



Maîtrise de la qualité géométrique des produits

Eric Pairel

► To cite this version:

Eric Pairel. Maîtrise de la qualité géométrique des produits. Génie mécanique [physics.class-ph]. ComUE Grenoble-Alpes, 2016. tel-01470017

HAL Id: tel-01470017

<https://hal.science/tel-01470017>

Submitted on 17 Feb 2017

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

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

COMUE GRENOBLE-ALPES

Mémoire
d'Habilitation à Diriger des Recherches

*Maîtrise de la qualité
géométrique des produits*

Éric PAIREL

Maître de conférences de la 60° section
à l'UNIVERSITÉ SAVOIE MONT BLANC
Affecté à POLYTECH ANNECY-CHAMBÉRY
et au laboratoire SYMME

Présenté, le 13 décembre 2016, devant le jury composé de :

Claire Lartigue, Professeur des universités à l'UNIVERSITÉ PARIS SUD
examinatrice et présidente

Bernard Anselmetti, Professeur des universités à l'UNIVERSITÉ PARIS SUD
rapporteur

Jean-Yves Hascoët, Professeur des universités à l'ÉCOLE CENTRALE DE NANTES
rapporteur

Maurice Pillet, Professeur des universités à l'UNIVERSITÉ SAVOIE MONT BLANC
rapporteur

Max Giordano, Professeur émérite à l'UNIVERSITÉ SAVOIE MONT BLANC
examinatrice

François Villeneuve, Professeur des universités à l'UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER
examineur

Alex Ballu, Maître de conférences habilité à l'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX
examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2016-2017

Auteur :

Éric Pairel

Laboratoire SYMME, POLYTECH ANNECY-CHAMBÉRY,

BP 80439, 74944 ANNECY-LE-VIEUX Cedex

eric.pairel@univ-smb.fr

+33 (04) 50 09 65 61

Mémoire d'Habilitation à diriger des recherches (HDR) :

Maîtrise de la qualité géométrique des produits

Destinataires :

Bernard Anselmetti

Laboratoire LURPA, UNIVERSITÉ PARIS SUD

61, avenue du Président Wilson, 94235 CACHAN Cedex

Alex Ballu

Laboratoire I2M, UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

351 cours de la Libération, 33 405 TALENCE Cedex

Max Giordano

Laboratoire SYMME, UNIVERSITÉ SAVOIE MONT BLANC

BP 80439, 74944 ANNECY-LE-VIEUX CEDEX

Jean-Yves Hascoët

Laboratoire IRCCyN, ÉCOLE CENTRALE NANTES

1 rue de la Noë, BP 92101, 44321 NANTES Cedex 3

Claire Lartigue

Laboratoire LURPA, UNIVERSITÉ PARIS SUD

61, avenue du Président Wilson, 94235 CACHAN Cedex

Maurice Pillet

Laboratoire SYMME, UNIVERSITÉ SAVOIE MONT BLANC

BP 80439, 74944 ANNECY-LE-VIEUX Cedex

François Villeneuve

Laboratoire G-SCOP, UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER

46 avenue Félix Viallet, 38031 GRENOBLE Cedex 1

REMERCIEMENTS

Comme un fait exprès, j'aurai attendu ma vingtième année de carrière pour me présenter à l'Habilitation à diriger des recherches. En fait, ce sont les aléas de la vie professionnelle et de la vie privée qui ont plusieurs fois repoussé ce projet ces dernières années. Plusieurs personnes, à divers titres, l'ont rendu possible et je veux ici les mettre à l'honneur.

En premier lieu, je remercie vivement les rapporteurs de ce mémoire et les membres du jury : Jean-Yves Hascoët, professeur des universités à l'ÉCOLE CENTRALE DE NANTES ; Bernard Anselmetti, professeur des universités à l'UNIVERSITÉ PARIS SUD ; et Maurice Pillet, professeur des universités à l'UNIVERSITÉ SAVOIE MONT BLANC qui me fait aussi profiter de son expérience et de ses travaux.

Je remercie également les autres membres du jury : Claire Lartigue, professeur des universités à l'UNIVERSITÉ PARIS SUD ; François Villeneuve, professeur des universités à l'UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER ; Alex Ballu, Maître de conférences habilité à diriger des recherches à l'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX ; et Max Giordano, professeur émérite à l'UNIVERSITÉ SAVOIE MONT BLANC et avec qui j'ai travaillé pendant près de quinze ans dans une complicité extraordinaire.

Je tiens à remercier Laurent Tabourot, directeur du laboratoire SYMME, pour le rapport favorable qu'il a fait en 2013 sur ma demande d'inscription à l'habilitation à diriger des recherches, mais aussi pour l'ambiance de travail sereine qu'il a créée au laboratoire SYMME.

Christine Galez, directrice-adjointe du laboratoire, contribue largement à cette ambiance mais c'est surtout pour sa prévenance que je veux la remercier ici.

Un grand merci enfin à Fabrice Frelin, programmeur informatique au laboratoire, sans qui mes idées n'auraient pas vu leurs concrétisations informatiques.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Considérant que ce document pourra être lu aussi par des personnes non averties du système universitaire français, il me paraît utile d'expliquer ce qu'est l'Habilitation à diriger des recherches et le « cahier des charges » permettant de la demander.

L'habilitation à diriger les recherches (HDR) est le plus haut diplôme universitaire français. Elle permet d'être directeur de thèse de doctorat ; rapporteur de thèses et d'HDR ; et, après avoir été qualifié par le Conseil national des universités, candidat aux fonctions de Professeur des universités.

Selon l'arrêté du 23 novembre 1988¹, qui la définit réglementairement, *« l'habilitation à diriger des recherches sanctionne la reconnaissance du haut niveau scientifique du candidat, du caractère original de sa démarche dans un domaine de la science, de son aptitude à maîtriser une stratégie de recherche dans un domaine scientifique ou technologique suffisamment large et de sa capacité à encadrer de jeunes chercheurs. »*.

Elle consiste à présenter par écrit, puis oralement, son activité de recherche *« permettant de faire apparaître son expérience dans l'animation d'une recherche »* à un jury composé d'*« enseignants habilités à diriger des recherches ... et, pour au moins de la moitié, de personnalités françaises ou étrangères extérieures à l'établissement et reconnues en raison de leur compétence scientifique »*. *« La moitié du jury, au moins, doit être composée de professeurs ou assimilés... »*.

1. Arrêté du 23 novembre 1988 relatif à l'habilitation à diriger des recherches. NOR: MENU8802296
Version consolidée au 22 septembre 2014.

La présentation orale doit faire apparaître *« l'ensemble de ses travaux et, éventuellement, pour une partie d'entre eux, une démonstration. »*

La présentation écrite prend la forme d'un **dossier de candidature** : toujours selon l'arrêté du 23 novembre 1988, *« le dossier de candidature comprend soit un ou plusieurs ouvrages publiés ou dactylographiés, soit un dossier de travaux, accompagnés d'une synthèse de l'activité scientifique du candidat permettant de faire apparaître son expérience dans l'animation d'une recherche. »*.

La Circulaire du 16 novembre 1992¹ précise que *« Dans la synthèse que celui-ci est appelé à rédiger, comme lors de l'exposé prévu à l' article 7, seront, dès lors, signalés les activités de recherche, notamment celles effectuées depuis la thèse de doctorat, l'obtention de contrats de recherche, la direction d'étudiants de second et de troisième cycle, les projets de recherches futurs. A partir de ces indications, le jury doit, en effet, examiner la capacité du candidat aux termes même de l'arrêté du 23 novembre 1988 “ à concevoir, diriger, animer et coordonner des activités de recherche et de valorisation »*.

Même si cette Circulaire précise qu'il s'agit d'une *« procédure... qui doit rester légère »* et qu'*« on ne saurait, non plus, exiger du candidat la rédaction d'un véritable mémoire... »*, il paraît pourtant difficile de faire apparaître le *« caractère original de sa démarche dans un domaine de la science »* et le *« haut niveau scientifique du candidat »* simplement par la présentation de son expérience en élaboration de projets, en animation et en direction de travaux de Recherche.

Aussi, plus qu'un *« dossier de candidature »*, le présent document est un **mémoire de mes travaux de recherche depuis mon Doctorat**. Il est organisé de la façon suivante :

Dans une **première partie** je retracerai mon **parcours professionnel en Recherche**. J'y présenterai les projets que j'ai mis sur pieds ; ceux auxquels j'ai également participé ; les codirections de thèse de doctorat que j'ai assurées et la chronologie de mes travaux. Un bilan permettra d'apprécier quantitativement ma production scientifique.

Dans une **deuxième partie**, je présenterai **les théories et les méthodes scientifiques** que j'ai développées depuis mon doctorat. Elle permettra donc une appréciation qualitative de ma production scientifique. Ce sera aussi l'occasion de présenter mon projet de recherche pour les années prochaines.

Enfin **une troisième partie** permettra d'apprécier mon **investissement dans les structures** auxquelles je suis rattaché ; c'est-à-dire mon laboratoire, ma composante et mon université. J'y présenterai aussi mes implications dans des structures externes et mes collaborations scientifiques.

Une **conclusion générale** me permettra de résumer le contenu de ce mémoire et d'exposer les motifs qui me poussent à présenter l'habilitation à diriger les recherches.

1.Circulaire no 92-336 du 16 novembre 1992 relative au doctorat et à l'habilitation à diriger des recherches.

Dans le corps de ce mémoire je ferai référence à différentes annexes situées juste après la Conclusion générale, et à différents termes ou expressions rappelés dans un Index à la suite des Annexes. La Table de matières de ce mémoire est située à sa toute fin.

Les références aux articles, rapports ou logiciels que j'ai produits ou coproduits et qui sont données dans l'Annexe B, sont indiquées entre crochets dans le texte.

Enfin, plusieurs liens hypertextes et WEB de ce mémoire ne sont évidemment fonctionnels que dans sa version PDF qu'il suffira au lecteur de me demander pour l'obtenir.

PREMIÈRE PARTIE

Parcours professionnel

Après une présentation de mon cursus universitaire et professionnel, au premier chapitre, je présenterai mon parcours scientifique depuis mon doctorat. Le troisième et dernier chapitre fera le bilan quantitatif de ma production scientifique.

CHAPITRE 1

Parcours universitaire

Passionné par la géométrie et la conception mécanique depuis mon plus jeune âge, peut-être grâce à un professeur de technologie au collège, j'ai suivi, après mon baccalauréat en CONSTRUCTION MÉCANIQUE (série F1 à l'époque) à ANGERS, un DUT¹ de GÉNIE MÉCANIQUE ET PRODUCTIQUE à NANTES, suivi d'une MST² de PRODUCTIQUE APPLIQUÉE AUX INDUSTRIES MÉCANIQUES, à ANNECY, puis d'un DEA³ en INFORMATIQUE, AUTOMATIQUE ET PRODUCTIQUE à BESANÇON et enfin un Doctorat de GÉNIE MÉCANIQUE à ANNECY.

C'est pendant mon service militaire, après mon DEA que je contacte Daniel Duret alors Maître de conférences à ANNECY et que j'avais connu en MST, pour lui faire part de mon souhait de travailler avec lui en thèse de doctorat dans le domaine de la maîtrise de la qualité géométrique. Grâce à lui, à Max Giordano, alors nouvellement promu Professeur des universités, et à la Région Rhône-Alpes qui a accepté de financer ma bourse de thèse, j'ai pu démarrer ma thèse de doctorat en 1992.

A mon arrivée à ANNECY, en 1992, l'ÉCOLE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS D'ANNECY, l'ESIA, vient d'ouvrir ses portes sur la base des MST et des DESS⁴ existants et accueille sa première promotion d'élèves-ingénieurs.

Le LABORATOIRE DE MÉCANIQUE APPLIQUÉE, le LMÉCA, vient tout juste, lui aussi, d'être créé par Robert Arrieux, Max Giordano et Daniel Duret. Je suis alors le premier doctorant du laboratoire, même si Robert avait ramené de Lyon un doctorant vietnamien en fin de thèse.

Lors de ma troisième année de doctorat, j'assure quelques vacations d'enseignement au Département de GÉNIE MÉCANIQUE ET PRODUCTIQUE de l'IUT d'ANNECY-LE-VIEUX, puis, en 1995, je suis sélectionné en tant qu'ATER⁵ sur un poste de Maître de conférence en 60^{ème}

1. Diplôme universitaire de technologie.

2. Maîtrise de Sciences Techniques ; ces maîtrises n'existent plus car elles ne délivraient pas la Licence à l'issue de la première année.

3. Diplôme d'études approfondies ; plus tard remplacé par le Master recherche.

4. Diplôme d'études supérieures spécialisées ; plus tard remplacé par le Master professionnel.

section¹ vacant. L'année suivante, en 1996, je suis nommé Maître de conférences sur ce même poste, que je n'ai plus quitté depuis. En 2013, j'ai demandé et obtenu ma promotion à la HORS CLASSE des Maîtres de conférences.

Entre temps, les structures, qui m'ont accueilli, ont évolué : en 2006, l'ESIA fusionne avec l'autre école d'ingénieurs de l'UNIVERSITÉ DE SAVOIE située sur le campus du BOURGET-DU-LAC, pour donner naissance à POLYTECH'SAVOIE, rapidement renommée POLYTECH ANNECY-CHAMBÉRY pour harmoniser les noms des écoles polytechniques universitaires du réseau POLYTECH dont elle fait partie.

Au même moment, le LMÉCA fusionne avec un autre laboratoire de l'école et une partie d'un troisième, pour donner naissance au laboratoire SYSTÈMES ET MATÉRIAUX POUR LA MÉCATRONIQUE, le laboratoire SYMME. Les équipes sont reconstituées en groupes de compétences travaillant sur des axes transverses applicatifs. Ainsi l'ex-équipe « Tolérancement », constituée de Max Giordano, Daniel Duret, Serge Samper, Pascal Hernandez, Alain Sergent et moi, devient le groupe « Qualité des produits » en intégrant de nouveaux membres, dont notamment Maurice Pillet avec qui je travaillerai plus tard.

Depuis toujours je m'intéresse à la QUALITÉ en général et à la QUALITÉ GÉOMÉTRIQUE DES PRODUITS en particulier. Dès mon stage de maîtrise, je me suis orienté vers des sujets en lien avec ces domaines. Mes activités en Recherche m'ont ainsi conduit à m'intéresser, d'abord, à la **vérification géométrique** des produits, c'est-à-dire à leur mesurage et au contrôle du respect des tolérances géométriques, ensuite à la **spécification** de leur géométrie, et plus tard à leur **fabrication** du point de vue géométrique. C'est essentiellement sur ce dernier sujet que je travaille à présent ; mais je souhaite revenir, dans les prochaines années, sur le sujet de la Spécification qui me semble être aujourd'hui le plus problématique d'un point de vue scientifique mais aussi et surtout pratique car il est le support des relations intra et inter-entreprises manufacturières dans le domaine géométrique.

En Enseignement aussi, je m'investis sur ces sujets : d'abord un cours de **Qualité** que j'ai dû mettre sur pied dès mon recrutement en tant qu'ATER à l'ESIA ; puis un cours de **Métrologie** ; plus tard un cours de **Spécification géométrique**. Je donnerai quelques éléments sur ces enseignements dans la troisième partie de ce mémoire car ils ont un fort lien avec mes activités en Recherche. Je me suis également investi dans des enseignements plus classiques : au début de ma carrière sur la **Conception assisté par ordinateur** et, depuis toujours et encore aujourd'hui, sur la **Mécanique des solides**.

Mon état civil, ma formation, mon parcours professionnel et mes pages WEB personnelles sont donnés dans mon CV en Annexe A.

5. Attaché temporaire d'enseignement et de recherche.

1. Section Mécanique, Génie mécanique et Génie civil du CONSEIL NATIONAL DES UNIVERSITÉS (CNU).

CHAPITRE 2

Parcours scientifique

1 De la vérification géométrique à sa spécification

1.1 1992 – 2016 : vérification géométrique par CALIBRES AJUSTANTS

En 1992, Daniel Duret, alors Maître de conférences, et Max Giordano, Professeur des universités, m'ont confié comme sujet de thèse, le contrôle par calibre virtuel des pièces manufacturées. L'idée était de reproduire virtuellement le contrôle par calibre matériel, assez fréquent en industrie, à partir d'un nuage de points numérisés à la surface de la pièce à contrôler.

J'ai nettement dépassé cet objectif en développant une théorie de *calibres virtuels ajustants à mobilités internes* qui sera détaillée dans la deuxième partie. A la fin de ma thèse, en 1995, j'avais développé un logiciel MS-DOS¹ exploitant ce modèle et qui a permis de faire la démonstration de l'efficacité de cette approche au regard des méthodes utilisées par les logiciels de métrologie tridimensionnelle d'alors... et d'aujourd'hui encore.

Grâce au programme TOLÉRANCEMENT ET QUALITÉ GÉOMÉTRIQUE DES PRODUITS que j'ai mis sur pied en 2006 pour le dossier de candidature à la création du pôle de compétitivité ARVE INDUSTRIES et que je présenterai dans la troisième partie de ce mémoire, j'ai pu reprendre ces travaux en 2007 en recrutant un ingénieur programmeur informatique, Fabrice Frelin², pour aboutir en 2011 au logiciel GÉOVÉRIF [72]. Il a fallu, pour cela, parachever la théorie (voir le chapitre 2 de la deuxième partie), notamment vis-à-vis de la possibilité d'utiliser un calibre composé comme composant d'un autre, et élaborer les méthodes mathématiques et les algorithmes nécessaires à l'implémentation de ces nouvelles possibilités.

1. Premier système d'exploitation développé par Microsoft.

2. Fabrice Frelin fut le premier contractuel embauché sur un projet recherche à l'Université de Savoie en 2006 me semble-t-il. En tout cas cela m'a valu de nombreuses interventions auprès des Services centraux de l'Université pour que cette embauche puisse se faire. Aujourd'hui Fabrice Frelin travaille sur des développements logiciels pour différents membres du laboratoire.

GÉOVÉRIF est aujourd'hui un logiciel expérimental, déposé à l'AGENCE POUR LA PROTECTION DES PROGRAMMES, qui permet de créer, de sauver et de ré-exécuter des gammes de mesure pour des pièces mécaniques formées de surfaces planes et cylindriques.

Ces travaux m'ont permis de publier dix articles scientifiques entre 1994 et 2009 [2, 18, 24-27, 57, 58, 64, 63]. Cependant aucun ne présente intégralement la théorie des calibres ajustants telle qu'elle sera présentée dans la deuxième partie et telle qu'elle est implémentée, aujourd'hui, dans le logiciel GÉOVÉRIF et cela fait partie de mes objectifs que d'y remédier.

Je cherche également à valoriser cette solution de métrologie. J'ai donc créé un kit, qui peut être téléchargé sur www.tolerancement.org, contenant le logiciel, un guide d'utilisation, des exemples et un tutoriel vidéo.

J'ai présenté GÉOVÉRIF dans deux séminaires destinés aux industriels et lors d'un séminaire du GROUPE DE RECHERCHE EN TOLÉRANCEMENT entre 2008 et 2011 et j'en ai fait la promotion dans un journal technologique local, le JITEC.

Je compte également sur deux projets d'inter-comparaison de logiciels de métrologie tridimensionnelle que je mène actuellement avec des entreprises et l'association MÉTROLOGIE GRAND SUD pour démontrer la supériorité de GÉOVÉRIF pour mesurer et vérifier les tolérances géométriques. Cela devrait me permettre de convaincre, dans un avenir que j'espère proche, un éditeur de logiciel ou un fabricant de machines à mesurer tridimensionnelles, de développer et de commercialiser ce logiciel.

1.2 1995 – 2013 : langages formels de spécification géométrique

Mes travaux sur la métrologie dimensionnelle m'ont conduit, pendant la thèse, à étudier de façon poussée les normes AFNOR¹ et ISO² de dimensionnement et de tolérancement des pièces manufacturées. Ces normes, et leurs évolutions, font maintenant partie de l'ensemble des normes dites de « *Spécification géométrique des produits* », encore appelées normes GPS, acronyme de « Geometrical Product Specification ».

Constituées d'un ensemble de documents établis à des périodes différentes depuis les années 1970, les normes présentent diverses indications graphiques qu'il est possible de porter sur le dessin d'une pièce, avec, ou parfois sans, leurs sens métrologiques théoriques, c'est-à-dire la manière théorique de contrôler les tolérances ainsi indiquées.

Les ambiguïtés et les incohérences de ces diverses indications normalisées me sont apparues rapidement, notamment à l'aune de la théorie des calibres ajustants. J'en présenterai quelques unes dans la deuxième partie de ce mémoire. J'ai alors cherché, dès ma thèse, à formaliser le tolérancement géométrique des pièces manufacturées, notamment en m'appuyant sur la théorie des calibres ajustants, et j'ai écrit ou coécrit dix articles [13, 19, 28-34, 54, 55], de 1995 à 2013. J'ai fait une partie de ces travaux avec Max Giordano qui avait eu l'idée de

1. Association française de normalisation.

2. Organisation internationale de normalisation.

généraliser le concept de groupe de zones de tolérance qu'on trouvait dans les normes et que j'ai appelé les *zones liées*.

Persuadé qu'il fallait y travailler davantage, j'ai d'abord proposé, en 2008, le montage d'un projet ANR, au groupe de Recherche en Tolérancement, mais il n'a pas recueilli l'adhésion que j'espérais. Avec Rénald Vincent, responsable technique au CETIM¹ et expert en Spécification géométrique des produits à l'AFNOR et à l'ISO, nous avons également proposé ce projet de recherche à la direction du CETIM, qui ne l'a pas non plus retenu à cette même époque.

Enfin, en 2010, disposant d'un étudiant de Master désireux de travailler avec moi, j'ai pu demander et obtenir une *Allocation doctorale de recherche* ministérielle (ADR) auprès de l'UNIVERSITÉ DE SAVOIE, malgré la forte concurrence sur ces allocations et en raison du caractère relativement « amont » et théorique de l'étude proposée. Pour donner toutes les chances à cette demande, j'ai sollicité et obtenu le soutien de l'UNION DE LA NORMALISATION DE LA MÉCANIQUE (UNM) et celui du pôle de compétitivité ARVE INDUSTRIES, dorénavant nommé MONT BLANC INDUSTRIES. L'Annexe C donne le sujet tel que proposé à l'époque dans le dossier.

J'ai donc dirigé, à partir de la rentrée universitaire de 2010, les travaux de Pierric Léonard sur l'établissement d'un langage formel. Serge Samper, qui était le codirecteur habilité, m'a laissé le faire avec une grande autonomie (90%).

Si les premiers mois de thèse ont permis d'avancer significativement sur l'élaboration d'un modèle formel de limitation des écarts géométriques que je présenterai dans la deuxième partie, j'ai dû, ensuite, demander à Pierric de fournir un travail plus rigoureux en lui donnant divers sujets d'études et de réflexions. Malheureusement, il n'a pas réussi à rester motivé sur son sujet et a démissionné en août 2012 pour être recruté par ASSYTEM² en tant qu'ingénieur en tolérancement sur le programme ITER³. Ces travaux resteraient à développer et à publier car une seule communication en a été faite sous deux formes [13] et [34].

Aujourd'hui j'ai davantage de recul sur le sujet, notamment grâce aux travaux que je mène avec Maurice Pillet sur le réglage de procédés (voir plus loin), et je souhaite travailler à nouveau sur cette problématique avec une approche globale. Je présenterai ce projet de recherche dans la deuxième partie de ce mémoire.

1. Centre technique des industries mécaniques.

2. Entreprise internationale travaillant dans le domaine de l'ingénierie et du conseil en innovation.

3. ITER est un programme international de «*construction du plus grand tokamak jamais conçu ; une machine qui doit démontrer que la fusion — l'énergie du Soleil et des étoiles — peut être utilisée comme source d'énergie à grande échelle, non émettrice de CO₂, pour produire de l'électricité.*» [<http://fr.viadeo.com/fr/company/iter-organisation>]

1.3 1999 – 2010 : calcul des tolérances « 3D » par le modèle des domaines jeux et domaines écarts

Le *modèle des domaines jeu et domaine écart* a été inventé par Max Giordano, Daniel Duret et Stéphane Tichadou en 1991. Un *domaine jeu* est un polytope qui représente l'ensemble des petits déplacements que peut effectuer un solide dans un autre ou sur un autre du fait de leur liaison. Un *domaine écart* est également un polytope qui représente, cette fois, l'ensemble des petits déplacements que peut effectuer un ou plusieurs points liés entre eux à l'intérieur d'une zone de l'espace tridimensionnel. Cette zone est normalement une zone de tolérance, c'est-à-dire définie par une spécification de tolérance géométrique.

Les opérations topologiques sur ces domaines permettent d'analyser l'impact des tolérances géométriques des pièces et des jeux entre elles sur les conditions fonctionnelles du mécanisme qu'elles constituent.

J'ai contribué au développement de ce modèle et à ses applications entre 1999 et 2010 [3, 20-23, 35-38, 56]. Néanmoins je ne projette pas d'y travailler davantage dans un proche avenir car, pour pouvoir faire des calculs, il faut d'abord se donner un modèle d'écarts géométriques et c'est sur ce sujet que je compte travailler dans les prochaines années comme je l'ai déjà dit.

1.4 2015 – 2016 : calcul des tolérances «1D» par les méthodes statistiques « inertielles »

Lorsque les tolérances de pièces devant s'assembler ont été calculées statistiquement, l'acceptation des pièces fabriquées par la simple vérification de ces tolérances sur chacune d'elles peut être dramatique pour les assemblages et conduire, par exemple, à ce que plus de la moitié des assemblages soient impossibles ou au contraire avec un jeu plus grand prévu.

Il faut en effet, en plus, tolérer ou plusieurs critères statistiques calculés sur le lot, comme par exemple un Ppk^1 .

Néanmoins la relation entre le Ppk , la tolérance individuelle et le taux de non-conformité n'est pas évidente.

Maurice Pillet a proposé, dès 2001², un critère statistique qu'il a appelé *tolérancement inertiel*, qui garantit à lui seul, c'est-à-dire sans la tolérance individuelle, que s'il est respecté sur chacun des lots de pièces devant s'assembler alors il le sera sur les assemblages.

Depuis, ce critère, avec d'autres, a été normalisé³. La norme NF E 04-008, élaborée sous l'impulsion de Maurice Pillet et de Marc Bouix de la société SOMFY, permet donc, en plus

1. Ppk est un indice de « Performance » d'une production, calculé par la division de la plus courte des distances entre la moyenne et les limites de tolérance, et la moitié de la dispersion de la production calculée à six écarts-types.

2. Maurice Pillet, Frédéric Bernard, Laetitia Avrillon ; Le tolérancement inertiel, une autre façon d'intégrer l'aspect combinatoire dans les processus assemblés ; CPI 2001 ; Fes, Maroc, 2001.

de la tolérance individuelle que doit respecter chaque produit, de spécifier une tolérance sur un critère statistique sur le lot et notamment une inertie maximale.

Je me suis intéressé à ces travaux, d'abord pour mes enseignements aux élèves-ingénieurs et alors que la relation entre le tolérancement inertiel et le tolérancement individuel n'était pas très claire et pas encore normalisée, ce qui m'a, parfois, mis en « porte-à-faux ». Maintenant cette relation est plus claire et je me suis associé au travail d'amélioration du calcul de l'inertie maximale avec Maurice Pillet en 2015 [39] et à sa diffusion avec un collègue algérien en 2016 [40].

Si je suis convaincu de la pertinence d'une approche statistique du calcul des tolérances, en lieu et place du calcul dit « au pire des cas », je considère cependant que le tolérancement normalisé s'y prête mal, ce qui donc constitue, à mes yeux, un argument supplémentaire pour travailler, dans les prochaines années, à l'élaboration d'un nouveau modèle de limitation et de spécification des écarts géométriques. Par exemple, une cote tolérancée ne définit, au sens normalisé, aucune grandeur quantifiable mais seulement un intervalle de valeurs dans lequel doit être contenue toute dimension locale mesurée sur l'entité géométrique ainsi tolérancée. Calculer l'inertie de la cote sur plusieurs pièces est donc problématique. Il existe des solutions normalisées pour lever ce problème mais au prix d'une complexification de la spécification.

Il faudra donc tenir compte de la nécessité de pouvoir faire des statistiques dans l'élaboration d'un nouveau modèle de spécification et de tolérancement.

