et deux applications à la surveillance d'usinage sont proposées : la surveillance de l'usure et celle du bris d'outil. Dans les deux cas, la notion d'état de l'outil est exploitée. Deux autres applications sont détaillées : la première concerne le pilotage en puissance du fraisage (UGV), la seconde l'usinage du composite avec des outils à concrétions diamantées pour laquelle la modélisation est intégralement revue.

Le deuxième thème concerne l'utilisation de moyens robotisés pour le parachèvement de pièce, et plus particulièrement les robots anthropomorphes. Après une mise en évidence des lacunes de ces derniers, une modélisation est choisie, et différents protocoles d'identifications des paramètres sont détaillés. L'exploitation de ces modèles peut alors être utilisée. Pour mettre en évidence les couplages qui existent entre le moyen et le procédé. Différentes propositions sont faites et mises en œuvre afin de parvenir à assurer la juste qualité des productions à réaliser.

### Mots clés

Fraisage, surveillance d'usinage, composite, robotique, flexibilité articulaire

### Abstract

This document contains research work within a general manufacturing context. Our approach is based on the analysis of signals. We observe the physical parameters related to manufacturing, model them to finally optimize the parameters of the process. Two major themes are addressed in the manuscript. The first concerns the milling on a rigid machine. The second is the manufacture on a flexible machine.

In the first theme, milling modelling is described and two applications of the machining monitoring are proposed: wear monitoring and tool breakage monitoring. In both cases, the notion of tool state is exploited. Two other applications are also detailed: the first concerns the control of the high speed machining power, and the second one is the composites machining with concretion tools for which the modelling is fundamentally revised.

The second theme concerns the robotic manufacturing, and more particularly anthropomorphic robots. After highlighting the robot weaknesses, a model is chosen, and different identification parameters protocols are detailed. The exploitation of these models can be used to highlight the couplings that exist between the robot and the process. Different proposals are made and implemented to ensure the quality of the productions to be produced.

### Key Words

Milling, monitoring manufactured, CFRP, robotic, joint stiffness