2 De la cotation de fabrication au pilotage statistique

2.1 1988 : cotation de fabrication évolutive

Même si je n'étais pas encore enseignant-chercheur, il me paraît intéressant de faire ici mention de mon stage de Maîtrise ; d'une part parce qu'il avait déjà trait au réglage des procédés, domaine dans lequel je travaille principalement aujourd'hui ; et d'autre part parce qu'il portait déjà sur un sujet de recherche puisqu'il s'agissait, pour moi, de mettre en place, dans une manufacture de montres de luxe, la *cotation de fabrication évolutive* que Daniel Duret, mon futur directeur de thèse, venait d'inventer et de publier dans une thèse de doctorat et dans un ouvrage¹.

La cotation de fabrication consiste à modifier la cible d'une cote de fabrication en fonction de la valeur déjà réalisée sur d'autres cotes de fabrication et éventuellement en fonction d'objectifs particuliers, en l'occurrence, pour mon stage, la visée d'une masse donnée

3. NF E04-008 octobre 2013 ; Spécification géométrique des produits (GPS) - Calcul de tolérance, indications et critères d'acceptation - Méthodes arithmétique, statistique quadratique et statistique inertielle.

1. Daniel Duret. « Cotation et Méthodes de contrôle en fabrication mécanique » ; Introduction à l'Art de l'Ingénieur ; Édition Augustin ; 1988.

pour la pièce usinée en matière précieuse (or ou platine). Mon travail a donné lieu à la rédaction d'un rapport de stage confidentiel [79].

2.2 2002 – 2007 : correction par cotes 2D - réglage des procédés d'emboutissage

En 2002, j'ai été sollicité par l'équipe « mécanique des matériaux » du LMÉCA, notamment en raison de mes compétences en PLANS D'EXPÉRIENCES, pour diriger les travaux de doctorat de Yann Ledoux, dans le cadre d'un projet de recherche européen, nommé INETFORSMEP et dont l'objectif était l'établissement d'une méthode d'optimisation de la conception des outillages d'emboutissage.

En effet, avec le retour élastique de la pièce emboutie il est très difficile de concevoir les outillages d'emboutissage et de régler les paramètres de ce procédé, comme la pression de maintien de la tôle emboutie entre le flanc et serre-flanc, la course du poinçon, etc.

Avec Yann Ledoux, aujourd'hui Maître de conférences à BORDEAUX 1, nous avons réussi à élaborer une méthodologie permettant d'optimiser la forme de l'outillage et les paramètres d'emboutissage sur la base d'essais numériques par éléments finis. Cette méthodologie, que je présenterai brièvement dans la deuxième partie de ce mémoire, a finalement été adoptée et appliquée par tous les autres partenaires du projet européen (Pologne, Roumanie et Portugal). Elle nous a aussi permis de réaliser huit publications de 2004 à 2007 [4, 5, 14, 41-45].

Robert Arrieux, responsable du projet européen pour le LMÉCA, et Max Giordano, le codirecteur habilité de cette thèse, m'ont laissé une très grande autonomie dans la direction de ces travaux (70%) de 2002 à 2005.

J'ai aussi participé activement, pour la partie que je dirigeais, aux bilans écrits et oraux de nos avancées devant les autres partenaires du projet européen et, parfois, devant le commissaire européen en charge du suivi de ce projet.

Les années qui suivirent m'ont quelque peu fait oublier ce travail qui pourtant formalisait déjà les étapes que nous allions suivre dans nos futurs travaux sur le pilotage des procédés d'usinage et qui sont les suivantes :

- 1 Paramétrer la géométrie du produit ;
- 2 Établir un *modèle variationnel direct* entre les paramètres du procédé et ceux du produit, c'est-à-dire un système d'équations donnant la variation de chaque paramètre du produit en fonction des variations des paramètres du procédé ;
- 3 Former une fonction objectif sur les paramètres du produit pour les faire tendre vers leurs valeurs cibles par optimisation : à l'époque nous avons proposé de minimiser la somme des carrés des écarts entre les valeurs courantes des paramètres du produit et leurs valeurs cibles. La pseudo-inversion du modèle variationnel direct que proposera Maurice Pillet, quelques années plus tard [50], [51], n'était pas envisageable à l'époque car notre modèle était formé d'équations quadratiques, plus précises que des équations linéaires.

En outre, cette méthodologie mettait en évidence le fait que les cotes spécifiées sur le dessin du produit sont insuffisantes pour caractériser géométriquement la pièce fabriquée ; ne serait-ce que par le fait que beaucoup de paramètres linéaires ou angulaires ne sont pas spécifiés sur le dessin car implicites (angles droits, éléments symétriques...).

2.3 2006 – 2016 : correction par cotes 1D - méthodologie COPILOT-PRO®

Avec l'utilisation croissante, depuis les années 2000, du tolérancement géométrique au détriment du tolérancement dimensionnel jusqu'alors majoritairement utilisé en industrie, s'est posé le problème de l'utilisation de ce nouveau tolérancement en production. En effet, si le tolérancement géométrique par zones est bien adapté à la description des conditions géométriques fonctionnelles des pièces mécaniques, il l'est beaucoup moins pour le réglage des machines-outils pour lequel il ne suffit pas de savoir que la surface fabriquée est en dehors de la zone de tolérance mais de combien et suivant quelles «directions».

En 2004, le témoignage, sur cette problématique, d'un responsable de production à la conférence JET2004¹ m'a conduit à proposer un travail de thèse au CENTRE TECHNIQUE DES INDUSTRIES DU DÉCOLLETAGE (CTDEC). Je me suis chargé d'élaborer un projet de recherche sur cette problématique, de recruter un doctorant, de rédiger un dossier de demande d'une CONVENTION INDUSTRIELLE DE FORMATION PAR LA RECHERCHE (CIFRE) auprès de l'ASSOCIATION NATIONALE DE LA RECHERCHE ET DE LA TECHNOLOGIE (ANRT) et enfin de négocier un contrat d'accompagnement auprès du CTDEC.

Le projet a pu démarrer en janvier 2006 avec le recrutement d'Ephraïm Goldschmidt. Ensemble, nous nous sommes rapidement aperçus que, même en tolérancement dimensionnel, c'est-à-dire par cotes sur le dessin, la relation entre celui-ci et le réglage des outils n'était pas du-tout formalisée et laissée à l'initiative des régleurs dans les entreprises notamment de décolletage. Nous avons alors décidé de nous focaliser sur ce problème et avons établi une méthodologie qui sera présentée en détail dans la seconde partie de ce mémoire et qui est appelée COPILOT-PRO®, pour « Cotation pour le pilotage de la production ».

Fin 2008, j'ai recruté un postdoctorant du laboratoire, pour nous aider à informatiser cette méthodologie. Le logiciel, que nous appelons maintenant COPILOT-PAA [71] en référence à son principal auteur, Pierre-Antoine Adragna, a été déposé à l'AGENCE POUR LA PROTECTION DES PROGRAMMES, l'APP, en 2010, mais il est insuffisamment fiable pour pouvoir être diffusé. Un autre projet, démarré en 2014 et appelé GAMAR pour « Génération Automatique des Matrices de Réglage » (voir section 2.5), avait pour but d'aboutir à une version fiable et commercialisable de ce logiciel et intégrant le réglage par points décrit succinctement en section 2.4.

1. 1^{ère} édition d'un congrès français, plutôt destiné aux cadres de l'industrie, qui sera plus tard appelé Journée européenne du Tolérancement et que j'ai co-organisée avec mon collègue Max Giordano et Jean Breton, de l'association THÉSAME MÉCATRONIQUE & MANAGEMENT, en 2004 à ANNECY.

COPILLOT-PRO® a été brevetée [1] en 2010 et nous a permis de réaliser huit autres publications [6-8, 15, 46-48, 59] entre 2007 et 2015. De plus plusieurs déclinaisons de son nom ont été déposées à l'INSTITUT NATIONAL DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE (INPI) par le CTDEC qui commercialise depuis cette méthodologie et des logiciels dérivés.

Soucieux de sa diffusion, j'ai présenté tout ou partie de cette méthodologie auprès des entreprises, notamment lors du congrès INTERCUT¹ en 2009 [67] et aux JOURNÉES EUROPÉENNES DU TOLÉRANCEMENT en 2009 [66] et 2015 [69]. Je l'ai aussi présentée au GROUPE RECHERCHE EN TOLÉRANCEMENT² en 2014 [68]. J'enseigne déjà les deux dernières étapes de COPILLOT-PRO® aux élèves-ingénieurs de POLYTECH ANNECY-CHAMBÉRY : la création de la matrice d'incidence des jauges-outils sur les cotes d'une part, et l'utilisation de cette matrice pour le pilotage de la production d'une série de pièces d'autre part (voir section 2.3 de la deuxième partie).

Pour le moment, seules ces deux dernières étapes de la méthodologie sont diffusées et utilisées en milieu industriel et aujourd'hui probablement dans une vingtaine d'entreprises en HAUTE-SAVOIE et en SUISSE. Les parties amont, c'est-à-dire la génération de la gamme de réglage, des cotes de fabrication et de la matrice d'incidence n'est ni diffusée ni utilisée pour le moment faute d'un logiciel exploitable et peut-être aussi d'un ouvrage de référence. Ce sera donc une de mes priorités que d'y remédier, à l'issue de ma candidature à l'HDR, en collaborant avec le CETIM-CTDEC pour le développement d'un progiciel et en développant un support de référence et de formation qui pourra prendre la forme d'un livre, bien que d'autres médias me paraissent aujourd'hui plus accessibles.

Du point de vue de l'encadrement doctoral, comme pour la thèse de Yann Ledoux, Max Giordano, codirecteur habilité, m'a laissé une très grande autonomie (90%) dans la direction de la thèse d'Ephraïm Goldschmidt, aujourd'hui ingénieur-docteur au CETIM-CTDEC.

Bien que spécifiquement développée pour l'usinage par *décolletage*, c'est-à-dire l'usinage en barre et non en lopin, les étapes de la méthodologie COPILLOT-PRO® reprennent celle de l'optimisation d'un procédé d'emboutissage que nous avons développée en 2005 (voir section 2.2), en les spécialisant et en les faisant précéder d'une étape initiale de génération de la gamme de réglage ou de la gamme de surveillance (voir le détail en section 1 de la deuxième partie) :

1 Génération de la gamme de réglage et/ou de la gamme de surveillance à partir du processus de fabrication.

2 Génération des cotes de fabrication de chaque phase de la gamme de réglage ou de surveillance. Cette étape correspond à la première de la méthodologie proposée en 2005 pour optimiser les procédés d'emboutissage, c'est-à-dire le **paramétrage géométrique du produit**.

1. Congrès francophone dédié à l'usinage et organisé annuellement depuis 2007 sous l'égide du pôle de compétitivité MONT BLANC INDUSTRIES.

2. Regroupement sans statut des chercheurs français en tolérancement depuis 2001.

3 Génération de la matrice d'incidence de l'ensemble des jauges et cotes outils sur les cotes de fabrication. C'est l'étape de **génération d'un modèle variationnel direct** du procédé.

4 Inversion (dans la version initiale de COPILOT-PRO®), pseudo-inversion (version actuelle) ou optimisation linéaire (voir section 2.6) de la matrice et résultats de mesure sur les cotes « fabriquées ». C'est la dernière étape de la méthodologie proposée pour les procédés d'emboutissage, c'est-à-dire l'inversion du modèle.

COPILLOT-PRO® est donc pour moi et pour Ephraïm Goldschmidt, qui continue de travailler à son développement au CETIM-CTDEC, la trame générale du réglage des procédés par mesurage des produits.

2.4 2009 – 2016 : correction par points - méthodologie INERTIEL TOTAL et projet USITRONIC

Autour de 2009, c'est-à-dire au moment où nous terminions COPILOT-PRO® avec Ephraïm Goldschmidt, Maurice Pillet et son doctorant Dimitri Denimal, ont proposé une approche plus simple et plus générale pour l'étape de paramétrage de la géométrie du produit usiné : il s'agit de mesurer l'écart de la surface usinée, par rapport à sa forme et sa situation idéale dans un repère du produit, en quelques points particuliers. Cette méthode sera présentée en détail dans la deuxième partie. Maurice Pillet et Dimitri Denimal¹ l'ont nommée le RÉGLAGE EN INERTIEL TOTAL [11, 16, 17, 61].

Le CETIM-CTDEC s'est alors intéressé à cette méthode et m'a proposée de l'intégrer à la méthodologie COPILOT-PRO® pour un projet plus ambitieux, nommé USITRONIC, visant à rendre autonome les décolleteuses sur plusieurs journées de production, notamment le week-end, par un mesurage et un pilotage automatiques des produits et des correcteurs de jauges.

J'ai alors proposé à Maurice Pillet de travailler ensemble sur ce projet et j'ai rédigé un texte proposant le rapprochement de nos deux méthodes qui a été intégré au dossier de candidature au FOND UNIQUE INTERMINISTÉRIEL (FUI) dédié aux pôles de compétitivité. Ce dossier, mis en forme par un cabinet privé, n'a d'abord pas été sélectionné en 2009. Retravaillé il l'a été l'année suivante. Dans ce cadre, j'ai demandé et obtenu un budget d'environ 150 000€ TTC pour le laboratoire SYMME, ce qui m'a permis de recruter un doctorant, Boukar Abdelhakim, et de rémunérer un programmeur informatique pendant un an.

Le projet USITRONIC fédérait l'USMB, le CETIM-CTDEC, deux entreprises de décolletage et une entreprise fabricant de machines de mesure rapides. Un comité de pilotage se réunissait quatre à cinq fois par an pour coordonner les travaux.

Pendant toute la durée du projet, c'est-à-dire quatre ans, j'ai participé à tous les comités, rédigé tous les rapports d'avancement, présenté régulièrement nos résultats aux autres partenaires du projet et parfois aux « financeurs » et établi les bilans financiers, avec notre

1. Dimitri Denimal ; Déploiement du tolérancement inertiel dans la relation client fournisseur. Thèse de doctorat de l'UNIVERSITÉ DE SAVOIE ; 2009

secrétaire-comptable, de manière à débloquent les différentes tranches des subventions de la BANQUE PUBLIQUE D'INVESTISSEMENT (BPI) mandatée par l'État (90k€) et l'AGENCE ÉCONOMIQUE DÉPARTEMENTALE (AED) mandatée par le Conseil général de la HAUTE-SAVOIE (65k€).

Par ailleurs, au démarrage du projet, les Services financiers de l'UNIVERSITÉ DE SAVOIE avaient classé ce projet en « Activités industrielles et Commerciales » soumise à la TVA sur les subventions. J'ai dû rechercher, en externe à l'Université, les critères permettant de classer une opération financière comme étant non assujettie à la TVA. Un courrier officiel adressé au Vice-Président du Conseil scientifique développant ces critères, a permis la révision de la décision initiale des services financiers et de disposer des montants prévus pour le projet.

Avec Maurice Pillet, nous avons encadré les travaux de Boukar Abdelhakim, de 2011 à 2013, à parts à peu près égales. Ils nous ont permis de publier douze articles scientifiques entre 2011 et 2016 [9-11, 16, 17, 50-53, 60-62]. Néanmoins tous les objectifs initiaux n'ont pas été atteints, ce qui m'a conduit à proposer un nouveau projet au CETIM-CTDEC en 2014, intitulé GAMAR pour Génération Automatique des Matrices de Réglage (voir section 2.5 ci-après) et à rechercher, dès 2012, des algorithmes pour éviter les paramètres coûteux à corriger sur le procédé de fabrication en utilisant les autres. Cette recherche a abouti en 2014 à la méthode COSELECT (voir section 2.6 ci-après et la présentation détaillée en section 4 de la deuxième partie).

2.5 2014 – 2016 : développement du logiciel COPILOT-PRO® - thèse GAMAR

Le projet USITRONIC (voir section précédente), n'a pas permis, contrairement à ses objectifs initiaux, d'aboutir au développement d'un module logiciel permettant de générer automatiquement la matrice d'incidence des correcteurs d'outils sur les cotes et sur les points. Pourtant nous disposions, au début du projet, d'un logiciel prototype, COPILOT-PAA, développé en 2009 pour la génération des gammes, des cotes et des matrices, et d'un logiciel prototype pour la génération des matrices sur les points, développé par Maurice Pillet.

J'ai donc proposé, au CETIM-CTDEC, de reprendre ce travail de développement logiciel, au travers d'une nouvelle thèse cofinancée par le CETIM-CTDEC et l'ASSEMBLÉE DES PAYS DE SAVOIE (APS).

L'ASSEMBLÉE DES PAYS DE SAVOIE, très récemment renommée CONSEIL SAVOIE MONT BLANC, est un *établissement public* créé par les Conseils départementaux de SAVOIE et de HAUTE-SAVOIE pour conduire et financer des actions liant les deux départements. En particulier ce Conseil octroie, chaque année, huit demi-allocations doctorales à l'UNIVERSITÉ SAVOIE MONT BLANC pour des projets de recherche en partenariat avec des entreprises ou des organismes des départements, qui apportent alors le complément du financement du projet, c'est-à-dire l'autre moitié de l'*allocation doctorale de recherche* (ADR) ainsi que les frais afférents au projet.

J'ai donc rédigé un projet de recherche, que j'ai fait labelliser par le pôle MONT BLANC INDUSTRIES pour que ma demande ait plus de chances d'être sélectionnée par l'APS et je me suis mis en quête d'un jeune chercheur. D'abord sur liste complémentaire de la sélection faite par l'APS, ce projet a finalement pu démarrer à la rentrée 2014 avec Ronald Munshunje que j'avais sélectionné parmi une quinzaine de candidatures à l'offre diffusée sur ABJ.

Malgré une procédure stricte de sélection finalisée par un entretien comprenant, notamment, un test d'anglais et un test de programmation informatique, Ronald Mushunje s'est révélé incapable de clairement comprendre nos méthodologies ni de programmer. Après une nouvelle période de mise à l'épreuve de deux mois supplémentaires à la première année écoulée, en accord avec Maurice Pillet son directeur habilité, j'ai engagé une procédure de licenciement pour « insuffisance professionnelle » en lien avec le Service des Ressources humaines, celui de la Recherche et des études doctorales et celui du Personnel, ainsi qu'avec l'École doctorale SISEO¹ de l'Université. Cette procédure n'avait jamais été activée à l'UNIVERSITÉ SAVOIE MONT BLANC, ni à l'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES dont dépend l'école doctorale SISEO. Il m'a fallu faire preuve de ténacité car beaucoup de responsables pensaient au mieux que cela serait très difficile ou au pire que c'était impossible !

Malgré la déception et le sentiment d'énergie perdue que m'a procurée cette expérience, j'en retire des leçons pour le recrutement de mes futurs doctorants : être plus sélectif sur les pays de formation initiale et obtenir des avis oraux des collègues ayant côtoyé ou encadré le candidat.

Reste que le travail de développement logiciel, prévu dans ce projet, reste à faire. Je me suis engagé auprès du CETIM-CTDEC à le mener avec eux sur la base des bibliothèques informatiques que j'ai développées par le passé avec Fabrice Frelin, l'ingénieur programmeur informatique du laboratoire, et d'un contrat de collaboration en cours de finalisation.

2.6 2014 – 2016 : pilotage statistique et sélectif des procédés - méthode COSELECT

La méthode de réglage par pseudo-inversion de la matrice d'incidence est tellement efficace que, dès la première pièce réglée, les écarts sur les cotes deviennent très petits. Le problème est alors de savoir s'ils peuvent encore être diminués. En effet, à partir d'un certain seuil, ils peuvent n'être qu'aléatoires d'une pièce à l'autre et donc irréductibles. Deming a même montré que chercher à réduire des écarts aléatoires ne faisait qu'augmenter la dispersion globale avec sa fameuse expérience de l'entonnoir (« The Deming'funnel experiment »)².

Ce problème nous a beaucoup occupés, Maurice Pillet, Boukar Abdelhakim et moi, durant le projet USITRONIC car personne ne l'avait encore résolu pour un ensemble de caractéristiques corrigées simultanément. Plus précisément, nous avons cherché à savoir :

1. Sciences et ingénierie des Systèmes, de l'Environnement et des Organisations.

2. Deming, W. E. (1982). Out of the Crisis. The MIT Press, 1982.

- comment détecter et annuler les toutes petites corrections, car peut-être néfastes à la dispersion globale ;
- s'il fallait, ou non, prendre en compte les tout petits écarts mesurés sur les caractéristiques car peut-être purement aléatoires et donc non significatifs ;
- si l'on pouvait ne se servir que d'une partie des correcteurs, et, personnellement, dans le but d'éviter d'utiliser les correcteurs difficiles et/ou coûteux à utiliser, comme par exemple, les cotes-outils en usinage qui nécessitent l'affûtage ou le changement de l'outil.

Nous avons testés de nombreuses solutions qui, aussi, étaient des correctifs aux défauts de calcul apportés par la méthode des moindres carrés. Pour cette méthode de calcul nous avons trouvé quelques bonnes solutions, néanmoins, en 2014, j'ai trouvé une solution bien plus simple à programmer, à comprendre et plus juste, permettant, en outre, de déterminer automatiquement les correcteurs les plus faciles à utiliser pour ramener toutes les caractéristiques dans leurs limites de contrôle. J'ai nommé cette méthode COSELECT, pour « correction sélective » et pour rappeler COPILOT-PRO®.

Convaincu que cette méthode était très innovante et répondait à un problème industriel, j'ai souhaité la protéger par brevet. Connaissant le coût relativement important de la rédaction d'un tel brevet par un cabinet spécialisé, autour de 10 000€, et refusant de mettre ce coût à la charge du laboratoire déjà déficitaire sur chacun de ses sept brevets, j'ai proposé au CETIM-CTDEC d'en assumer les frais contre un droit d'exploitation exclusif. Malheureusement le CETIM-CTDEC a décliné cette offre ; peut-être aussi à cause des exigences fortes du Service de valorisation de l'Université.

J'ai donc décidé de rédiger moi-même le brevet pour réduire, dans un facteur d'environ vingt, le coût de sa demande et en m'appuyant sur ma précédente expérience sur le brevet COPILOT-PRO® menée avec un cabinet spécialisé.

Malheureusement, après avoir passé la première phase d'examen de sa structure et de son style, je n'ai pas réussi à rendre la description ni les revendications suffisamment concrètes pour obtenir un avis favorable à son dépôt. Même s'il était encore possible de corriger la demande initiale, et fatigué par toute ces péripéties à son propos, j'ai pris la décision de renoncer à sa protection et l'ai alors immédiatement publié pour empêcher toute accapuration par un tiers [12], [49].

En effet, je l'avais déjà présenté au CETIM-CTDEC et m'apprêtais à le faire aux trois éditeurs de logiciels de SPC¹ des Pays de Savoie, leaders dans ce domaine. Deux de ces sociétés n'ont jamais répondu à mes sollicitations et la troisième s'est finalement désistée lorsqu'il s'est agi de signer un accord préalable de confidentialité pourtant rudimentaire.

Avec mon expérience de valorisation de COPILOT-PRO®, je suis aujourd'hui relativement perplexe face à l'attitude des petites et moyennes entreprises vis-à-vis de l'innovation. Elles ont souvent « le nez dans le guidon » et peu sont ouvertes aux nouvelles

1. « Statistical Process Control » ou, en français, « Maîtrise statistique des procédés ».

idées. Certainement est-ce faute de temps mais c'est peut-être aussi faute d'une sensibilisation suffisante, notamment dans l'enseignement supérieur, à l'importance de l'innovation pour le devenir d'une entreprise.

Pourtant, avec Fabrice Frelin, nous avons développé un logiciel parfaitement opérationnel et qui a permis de montrer l'efficacité de cette méthode sur la simulation d'une série de pièces [12]. Ce logiciel, nommé COSELECT V2 [73], est référencé à l'AGENCE POUR LA PROTECTION DES PROGRAMMES et je l'ai mis à disposition ainsi qu'un tutoriel, une présentation et un exemple sur le site WEB du programme TOLÉRANCE ET QUALITÉ DE PRODUITS (TQP)¹ du pôle :

<http://www.polytech.univ-savoie.fr/index.php?id=444>

Cette méthode introduit plusieurs nouveaux concepts dont notamment la notion de domaine cible dans lequel peut être choisie la cible de chaque caractéristique. Avec la fusion de la carte de Schewhart et celle aux limites élargies, COSELECT offre une nouvelle vision de la MAÎTRISE STATISTIQUE DES PROCÉDÉS, permettant non seulement la surveillance des caractéristiques mais bien leur « régulation ». C'est d'ailleurs ce qui m'a conduit à complètement revisiter mon enseignement de la MSP auprès des élèves-ingénieurs de POLYTECH ANNECY-CHAMBÉRY.

Je n'ai aucun doute sur le devenir de cette méthode, d'autant qu'elle peut aussi être utilisée avec des modèles variationnels directs non linéaires, même si COSELECT V2 ne peut traiter qu'une matrice d'incidence, c'est-à-dire un modèle linéaire.

1. Le programme TQP est un programme que j'ai élaboré pour le dossier de candidature du pôle ARVE INDUSTRIES (voir section 1.1 du chapitre 1 de la troisième partie).

CHAPITRE 3

Bilans

1 Bilan de l'activité Recherche

1.1 Sujets de recherche et temps passé

Le tableau 1 ci-dessous donne les proportions approximatives du temps passé sur chacun de mes sujets de recherche depuis l'obtention de mon Doctorat et jusqu'à maintenant, avec, caractères bleus et gras, celles passées avec mes doctorants. Attention, ce ne sont pas les taux d'encadrement qui sont, eux, donnés dans le tableau 3, mais bien les taux de mon « temps Recherche ».

Tableau 1 : Proportions de mon « temps Recherche » par sujet et par année.

Sujet	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Vérif. (Cal. Ajustants)	80%	20%	20%			10%	10%						30%	30%		30%	30%				10%	10%
Spécif. (dir. Thèse lang. Formels)	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%				30%	30%	10%			
Calculs 3D					10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%						
Calculs stat. 1D																					10%	10%
Régl. Emboutissage (dir. Thèse)								10%	30%	30%	30%	10%	10%									
Régl. usin. par cotes (dir Thèse COPILOT-PRO, dir. Thèse GAMAR)												30%	30%	30%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	30%
Régl. usin. par points (dir Thèse USITRONIC)																20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
Régl. stat. et sélectif des procédés (COSELECT)																	30%	30%	30%	30%	30%	10%

1.2 Responsabilité de contrats

J'ai été responsable ou coresponsable de **six contrats de recherche** et à l'initiative de quatre d'entre-eux, en caractères bleus et gras dans le tableau 2 qui donne les taux de ma responsabilité sur chacun d'eux. Bien sûr, j'ai aussi participé à l'élaboration des deux autres.

Tableau 2 : Responsabilités scientifiques de Contrat de recherche.

Contrat de recherche	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
INETFORSMEP (Emboutissage)	20%	20%	20%										
Tol. & Qual. des Produits (Pôle)				100%	80%	70%	60%	50%	40%	30%			
COPILOT-PRO				100%	100%	100%							
Langages formels									100%	100%			
USITRONIC							100%	100%	100%	100%	100%	100%	
GAMAR												100%	100%

Comme l'indique ce tableau, ma responsabilité sur le programme TOLÉRANCE ET QUALITÉ DE PRODUITS (TQP)¹, que j'avais élaboré pour le Pôle de compétitivité MONT BLANC INDUSTRIES, a progressivement diminuée, récupérée officiellement par le CETIM-CTDEC. Ce programme a disparu en tant que tel dans la feuille de route 3.0 du Pôle. Heureusement, les quelques projets du laboratoire dans ce domaine continuent à être labellisés par le pôle.

1.3 Directions de thèse

J'ai dirigé ou codirigé **cinq thèses de doctorat** avec un encadrement égal ou supérieur à celui du directeur habilité. Le tableau 3 donne les taux d'encadrement pour chacune d'elles. Les directeurs habilités ont été : Max Giordano par deux fois ; Maurice Pillet, par deux fois aussi ; et Serge Samper, une fois.

Tableau 3 : Directions de Thèse de doctorat.

Sujet de thèse	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Emboutissage (Y. Ledoux)	70%	70%	70%										
COPILLOT-PRO (E. Goldschmidt)				90%	90%	90%							
Langages formels (P. Léonard)									90%	90%			
USITRONIC (B. Abdelhakim)									50%	50%	50%		
GAMAR (R. Mushunje)													70%

1.4 Direction de DEA ou de Master

Il n'y a plus de Master recherche pouvant proposer un stage dans le domaine du Génie mécanique à l'USMB depuis 2014.

Les rares étudiants dans les Masters pré-existants ne m'ont permis d'en encadrer que **deux**. Le dernier fut Benjamin Vayre, de janvier 2010 à juillet 2010, sur la mise au point d'un algorithme de génération des gammes de réglage COPILLOT-PRO®.

2 Bilan des communications

Je suis auteur ou coauteur de 70 communications, dont 63 avec article scientifique et 36 en premier auteur. La liste complète peut être trouvée en Annexe B.

Le tableau 4 donne le nombre de communications par sujet, support et année : la « diagonale » des cases colorées fait clairement apparaître l'évolution de ma recherche depuis la vérification géométrique vers le pilotage des procédés.

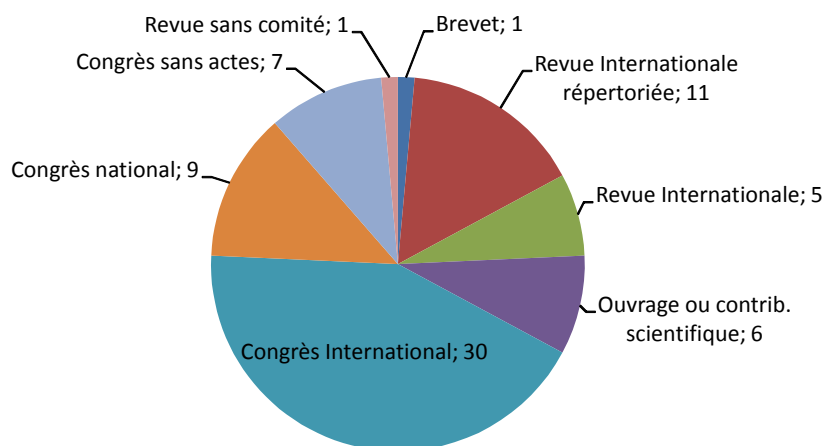
1. Le programme TQP est un programme que j'ai élaboré pour le dossier de candidature du pôle ARVE INDUSTRIES (voir section 1.1 du chapitre 1 de la troisième partie).

Tableau 4 : Nombre de communications par sujet, support et année.

Sujet	Support	1994	1995	1996	1997	1999	2001	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Total
Géovérif	Revue Internationale répertoriée											1										1
	Ouvrage ou contrib. scientifique		1																			1
	Congrès International	1												1								4
	Congrès national				1					1												2
	Revue sans comité			1																		1
Langage	Congrès sans actes												1			1						2
	Revue Internationale																	1				1
	Ouvrage ou contrib. scientifique											1										1
	Congrès International		1			1		2		1		1						1				7
Calcul	Congrès national		1				1															2
	Revue Internationale répertoriée								1				2			1						4
	Ouvrage ou contrib. scientifique																			1	1	6
Emboutissage	Congrès International																					1
	Revue Internationale																					1
	Congrès International								1	3	1											5
Copilot-pro	Brevet															1						1
	Revue Internationale répertoriée																2					3
	Revue Internationale																	1				1
	Congrès International																1	1				3
	Congrès national											1										1
Pilotage inertiel	Congrès sans actes													2					1	1		4
	Revue Internationale répertoriée															1			1	1		3
	Revue Internationale														1							2
	Congrès International															2		2				4
CoSelect	Congrès national																2				1	3
	Revue Internationale répertoriée																				1	1
General	Congrès International																		1			1
	Congrès sans actes														1							1
Total		1	3	1	2	3	2	4	2	7	2	9	1	5	2	7	5	5	3	3	3	70

La figure 1 donne la répartition, par support, des 70 communications dont je suis auteur ou coauteur : 16 sont des articles de revue internationale dont onze sont répertoriées par le HCERES¹.

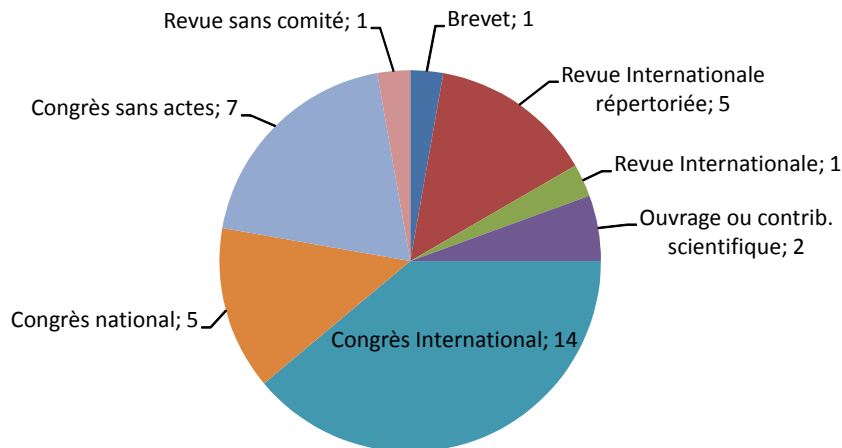
Figure 1 : Répartition, par support, des 70 communications en tant qu'auteur ou coauteur.



La figure 2 donne la répartition, par support, des 36 communications dont je suis le premier auteur. Même si cette figure ne le fait pas apparaître, les revues internationales sont plus utilisées que par le passé.

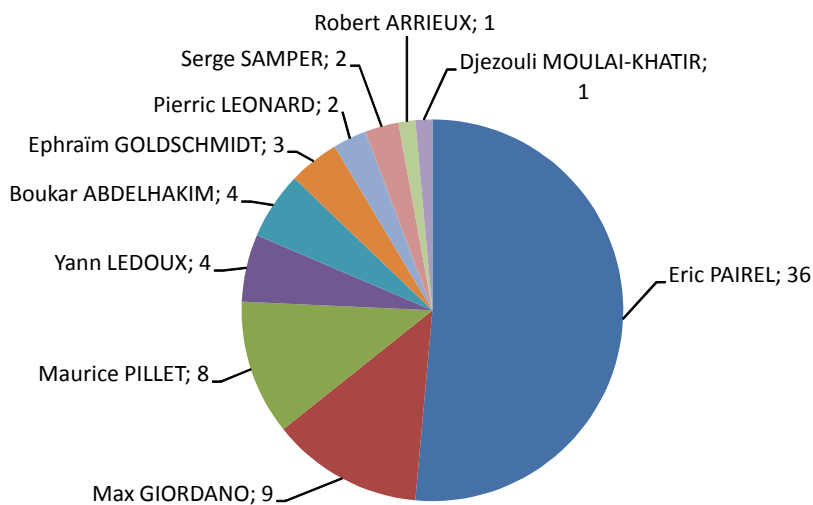
1. Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur.

Figure 2 : Répartition, par support, des 36 communications en tant que premier auteur.



Enfin, la figure 3 donne les premiers auteurs des 70 communications. Ils sont presque tous membres du laboratoire SYMME.

Figure 3 : Premiers auteurs des 70 communications.



3 Bilan des autres productions

J'ai produit ou coproduit trois logiciels [71], [72], [73] ; un rapport interne au laboratoire sur l'optimisation linéaire [75] ; un support de formation à la Spécification géométrique des produits pour le compte de l'IUFM de GRENOBLE [74] ; trois rapports d'expertise ou de prestation pour des entreprises [76], [77], [78] ; et deux rapports de stage ayant un caractère recherche [79], [80].

DEUXIÈME PARTIE

Résultats scientifiques et perspectives

Je travaille dans le domaine de la qualité géométrique des produits manufacturés, depuis plus de vingt ans.

Ce domaine, stratégique pour les entreprises manufacturières, recouvre les problématiques de **spécification** de la qualité géométrique souhaitée ; de la « **fabrication** » de cette qualité ; et de sa **vérification** métrologique.

J'ai commencé par travailler, lors ma thèse de doctorat, sur la vérification qui m'a conduit rapidement à travailler sur la spécification. Je présenterai nos principaux résultats sur ce thème dans le deuxième chapitre. En effet il me paraît plus pédagogique de commencer, au premier chapitre, par le thème de la fabrication et du pilotage de procédé sur lequel je travaille depuis une dizaine d'années, car il permet d'appréhender les besoins en caractérisation géométrique du produit qui devrait, peut-être, être l'objectif de la spécification du bureau d'études.

Le troisième et dernier chapitre me permettra de montrer que les outils normalisés pour la spécification géométrique ne répondent pas à ce besoin de caractérisation et, surtout, ne constituent pas un système complet et cohérent permettant de spécifier la géométrie optimale et les tolérances autour d'elle. Cela me permettra de justifier mon projet de recherche pour les années à venir pour lequel je donnerai aussi quelques pistes.

CHAPITRE 1

De la cotation de fabrication au pilotage statistique

1 Correction par cotes 1D des produits usinés : méthodologie COPILOT-PRO®

1.1 Etat de l'art, en 2006, concernant les cotes de fabrication et le réglage des machines-outils

En 2006 l'**état de l'art académique** concernant la formalisation d'un processus de fabrication, la cotation de fabrication et le réglage des machines, était brièvement le suivant :

Une gamme de fabrication est une suite chronologique de quelques phases de fabrication, elles-mêmes subdivisées en sous-phases puis en opérations de fabrication. On change de phase lorsqu'on change de machine ou de poste et on change de sous-phase lorsqu'on change de prise-de-pièce dans une machine ou un poste.

Cette organisation hiérarchique à deux niveaux, *phase* puis *sous-phase* contenant les opérations, n'est, à ma connaissance, justifiée dans aucune publication. Leur lien avec les cotes de fabrication reste confus. Les instants auxquels les cotes de fabrication doivent être mesurées ne sont pas explicités.

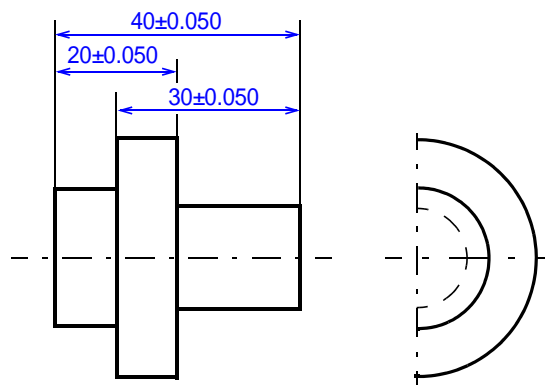
En outre, la sous-phase n'est pas toujours introduite dans les formations ; peut-être parce que les exemples considérés ne comportent qu'une seule prise-de-pièce par machine. Pourtant elle seule est fondamentale alors que la phase n'a pas d'autre intérêt que d'identifier la machine. En effet, une surface réalisée dans une prise-de-pièce a une position incontrôlable dans une autre prise-de-pièce puisque pouvant varier d'une pièce à l'autre selon les réglages effectués dans la première prise-de-pièce ; sauf, évidemment, si elle sert justement au positionnement de la pièce dans la nouvelle prise-de-pièce.

Donc, l'objectif implicite du découpage d'un processus de fabrication est d'identifier les **séquences d'opérations de fabrication** dont le résultat géométrique sur la pièce peut être spécifié et maîtrisé indépendamment du résultat géométrique des autres séquences. Pour la

raison que nous venons d'expliciter précédemment, **ces séquences sont forcément les prises-de-pièces, c'est-à-dire les sous-phases.**

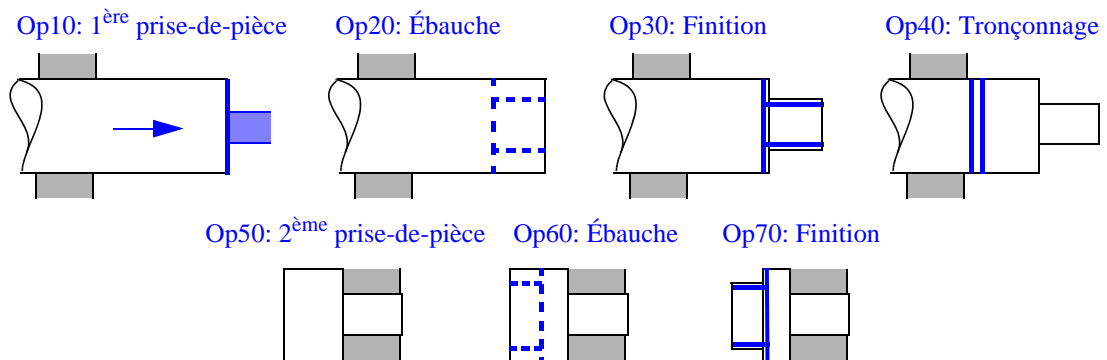
Afin d'illustrer nos propos dans tout ce chapitre, nous prendrons l'exemple d'une pièce de révolution réalisée en deux prises-de-pièce et issue d'une de nos publications sur COPILLOT-PRO® [15] : la figure 1 donne les *cotes-études* de la pièce, c'est-à-dire celles spécifiées par le Bureau d'études et qui, normalement, garantissent le bon fonctionnement de la pièce si elles sont respectées (voir figure 1).

Figure 1 : Dessin de définition partiel du produit à usiner (non conforme aux normes de spécification géométrique ISO).



La figure 2 montre, en deux lignes de dessins, les deux prises-de-pièces : la première par un mandrin serrant la barre cylindrique dans laquelle va être ouvragée la pièce et après son posage sur une butée escamotable. C'est l'opération 10. La deuxième par un serrage du mandrin sur la surface cylindrique finie à la précédente prise-de-pièce et après un posage sur l'épaulement de cette surface (voir figure 2).

Figure 2 : Processus de fabrication.



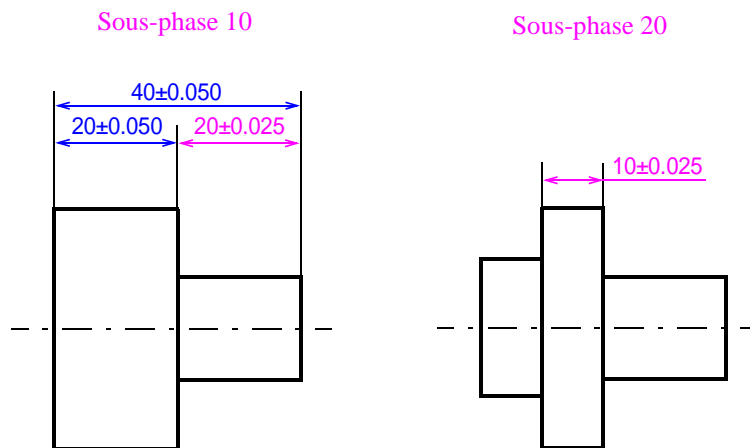
Les machines ne sont ici pas données, ce qui perturberait tout élève de la formation classique du domaine. Pourtant, comme nous l'avons précédemment expliqué, seules les prises-de-pièces sont importantes, c'est-à-dire, dans le vocabulaire classique, les sous-phases. Il y a donc ici deux sous-phases. Peu importe qu'elles appartiennent à la même phase ou à deux phases différentes, c'est-à-dire qu'il y ait une machine avec deux prises-de-pièces, ou deux machines ayant chacune une seule prise-de-pièce. En fait, nous verrons dans la prochaine

section consacrée à COPILLOT-PRO® que d'autres éléments que les prises-de-pièces doivent être pris en compte pour définir une séquence d'opérations de fabrication indépendante.

Lors de chaque sous-phase, des surfaces de la pièce sont réalisées, pour lesquelles des cotes de fabrication doivent être déterminées afin de maîtriser leurs positions. Il y a alors au moins deux « écoles », la « française » et « l'américaine » : **les cotes de fabrication de Bourdet**¹, enseignant-chercheur à l'ENS DE CACHAN de 1970 à 2010 et qui donc a formé des générations d'enseignants en France ; et **les cotes de fabrication de Wade**² dont les écrits ont fortement influencé toute la littérature anglo-saxonne du domaine. Les deux ont pour but d'avoir des cotes fabrication maîtrisables, c'est-à-dire ne pouvant varier d'une pièce à l'autre du fait des réglages effectués dans les sous-phases précédentes. Notons qu'aucune information n'est donnée quant aux moments auxquels il faut mesurer les cotes de fabrication dans la littérature.

Les cotes de Bourdet sont déduites des cotes-études par des chaînes minimales de cotes passant par la surface de position maîtrisée commune entre les sous-phases, c'est-à-dire ici l'épaulement de la première surface cylindrique réalisée (voir figure 3).

Figure 3 : Cotes de fabrication de Bourdet (non conforme aux normes de spécification géométrique ISO).



On observe que deux des trois cotes-études ont pu être conservées en tant que cotes de fabrication. Elles sont en bleu sur la figure 3. La dernière a dû être remplacée par deux cotes de fabrication (en magenta sur la figure).

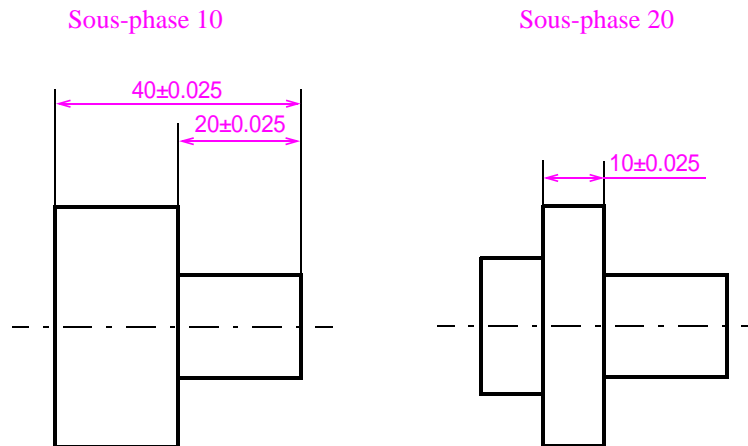
Les cotes de Wade sont des cotes qui positionnent chaque surface par rapport à la surface posée de la pièce (voir figure 4). En fait, l'école américaine n'utilise pas les notions de phase ou de sous-phase car elle n'en a pas besoin : chaque opération de fabrication a sa propre cote de fabrication qui est indépendante de toutes les autres, à la différence de celles de Bourdet.

1. Bourdet, P., 1973, « Chaines de cotes de fabrication (Méthode des delta L): première partie Modèles ». L'Ingénieur et le Technicien de l'Enseignement Technique. Décembre 1973.

2. Wade, O.R., 1967. Tolerance control in design and manufacturing. New York: Industrial Press.

Les tolérances des cotes de fabrication, de Wade ou de Bourdet, sont déterminées pour garantir celles des *cotes-études*.

Figure 4 : Cotes de fabrication de Wade (non conforme aux normes de spécification géométrique ISO).



On observe qu'aucune des cotes-études n'est conservée telle quelle en cote de fabrication de Wade.

Même si l'exemple est simple, la détermination mentale de ces cotes n'est pas évidente. Le logiciel COPILOT-PAA [71] permet de déterminer automatiquement, les cotes de Bourdet, celles de Wade, ou même d'autres.

Les avantages et les inconvénients de ces deux écoles apparaissent sur ce simple exemple :

- Les cotes de Wade permettent le réglage des outils puisque chacune d'elles ne dépend que d'un seul outil. En revanche ces cotes sont très différentes des cotes-études et leurs tolérances sont beaucoup plus faibles ; à tel point qu'elles peuvent même être intenables en pratique !
- Les cotes de Bourdet sont plus proches des cotes-études et peuvent même y correspondre directement (cotes en caractères bleus sur la figure 3). En revanche elles ne sont pas utilisables pour le réglage des outils car elles dépendent en général de deux outils ; chacun d'eux pouvant modifier plusieurs autres cotes. C'est le cas de la cote de 20 ± 0.50 par exemple.

En entreprises, notamment de décolletage, les régleurs utilisent, sans que cela ne se sache toujours, les cotes de Wade ; néanmoins souvent sans leurs tolérances. Les cotes de Wade sont parfois appelées, en France et notamment en enseignement, les *cotes fabriquées*, les *cotes de réglage*, les *cotes-outils*, les *cotes mères*... ce qui contribue aux confusions dans ce domaine.

En décolletage, le mesurage de la pièce nécessite son tronçonnage de la barre dans laquelle elle est usinée. Il n'est pas rare, alors, de voir autant de pièces tronçonnées et jetées qu'il y a de cotes de Wade ; soit souvent plus d'une dizaine. Outre la perte de matière, c'est surtout la perte de temps de production qui est très coûteuse.

Sur la base de ces deux écoles, des logiciels ont été développés, en France et aux États-Unis principalement, permettant la détermination automatique de ces cotes de fabrication et, en France au moins, de vérifier la capacité de la machine à respecter les tolérances des cotes de fabrication (méthode des ΔL due à Pierre Bourdet, 1973).

Pour terminer cet état de l'art, il n'existe apparemment aucun document montrant comment les surépaisseurs d'usinage, laissées pour les finitions, sont contrôlées par les cotes de fabrication. En pratique, les régleurs peuvent laisser une partie de la surface ébauchée lors de la finition de manière à mesurer directement l'épaisseur prise par la finition, mais cela nécessite une intervention particulière de leur part et un mesurage plus ou moins maîtrisé.

1.2 Génération de la gamme de surveillance et de la gamme de réglage

COPILOT-PRO® bouleverse beaucoup de notions que l'on croyait intangibles, à tel point qu'il m'a fallu plusieurs écrits et beaucoup de temps pour faire converger ses concepts.

La première « révolution » a été de redéfinir la notion de phase de fabrication : à l'instar de la sous-phase de fabrication présentée dans l'état de l'art, la ***phase de fabrication Copilot-pro*** est définie pour que toute cote entre les faces réalisées ou posées dans la phase, soit maîtrisable, c'est-à-dire puisse être corrigée par réglage des outils. **Cependant elle ne correspond ni à une machine, ni à une prise de pièce.**

En effet une cote peut être maîtrisable même si les deux faces sont réalisées dans deux prises-de-pièces différentes, voire deux machines différentes ; pourvu que l'on ait la maîtrise simultanée du réglage des outils qui les fabriquent.

Néanmoins, il faut aussi que l'encours de pièces, entre la fabrication de la première face et celle de la seconde, ne soit pas trop important, de sorte que la dérive du premier outil, par usure par exemple, soit négligeable devant la « précision » recherchée sur la cote. Il faut aussi accepter de rebuter, éventuellement, l'encours, car si le premier outil est vraiment très mal réglé et que le second ne peut « rattraper », on ne le saura qu'à la fin de phase ; lorsqu'on mesurera la cote, avec toutes les autres aussi « fabriquées » dans la phase Copilot-pro. Donc toutes les pièces entre cet outil, très mal réglé, et le poste de mesurage seront non conformes et devront être rebutées.

Il faut donc évaluer le coût d'un tel rebut ; qui devrait néanmoins n'apparaître que lors du montage d'un premier outil neuf mal pré-réglé ; et le comparer à celui de la mise en place d'une opération de mesurage intermédiaire systématique permettant de réduire l'encours potentiellement rebutées.

Ces réflexions permettent de donner une définition de la phase Copilot-pro qui, comme nous venons de voir, se terminera par une opération unique de mesurage de l'ensemble des cotes de fabrication « réalisées » pendant la phase pour la gamme de surveillance ; la gamme de surveillance et les cotes de fabrication seront déterminées ultérieurement.

La phase de fabrication Copilot-pro est **une suite d'opérations de fabrication** :

1 dont on maîtrise simultanément les réglages ;

2 dont l'encours est suffisamment faible pour que la dérive des réglages, des premiers outils notamment, durant la production de cet encours, soit négligeable devant la « précision » recherchée ;

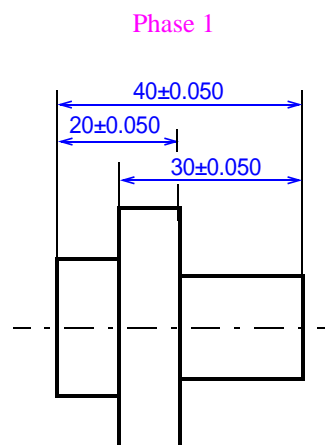
3 et dont l'encours peut être économiquement rebuté.

Cette définition fait apparaître des éléments totalement nouveaux par rapport à la définition classique de la phase ou de la sous-phase : la notion de réglage ; celle de mesurage ; celle d'encours de production ; et celle de rebut économique. Elle rompt avec les notions de prises-de-pièce et de poste. En effet, une phase de fabrication Copilot-pro peut contenir plusieurs prise-de-pièces et même plusieurs postes : si la pièce-exemple transite de la première prise-de-pièce à la seconde en flux tendu ; avec donc, a priori, un encours très faible qui pourrait être économiquement rebuté ; et qu'on maîtrise l'ensemble des réglages des usinages ; ce qui est logiquement le cas en flux tendu ; alors l'ensemble des opérations d'usinage de ces deux prises-de-pièce peuvent être regroupées dans une seule et même *phase de fabrication Copilot-pro* (le qualificatif « Copilot-pro » sera, par la suite, sous-entendu).

Pour l'ensemble des faces usinées ou posées dans la phase de fabrication, et subsistant à son issue, des cotes de fabrication doivent être déterminées pour les positionner entre elles. Ces cotes seront mesurées à l'issue de la phase et permettront le réglage des outils. Pour la pièce-exemple, seules les faces finies subsistent et aucune face ébauchée. Elles sont toutes réalisées dans la phase. Donc les cotes-études, qui les relient, sont directement maîtrisables et mesurables (voir figure 5) et deviennent les cotes de fabrication de la phase.

Si le processus avait été découpé en deux phases de fabrication Copilot-pro, les cotes de fabrication de chacune d'elles auraient été déterminées par chaînes de cotes, comme celles de Bourdet. Ce sera illustré plus bas.

Figure 5 : Cotes de fabrication Copilot-pro si les deux prises-de-pièces peuvent être regroupées dans une seule et même phase de fabrication Copilot-pro (non conforme aux normes de spécification géométrique ISO).



A ce stade, l'avantage de la phase Copilot-pro, sur la phase ou sous-phase classique, apparaît immédiatement : elle permet d'utiliser encore plus de cotes-études en production que

les cotes de Bourdet. Néanmoins, elle en a aussi le même inconvénient concernant le réglage ; mais il sera résolu ultérieurement par la méthodologie.

La gamme ainsi obtenue est appelée **gamme de surveillance**, car c'est celle qui sera mise en œuvre lors de la production en série des pièces. Le mesurage des cotes de fabrication à l'issue de chacune des phases peut se faire en temps masqué durant la production. Evidemment, elle ne permet pas de vérifier et, le cas échéant, de corriger, la position des surfaces ébauchées. Il faut pour cela utiliser une autre gamme appelée **gamme de réglage**. Cette gamme sera mise en œuvre au réglage initial des outils, puis, de façon régulière, au cours de la production qui sera alors un moment ralenti.

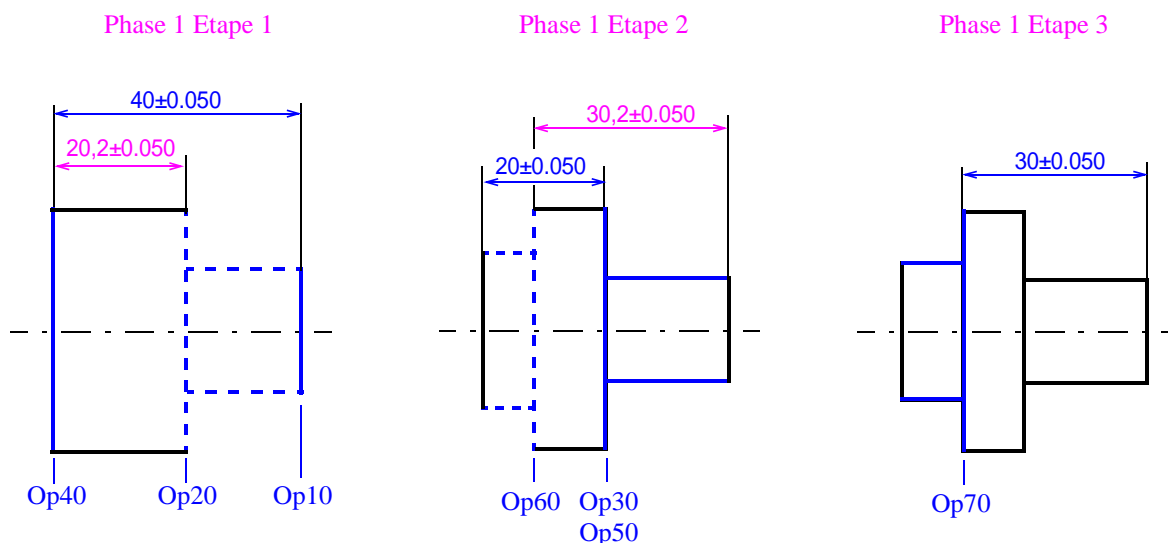
Evidemment, il va falloir interrompre le processus de fabrication pour mesurer les surfaces ébauchées avant qu'elles ne disparaissent par leur finition. Pour cela, chaque phase de fabrication Copilot-pro va être morcelée en **étapes de fabrication** de sorte que toutes les faces usinées ou posées, dans chaque étape, subsistent à son issue.

Le processus de détermination des étapes est relativement compliqué car il faut tenir compte des multiples contraintes techniques et temporelles entre les opérations de fabrication. L'article [15], donné en Annexe D, détaille la méthode mise au point pour cela. Pour la pièce-exemple, nous ne l'utiliserons pas et procéderons de façon plus intuitive.

Il s'agit d'être capable de mesurer toutes les faces usinées en un minimum de postes de mesurage dans la gamme. Autrement dit, il faut regrouper le plus d'opérations de fabrication possible avant un mesurage. Ainsi on limitera les coûts de ces postes et surtout on permettra de mesurer des cotes de fabrication plus « proches » des cotes-études.

Pour la pièce-exemple, la première étape de fabrication s'ouvre avec la première opération de la phase, c'est-à-dire sa prise-de pièce, OP10, (voir figure 2). Ensuite on intègre, dans cette étape, les opérations suivantes si elles ne suppriment pas les surfaces créées par celles déjà présentes dans l'étape ; soit les OP20 et 40.

Figure 6 : Phase, étapes et cotes de fabrication à mesurer de la gamme de réglage (non conforme aux normes de spécification géométrique ISO).



L'OP50 ne peut pas être intégrée car les surfaces qu'elle utilise n'ont pas été réalisées par l'OP30. Cela ferme donc la première étape (voir Etape 1 de la figure 6 dans laquelle les surfaces réalisées sont colorées en bleu et en pointillés pour les ébauches).

On ouvre une deuxième étape avec la première opération pas encore réalisée, c'est-à-dire l'OP30, et on y ajoute les opérations suivantes si elles ne suppriment pas les surfaces déjà intégrées dans cette deuxième étape, soit les OP50 et 60. Evidemment ces opérations s'ajoutent à celles réalisées dans la première étape. En décolletage, en raison du tronçonnage, cela nécessite de faire une nouvelle pièce.

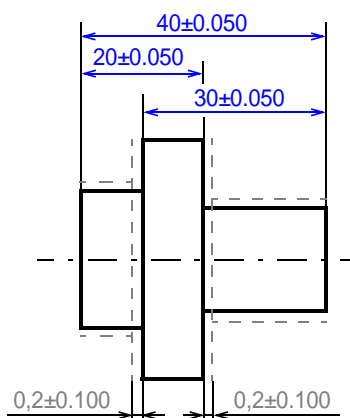
Enfin on ouvre une troisième étape pour la dernière opération pas encore réalisée, l'OP70. Comme précédemment cette opération s'ajoute à toutes les précédentes et nécessite, en décolletage, de fabriquer une troisième pièce de réglage.

En résumé, le processus de fabrication est morcelé en phases de fabrication ; pour la pièce-exemple il n'y en a qu'une. Pour la gamme de surveillance, cela suffit. Pour la gamme de réglage, chaque phase est morcelée, en étapes de fabrication afin de maîtriser la position des faces qui vont disparaître, s'il y en a. Pour la pièce-exemple, la phase est morcelée en trois étapes de fabrication.

1.3 Génération des cotes de fabrication

A l'issue de chaque étape de la gamme de réglage, les positions relatives des faces usinées seront mesurées au travers des cotes de fabrication. Ces cotes sont déterminées par chaînes de cotes à partir des cotes-études mais aussi des *cotes-méthodes*. C'est ainsi que nous appelons les cotes introduites par le Bureau des méthodes en charge de l'industrialisation du produit. Les premières d'entre elles sont les cotes définissant les surépaisseurs minimales et maximales de matière laissées aux outils de finition. En pratique ces cotes sont très importantes car leurs valeurs minimales conditionnent l'usinabilité et leurs valeurs maximales, la durée de vie des outils de finition. Pour la pièce-exemple ces cotes sont donnés au bas du dessin de la pièce sur la figure 7 ci-dessous.

Figure 7 : Surfaces ébauchées (en pointillés), cotes-études et cotes-méthodes tolérancées.



Un peu comme pour les cotes de fabrication de Bourdet, les cotes de fabrication Copilot-pro sont déterminées en recherchant le «chemin» le plus court, sur l'ensemble des cotes de fabrication potentielles, pour chaque cote-étude ou méthode.

Cependant le nombre de cotes de fabrication potentielles est bien plus important que dans la méthode de Bourdet car davantage de faces sont maîtrisées dans chaque étape de fabrication : il y a bien sûr les faces usinées ou posées dans l'étape mais aussi celles subsistant des étapes précédentes.

Par exemple, les faces réalisées par les opérations OP10 et OP40 à l'étape 1, subsistent à l'issue de l'étape 2, et même de l'étape 3. Par conséquent les faces réalisées ou posées à l'étape 2, c'est-à-dire celles des OP30 et 60, peuvent être positionnées entre-elles mais aussi par rapport aux faces réalisées dans les étapes précédentes et qui subsistent à l'issue de l'étape 2, c'est-à-dire, ici, les faces réalisées par les OP10 et 40.

Ainsi cinq cotes de fabrication potentielles permettent de maîtriser la position des deux faces réalisées à cette étape et alors que deux suffisent. De même trois cotes de fabrication potentielles permettent de maîtriser la position de l'unique face réalisée à l'étape 3, alors qu'une seule suffit.

Ce sur-nombre de cotes de fabrication potentielles est intéressant car il permet de choisir, par exemple, celles qui sont les plus simples à mesurer ; ou bien celles qui correspondent le plus aux cotes-études. C'est ce dernier choix qui a été fait ici et qui a permis de conserver les cotes-études. Elles apparaissent en bleu sur la figure 6. Les deux autres cotes de fabrication proviennent des deux cotes-méthodes.

Ce travail de choix des cotes de fabrication permettant de garantir les cotes-études et les cotes-méthodes peut être mené manuellement en s'aidant de graphes et de tableaux de répartition des tolérances de celles-ci. C'est l'esprit de l'article de 2013 [15] mais un document plus procédural mériterait d'être élaboré.

A partir de la saisie du processus de fabrication, c'est-à-dire des opérations de fabrication, des faces qu'elles réalisent, des prises-de-pièces dans lesquelles elles sont faites et des cotes-études et méthode, le logiciel COPILOT-PAA [71] détermine automatiquement les gammes et les cotes de fabrication selon les préférences de son utilisateur.

1.4 Génération de la matrice d'incidence

A l'issue de chaque phase de fabrication, si des écarts sur les cotes de fabrication sont constatés, il faut les corriger. C'est là la deuxième grande innovation introduite par COPILOT-PRO® : la **matrice d'incidence**. Avec Ephraïm Goldschmidt, nous avons été les premiers à l'introduire courant 2006 comme peut en attester notre présentation au laboratoire SYMME fin 2006¹ lors de laquelle les notions de gamme, de phase et d'étape étaient déjà posées.

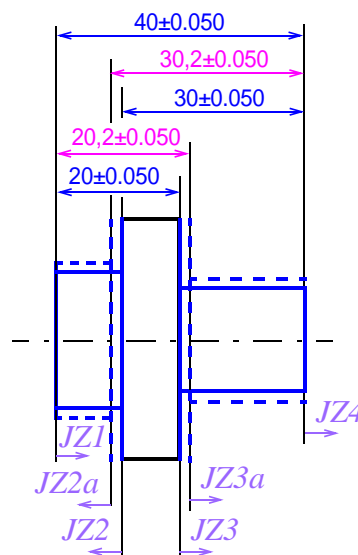
1.<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01096437v1>

Le principe est de déterminer l'incidence de chaque correcteur d'outil sur les cotes. Là encore, le logiciel COPILOT-PAA [71] permet de générer automatiquement la matrice de ces incidences ; mais nous utiliserons ici une méthode manuelle, progressivement mise au point ces dernières années.

Elle consiste à faire un dessin de toutes les faces réalisées dans la phase de fabrication avec ses cotes de fabrication (voir figure 8). On ajoute ensuite, en dessous, tous les correcteurs d'outils. Ce sont pour l'essentiel des correcteurs de position mais cela peut être aussi des cotes-outils pour des outils de forme et dont la correction nécessite leur affûtage ou leur remplacement. Ici, il n'y a pas d'outil de forme.

Cette « cotation » des correcteurs, nous a conduit à les appeler, un temps, les cotes-pilotes, notamment dans l'article [7]. Nous avons depuis abandonné cette dénomination.

Figure 8 : Ensemble des cotes de fabrication de l'unique phase de fabrication avec la cotation des correcteurs d'outils, y compris celui de la butée escamotable de l'OP10.



Nous avons supposé ici que la pièce était usinée dans une décolleteuse bi-broches à commande numérique. La première prise-de-pièce est celle faite par la broche principale pour laquelle l'axe Z est orienté vers la droite ce qui explique l'orientation des correcteurs JZ1, JZ3a, JZ3, et JZ4 vers la droite (voir figure 8) ; alors que la seconde est celle faite par la broche de reprise et pour laquelle l'axe Z est orienté vers la gauche ce qui explique l'orientation des correcteurs JZ2a et JZ2.

A partir de ce dessin, la construction de la matrice d'incidence est très simple : chaque correcteur orienté dans le même sens que l'extrémité d'une cote arrivant sur sa ligne d'attache, a une incidence de +1 sur celle-ci ; sinon, de -1.

La figure 9 donne la matrice d'incidence de l'ensemble des correcteurs sur l'ensemble des cotes de fabrication de la phase.

Figure 9 : Matrice d'incidence des correcteurs de la gamme de réglage.

	$\delta JZ1$	$\delta JZ3a$	$\delta JZ4$	$\delta JZ2a$	$\delta JZ3$	$\delta JZ2$
40±0.050	-1	0	1	0	0	0
20,2±0.050	-1	1	0	0	0	0
30,2±0.050	0	0	1	1	0	0
20±0.050	-1	0	0	0	1	0
30±0.050	0	0	1	0	0	1

Cette matrice permet de calculer les variations des cotes dues à des variations sur les correcteurs. C'est donc un **modèle variationnel direct** du procédé. Nous verrons, dans les sections suivantes, deux autres méthodes mises au point pour élaborer des modèles variationnels directs de géométrie.

Ce modèle permet notamment de simuler des écarts sur les cotes en se donnant des erreurs sur les jauges. Par exemple, supposons que les jauges aient les erreurs suivantes (figure 10) :

Figure 10 : Erreurs supposées sur les jauges.

	$\delta JZ1$	$\delta JZ3a$	$\delta JZ4$	$\delta JZ2a$	$\delta JZ3$	$\delta JZ2$
Erreurs JZ	0,000	-0,100	-0,050	-0,300	0,200	-0,150

Une simple multiplication matricielle permet de simuler des écarts réalistes qui en résultent sur les cotes (figure 11).

Figure 11 : Écarts simulés sur les cotes.

	$e^0 CF$
40±0.050	-0,050
20,2±0.050	-0,100
30,2±0.050	-0,350
20±0.050	0,200
30±0.050	-0,200

Nous utilisons cette possibilité dans le logiciel COSELECT 2.0 [73] pour générer un jeu d'écarts réalistes, mais aussi dans un simulateur EXCEL générique, créé par Maurice Pillet, qui permet aussi d'ajouter de la variance sur les jauges et sur les cotes.

Cependant, c'est bien dans le sens inverse qu'il nous faut utiliser la matrice d'incidence pour pouvoir calculer les ajustements δJ des jauges en fonction des écarts mesurés sur les cotes de la dernière pièce produite.

1.5 Utilisation à l'atelier

La matrice d'incidence n'est pas inversible en l'état. Elle n'est d'ailleurs même pas carrée. Cela traduit le fait qu'une infinité d'erreurs sur les jauges permettraient d'obtenir les mêmes écarts sur les cotes de fabrication. Un exemple trivial consiste à déplacer tous les outils d'une même quantité dans un sens : cela ne change évidemment pas les cotes !

Il faut donc **figer un des correcteurs**, c'est-à-dire s'interdire de le modifier. En général, les régleurs préfèrent de pas modifier la jauge de l'outil le plus proche de la broche pour éviter toute collision avec elle. En figeant $\delta JZ1$, la matrice d'incidence peut être inversée (voir figure 12). Cette nouvelle matrice est appelée la **matrice de pilotage**.

Figure 12 : Matrice de pilotage complète (inverse de la matrice d'incidence dans laquelle la colonne associée à $JZ1$ a été supprimée).

	40±0.050	20,2±0.050	30,2±0.050	20±0.050	30±0.050
$\delta JZ3a$	0	1	0	0	0
$\delta JZ4$	1	0	0	0	0
$\delta JZ2a$	-1	0	1	0	0
$\delta JZ3$	0	0	0	1	0
$\delta JZ2$	-1	0	0	0	1

Cependant, en pratique, certains outils ne peuvent pas être ajustés à chaque fois que l'on mesure la dernière pièce produite. Ce peut être, par exemple, une cote-outil d'un outil de forme dont la correction nécessite son réaffutage. On est alors amené à figer son correcteur dans la matrice d'incidence qui, du coup, n'est plus inversible.

Une solution, proposée par Maurice Pillet, est alors de calculer sa pseudo-inverse qui permettra de calculer un ajustement approximatif conduisant à la somme minimale des carrés des prochains écarts sur les cotes. Supposons, par exemple, que nous ne puissions pas ajuster la jauge $JZ2$. La matrice d'incidence (voir figure 9) perd alors aussi cette colonne. La matrice de pilotage est alors sa pseudo-inverse (voir figure 13).

Figure 13 : Matrice de pilotage partielle, sans $JZ1$ ni $JZ2$ (pseudo-inverse).

	40±0.050	20,2±0.050	30,2±0.050	20±0.050	30±0.050
$\delta JZ3a$	0	1	0	0	0
$\delta JZ4$	1	0	0	0	1
$\delta JZ2a$	-1	0	1	0	-1
$\delta JZ3$	0	0	0	1	0

Reprenons les écarts simulés de la figure 11. Si nous les multiplions par la matrice de pilotage complète, donnée en figure 12, nous retrouvons les erreurs sur les jauges données en figure 10.

En revanche si nous les multiplions par la matrice de pilotage partielle, donnée en figure 13, nous ne retrouvons pas les erreurs sur les jauges mais un ajustement de celles-ci, au signe près (voir figure 14), qui permet de minimiser la somme des carrés des prochains écarts prévus (voir figure 15).

Figure 14 : « Pseudo-erreurs » des jauges : opposés de l'ajustement à leur apporter.

	$\delta JZ3a$	$\delta JZ4$	$\delta JZ2a$	$\delta JZ3$
Ajust.	-0,100	-0,125	-0,225	0,200

Figure 15 : Prochains écarts sur les cotes de fabrication prévus si l'on applique l'ajustement donné en figure 14.

	$e^{-1} CF$
40±0.050	0,075
20,2±0.050	0,000
30,2±0.050	0,000
20±0.050	0,000
30±0.050	-0,075

Nous constatons que les « pseudo-erreurs » des jauges sont très différentes de leurs erreurs « réelles ». C'est ce qui nous conduit à les qualifier de « pseudo-erreurs ». Ainsi l'erreur sur *JZ4* ne vaut pas -0,125 mm, comme calculée par la matrice de pilotage partielle, mais -0,050 mm (voir figure 10). Cela s'explique par le fait qu'on « demande » à la jauge *JZ4* de réduire l'écart dû à *JZ2* qu'on s'est interdit de corriger.

Néanmoins l'ajustement des jauges de l'opposé des pseudo-erreurs permet ici, comme dans la majorité des cas, de fortement diminuer les prochains écarts : la plupart d'entre-eux sont nuls car ils ne dépendent, chacun, que d'un seul correcteur qui, en outre, n'impacte que celui-ci ; et deux d'entre-eux sont passés de quelques dixièmes de millimètre (voir figure 11) à seulement quelques centièmes (ils sont ici opposés car la somme de tous les écarts est forcément nulle lorsque la somme de leurs carrés est minimale).

D'un point de vue pratique, deux cas de figure peuvent se présenter dans les ateliers :

- soit on dispose d'un logiciel capable de « pseudo-inverser » la matrice d'incidence à chaque fois que le régleur figera un correcteur et voudra calculer l'ajustement des autres ;
- soit on ne dispose pas d'un tel logiciel et la matrice de pilotage sera calculée une fois pour toutes avec un choix initial du ou des correcteurs figés pour avoir une simple fiche de calcul de l'ajustement des correcteurs à l'atelier, manuelle ou EXCEL®.

Certaines entreprises utilisent effectivement une simple feuille EXCEL® préparée par leur Bureau des Méthodes. D'autres utilisent des logiciels capables de calculer la pseudo-inverse sur les correcteurs sélectionnés par le régleur et développés par le CETIM-CTDEC ou INFODREAM¹.

1.6 Conclusions et perspectives pour COPILOT-PRO®

Même si nous avons présenté des méthodes manuelles pour générer les gammes et la matrice d'incidence, les résultats précédents ont été établis automatiquement par le logiciel COPILOT-PAA [71] (sauf la pseudo-inverse). A titre d'illustration, la figure 16 donne une capture d'écran de ce logiciel sur l'onglet donnant les cotes de fabrication pour la gamme de réglage et leurs relations avec les cotes-études et les cotes-méthodes.

Comme nous l'avons déjà dit, COPILOT-PAA a déjà toutes les fonctionnalités de génération automatique des gammes, des cotes et des matrices mais présente un manque de

1. http://infodreamgroup.fr/suite_qualaxy/pilotage-matriciel/

fiabilité au niveau de la génération des gammes et ne peut prendre en compte que deux directions de cotes dont l'une est dédiée aux diamètres de pièces de révolution.

USITRONIC, puis GAMAR, avaient pour objectif notamment d'aboutir à un progiciel intégrant les fonctionnalités de COPILOT-PAA ; mais cela n'a pas pu être fait. Le CETIM-CTDEC, après surtout avoir travaillé au pilotage d'une cellule autonome d'usinage dans le cadre du projet USITRONIC, est maintenant davantage demandeur de ce progiciel. Je me suis donc engagé à les aider personnellement à développer les modules de COPILOT-PRO® dès que le contrat d'exploitation commerciale, en cours d'élaboration, sera signé.

Nous terminons cette présentation de COPILOT-PRO® en en donnant deux inconvénients importants, qui seront corrigés par COSELECT (voir section 4) :

- la suppression d'une jauge est relativement dangereuse car elle n'est plus surveillée mais continue de dériver et d'impacter les cotes. Les autres correcteurs vont donc « chercher » à compenser sa dérive en prenant des ajustements de plus en plus grands. Cependant les prochains écarts vont, eux-aussi, tout de même augmenter. Cette situation risque aussi de semer le doute chez le régleur ;
- à chaque mesurage un ajustement est calculé qui concerne l'ensemble des correcteurs, alors qu'une sous-partie aurait peut-être été suffisante et alors que les écarts sont peut-être uniquement aléatoires et donc impossible à corriger. L'ajustement systématique crée alors davantage de dispersion comme Deming l'a montré par sa fameuse expérience de l'entonnoir (« The Deming's funnel experiment »)¹.

Figure 16 : Interface de COPILOT-PAA sur l'onglet donnant les cotes de fabrication classées par étapes, alors appelées « sous-étape de réglage » (S.E.R.).

CC	Cible	T voulue	T obtenue	CF_P1_P4	CF_P1_P3a	CF_P2a_P4	CF_P1_P3	CF_P2_P4
Etape				S.E.R. 1	S.E.R. 1	S.E.R. 2	S.E.R. 2	S.E.R. 3
Incertitude de mesure				1	1	1	1	1
Dispersion d'usinage				1	1	1	1	1
Cible				40	20,2	30,2	20	30
CF tol.				0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
CE_P1_P3	20	0,1	0,1	0	0	0	1	0
CE_P1_P4	40	0,1	0,1	1	0	0	0	0
CE_P2_P4	30	0,1	0,1	0	0	0	0	1
CM_P2a_P2	0,2	0,2	0,2	0	0	1	0	-1
CM_P3_P3a	0,2	0,2	0,2	0	1	0	-1	0

1. Deming, W. E. (1982). Out of the Crisis. The MIT Press, 1982.

2 Correction par cotes 2D des produits d'emboutis

2.1 Préambule

Antérieurement à COPILOT-PRO®, avec Yann Ledoux alors doctorant, nous avons élaboré, dans le cadre du projet européen INETFORSMEP, une méthode pour corriger la géométrie des pièces embouties entre 2002 et 2005 (Cf section 2.2 de la première partie de ce mémoire). Malgré cette antériorité, cette méthode reste intéressante à présenter car :

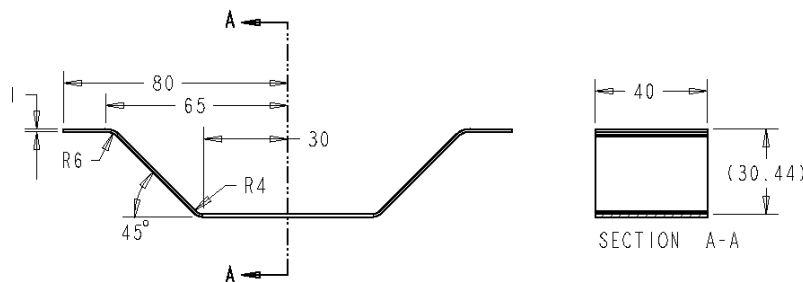
- d'une part, elle permet de corriger des géométries 2D, alors que COPILOT-PRO®, dans la partie cotes de fabrication et matrice d'incidence, ne sait corriger que des géométries 1D, même si plusieurs directions de cotes dans l'espace peuvent être prises en compte ;
- d'autre part, elle montre comment un modèle variationnel direct peut être établi expérimentalement au lieu de l'être géométriquement comme le fait COPILOT-PRO®. En effet, en emboutissage, procédé pour lequel a été développée cette méthode, le *retour élastique* de la pièce extraite de l'outillage est tel que ce dernier ne peut avoir la forme « négative » de la pièce. Il n'y a donc pas de relation géométrique simple entre la forme de l'outillage et la forme de la pièce ; d'autant que le retour élastique dépend aussi de paramètres non géométriques comme le coefficient de glissement, la force du serre-flanc...
- et enfin elle montre comment les moindres carrés peuvent permettre de déterminer un ajustement des paramètres du procédé pour corriger les caractéristiques du produit et les rapprocher de leurs cibles.

La présentation ci-après s'appuie sur une publication de 2004 [4], mais utilise le vocabulaire commun à toute cette partie du mémoire.

2.2 Méthode d'ajustement d'un procédé d'emboutissage, mise au point en 2004

La méthode est illustrée sur un exemple d'embouti prismatique qui peut donc être paramétré dans le plan. Il s'agit d'une pièce en aluminium ayant approximativement la forme d'un V et c'est ainsi qu'elle avait été nommé dans le projet (voir figure 17).

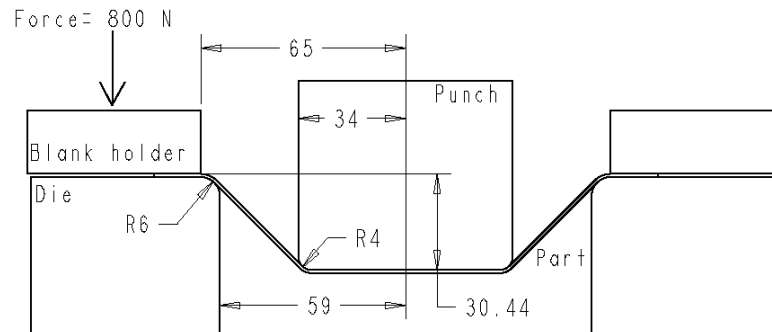
Figure 17 : Spécification de la géométrie cible de la pièce.



Le procédé d'emboutissage initial est constitué d'un poinçon (« punch » sur la figure 18) enfonçant, d'une certaine quantité, un flanc de tôle d'aluminium maintenu par un

serre-flanc (« blank-holder ») sur la matrice (« die »). Ce procédé initial a la « forme négative » de la pièce et ne va donc pas permettre d'obtenir la géométrie souhaitée du fait du retour élastique de la pièce une fois extraite de l'outillage ; mais c'est un point de départ.

Figure 18 : Procédé initial.



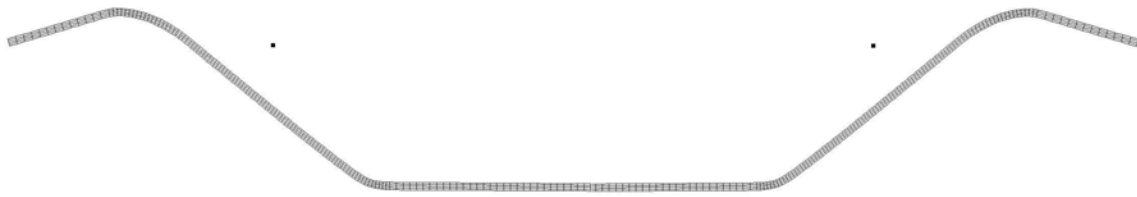
La méthode formalisée en 2004 comporte les sept étapes suivantes qui s'apparentent à celles d'une bonne démarche en **Plans d'expériences**¹ :

- 1 Simulation par éléments finis de l'embouti initial ;
- 2 Caractérisation géométrique de la géométrie virtuelle obtenue ;
- 3 Inventaire des paramètres du procédé peut-être influant sur les caractéristiques géométriques retenus à l'étape précédente ;
- 4 Choix du type de modèle polynomial associé aux caractéristiques et réalisation d'un plan d'expériences numériques, c'est-à-dire un plan de simulations par éléments finis ;
- 5 Mesurage numérique des caractéristiques sur les emboutis virtuels ;
- 6 Calcul et validation du modèle polynomial associé à chaque caractéristique : l'ensemble de ces polynômes constitue un modèle variationnel direct du procédé d'emboutissage ;
- 7 Recherche de solutions sur les paramètres du procédé qui permettent théoriquement de réduire la somme des carrés des écarts entre les valeurs des caractéristiques et leurs valeurs cibles.

2.2.1 Etape 1 : simulation de l'embouti initial

Nous ne détaillerons pas ici les choix réalisés à l'époque pour réaliser une simulation réaliste de l'embouti initial. Ils sont détaillés dans la publication. Le retour élastique de l'embouti virtuel apparaît nettement sur la copie d'écran donnée en figure 19 : le « V » s'est ouvert.

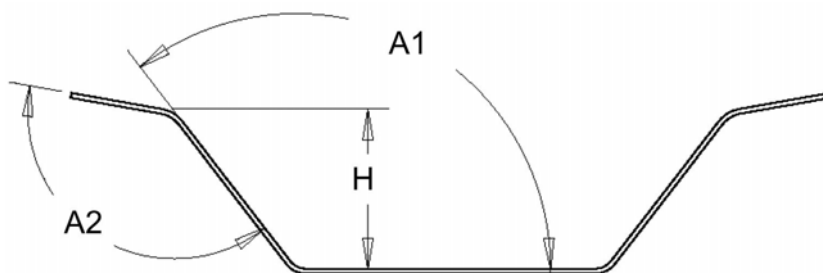
1. Les Plans d'expériences désignent un ensemble de techniques permettant de modéliser et d'optimiser un procédé ou un produit en réalisant sur celui-ci des essais ou des prototypes.

Figure 19 : Embouti initial.

2.2.2 Etape 2 : caractérisation géométrique de l'embouti initial

La forme de l'embouti initial peut être différente de la géométrie cible. Ici ce n'est pas le cas : le profil est resté symétrique ; les parties rectilignes le sont encore à peu près ; seuls les angles et les longueurs semblent devoir être corrigés.

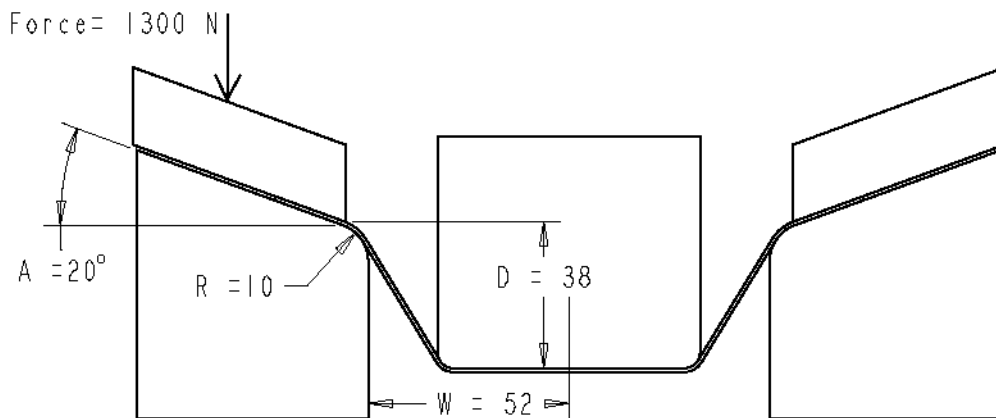
Il s'agit donc de coter cette géométrie « déformée » en fonction des défauts géométriques observés. La cotation de la géométrie cible n'est en effet que très partiellement utilisable en général notamment par le fait que les cotes qui positionnent les raccordements tangents entre les segments de droite et les arcs de cercles (voir figure 17) ne sont que très imprécisément mesurables. Plusieurs solutions sont possibles néanmoins il est souhaitable de choisir des cotes si possible indépendantes entre elles et relativement sensibles à la modification visible de la géométrie. Pour la pièce en «V» nous avons retenu deux angles et une hauteur (voir figure 20). La hauteur est mesurée à l'intersection des deux droites tangentes aux parties rectilignes. Une gamme de mesure doit donc être élaborée pour mesurer les deux angles et la hauteur à partir du nuage de points issu du maillage d'éléments finis avec, au préalable une segmentation de ce nuage par entités géométriques.

Figure 20 : Caractérisation géométrique par cotes de l'embouti « déformé ».

2.2.3 Etape 3 : recherche des paramètres influents

Cette étape est celle qui fait le plus appel à l'expertise des personnes de métier. Il s'agit d'identifier les paramètres du procédé qui peuvent influencer sur les caractéristiques retenues sur le produit. Pour cet exemple, cinq paramètres ont été retenus, dont quatre d'ordre géométrique pour modifier la forme de l'outillage, et un plutôt d'ordre procédé puisqu'il s'agit de la force appliquée au serre-flanc (voir figure 21). Ces paramètres doivent être indépendants les uns des autres pour pouvoir les tester dans un plan d'expériences, c'est-à-dire qu'il doit être possible de modifier la valeur de l'un deux sans modification des autres.

Figure 21 : Paramètres procédés retenus



Il faut ensuite choisir les plages de variation de chacun d'eux de façon à ce que les géométries des emboutis qu'ils permettront d'obtenir « contiennent » la géométrie cible. là encore, c'est une affaire de spécialistes.

Le tableau suivant donne les valeurs initiale, inférieure et supérieures, c'est-à-dire qui correspondent à l'outillage initial.

Tableau 1 : Valeurs initiale, inférieure et supérieure de paramètres du procédé.

Paramètre	Valeur initiale	Valeur inférieure	Valeur supérieure
A : Angle de la matrice (°)	0	0	20
R : Rayon de la matrice (mm)	6	6	10
W : Largeur de la matrice (mm)	59	52	59
D : Profondeur du poinçon (mm)	30.44	33	38
F : Force du serre-flanc (N)	800	5	1000

2.2.4 Choix du type de modèle pour les caractéristiques et réalisation du plan d'expériences associé

Nous recherchons, dans un premier temps, à avoir des modèles polynomiaux bilinéaires, c'est-à-dire contenant toutes les interactions entre les paramètres, de la forme :

$$Y = a_0 + a_1A' + a_2R' + \dots + a_5F' + a_{12}A'R' + \dots + a_{45}D'F' \quad (\text{Eq. 1})$$

où Y est A1, A2 ou H

Etant donné le nombre de paramètres, cinq, un plan fractionnaire à seize expériences permet d'identifier les effets de cinq paramètres et des dix interactions entre eux.

2.2.5 Etape 5 : Mesurage des caractéristiques

Chacune des expériences conduit à un embouti virtuel sur lequel sont mesurées A1, A2 et H. Le tableau suivant donne les résultats de mesure.

Tableau 2 : Résultats de mesure des caractéristiques sur les seize emboutis virtuels.

n° d'expérience	A1: Angle (°)	A2: Angle (°)	H : Heigh (mm)
1	132.89	116.89	27.79
2	120.02	116.55	37.51
3	132.03	131.23	32.97
4	135.76	121.09	31.72
5	126.56	124.82	32.63
6	132.89	115.86	30.85
7	145.06	132.63	24.98
8	131.52	131.8	36.20
9	123.25	140.92	32.52
10	125.26	130.24	32.53
11	143.92	150.05	23.02
12	128.12	147.25	36.95
13	137.44	138.64	23.99
14	120.26	138.97	37.78
15	133.01	152.64	33.16
16	142.41	149	25.76

2.2.6 Etape 6 : Calcul et validation des modèles polynomiaux

A partir des résultats de mesure, le modèle polynomial, associé à chaque caractéristique, est calculée par régression multilinéaire, c'est-à-dire suivant le critère des moindres carrés. Dans les équations obtenues les effets les plus importants ont été écrits en gras (voir équations 2, 3 et 4).

$$A1 = \mathbf{131.90} - 0.19A' + \mathbf{1.74R'} + \mathbf{4.58W'} - \mathbf{2.37D'} - \mathbf{5.05F'} - 0.17A'R' + 0.58A'W' - 0.32A'D' - 0.5A'F' - 0.22R'W' + 0.49R'D' - 0.75R'F' + 0.35W'D' - 0.26W'F' + 0.51D'F' \quad (\text{Eq. 2})$$

$$A2 = \mathbf{133.66} + \mathbf{9.80A'} + \mathbf{1.88R'} + \mathbf{5.8W'} - \mathbf{2.32D'} + \mathbf{1.86F'} - 0.53A'R' + 0.47A'W' + 0.22A'D' - 0.38A'F' + 0.17RW' - 0.68RD' - 0.35RF' + 0.14WD' - 0.59WF' + 0.43DF' \quad (\text{Eq. 3})$$

$$H = \mathbf{31.27} - 0.56A' - 0.60R' - 0.68W' + \mathbf{2.39D'} + \mathbf{3.69F'} + 0.06A'R' - 0.31A'W' + 0.15A'D' + 0.70A'F' + 0.03R'W' - 0.41R'D' + 0.58R'F' - 0.33W'D' + 0.53W'F' - 0.25D'F' \quad (\text{Eq. 4})$$

Ces modèles sont parfaitement ajustés aux seize expériences car ils ont seize degrés de liberté. En revanche il faut les vérifier sur au moins une expérience hors plan et au centre du domaine d'étude, c'est-à-dire lorsque les paramètres sont à leurs valeurs médianes.

La configuration donnant théoriquement A1 maximum, A2 maximum et H minimum, est la même ; ce qui est exceptionnel ; et n'est pas dans le plan. Elle permet de vérifier les modèles (voir tableau 3).

Tableau 3 : Comparaison des caractéristiques sur la configuration maximisant théoriquement les caractéristiques.

n°	A'	R'	W'	D'	F'	A1 (°)	A2 (°)	H (mm)
17	1	1	1	-1	-1	Théorique : 147.1°	Théorique : 152.4°	Théorique : 21.7mm
						Mesurée : 142.8°	Mesurée : 149.9°	Mesurée : 25.4mm
						Déviations : 4.3°	Déviations : 2.5°	Déviations : -3.7mm

En outre, les modèles doivent être vérifiés au milieu du domaine d'étude, c'est-à-dire lorsque les paramètres prennent leurs valeurs médianes. Comme pour la configuration précédente, une nouvelle simulation doit être réalisée et l'embouti virtuel mesuré.

Les déviations des modèles polynomiaux sont plus faibles au milieu du domaine que sur la configuration donnant théoriquement les valeurs maximales aux caractéristiques (voir tableau 4). Pour cette présentation, les déviations sont acceptées et les modèles validés. Pour être plus précis, il suffirait de compléter le plan précédent pour obtenir un plan composite et des modèles polynomiaux du deuxième degré.

Tableau 4 : Comparaison des caractéristiques au centre du domaine d'étude.

n°	A'	R'	W'	D'	F'	A1 (°)	A2 (°)	H (mm)
18	1	1	1	-1	-1	Théorique : 131.9°	Théorique : 133.7°	Théorique : 31.3mm
						Mesurée : 130.2°	Mesurée : 132.4°	Mesurée : 33.2mm
						Déviations : 1.7°	Déviations : 1.3°	Déviations : -1.9mm

2.2.7 Etape 7 : Ajustement des paramètres du procédé

L'objectif est de trouver une configuration des paramètres permettant de rapprocher le plus possible les caractéristiques de leurs valeurs cibles, c'est-à-dire 135 mm pour A1 et A2 et 30.44 mm pour H. Les paramètres étant communs aux trois modèles polynomiaux, il faut combiner leurs objectifs pour trouver une solution commune. Pour cela nous formons la fonction objectif, FO, qui somme les carrés des écarts entre les valeurs courantes des caractéristiques et leurs valeurs cible (voir équation 5 ci-dessous).

$$FO = (A1 - 135)^2 + (A2 - 135)^2 + (H - 30.44)^2 \quad (\text{Eq. 5})$$

Le solveur d'EXCEL® permet de noter qu'il existe plusieurs minimums locaux dépendants des valeurs initiales données aux paramètres avant de lancer l'optimisation non linéaire. Parmi plusieurs d'entre eux nous avons choisi celui dont les valeurs des paramètres étaient les plus proches d'une configuration du plan d'expérience de manière à minimiser l'erreur de prédiction, les polynômes étant parfaitement ajustés aux expériences du plan. Cela nous a effectivement permis de trouver un ajustement de l'outillage et de la force de serre-flanc conduisant quasiment à la géométrie souhaitée (voir tableau 5).

Tableau 5 : Solution optimale retenue et réalisation d'un nouvel embouti virtuel.

n°	A'	R'	W'	D'	F'	A1 (°)	A2 (°)	H (mm)
19	0.35 (13.5°)	-1 (6mm)	0.75 (58.1)	1 (38mm)	-0.91 (47N)	Théorique : 135°	Théorique : 135°	Théorique : 30.44mm
						Mesurée : 133.8°	Mesurée : 134.5°	Mesurée : 30.4mm
						Déviations : 1.2°	Déviations : 0.5°	Déviations : 0.4mm

2.3 Conclusion et discussions sur la méthode mise au point en 2004

Une des difficultés de la méthode est de caractériser judicieusement le profil déformé par des cotes linéaires et angulaires. A cette étape, la méthode de la correction par points, qui sera présentée à la section suivante, paraît beaucoup plus simple. Cela resterait à vérifier notamment au regard de la segmentation du nuage des nœuds du maillage. D'autre part, l'étape suivante, qui consiste à chercher les paramètres influents sur la géométrie, serait peut-être alors plus difficile. En effet, il est assez évident que A2 dépend de A sur l'outillage.

Enfin il est étonnant que le solveur d'EXCEL® n'ait pas été capable de déterminer le minimum global car soit le système, de trois équations bilinéaires à cinq paramètres, présente un domaine solution et dans ce cas le solveur aurait dû fournir au moins une solution du domaine ; soit il n'a pas de solution, ce qui semble être le cas ici, et alors une simple régression multilinéaire, par exemple par la pseudo-inverse du système de 48 équations (3 modèles, fois 16) permettrait d'obtenir le minimum global. Ce point mériterait d'être examiné plus en profondeur aujourd'hui.

3 Correction par points des produits usinés

3.1 Préambule

Développé entre 2005 et 2008 dans le cadre de la thèse d'Ephraïm Goldschmidt, COPILOT-PRO® introduit une méthode formelle de pilotage par cotes.

A la même période, Maurice Pillet a développé, avec son doctorant Dimitri Denimal, le *pilotage par points* qu'ils ont nommés le *pilotage inertiel total*, PIT, faisant ainsi référence

au critère de qualité retenu : la somme des carrés des écarts entre les points et la surface cible, ce qui s'apparente à la définition de l'inertie mécanique.

J'ai contribué au développement de cette méthode dans le cadre de la thèse de Boukar Abdelhakim entre 2010 et 2013, notamment par la recherche de solutions aux problèmes que pose ce pilotage dès lors que les écarts sont petits et qu'un outil usine plusieurs surfaces. Ces problèmes ne seront pas explicités ici car il est plus important de présenter le principe de la **correction par points**, ainsi renommé car nous verrons que la matrice d'incidence obtenue peut être utilisée avec un autre critère que les moindres carrés. C'est ce qui est fait par COSELECT décrit à la section 4.

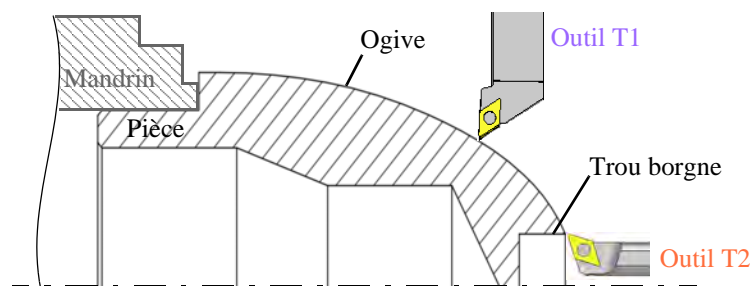
3.2 Principe de la correction par points

Le principe de cette méthode est de mesurer les écarts de quelques points sur la surface usinée, par rapport à leur position idéale dans un repère de référence lié à la pièce et d'en déduire l'ajustement à faire sur les correcteurs de l'outil de coupe.

Pour présenter cette méthode, nous nous inspirons ici de la présentation qui en a été faite dans l'article [62] que nous avons récemment publié pour résoudre les problèmes de repères que posait encore cette méthode. Cet article peut être trouvé en Annexe E.

L'exemple de présentation est celui de l'usinage d'une ogive et d'un trou borgne à son sommet (voir figure 22).

Figure 22 : Usinage de l'ogive et du trou borgne (extrait de [62]).

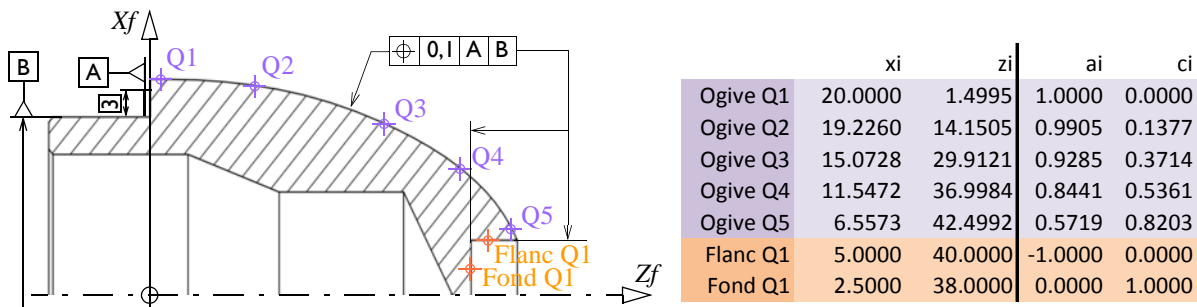


Quatre jauges interviennent dans la forme et la position de l'ogive usinée : les jauges de position en X, Y et Z de la pointe théorique de l'outil T1 ainsi que la jauge de son **rayon de bec**. La jauge en Y est aussi appelé la **hauteur de pointe**. En revanche seules deux jauges de l'outil T2 influencent la forme et la position du trou borgne : celles de position en X et en Z. La hauteur de pointe a une influence qui ne peut pas être mesurée dans le trou, et le rayon de bec n'a aucune influence. L'article [62] est le tout premier à présenter les jauges de rayon de bec et de hauteur de pointe.

La première étape du pilotage par points est de choisir quelques points sur chacune des surfaces usinées dans leur situation idéale par rapport au repère de référence de la pièce. Ainsi les coordonnées de cinq points ont été relevés sur le modèle CAO de la pièce ainsi que les composantes de leurs normales par rapport à la surface (voir figure 23 et notamment le tableau qu'elle contient).

Pour le flanc ou le fond du trou borgne, un seul point suffit vis-à-vis des correcteurs dont on dispose sur l'outil qui les usine.

Figure 23 : Choix de quelques points sur les surfaces à usiner (extrait de [62]).



Remarquons que ces points peuvent aussi servir à la spécification ISO de la géométrie cible de la pièce ; même si, en pratique, on préfère faire référence à un fichier CAO sur son dessin technique.

A l'atelier, on mesurera, dans la direction des normales, les écarts des points usinés par rapport aux surfaces idéales (voir figure 24 et figure 25 qui donne un exemple simulé).

Figure 24 : Écarts mesurés entre les surfaces usinées et les surfaces idéales (extrait de [62]).

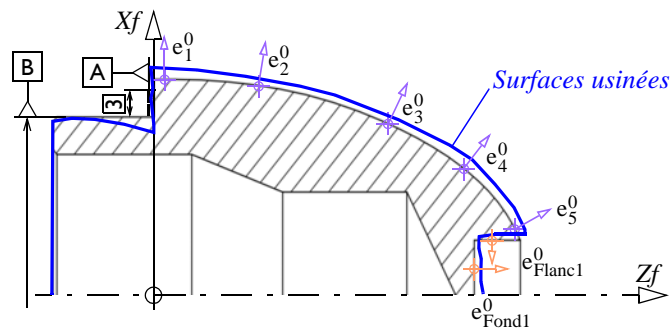


Figure 25 : Écarts initiaux des points par rapport aux surfaces idéales (extrait de [62]).

Point	e_{i0}
Ogive Q1	0.1999
Ogive Q2	0.1926
Ogive Q3	0.1778
Ogive Q4	0.1653
Ogive Q5	0.1374
Flanc Q1	-0.0603
Fond Q1	0.8000

Par des méthodes détaillées dans [62], il est possible de calculer la matrice d'incidence des jauges sélectionnées sur les écarts des différents points (voir figure 26).

Figure 26 : Matrice d'incidence des jauges-outils sur les écarts des points par rapport aux surfaces idéales (extrait de [62]).

	J1x	J1y ²	J1z	J1r	J2x	J2z
Ogive Q1	1.000	0.025	0.000	0.000	0	0
Ogive Q2	0.990	0.026	0.138	-0.128	0	0
Ogive Q3	0.928	0.031	0.371	-0.300	0	0
Ogive Q4	0.844	0.037	0.536	-0.380	0	0
Ogive Q5	0.572	0.044	0.820	-0.392	0	0
Flanc Q1	0	0	0	0	-1.000	0.000
Fond Q1	0	0	0	0	0.000	1.000

Cette matrice permet de calculer les variations sur les écarts des points en fonction de variations sur les jauges. C'est donc un modèle variationnel direct de la géométrie caractérisée par points.

La méthode de calcul retenue dans [62] pour « inverser » ce modèle est la pseudo-inverse. Si l'on suppose que des jauges sans erreurs conduisent à des écarts nuls sur les points, alors la multiplication de cette matrice par les écarts initiaux donne les pseudo-erreurs des jauges-outils ou, plus exactement, les ajustements à leur appliquer (voir figure 27).

Figure 27 : Ajustements des jauges (extrait de [62]).

J1x	J1y ²	J1z	J1r	J2x	J2z
0.2000	-0.0033	0.0998	0.1498	0.0603	0.8000

Ces ajustements permettent d'annuler les prochains écarts calculés comme pourrait le montrer le produit de ses ajustements par la matrice d'incidence de la figure 26.

Les rayons de bec, jamais ajustés en pratique actuellement, ont une influence du même ordre de grandeur que les autres sur des surfaces non parallèles aux axes du porte-outil comme on peut le voir dans la matrice d'incidence (voir figure 26). Par conséquent, ne pas les prendre empêche d'annuler les prochains écarts. Ainsi sans J1r, les prochains écarts ne seraient pas nuls mais de l'ordre du centième de millimètre pour cet exemple (voir figure 27) avec, en outre, le risque de « trop » ajuster les jauges en X et en Z pour compenser l'erreur dérivante de la jauge de rayon.

Figure 28 : Prochains écarts des points avec toutes les jauges sauf J1r (extrait de [62]).

Point	e_i^1
Ogive Q1	0.0091
Ogive Q2	0.0003
Ogive Q3	-0.0081
Ogive Q4	-0.0083
Ogive Q5	0.0091
Flanc Q1	0.0000
Fond Q1	0.0000

3.3 Discussions sur la correction par points

Le pilotage par points, dès lors qu'il prend en compte toutes les jauges, est à ce jour la méthode la plus précise qui soit pour corriger les usinages. Sauf à utiliser un modèle variationnel direct plus précis et donc non linéaire, nous pensons qu'il n'est pas possible de proposer d'autres méthodes plus précises et c'est pourquoi nous avons intitulé l'article [62], « Réglage ultra-précis des usinages ».

Elle n'est pas encore utilisée en milieu industriel et n'a fait l'objet que d'une seule expérimentation réelle partielle mais convaincante au CETIM-CTDEC. Plus générale que le pilotage par cotes, nous sommes convaincu qu'elle finira par s'imposer.

Néanmoins, telle quelle, elle souffre des mêmes inconvénients que le pilotage par cotes énoncés à la section 1.6, à savoir, la dangerosité de ne pas surveiller toutes les jauges aux travers du mesurage des caractéristiques qu'elles « fabriquent » ; et l'augmentation de la dispersion globale liée à l'ajustement systématique des correcteurs.

La méthode COSELECT, présentée ci-après, permet de les lever.

4 Pilotage statistique et sélectif des procédés : méthode COSELECT

4.1 Préambule

Nous reproduisons ici presque tel quel l'article publié en 2016 dans le JOURNAL EUROPÉEN DES SYSTÈMES AUTOMATISÉS [12].

4.2 Etat de l'art préalable et introduction des notions utilisées par COSELECT

Le problème que nous avons cherché à résoudre, en mettant au point la méthode présentée dans cette section, est celui du réglage des procédés de fabrication « créant » des caractéristiques sur les produits qu'ils fabriquent. C'est évidemment un problème extrêmement courant dans les industries et qui pourtant n'est toujours pas résolu de façon satisfaisante d'un point de vue pratique et même d'un point de vue scientifique pour les procédés que nous considérons. Ces procédés ont les particularités assez fréquentes suivantes :

- Ils sont « discrets », c'est-à-dire que leurs produits sont des objets physiques discernables ;
- Ils n'ont pas de dynamique, c'est-à-dire qu'une modification de leur réglage change aussitôt les caractéristiques de leurs produits ;

- Ils créent une dérive progressive des caractéristiques. C'est particulièrement le cas des procédés d'usinage dont les outils s'usent au cours de la production et font donc dériver la géométrie des produits ;

- Ils sont réglés au regard des caractéristiques mesurées sur leurs produits ;

- Les caractéristiques ont toutes une dispersion aléatoire instantanée créée par le procédé de fabrication mais aussi par le procédé de mesure si bien qu'on ne connaît pas précisément leurs tendances centrales qu'il faut pourtant corriger.

En outre, nous considérons que le réglage du procédé ne modifie pas les dispersions des caractéristiques. Cette hypothèse est probablement vérifiée dans la plupart des cas, car les réglages effectués sont de faibles amplitudes. Nous considérons aussi que le procédé de mesure n'introduit pas de biais lié, par exemple, à une mauvaise justesse.

Actuellement, dans les entreprises, ces procédés sont la plupart du temps ajustés par des régleurs s'appuyant uniquement sur leur expérience. Ceux-ci sont parfois un peu aidés par la mise en place de cartes de contrôle SPC¹ qui leur permettent de savoir quand régler. Les cartes les plus couramment utilisées sont la carte de Shewhart (1931) et la carte aux limites élargies. Nous rappelons ici les relations de calcul de ces deux cartes car nous les utiliserons d'une manière un peu différente dans la méthode COSELECT. D'ailleurs nous ne les appellerons pas *limites de contrôle* mais *limites alpha* et *limites bêta*.

La *carte de Shewhart* utilise des limites, disposées symétriquement par rapport à une valeur cible, et en-dessous desquelles, il a été montré par Deming (1982) qu'il ne fallait pas chercher à corriger la caractéristique car alors on augmentait sa dispersion. Ces limites sont calculées à partir du risque alpha d'avoir la moyenne de la caractéristique, \bar{C}_i , calculée sur n produits, au-delà des limites de contrôle alors que sa *tendance centrale* est parfaitement centrée sur la valeur cible (voir figure 29 et équations 6 et 7). Nous les appelons les limites alpha inférieure, L α I, et supérieure, L α S.

$$L\alpha I_i = \text{Cible}_i - u_\alpha \frac{\sigma_{ct_i}}{\sqrt{n}} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$L\alpha S_i = \text{Cible}_i + u_\alpha \frac{\sigma_{ct_i}}{\sqrt{n}} \quad (\text{Eq. 7})$$

avec :

- Cible_i : valeur cible pour la caractéristique i ; très généralement égale au milieu de l'intervalle de tolérance en SPC classique.

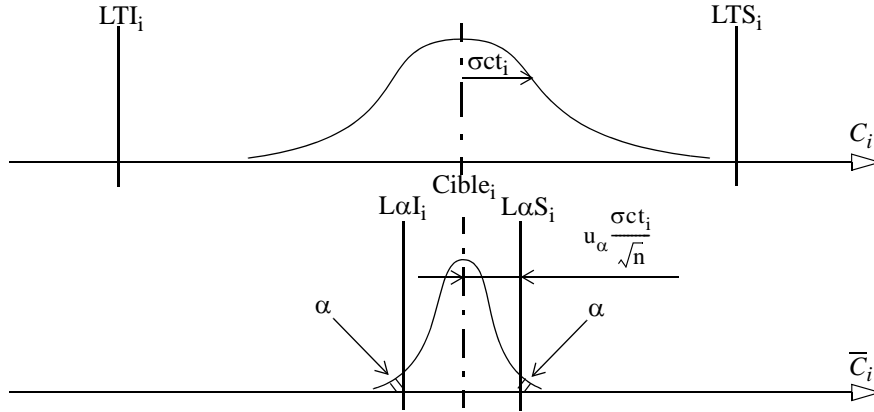
- u_α : valeur de la variable de Gauss centrée réduite correspondant au risque α ; généralement pris égal à 3.

- n : nombre de pièces mesurées pour calculer l'écart de la caractéristique.

1. « Statistical Process Control » ou « Maîtrise statistique des procédés » en français.

- σ_{ct_i} : l'écart type de dispersion court-terme (instantanée) de la caractéristique i.

Figure 29 : Position des limites alpha, utilisées par la carte de Shewhart et par COSELECT, pour surveiller la moyenne \bar{C}_i de la caractéristique mesurée sur n pièces ; n pouvant être égal à 1.



La **carte aux limites élargies** est une variante de la carte de Shewhart permettant d'accepter des écarts, par rapport à la cible, dépassant les limites alpha. Elle est utile lorsqu'on souhaite minimiser le nombre d'ajustements des paramètres dont dépend la caractéristique. Ces limites sont calculées à partir du risque bêta d'avoir la moyenne de la caractéristique, \bar{C}_i , calculée sur n produits, en-deçà des limites de contrôle, alors que la tendance centrale de celle-ci est, en fait, au-delà et génère p% de produits hors tolérance (voir figure 30 et équations 8 et 9). Nous les appelons les limites bêta inférieure, $L\beta I_i$, et supérieure, $L\beta S_i$. Par rapport aux limites alpha, elles sont nécessairement au-delà de ces limites puisqu'en-deçà des limites alpha il ne faut pas corriger la caractéristique alors qu'au-delà des limites bêta il faut la corriger.

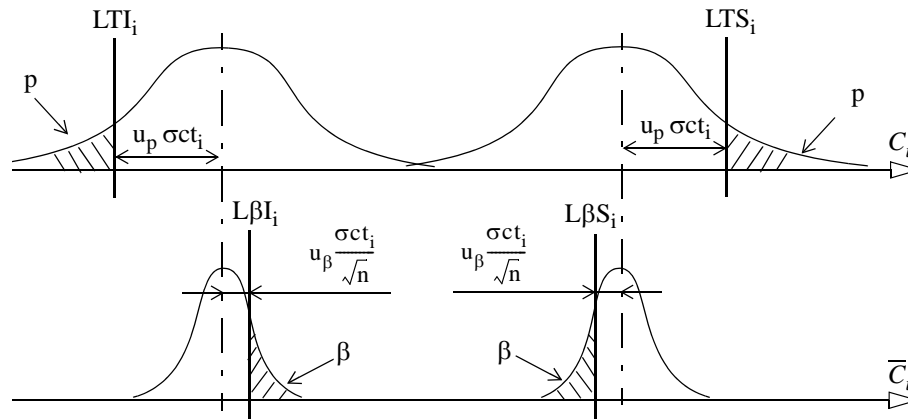
$$L\beta I_i = LTI_i + \left(u_p + \frac{u_\beta}{\sqrt{n}}\right) \sigma_{ct_i} \quad (\text{Eq. 8})$$

$$L\beta S_i = LTS_i - \left(u_p + \frac{u_\beta}{\sqrt{n}}\right) \sigma_{ct_i} \quad (\text{Eq. 9})$$

avec :

- LTI_i et LTS_i : limite de tolérance inférieure et supérieure de la caractéristique i.
- u_p : valeur de la variable de Gauss centrée réduite correspondant à la proportion p de valeurs supérieures ; généralement prise égale à 3.
- u_β : valeur de la variable de Gauss centrée réduite correspondant au risque β de croire que la dispersion est encore dans les limites ; généralement prise égale à 1,28 ($\beta = 10\%$).

Figure 30 : Position des limites bêta, utilisées par la « carte aux limites élargies » et par COSELECT, surveiller la moyenne \bar{C}_i de la caractéristique mesurée sur n pièces ; n pouvant être égal à 1.



Lorsque plusieurs caractéristiques sont surveillées simultanément sur le produit – c’est évidemment très souvent le cas – une carte multivariée est statistiquement plus efficace que plusieurs cartes de Shewhart utilisées simultanément sur les caractéristiques, comme plusieurs scientifiques ont pu le montrer. Il existe aujourd’hui plusieurs cartes multivariées mais la plus connue est due à Hotteling (1947) et est aussi appelée la *carte du T^2* .

Néanmoins, qu’elles soient faites pour une seule caractéristique ou pour plusieurs, les cartes de contrôle SPC ne font que détecter une situation statistiquement anormale. Elles n’apportent aucune aide au réglage qui d’ailleurs n’est absolument pas abordé par le SPC ; même la notion de cible n’est utilisée que comme valeur de référence et non comme une cible à viser.

Le problème du réglage pour corriger une ou plusieurs caractéristique(s) dispersée(s) est abordé par un autre champ disciplinaire, moins connu que le SPC, appelé le *réglage statistique des procédés* ou *Statistical Process Adjustment* et *SPA* en anglais. Del Castillo en est le principal promoteur aujourd’hui. Il a notamment fait, en 2006, une synthèse des techniques qu’il recouvre. La très grande majorité des propositions concerne l’ajustement d’un seul paramètre agissant sur une seule caractéristique ; néanmoins quelques-unes ont été faites pour l’ajustement de plusieurs paramètres agissant simultanément sur plusieurs caractéristiques dispersées. COSELECT se situe bien dans ce paradigme, mais, d’une part, chaque caractéristique possède sa propre carte de contrôle – ce qui laisse le choix du type de carte pour chacune – d’autre part, les limites de ces cartes participent pleinement au calcul du réglage lorsqu’il est nécessaire. Etant donné que COSELECT est à présent implémenté dans le logiciel COSELECT 2.0, nous parlerons indifféremment de COSELECT pour parler de celui-ci ou de la méthode.

Dans la première sous-section nous montrerons que COSELECT ne repose sur aucun modèle direct particulier, à la différence de beaucoup de méthodes publiées, et peut donc être mis en œuvre avec n’importe quel *modèle variationnel direct*. La deuxième sous-section présente ses idées-forces et son algorithme. La troisième permet d’évaluer son efficacité au regard notamment du réglage calculé suivant les moindres carrés.

4.3 Modèle variationnel direct utilisé par COSELECT

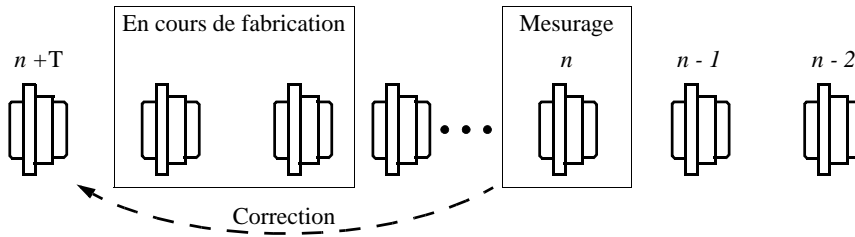
Il existe plusieurs méthodes permettant d'établir un modèle variationnel direct. Une modélisation par les lois de la physique, de la géométrie comme dans COPILLOT-PRO ou encore la CORRECTION PAR POINTS, ou par une approche purement empirique, permet d'obtenir un modèle mathématique. Quelle que soit la méthode pour l'établir, le modèle variationnel direct peut se mettre sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \delta C_l = f_l(\delta P_l, \delta P_j, \delta P_k) \\ \delta C_i = f_i(\delta P_l, \delta P_j, \delta P_k) \\ \delta C_m = f_m(\delta P_l, \delta P_j, \delta P_k) \end{cases} \quad (\text{Eq. 10})$$

où δC_i est la variation de la caractéristique i due aux variations δP_j des paramètres de réglage du procédé.

Pour les procédés discrets, notamment manufacturiers, le réglage, décidé à l'issue du mesurage d'un ou de quelques produits venant d'être fabriqués, ne s'appliquera que sur ceux en attente d'être fabriqués ($n+T$, $n+T+1$...) (voir figure 31).

Figure 31 : Période des réglages.



Il y a donc un décalage, d'une période T , dépendant de l'encours de produits entre la dernière pièce n qui permet de calculer le réglage et la première $n+T$ qui sera effectivement corrigée.

A partir du modèle variationnel direct, nous pouvons donc calculer les prochaines valeurs théoriques des caractéristiques du produit $n+T$, connaissant celles du produit n ou des moyennes des produits n à $n-p$ (voir équation 11).

$$\begin{cases} C_l^{n+T} = C_l^n + \delta C_l \\ C_i^{n+T} = C_i^n + \delta C_i \\ C_m^{n+T} = C_m^n + \delta C_m \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} C_l^{n+T} = C_l^n + f_l(\delta P_l, \delta P_j, \delta P_k) \\ C_i^{n+T} = C_i^n + f_i(\delta P_l, \delta P_j, \delta P_k) \\ C_m^{n+T} = C_m^n + f_m(\delta P_l, \delta P_j, \delta P_k) \end{cases} \quad (\text{Eq. 11})$$

Dans le système d'équations 11, C_i^n est la valeur de la caractéristique i de la pièce n si c'est la seule qui ait été mesurée, ou la moyenne des pièces n à $n-p$, si p pièces ont été mesurées. Le problème du réglage consiste alors à trouver une variation des paramètres δP_j permettant d'annuler, ou au moins de réduire, les écarts des prochaines caractéristiques par rapport à leurs cibles.

Selon, notamment, le nombre de caractéristiques et le nombre de paramètres ce système d'équations peut avoir une infinité de solutions ; une solution unique ; ou encore aucune solution. Dans ce dernier cas la méthode très généralement utilisée consiste à rechercher la solution qui minimise la somme des carrés des écarts des prochaines valeurs des caractéristiques. En particulier, si le modèle variationnel direct est linéaire, alors, il peut être mis sous forme matricielle et pseudo-inversé. Il suffit ensuite, alors, de multiplier la matrice colonne des écarts des caractéristiques par cette matrice pseudo-inverse pour obtenir le réglage des paramètres. C'est à cette méthode de calcul que nous comparerons les résultats obtenus par COSELECT à la section 4.5.

4.4 Principe de COSELECT

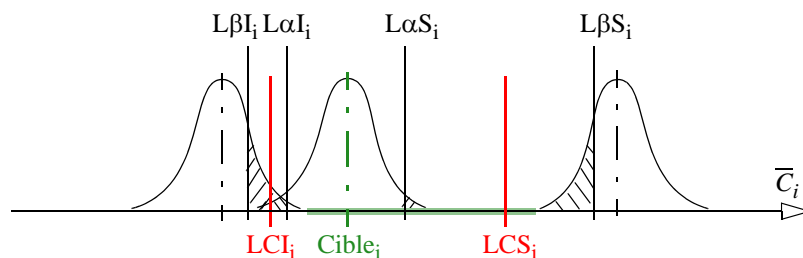
4.4.1 Cible et limites de contrôle des caractéristiques

Une cible est choisie pour chaque caractéristique. Elle peut être placée au milieu de l'intervalle de tolérance de la caractéristique, mais si cette dernière dérive progressivement et qu'on souhaite minimiser la fréquence de sa correction, elle peut être placée à l'opposé du sens de sa dérive.

Dans tous les cas, la cible déplace avec elle les limites alpha. Par ailleurs, comme les limites alpha sont nécessairement à l'intérieur des limites bêta, cela contraint le domaine de solutions possibles pour la cible. Ce domaine est représenté par un trait vert épais sur la figure 32 ci-dessous.

De façon classique, des limites de contrôle sont établies pour chaque caractéristique. En-deçà de ces limites, la caractéristique ne demande aucune correction ; au-delà si. Ces limites de contrôle sont nécessairement entre les limites alpha et les limites bêta (voir figure 32). Là encore si l'on souhaite minimiser la fréquence des corrections d'une caractéristique qui dérive progressivement, on a intérêt à placer ces limites vers les limites bêta. Sinon, on peut les placer vers les limites alpha.

Figure 32 : Choix de la cible et des limites de contrôle.



4.4.2 Formulation du problème d'optimisation

L'idée-force fondamentale de COSELECT est de chercher une solution de réglage qui suffit à remettre les caractéristiques dans leurs limites de contrôle et non forcément sur leurs cibles. C'est donc une utilisation originale des limites de contrôle qui ne servent plus seulement à détecter un dérèglement mais servent aussi au réglage. Mathématiquement cela

consiste à écrire que les prochaines valeurs des caractéristiques C_i^{n+T} devront être dans leurs limites de contrôle (voir équation 12 dans laquelle, chacune des inéquations est volontairement écrite soit avec une limite de contrôle inférieure LCI_i , une limite de contrôle supérieure LCS_i ou les deux pour montrer qu'il est également possible de prendre en compte des caractéristiques mono-bornées).

$$\begin{cases} LCI_i \leq C_i^{n+T} \leq LCS_i \\ LCI_i \leq C_i^{n+T} \\ C_m^{n+T} \leq LCS_m \end{cases} \quad (\text{Eq. 12})$$

Ainsi, alors qu'il est possible qu'aucune solution sur les paramètres ne permette de remettre théoriquement les caractéristiques sur leurs cibles, COSELECT définit un domaine solution. Dès lors il devient possible d'essayer de trouver une solution avec seulement une partie des paramètres de réglage. C'est là la deuxième idée-force de COSELECT : permettre de définir des préférences sur les paramètres pour que COSELECT recherche d'abord une solution de réglage sur les paramètres préférés. Nous détaillerons cette idée plus bas.

Enfin la troisième idée-force de COSELECT est de chercher un réglage qui minimise les écarts des prochaines valeurs de façon proportionnelle aux limites de contrôle.

Pour cela on rend variables les limites de contrôle avec un paramètre d (voir équation 13 et figure 33) :

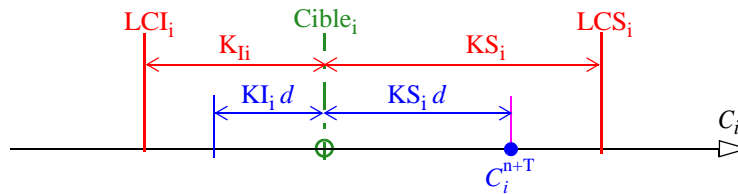
$$\begin{aligned} LCI_i^d &= \text{Cible}_i - KI_i \times d \\ LCS_i^d &= \text{Cible}_i + KS_i \times d \end{aligned} \quad (\text{Eq. 13})$$

où $KI_i = \text{Cible}_i - LCI_i$ et $KS_i = LCS_i - \text{Cible}_i$

et on contraint la prochaine valeur à rester à l'intérieur de ces limites paramétrées :

$$\text{Cible}_i - KI_i \times d \leq C_i^{n+T} \leq \text{Cible}_i + KS_i \times d \quad (\text{Eq. 14})$$

Figure 33 : Limites de contrôle paramétrées par la distance réduite d .



La minimisation de d contraint la prochaine valeur C_i^{n+T} à se rapprocher de sa cible. Si d est inférieur à 1, cela signifie qu'elle est à l'intérieur de ses limites ; sinon cela signifie qu'elle en est à l'extérieur.

En rendant commune la distance réduite d à toutes les caractéristiques, on obtient donc finalement un problème d'optimisation sous contraintes qui, en reprenant l'équation 12, prend la forme générale suivante :

Minimiser d sous :

$$\begin{cases} \text{Cible}_1 - \text{KI}_1 \times d \leq C_1^{n+T} \leq \text{Cible}_1 + \text{KS}_1 \times d \\ \text{Cible}_i - \text{KI}_i \times d \leq C_i^{n+T} \\ C_m^{n+T} \leq \text{Cible}_m + \text{KS}_m \times d \end{cases} \quad (\text{Eq. 15})$$

Soit, en utilisant le modèle variationnel direct :

Minimiser d sous :

$$\begin{cases} \text{Cible}_1 - \text{KI}_1 \times d \leq C_1^n + f_1(\delta P_l, \delta P_j, \delta P_k) \leq \text{Cible}_1 + \text{KS}_1 \times d \\ \text{Cible}_i - \text{KI}_i \times d \leq C_i^n + f_i(\delta P_l, \delta P_j, \delta P_k) \\ C_m^n + f_m(\delta P_l, \delta P_j, \delta P_k) \leq \text{Cible}_m + \text{KS}_m \times d \end{cases} \quad (\text{Eq. 16})$$

ou encore sous forme canonique :

Minimiser d sous :

$$\begin{cases} \text{KI}_1 \times d + f_1(\delta P_l, \delta P_j, \delta P_k) \geq (\text{Cible}_1 - C_1^n) \\ \text{KS}_1 \times d - f_1(\delta P_l, \delta P_j, \delta P_k) \geq (-\text{Cible}_1 + C_1^n) \\ \text{KI}_i \times d + f_i(\delta P_l, \delta P_j, \delta P_k) \geq (\text{Cible}_i - C_i^n) \\ \text{KS}_m \times d - f_m(\delta P_l, \delta P_j, \delta P_k) \geq (-\text{Cible}_m + C_m^n) \end{cases} \quad (\text{Eq. 17})$$

Ce problème d'optimisation a toujours une solution puisque d peut être augmenté à l'infini. C'est là un avantage pratique intéressant.

Il existe de nombreux codes d'optimisation sous contraintes. Dans le logiciel COSELECT 2.0 le modèle variationnel direct est forcément linéaire et nous utilisons l'algorithme d'optimisation linéaire de Dantzig bien plus efficace qu'un algorithme général dans ce cas.

4.4.3 Prise en compte du classement des paramètres de réglage

La deuxième idée-force de COSELECT, et qui en a même motivé la mise au point, est de permettre à l'utilisateur de définir un ordre préférentiel d'utilisation des paramètres du réglage du procédé, afin, par exemple, d'utiliser en priorité les paramètres les plus faciles à régler et n'utiliser les autres que si c'est absolument nécessaire pour remettre toutes les caractéristiques dans leurs limites de contrôle.

Pour cela, les paramètres sont classés dans des groupes numérotés. Ainsi le groupe 1 est celui des paramètres à utiliser prioritairement. S'ils ne permettent pas de remettre les caractéristiques dans leur limites de contrôle, c'est-à-dire si la résolution du problème d'optimisation donne une distance réduite d supérieure à 1, alors un nouveau problème d'optimisation est formé avec les paramètres du groupe 1 et ceux du groupe 2. Ainsi de suite jusqu'à ce qu'une solution de réglage soit trouvée ou bien que cet algorithme itératif ait épuisé tous les groupes et donc tous les paramètres.

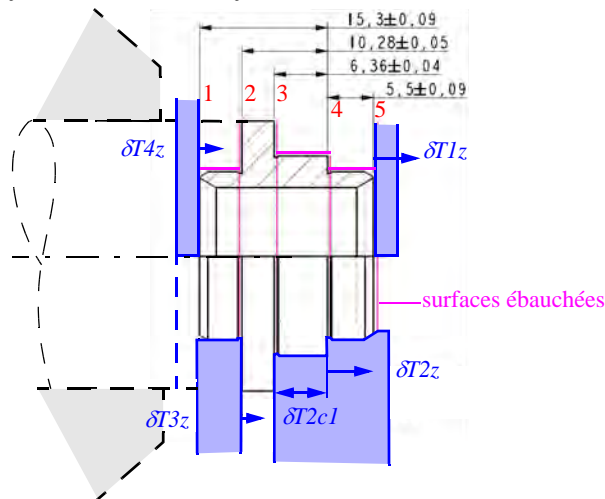
Bien que cela ne devrait pratiquement pas se produire, il se peut que même l'ensemble des paramètres ne permettent pas de remettre toutes les caractéristiques dans leurs limites de contrôle. Dans ce cas, le résultat de la dernière optimisation donne une valeur d supérieure à 1, ce qui signifie qu'au moins une caractéristique sera en-dehors de ses limites de contrôle après le réglage calculé. Cependant, d étant minimal, ce réglage minimise le dépassement des limites. d donne alors, en proportion de l'intervalle entre les limites, le dépassement qui, s'il est faible, pourra être accepté, d'autant que les limites de tolérances sont bien au-delà des limites de contrôle.

4.5 Simulation du pilotage par COSELECT d'un procédé industriel

4.5.1 Présentation du procédé industriel et de son modèle variationnel direct

Nous reprenons l'exemple industriel introduit dans [8] (voir figure 34).

Figure 34 : Cotes finies et outils de finition.



Il s'agit d'une pièce usinée en décolletage. Seuls les outils de finition sont représentés sur la figure. Ce sont des outils de fonçage, c'est-à-dire qu'ils usinent la pièce en se déplaçant radialement par rapport à elle. Ils sont numérotés dans l'ordre chronologique de leur intervention :

- T1 finit la face numérotée (5) ;
- T2 finit les faces (3) et (4) ;
- T3 finit (2) ;
- et T4 tronçonne la pièce de la barre et finit la face (1).

Les caractéristiques C_i du produit sont les cotes nommées par leurs valeurs nominales : 15.3, 10.28, 6.36 et 5.5 (voir figure 34).

Les paramètres P_j du procédé sont les correcteurs d'outils. Les correcteurs de position, notés δT_{iz} , sont représentés sur le dessin de la pièce dans le sens de leur déplacement positif (voir figure 34). Pour l'outil T2, qui réalise deux faces, le correcteur de position a été

« posé » sur la face (4). Il possède aussi une cote-outil $T2c1$ qui peut être réglée par affûtage. $\delta T2c1$ est donc aussi un correcteur même s'il est beaucoup plus difficile à modifier que les autres.

Selon la méthode COPILOT-PRO, présentée en section 1.4, le dessin permet de voir qu'un déplacement $\delta T2z$ de T2 va augmenter de la même quantité les cotes 15.3 et 10.28 et diminuer la cote 5.5. La cote de 6.36 est insensible à ce déplacement. Le modèle obtenu est donc un modèle linéaire qui peut être représenté sous la forme matricielle suivante :

$$[\delta C] = [E] \cdot [\delta P] \quad (\text{Eq. 18})$$

où $[E]$ est la matrice d'incidence des paramètres sur les caractéristiques. Elle est donnée en figure 35 ci-dessous.

Figure 35 : Matrice d'incidence $[E]$ des correcteurs sur les cotes finies.

	T1z	T2z	T3z	T2c1	T4z
15.3	0	1	0	0	-1
10.28	0	1	-1	0	0
6.36	0	0	0	1	0
5.5	1	-1	0	0	0

Cette matrice d'incidence n'est ni inversible ni pseudo-inversible puisque qu'il y a davantage de correcteurs que de caractéristiques à corriger. Cela signifie qu'il existe une infinité de solutions de réglage pour corriger les écarts sur les cotes. Cela serait plutôt un avantage sur la plupart des procédés mais en usinage cela peut conduire à un déplacement de l'ensemble des outils vers la gauche, c'est-à-dire vers la mandrin en rotation et donc à la collision de l'outil de tronçonnage avec celui-ci. C'est pour cette raison qu'en pratique les régleurs ne modifient pas le réglage de l'outil de tronçonnage mais seulement les autres. Nous figurons donc le correcteur T4z dans la suite.

4.5.2 Mise en place de la simulation

La simulation de production a été réalisée grâce au classeur EXCEL® réalisé par Maurice Pillet. Nous avons simulé une usure des outils à laquelle s'ajoute une dispersion aléatoire instantanée des cotes « fabriquées ».

Le tableau 6 donne la dérive imposée à chaque pièce pour chaque outil.

T1 est la butée escamotable : elle n'a évidemment pas de dérive par usure.

Par ailleurs, nous avons fixé à un micron l'écart-type de dispersion aléatoire de chaque cote.

Tableau 6 : Lois d'usure supposées des outils.

Correcteur outil	Dérive / pièce (μm)
T1z	0
T2z	0,1

Correcteur outil	Dérive / pièce (μm)
T3z	0,6
T2c1	- 0,4
T4z	0,4

Avec ces paramètres, les figures suivantes montrent la dérive des cotes lorsqu'aucun réglage des outils n'est réalisé ; d'abord sur les 30 premières pièces (figure 36) ; puis sur les 150 dont elles font parties (figure 37).

Figure 36 : Variations des cotes sur les 30 premières pièces.

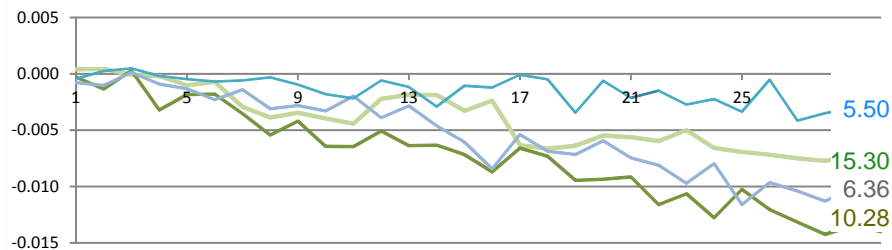
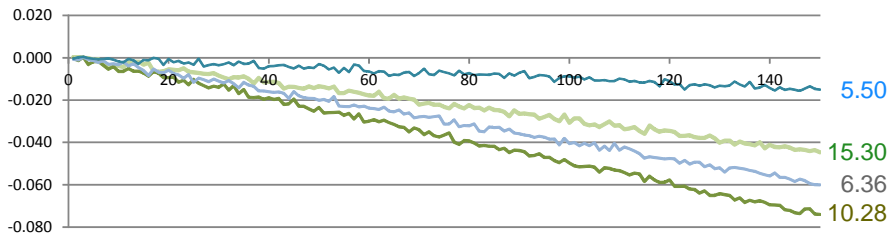


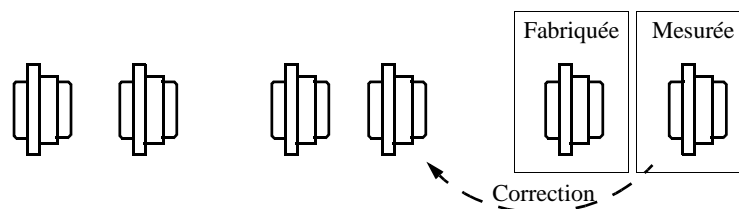
Figure 37 : Variations des cotes sur les 150 pièces.



A partir de la 101^e pièce, la cote de 6.36 sort de ses limites de tolérance qui sont de $\pm 0,040$ mm. Les autres sont encore dans leurs limites de tolérance mais en sortiront, les unes après les autres, à partir de la 180^e pièce environ.

Nous supposons que le mesurage d'une pièce se fait pendant que la suivante est en train d'être usinée. Le réglage des outils ne pourra donc s'appliquer que sur la troisième pièce. La période de réglage est donc de 2 (voir figure 38).

Figure 38 : Période de 2 utilisée pour la simulation.



En pratique c'est une période minimale car la transitique entre la machine-outil et le moyen de production peut contenir aussi d'autres pièces ce qui allonge encore la période (voir figure 31). Il faut bien entendu essayer d'avoir la période la plus petite pour pouvoir compenser au plus vite la dérive des cotes. Sur le simulateur, nous allons donc produire par

paquets de deux et mesurer, sur chacun, la première produite pour en déduire le réglage éventuel qui s'appliquera au paquet suivant.

4.5.3 Pilotage avec la matrice de pilotage (pseudo-inverse de la matrice d'incidence partielle)

Il n'est pas possible en pratique de corriger le correcteur de forme T2c1 toutes les deux pièces car cela nécessiterait le changement de l'outil ou son ré-affûtage. C'est pourquoi, le pilotage par la matrice de pilotage, c'est-à-dire la pseudo-inverse de la matrice d'incidence partielle, interdit de pouvoir prendre en compte un correcteur de ce type.

Avec le correcteur de position T4z, également figé, la matrice d'incidence partielle n'a alors plus que trois colonnes pour quatre lignes, dont une nulle (voir figure 39). En effet la cote de 6.36 ne dépend que de T4z. On ne pourra donc pas corriger cette cote qui va dériver (voir figure 41 et figure 42). En pratique il faudra donc prévoir une procédure de surveillance et de correction complémentaire et spécifique de cette cote, ce qui alourdira le travail des opérateurs. Nous verrons que COSELECT n'a pas cet inconvénient.

Figure 39 : Sous-matrice d'incidence partielle.

	T1z	T2z	T3z
15.3	0	1	0
10.28	0	1	-1
6.36	0	0	0
5.5	1	-1	0

La figure 40 donne la pseudo-inverse de la matrice d'incidence partielle.

Figure 40 : Matrice de pilotage (pseudo-inverse de la matrice d'incidence partielle).

	15.3	10.28	6.36	5.5
T1z	1	0	0	1
T2z	1	0	0	0
T3z	1	-1	0	0

Les figures 41 et 42 montrent que les corrections ont permis de supprimer la dérive des cotes 15.3, 10.28 et 5.5. Seule la cote de 6.36, qui ne peut pas être corrigée, dérive.

Figure 41 : Résultat des réglages par le modèle pseudo-inverse sur les 30 premières pièces.

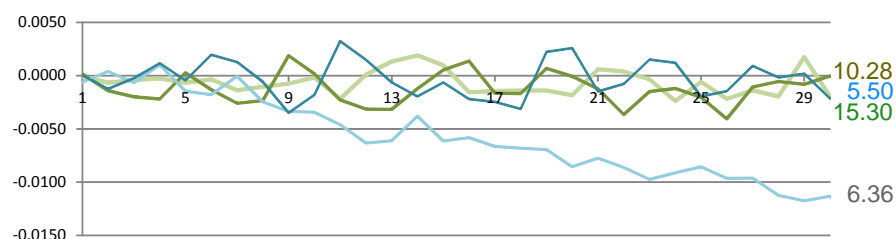
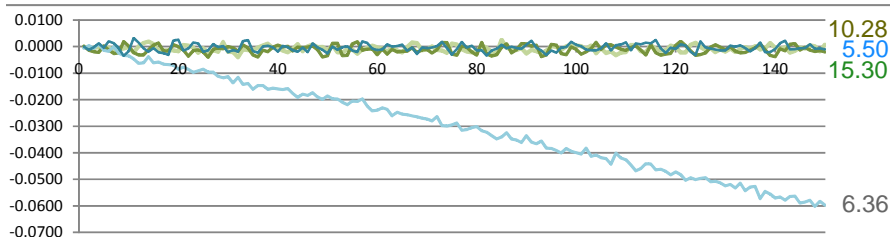


Figure 42 : Résultat des réglages par le modèle pseudo-inverse sur les 150 pièces.



4.5.4 Pilotage par COSELECT

Comme pour le pilotage avec la matrice de pilotage, le correcteur de l'outil de tronçonnage T4z va être figé. Cela se fait en le classant dans le groupe 0 (voir l'interface partielle de COSELEC 2.0 sur figure 43).

Le correcteur de forme T2c1 a été classé dans un groupe 2 pour n'être utilisé que si les correcteurs de position du groupe 1 ne suffisent pas à remettre toutes les cotes dans leurs limites de contrôle. Pour retarder le plus possible son réglage, les limites de contrôle de la cote 6.36, qu'il affecte, ont été élargies le plus possible étant donnée la dispersion aléatoire de la cote. Elles sont à $\pm 35 \mu\text{m}$ alors que celles des autres cotes sont à $\pm 3 \mu\text{m}$ (3 fois l'écart type d'un micron ; voir colonnes LimContInf et LimContSup de l'interface partielle sur la figure 44).

Figure 43 : Configuration des correcteurs dans COSELECT 2.0.

Nom	T1z	T2z	T3z	T2c1	T4z
Niveau	1	1	1	2	0
Plafond	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000
Correctio...	-0.0097	-0.0060	-0.0111	0.0000	0.0000
► Etat	Utilisé	Utilisé	Utilisé	Inutilisé	Désactivé
15.3	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	-1.0000
10.28	0.0000	1.0000	-1.0000	0.0000	0.0000
6.36	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000
► 5.5	1.0000	-1.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Figure 44 : Configuration des cotes dans COSELECT 2.0.

Nom	LimTolInf	LimContInf	Cible	LimContS...	LimTolSup	Nb mesures	Val mesurée
15.3	-0.0900	-0.0030	0.0000	0.0030	0.0900	1	0.0061
10.28	-0.0500	-0.0030	0.0000	0.0030	0.0500	1	-0.0052
6.36	-0.0400	-0.0350	0.0000	0.0350	0.0400	1	-0.0010
5.5	-0.0900	-0.0030	0.0000	0.0030	0.0900	1	0.0038

Les figures 45 et 46 donnent l'évolution des cotes sur les 30 premières pièces puis sur les 150. Les cotes de 15.3, 10.28 et 5.5 n'ont plus de dérive.

Seule la cote de 6.36 dérive comme souhaitée mais elle est corrigée par réglage de T2c1 au bout de 85 pièces quand sa valeur est inférieure à sa limite de contrôle inférieure.

On pourrait bien sûr allonger encore la période entre deux réglages de ce correcteur en visant une cible supérieure pour la cote de 6.36 ; par exemple +0.033 mm. Ainsi la pente de la dérive serait plus longue. Evidemment cela augmenterait aussi la dispersion globale de la cote. Il y a donc là un arbitrage ou un compromis à trouver en tenant compte aussi de l'usure

maximale admissible réelle de l'outil qui peut nécessiter un changement ou un ré-affûtage sur une période plus courte.

Figure 45 : Résultat des réglages par COSELECT sur les 30 premières pièces.

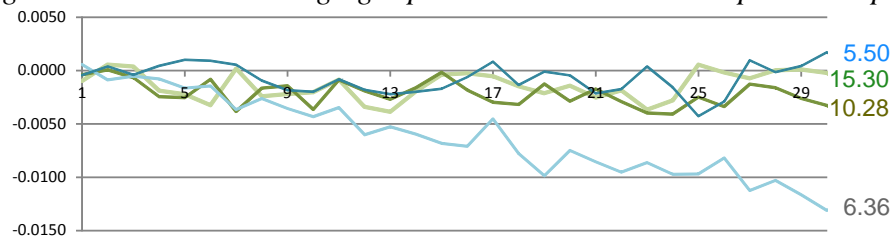
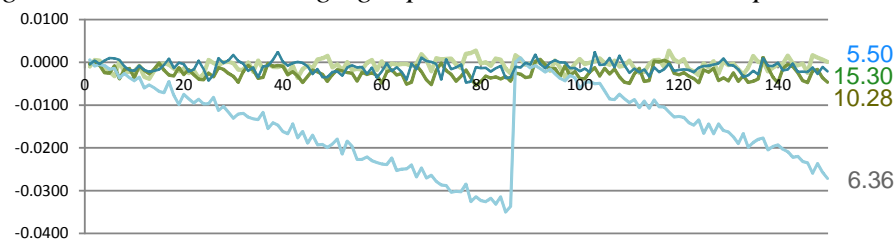


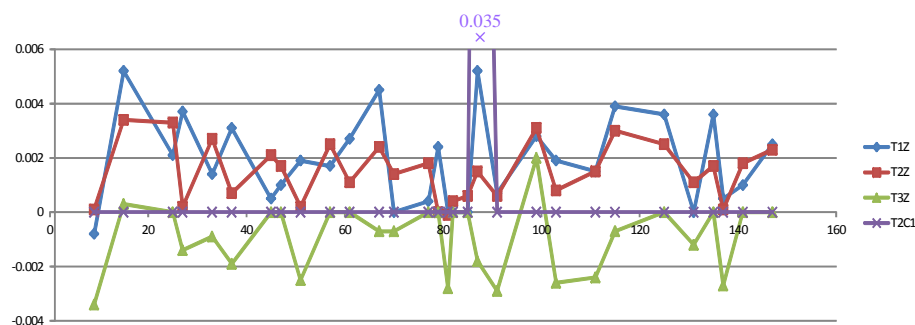
Figure 46 : Résultat des réglages par COSELECT sur les 150 pièces.



4.5.5 Comparaison des performances des deux pilotages

COSELECT a déclenché 30 réglages alors que la pseudo-inverse en a fait 75 (150 divisé par 2). En effet les 45 autres pièces mesurées avaient leurs cotes dans les limites de contrôle et n'ont donc pas déclenché de réglage par COSELECT. De plus, lors des réglages, certains correcteurs n'ont pas été modifiés. Cela peut être observé sur la figure 47, tout particulièrement pour le correcteur T3z. COSELECT peut donc être utilisé en réglage manuel alors que la pseudo-inverse ne le peut pas en pratique, en tout cas avec des périodes courtes.

Figure 47 : Les trente réglages des correcteurs par COSELECT.

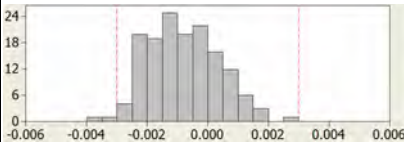
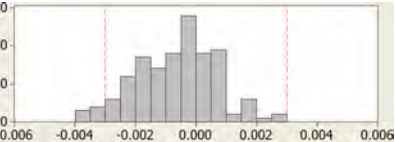
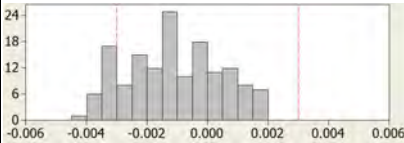
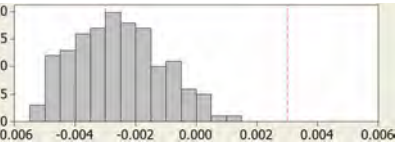
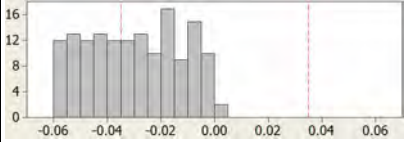
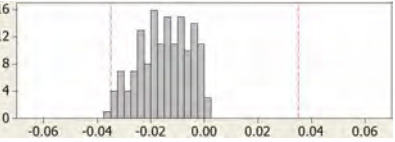
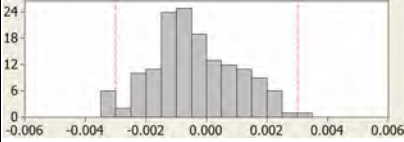
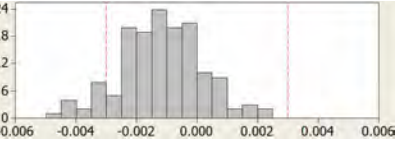


Malgré un nombre de réglages plus de deux fois inférieur au nombre de réglage par la pseudo-inverse, les « qualités » des cotes « fabriquées » par COSELECT et par la pseudo-inverse sont très similaires. La comparaison des moyennes et des écart-types expérimentaux dans le tableau 7 ci-dessous permet de dire que COSELECT ne disperse pas plus que la pseudo-inverse mais, par contre, peut décentrer davantage. C'est en particulier le cas pour la cote de 10.28.

Ce n'est cependant pas rédhibitoire puisqu'il suffit de déplacer, à l'opposé de la moyenne obtenue, la cible de chaque cote pour que les prochaines productions soient centrées dans les intervalles de tolérance si c'est nécessaire.

Sur les histogrammes du tableau 7, les limites de contrôle ont été tracées en pointillés. Elles sont nettement en-deçà des limites de tolérance (sauf pour la cote de 6.36 qui a des limites de contrôle élargies). Aucune des 150 pièces n'est hors tolérance avec COSELECT.

Tableau 7 : Histogramme, écart type expérimental s et moyenne m de chaque cote.

	Pseudo-inverse	CoSelect
15.3		
s	0,0012	0,0013
m	-0,0008	-0,0006
10.28		
s	0,0015	0,0014
m	-0,0011	-0,0026
6.36		
s	0,0174	0,0093
m	-0,0299	-0,0149
5.5		
s	0,0014	0,0014
m	-0,0004	-0,0012

4.6 Conclusion sur COSELECT

Le réglage statistique et sélectif que nous proposons fusionne la surveillance SPC avec la régulation des procédés discrets, en apportant d'importants avantages sur les techniques existantes :

- Il utilise des cartes de contrôle mono-caractéristiques bien connues dans l'industrie contrairement aux cartes multi-caractéristiques ;

- Les paramètres de réglage sont tous pris en compte, même les plus compliqués ou les plus coûteux, grâce au classement préférentiel. En pratique cet avantage est très important en usinage car d'une part, il permet d'augmenter la durée d'utilisation des outils et, d'autre part, il permet au régleur de la machine d'intervenir sur ce classement selon ses besoins ;

- Le modèle direct du procédé peut être de n'importe quelle forme et non-linéaire, puisque la méthode proposée ne repose pas sur une technique d'optimisation particulière. Il faut simplement utiliser l'algorithme adapté au modèle direct ;

- Les performances en termes de dispersion globale et de moyennes sur les caractéristiques d'une production sont très similaires à celles obtenues par les techniques de pilotage basées sur le critère des moindres carrés, les plus courantes ;

- Le nombre de réglages est beaucoup plus faible que par la procédure systématique de réglage, ce qui, d'un point de vue pratique, permet d'utiliser cette méthode pour des procédés réglés manuellement ;

- Enfin, l'implémentation informatique est très simple, si l'on dispose d'un algorithme d'optimisation.

COSELECT est une méthode générale de réglage d'un procédé, voire d'un produit. En effet, elle pourrait peut-être aussi être utilisée en conception de produit, puisque, dans ce domaine aussi, certains paramètres de conception doivent être ajustés pour optimiser les caractéristiques du produit conçu, qui sont mesurées et présentent donc de la dispersion et un domaine de validité propre à chacun.

5 De la cotation au pilotage : conclusions

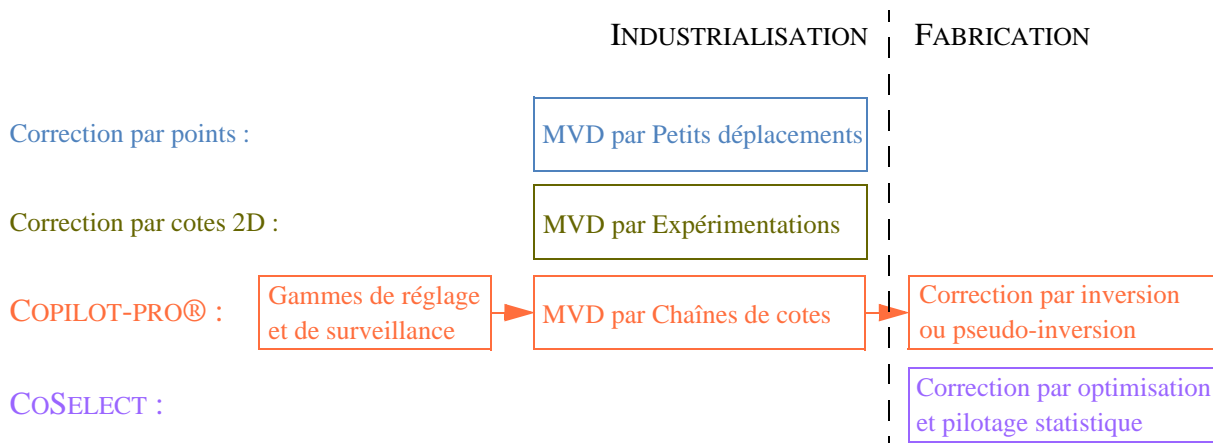
La méthodologie COPILOT-PRO® consiste à dérouler des méthodes particulières pour réaliser les deux étapes d'industrialisation et l'étape de fabrication, c'est-à-dire :

- 1 la génération des gammes de réglage et de surveillance ;
- 2 la génération du modèle variationnel direct, nommé, plus simplement, MVD dans la suite ;
- 3 et la correction du procédé par utilisation inverse du MVD.

Ces étapes sont en fait indépendantes et modulaires : en effet, il est tout à fait possible, par exemple, de générer les gammes (étape 1), puis de construire un MVD de correction par points pour chacune des phases de fabrication des gammes (étape 2), et enfin d'utiliser ces MVD dans COSELECT.

La figure suivante positionne chacune des méthodes, présentées dans ce chapitre, dans les trois étapes de COPILOT-PRO® pour montrer qu'elles peuvent se remplacer sans remettre en cause la méthodologie COPILOT-PRO® qui définit la trame générale.

Figure 48 : Présentation modulaire des méthodes présentées dans ce chapitre.



Le CETIM-CTDEC, en la personne d'Ephraïm Goldschmidt notamment, a bien compris l'intérêt de cette vision modulaire et développe actuellement un progiciel de pilotage de cellule flexible d'usinage, permettant d'enchaîner l'appel de modules de calcul interchangeables.

Comme nous l'avons déjà vu, seules la correction par cotes 1D et la pseudo-inversion sont actuellement utilisés par quelques entreprises de Haute-Savoie et de Suisse. La correction par points, le pilotage par COSELECT n'ont pas encore été expérimentés réellement. Pour cela, il faut d'abord disposer des modules logiciels capables de s'échanger leurs données pour dérouler, le plus automatiquement possible, les trois étapes de COPILLOT-PRO®. Je me suis engagé à aider le CETIM-CTDEC dans ce but. Par ailleurs il faudra aussi disposer de supports de formation et un ouvrage de référence, que j'espère pouvoir écrire rapidement.

Reste aussi à appliquer ces méthodes aux autres procédés manufacturiers et notamment à l'injection plastique qui fournit une proportion considérable de produits manufacturés. C'est un de nos objectifs dans le cadre du projet de recherche SAPRISTI, pour « Système Autocorrectif pour la PROduction zéro défaut de pièces plaSTIques » qui a démarré début septembre 2016 et qui présente des problématiques que nous n'avons pas encore rencontrées : celle d'un produit non immédiatement mesurable pour régler le procédé du fait de sa stabilisation géométrique lente et celle d'une variété très importante de paramètres procédé.

CHAPITRE 2

De la vérification à la spécification géométrique

1 Vérification géométrique par CALIBRES AJUSTANTS

1.1 Etat de l'art de la vérification géométrique

Nous distinguons deux métrologies géométriques :

- la métrologie par instruments ;
- la métrologie par coordonnées.

La métrologie par instruments regroupe tous les procédés de mesure ou de contrôle donnant directement le résultat de mesure sans nécessiter de calcul particulier. Les instruments de mesure traditionnels, tels que les pieds à coulisse ou les micromètres, permettent cette métrologie, mais aussi les calibres à limites.

La métrologie par coordonnées nécessite des calculs pour obtenir un résultat à partir des coordonnées de points scannés¹ à la surface des produits manufacturés. Elle s'appuie sur des machines de mesure de coordonnées bidimensionnelles ou tridimensionnelles. La plus connue de ces machines est la *machine de mesure tridimensionnelle* ; ou MMT, aussi appelé CMM en anglais pour Coordinate measuring machine ; à laquelle est nécessairement associée un ordinateur et un logiciel de calculs tridimensionnels.

Il existe, aujourd'hui, probablement une dizaine de progiciels de métrologie tridimensionnelle ; mais tous utilisent la même démarche fondamentale pour aboutir à un résultat de mesure qui consiste, dans l'ordre, à :

1 **identifier** individuellement des *surfaces élémentaires* de l'objet mesuré ; c'est-à-dire à ajuster mathématiquement une surface théorique parfaite au nuage de points scannés sur

1. On dit aussi palpés, mais ce terme suggère un contact ; or il existe de plus en plus de machines qui scannent sans contact.

une des surfaces de l'objet ; ces surfaces sont positionnées dans l'espace par des éléments géométriques élémentaires qui sont le point, la droite et le plan, et qui sont maintenant appelées, par la norme ISO 5459 de 2011¹, les *éléments de situation*. Par exemple, un cylindre de révolution est positionnée par une droite qui est son axe ;

2 **construire** de nouveaux éléments géométriques élémentaires de type point, droite, plan, par projection, intersection ou construction contrainte, de ceux déjà existant ;

3 **mesurer** des distances entre les éléments géométriques élémentaires ou entre un élément géométrique élémentaire et un ou plusieurs points scannés.

Cette démarche a de nombreux inconvénients :

- elle laisse une trop grande liberté à l'utilisateur du progiciel qui aboutit à des résultats différents entre utilisateurs sur le même objet mesuré !
- elle ne permet qu'un contrôle dégradé de nombreuses tolérances géométriques indiquées sur les dessins techniques en particulier lorsqu'elles n'ont pas de référence ou alors des références laissant des mobilités à la zone de tolérance définie par la tolérance géométrique. Cela signifie que le mesurage que permet cette démarche est trop contraignant et conduit à exagérer l'écart mesuré et donc, potentiellement, à déclarer non conforme un objet pourtant conforme;
- enfin, elle est totalement incompatible avec le contrôle direct des surfaces, tel qu'il peut être fait par calibre physique. C'est d'ailleurs ce dernier point qui a motivé, à l'origine, le développement de la théorie des CALIBRES AJUSTANTS.

1.2 Théorie des CALIBRES AJUSTANTS

1.2.1 Préambule

Plutôt que de « modèle des calibres ajustants », il me paraît plus juste de parler de théorie, car un modèle est une représentation de la réalité et, en l'espèce, les calibres ajustants ne modélisent aucune réalité, même s'ils peuvent représenter virtuellement des calibres réels. Ils sont d'abord un ensemble de définitions, de règles et de propriétés.

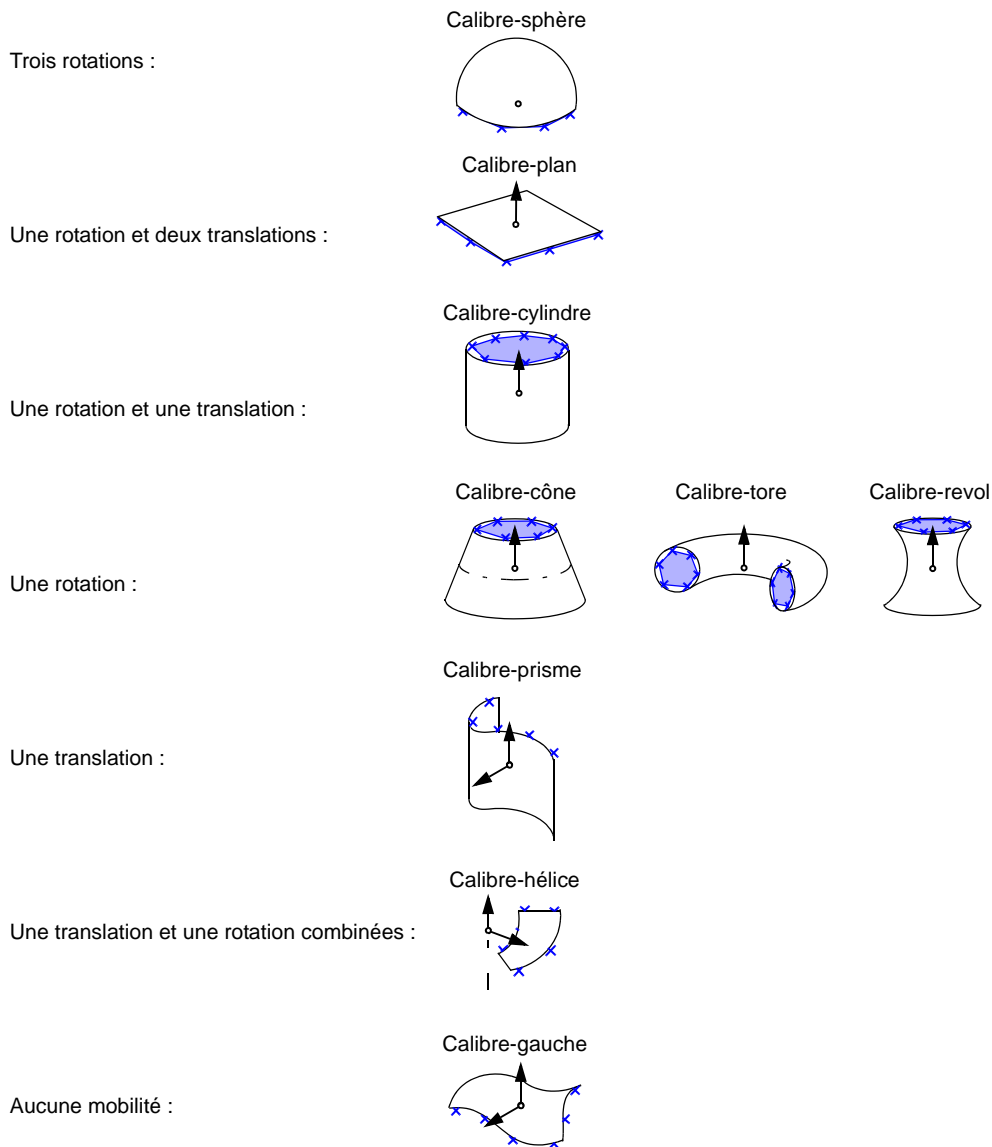
J'ai défini les bases de cette théorie pendant ma thèse puis je l'ai enrichi en 2006, à l'occasion de la programmation informatique de l'actuelle version de GÉO VériF.

La présentation qui en est faite ici est nouvelle et permettra une future publication.

1. NF EN ISO 5459 novembre 2011, Spécification géométrique des produits (GPS) - Tolérancement géométrique - Références spécifiées et systèmes de références spécifiées

1.2.2 Base de calibres élémentaires

Figure 49 : Les neuf calibres élémentaires (représentés schématiquement en noir avec leur nuage de points en bleu).



La théorie des calibres ajustants repose actuellement sur une base de neuf *calibres élémentaires* qui définissent neuf types de *nuage de points* auxquels ils sont *associés* (voir figure 49). Organisés suivant les sept classes de surface¹, ces calibres sont :

- le *Calibre-sphère* ;
- le *Calibre-plan* ;
- le *Calibre-cylindre* ;
- le *Calibre-cône*, le *Calibre-tore* et le *Calibre-révol* dont la surface ne peut être segmentée en plan, cône ou tore ;

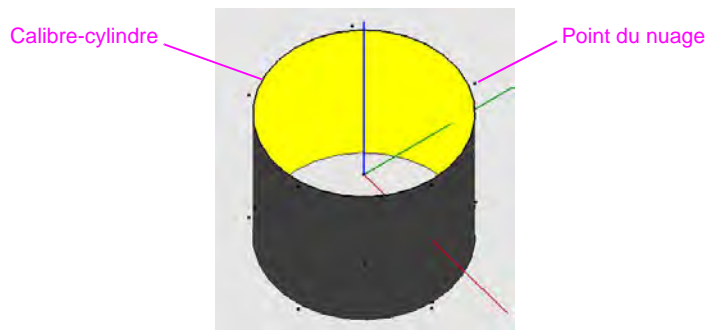
1. A. CLÉMENT, A. RIVIÈRE, M. TEMMERMAN, « Cotation tridimensionnelle des systèmes mécaniques. Théorie & Pratique », PYC ÉDITION 1994.

- le *Calibre-prisme* ;
- le *Calibre-hélice* ;
- et le *Calibre-gauche* dont la surface ne peut être segmentée en calibres des autres types.

Le nuage de points représente, normalement, une partie de la surface réelle d'un objet physique. Il peut être aussi un ensemble de points issus d'une construction CAO ou d'une simulation par éléments finis, par exemple. Dans tous les cas, le nuage est orienté, c'est-à-dire que le côté matière est connu. Dans GÉOVÉRIF il l'est par la donnée d'un point dans le vide au-dessus du premier point du nuage, les points étant ordonnés arbitrairement. Le nombre minimal de points dépend du type de nuage; par exemple pour un plan il est de trois ; mais il n'y a pas de nombre maximal.

Le calibre est lui aussi orienté : une de ses faces représente l'extérieur-matière de l'objet. Dans GÉOVÉRIF elle est colorée tandis que la face représentant l'intérieur-matière est grisée (voir figure 50). La couleur dépend du **comportement** du calibre. Cet attribut est expliqué plus loin.

Figure 50 : Calibre-cylindre associé à un nuage de points représentant un trou (capture d'écran de GÉOVÉRIF).



Sur cette capture d'écran de GÉOVÉRIF, comme sur toutes les prochaines, les calibres sont limités pour pouvoir être affichés mais en fait seuls les nuages de points sont, de fait, limités ; les surfaces des calibres sont, elles, illimitées.

1.2.3 Identification des surfaces élémentaires d'un objet

Dans GÉOVÉRIF, à chaque nuage de points d'un objet, réel ou virtuel, est *ajusté* un calibre élémentaire. Ses dimensions, s'il en a, sont variables sauf pour les calibres révol, prisme, hélice et gauche, dont les dimensions sont multiples et dont la variabilité resterait à étudier.

Un critère d'ajustement lui est affecté. Ce critère consiste à préciser, d'une part la situation de la surface par rapport aux points vis-à-vis de la matière : à l'extérieur, au milieu ou à l'intérieur des points ; et d'autre part la « distance » à minimiser vis-à-vis des points.

Actuellement GÉOVÉRIF propose trois critères d'ajustement :

- le **critère des moindres carrés** : la surface est au « milieu » des points, vis-à-vis de la matière, et minimise la somme des carrés de leurs distances : $\Sigma(e_i)^2$. Aussi nommé critère de Gauss, c'est le critère par défaut de tous les progiciels de métrologie et presque le seul à être utilisé par les métrologues dans les entreprises.

- le **critère du défaut de forme mini** : dans GÉOVÉRIF la surface est à l'extérieur des points, vis-à-vis de la matière, et minimise la distance maximale avec eux : e_iMax avec $e_i \geq 0 \quad \forall i$. Ce critère est proposé par la plupart des progiciels de métrologie, souvent en « milieu matière » plutôt qu'en extérieur. Il est aussi appelé **critère minmax**, ou **de Tchebychev**. C'est le critère normalisé pour prendre en référence une surface plane.

- le **critère du volume minimal** : la surface est à l'extérieur des points, vis-à-vis de la matière, et minimise la somme de leurs distances : Σe_i avec $e_i \geq 0 \quad \forall i$. Il a été initialement proposé par un chercheur américain¹ en 1983 pour l'établissement des références en tolérancement géométrique. J'ai démontré, dans ma thèse de doctorat [18] en 1995, que, d'une part, il pouvait s'interpréter comme une minimisation du volume entre la surface ainsi ajustée et la surface scannée, ce qui justifie le nom que je lui donne depuis, et d'autre part qu'il généralisait le critère, proposé par un chercheur français², en 1987, de la taille minimale ou maximale pour ajuster une **entité dimensionnelle** linéaire telle qu'une sphère, un cylindre. Ce critère de taille minimale/maximale est normalisé par l'ISO 5459 de 2011³ pour établir les références des entités dimensionnelles linéaires. C'est le premier critère que j'ai développé pour les calibres ajustants car il me paraissait être le plus proche de l'ajustement physique d'une surface présentant des défauts de forme avec une surface presque parfaite telle que celle d'une table de métrologie. Il a cependant l'inconvénient de ne pas fournir un ajustement unique dans certaines situations comme, par exemple, l'ajustement d'un cylindre à une surface légèrement conique : une fois le cylindre de taille minimale en contact avec le cône, il peut prendre plusieurs orientations sans que cela ne modifie le volume entre-eux (au premier ordre). L'idéal, dans cette situation, serait alors de rechercher l'orientation qui minimise la plus grande des distances avec les points. Ce développement reste à faire.

Sur une surface parfaite, ou tout du moins un nuage de points représentant une surface parfaite, ces trois critères donnent la même surface ajustée. En revanche sur une surface à forts défauts de forme, les surfaces, ajustées par chacun des trois critères, diffèrent notablement. A titre d'exemple, nous avons ajusté trois calibre-cylindres sur le même nuage de points représentant un trou simulé avec un lobe vers les X positifs (voir figure 51). Le critère du volume minimal, Σe_i , donne un cylindre mieux centré dans le trou que e_iMax et ayant le diamètre maximal entrant dans le trou. Le critère des moindres carrés, $\Sigma(e_i)^2$, donne un cylindre encore plus grand et moins décentré que e_iMax qui est « tiré » par le lobe.

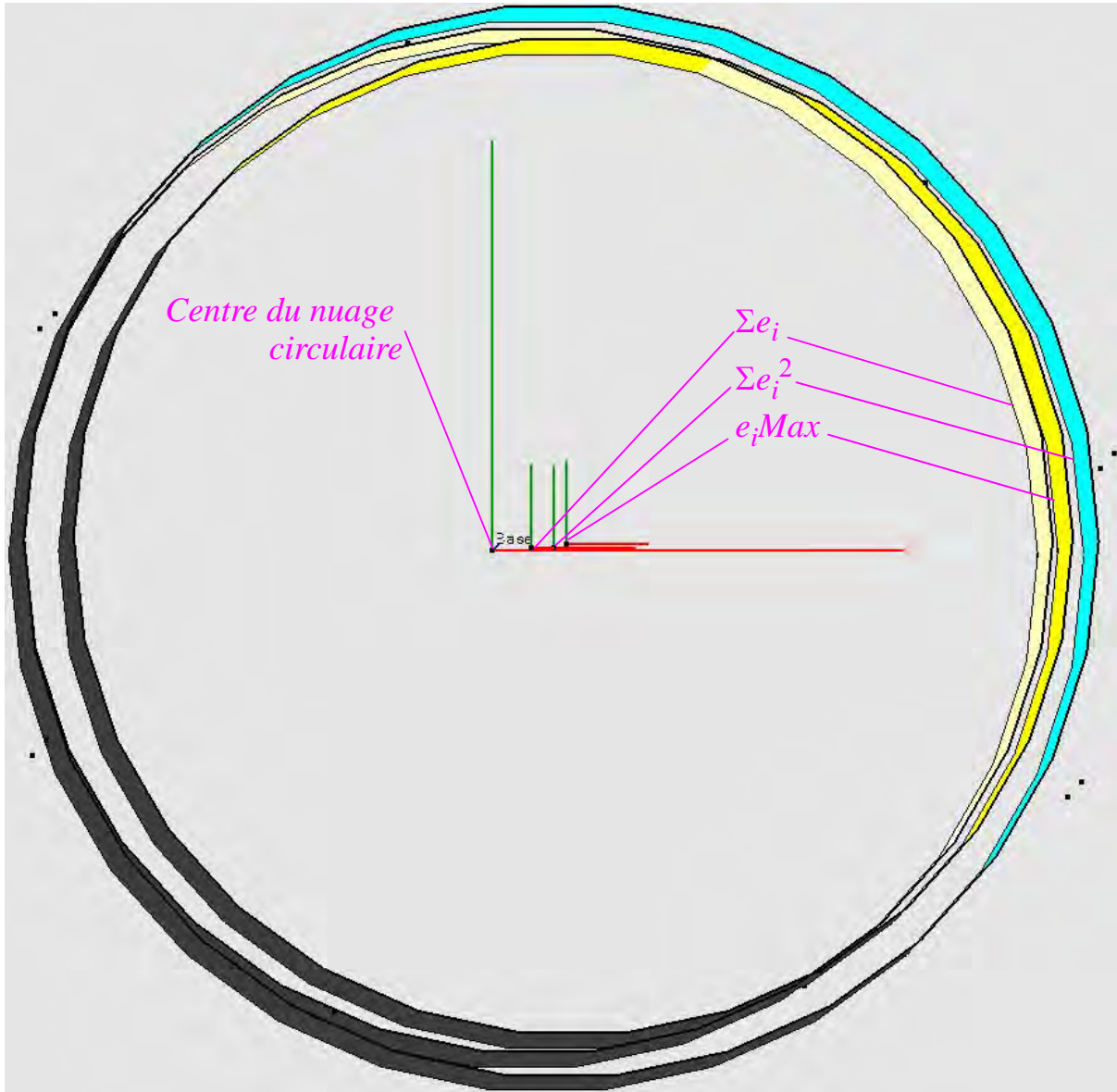
1. A.A.G. Requicha, « Towards a theory of Geometrical Tolerancing »; The International Journal of Robotics Research, Vol. 2, No. 4, 1983

2. P. Bourdet, « Contribution à la mesure tridimensionnelle : Modèle d'identification géométrique des surfaces ; Métrologie fonctionnelle des pièces mécaniques ; Correction géométrique des machines à mesurer tridimensionnelles »; Thèse de l'université de Nancy I (France), 1987.

3. NF EN ISO 5459 novembre 2011, Spécification géométrique des produits (GPS) - Tolérancement géométrique - Références spécifiées et systèmes de références spécifiées

Quel que soit le critère, et donc l'ajustement obtenu, le calibre élémentaire établit une liaison avec le nuage de points dont les mobilités laissent sa surface invariante.

Figure 51 : Calibres-cylindres ajustés, suivant chacun des critères proposés par GÉOVÉRIF, à un trou simulé présentant un lobe vers les X positifs (axe rouge).



1.2.4 Construction d'un calibre composé

Chaque calibre élémentaire est muni d'un repère orthonormé direct permettant de le situer dans l'espace, soit par rapport au repère de référence des nuages de points, soit par rapport au repère d'un autre calibre quand il est utilisé comme composant. La figure 49 donne la direction principale Z de chaque calibre élémentaire et éventuellement la direction secondaire Y.

En effet, à partir des calibres élémentaires ajustés aux nuages de points, il est possible d'en créer des copies, associées aux mêmes nuages de points que les originaux, et de mettre ces copies en positions parfaites entre eux dans un repère unique de construction. La construction

ainsi obtenue est appelée un **calibre composé** et le repère de construction, le **repère du calibre composé**. Ce calibre composé va, à son tour, s'ajuster aux nuages de points de ses composants. Une fois ajusté il pourra alors être copié pour créer un composant d'un nouveau calibre composé et ainsi de suite. Il est ainsi possible de composer à l'infini les calibres même si, en pratique, deux niveaux de composition suffisent : les composants directs du calibre construit, dits de rang 1, et les composants de ces composants, dits composants de rang 2 pour le calibre construit. Dans la suite nous devrons parfois faire référence au rang d'un composant.

1.2.5 Comportements Ajustant et Limitant des composants

Chaque composant d'un calibre doit avoir l'un des trois comportements suivants, vis-à-vis de son nuage ou de son groupe de nuages de points :

- **Limitant**, ou **Frontière** : le composant « cherche » juste à s'assembler avec son nuage ou son groupe de nuage de points. La ou les tailles de ces composants élémentaires sont figés ; les positions entre sous-composants normalement aussi, bien que l'on puisse les libérer (voir MOBILITES). Un tel composant est finalement soit **Assemblé**, soit **Non-assemblable**. Dans GÉOVÉRIF, ce composant a sa face extérieur-matière colorée en bleu ;
- **Ajustant** : le composant « cherche » à s'ajuster, selon le critère choisi, à son nuage ou son groupe de nuage de points. La ou les tailles de ces composants élémentaires sont normalement variables bien qu'il soit aussi possible de les figer. Les positions entre sous-composants peuvent être figées ou variables. Un tel composant est finalement soit **Ajusté**, soit **Non-assemblable**. Dans GÉOVÉRIF, ce composant a sa face extérieur-matière colorée en jaune ;
- **Ajustant-prioritaire** : le composant s'ajuste avant les composants Ajustant ou Limitant qui sont, en attendant, inhibés. La ou les tailles de ces composants élémentaires sont normalement variables bien qu'il soit aussi possible de les figer. Les positions entre sous-composants peuvent être figées ou, dans une certaine mesure, rendues variables. Comme pour le composant Ajustant, un tel composant est finalement soit **Ajusté**, soit **Non-assemblable**. Ce comportement est détaillé dans la section suivante.

Afin d'expliciter ces comportements, nous considérons toutes les combinaisons possibles sur un calibre composé de deux calibres-cylindres parallèles et d'entre-axe figé (voir figure 52 à figure 55) :

- Si les deux cylindres sont limitants (voir figure 52), le calibre composé prend une position **Assemblé** quelconque s'il le peut ou bien une position qui réduit approximativement le franchissement des surfaces par les points, s'il est **Non-assemblable**. La figure 52 montre un calibre composé non-assemblable en position réduisant les franchissements : des points sont visibles du côté des faces colorées et GÉOVÉRIF l'indique. Ce calibre non-assemblable ne pourra pas être utilisé comme composant : s'il ne peut s'assembler seul, il ne le pourra pas davantage en tant que composant. En revanche s'il pouvait s'assembler alors il pourrait être utilisé comme composant avec, vis-à-vis de ses nuages de points, six mobilités.
- Si l'un des deux cylindres est Ajustant, en jaune sur la figure 53, le calibre composé prend une **position ajustée** telle que celui-ci soit le mieux ajusté possible tenant

compte du calibre Limitant qui doit rester assemblé. L'ajustement peut donc être incomplet car limité par le calibre Limitant (d'où le nom de ce comportement). Une fois ajusté, ce calibre composé n'a plus que deux mobilités – la translation et la rotation selon l'axe du cylindre ajusté – et pourra être utilisé comme composant.

- Si les deux cylindres sont Ajustants (voir figure 54), le calibre composé prend une **position ajustée** telle que les deux cylindres soient, ensemble, le mieux ajusté possible, selon un critère unique. Une fois ajusté, ce calibre composé n'a plus qu'une seule mobilité – la translation selon les axes des cylindres – et pourra être utilisé comme composant.

Figure 52 : Calibre composé de deux cylindres limitants, non-assemblables (certains points sont du côté des surfaces colorées).

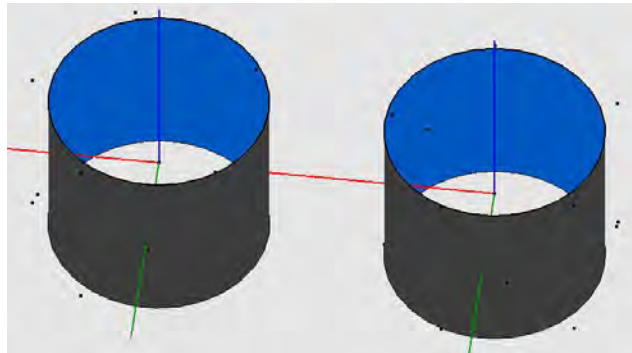


Figure 53 : Ajustement d'un calibre composé d'un cylindre Ajustant et d'un autre Limitant.

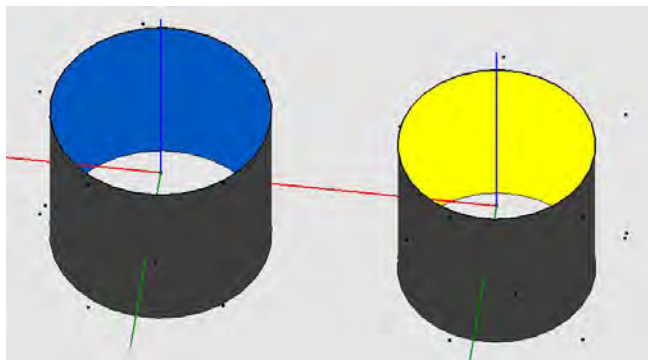
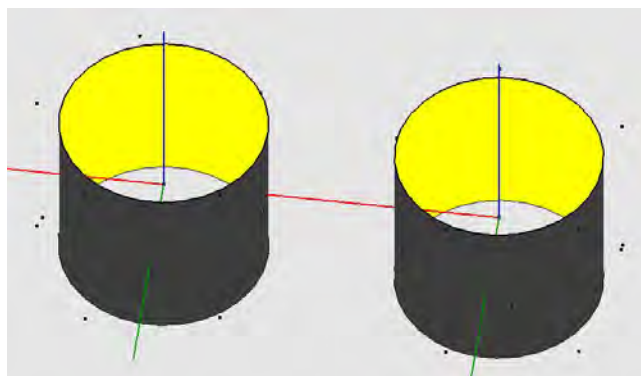


Figure 54 : Ajustement d'un calibre composé de deux Cylindres Ajustants.



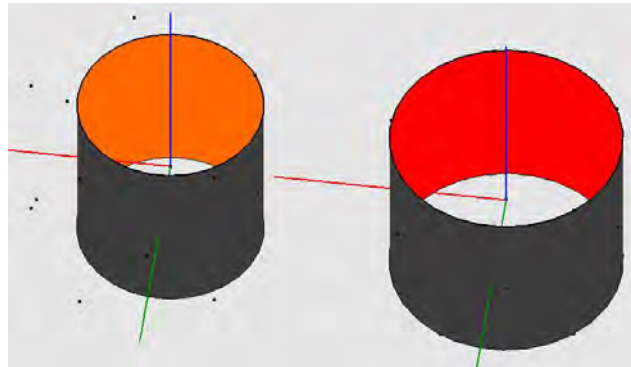
1.2.6 Comportements Ajustants-prioritaires des composants

Comme nous l'avons déjà dit, un composant Ajustant-prioritaire s'ajuste avant les autres et supprime, de fait, plusieurs mobilités du calibre composé dont il fait partie. Les mobilités restantes peuvent être réduites encore par l'ajustement d'un second Ajustant-prioritaire. On démontre qu'au plus trois composants Ajustants-prioritaires suffisent à supprimer les six mobilités d'un calibre composé. Il suffit donc de prévoir trois niveaux d'Ajustant-prioritaire :

- *Ajustant-primaire* ;
- *Ajustant-secondaire* ;
- *Ajustant-tertiaire*.

N'importe quel composant peut être Ajustant-primaire. En revanche, un autre composant ne peut être Ajustant-secondaire que si son ajustement supprime des mobilités au calibre composé (sinon cela serait inutile car sans effet sur l'ajustement des composants Ajustants ni sur l'assemblage des composants Limitants). Par exemple, l'un des cylindres peut être Ajustant-primaire (en rouge sur la figure 55) et l'autre Ajustant-secondaire (en orange). Le premier supprime quatre mobilités pour ne laisser que la translation et la rotation selon son axe de révolution que le second supprime pour ne laisser que la translation. Cette translation pourrait être supprimée par un composant Ajustant-tertiaire tel qu'un plan orthogonal aux cylindres ou un troisième cylindre non parallèle aux deux premiers. Ensuite, tout autre composant ne pourrait être qu'Ajustant ou Limitant.

Figure 55 : Ajustement d'un calibre composé d'un Cylindre Ajustant-primaire et d'un autre Ajustant-secondaire.



Les composants Ajustants-prioritaires sont prioritaires sur les Ajustants et Limitants qui sont même inhibés lors de leur ajustement. Ainsi un composant Limitant ne peut pas limiter l'ajustement d'un composant Ajustant-prioritaire : toujours sur le même exemple, si l'un des cylindres est Ajustant-primaire et l'autre Limitant, le calibre composé prend une position telle que l'Ajustant-primaire soit complètement ajusté et le Limitant assemblé, s'il le peut. Sur la figure 56, le Limitant est non-assemblable, donc le calibre composé prend un état non-assemblable aussi. La figure 57 montre qu'il aurait fallu un cylindre de diamètre plus petit pour que l'assemblage soit possible.

Figure 56 : Calibre composé d'un cylindre Ajustant-primaire et d'un autre Limitant, non-assemblable.

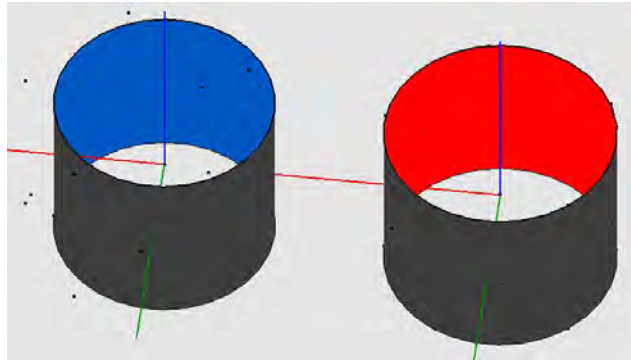
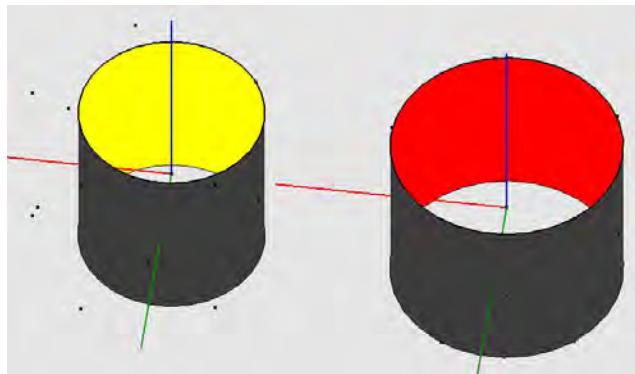


Figure 57 : Ajustement d'un calibre composé d'un cylindre Ajustant-primaire et d'un autre simplement Ajustant.



1.2.7 Sept règles sur les comportements des composants

Nous venons de voir qu'un composant peut prendre, a priori, l'un des cinq *comportements* suivants :

- *Limitant* ;
- *Ajustant* ;
- *Ajustant-primaire* ;
- *Ajustant-secondaire* ;
- *Ajustant-tertiaire*.

Néanmoins sept règles limitent ces possibilités selon les composants déjà définis dans le calibre composé et selon qu'il soit lui-même composé :

- **Règle d'unicité de l'Ajustant-primaire** : à chaque rang, un seul composant peut être Ajustant-primaire.

- **Règle d'unicité de l'Ajustant-secondaire** : à chaque rang, un seul composant peut être Ajustant-secondaire et qu'à la condition qu'il supprime de nouvelles mobilités par rapport à celles supprimées par l'Ajustant-primaire.

- **Règle d'unicité de l'Ajustant-tertiaire** : à chaque rang, un seul composant peut être Ajustant-tertiaire et qu'à la condition qu'il supprime de nouvelles mobilités par rapport à celles supprimés par l'Ajustant-primaire et l'Ajustant-secondaire.
- **Règle de composition des Limitants** : un composant ne contenant que des Limitants, ne peut être que Limitant.
- **Règle de propagation des Limitants (réciproque de la règle de composition des Limitants)** : un composant Limitant ne peut être constitué que de Limitants au 1er rang et donc aux rang suivants par propagation.
- **Règle de composition des Ajustants-prioritaires** : un composant contenant au moins un Ajustant-prioritaire ne peut être qu'Ajustant-prioritaire.
- **Règle de propagation des Ajustants** : un composant Ajustant doit contenir au moins un Ajustant au 1er rang et donc aux rang suivants par propagation.

De plus, dans l'actuelle version de GÉOVÉRIF, un composé ne peut devenir Ajustant-prioritaire que s'il ne contient aucun Limitant au premier rang. Autrement-dit il ne doit contenir que des Ajustants et/ou des Ajustants-prioritaires. Cette règle ne fait pas partie de la théorie des calibres ajustants mais a été ajoutée aux autres dans l'actuelle version de GÉOVÉRIF car il a été jugé trop compliqué, informatiquement, de prendre en compte des limites sur les mobilités que laisse un composant Ajustant-prioritaire dues aux Limitants qu'il contient.

Malheureusement, l'actuelle version de GÉOVÉRIF ne vérifie cette règle qu'au premier rang. Elle présente donc là un bug puisqu'un Limitant peut se « cacher » au deuxième rang d'un Ajustant-prioritaire. C'est la rédaction de ce mémoire qui m'a permis d'identifier ce bug.

Du point de vue calculatoire, la vérification que l'Ajustant-secondaire, puis l'Ajustant-tertiaire suppriment bien des mobilités au calibre composé était faite au travers de reclassements SATT dans les anciennes versions de GÉOVÉRIF. La multiplicité des cas de reclassement et de construction de positions initiales correspondantes, nous a conduit à renoncer à cette méthode pour en bâtir une nouvelle, basée sur les torseurs d'effort transmissibles par les liaisons établies par les calibres, beaucoup plus simple à programmer et plus « robuste ».

1.2.8 Une règle sur les critères d'ajustement des composants

Règle d'unicité du critère d'ajustement des Ajustants : les critères d'ajustement sont définis pour les calibres élémentaires. Conceptuellement, chaque composant élémentaire pourrait avoir son propre critère, qu'il soit Ajustant ou Ajustant-prioritaire (les Limitants n'ont pas besoin de critère d'ajustement). En fait, il paraît plus cohérent que tous les Ajustants aient le même critère puisqu'ils s'ajustent ensemble. En revanche les Ajustants-prioritaires peuvent avoir des critères différents entre eux.

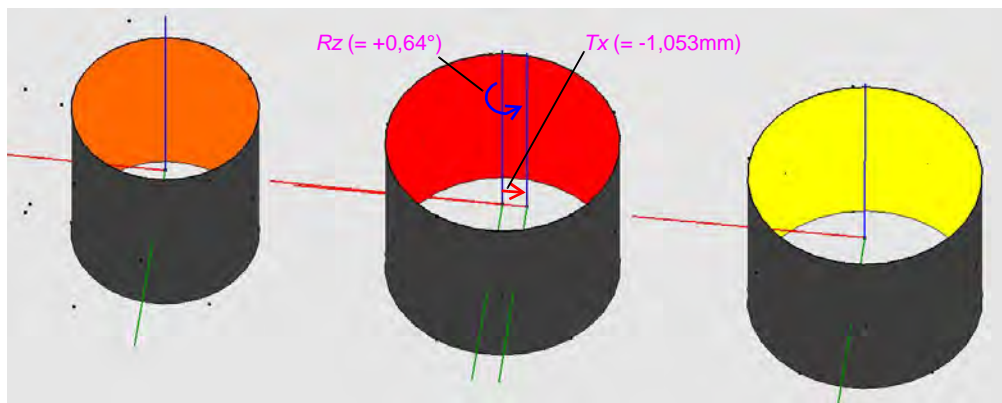
1.2.9 Quatre règles sur les mobilités des composants

Un calibre composant a une position qui est définie par construction par rapport au repère du calibre composé dont il fait partie. Cette position est normalement la **position idéale** de la surface ou du groupe de surfaces. Il peut en dévier, lors de l'assemblage, si des **mobilités propres** lui ont été données. Ces mobilités sont les trois translations et les trois rotations selon les trois directions de son repère.

Une mobilité propre est un paramètre variable et « mesurant » ; c'est-à-dire qu'une fois le calibre ajusté ou assemblé, sa valeur est connue (et affichée dans GÉOVÉRIF).

Par exemple, imaginons que l'on souhaite mesurer l'écart en coordonnées polaires d'un troisième trou par rapport au groupe des deux premiers pris en référence (voir figure 58) : il faut d'abord définir un calibre composé d'un seul cylindre Ajustant situé à -14,5mm (entre-axe nominal entre les deux trous) du repère de construction ; puis utiliser ce composé comme composant centré sur un nouveau repère de construction avec un cylindre Ajustant-primaire et un autre cylindre à 14,5mm Ajustant-secondaire. Le repère du composant Ajustant étant centré sur le cylindre Ajustant-primaire, en lui donnant une mobilité de translation le long de son axe X, T_x , et une mobilité de rotation autour de son axe Z, R_z , ce calibre va pouvoir se mouvoir selon ces mobilités pour s'ajuster au mieux. Avec son diamètre lui aussi variable, les valeurs prises par ces mobilités donnent l'écart de ce trou en coordonnées polaires.

Figure 58 : Ajustement d'un calibre composé d'un cylindre Ajustant-primaire, d'un autre Ajustant-secondaire et d'un composé d'un cylindre avec les mobilités T_x et R_z selon les axes de son repère initialement confondus avec ceux du cylindre Ajustant-primaire.



Jusqu'à six mobilités peuvent être données à chaque composant ; néanmoins quatre règles limitent ces possibilités selon son comportement :

Règle des mobilités inutiles : un composant ne peut avoir de mobilité qui le laisserait invariant. Sur l'exemple de la figure 58, il est inutile de donner une mobilité de rotation ou de translation à l'Ajustant autour de son axe Z (axe bleu) car cela ne modifierait pas sa surface. En pratique GÉOVÉRIF accepte ces mobilités qui, de toute façon, ne sont pas utilisées lors de l'assemblage.

- **Règle d'immobilité de l'Ajustant-primaire** : un Ajustant-primaire ne peut pas avoir de mobilité. En effet, cela ne lui serait d'aucune utilité puisqu'il profite déjà des mobilités restant au calibre composé et pour le rang dont il fait partie.

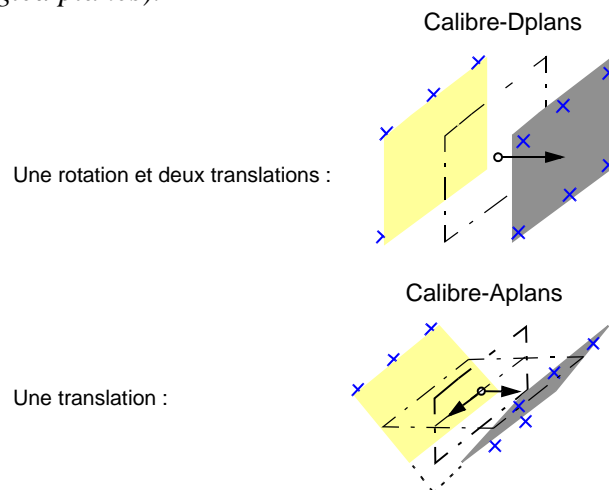
- **Règle pour les mobilités d'un Ajustant-secondaire ou tertiaire** : un Ajustant-secondaire ou tertiaire ne peut avoir de mobilité qui modifierait la classe qu'il constitue avec les Ajustants-prioritaires de son rang. Sur l'exemple de la figure 58, le cylindre Ajustant-secondaire ne peut avoir de mobilité en rotation ni autour de l'axe X (en rouge sur la figure 58), ni autour de l'axe Y (en vert sur la figure 58) car ces mobilités modifierait la classe de la liaison qu'il constitue avec l'ajustant-primaire.

- **Règle des mobilités internes à un Ajustant-prioritaire** : les composants d'un Ajustant-prioritaire ne peuvent avoir de mobilité qui modifierait la classe de la liaison qu'ils constituent ensemble. Par exemple aucun des deux cylindres parallèles d'un Ajustant-prioritaire ne peut avoir de mobilité en rotation selon les directions orthogonales à leurs axes car cela modifierait la classe qu'ils constituent ensemble. A l'heure actuelle, cette règle n'est pas vérifiée par GÉOVÉRIF. C'est un bug relevé à l'occasion de la rédaction de ce mémoire.

1.2.10 Calibres composés spéciaux

Les entités géométriques formées soit de deux plans parallèles, soit de deux plans sécants (voir figure 59) sont très courantes sur les produits manufacturés. Elles ont la caractéristique de n'avoir qu'une taille intrinsèque, linéaire ou angulaire et d'être positionnées par leur plan médian et un plan de jauge pour celle formée de deux plans sécants.

Figure 59 : Deux calibres-composés spéciaux : le *Dplans* (Distanced planes) et le *Aplans* (Angled planes).



Pour disposer de ces entités dans la théorie des calibres Ajustants, deux **calibres composés spéciaux** sont définis : le **Dplans** (pour « Distanced planes ») et le **Aplans** (pour « Angled planes »). Ce sont des composés spéciaux en ce sens qu'ils sont déjà construits avec un repère sur le plan médian et une dimension et un plan de jauge pour le Aplans. Comme les calibres élémentaires, ils peuvent prendre n'importe quel comportement, critère d'ajustement ou mobilités lorsqu'ils sont composants. Par contre ils sont associés, chacun, à deux nuages de points.

1.2.11 Calibres-zones

Une fois qu'un calibre élémentaire ou spécial est ajusté à son (ses) nuage(s) de points, il est possible d'en extraire un nouveau nuage de points représentant son **élément positionnel limité**. Par exemple, pour un calibre-cylindre, l'élément positionnel sera son **axe limité** par deux points (voir figure 60). Pour un calibre-plan, l'élément positionnel sera une **portion de son plan**, limitée par les sommets d'un polygone convexe contenant tous les points du nuage sur lequel il est ajusté (voir figure 61).

Figure 60 : Nuage positionnel d'un calibre-cylindre ajusté et Calibre-zone-cylindre associé.

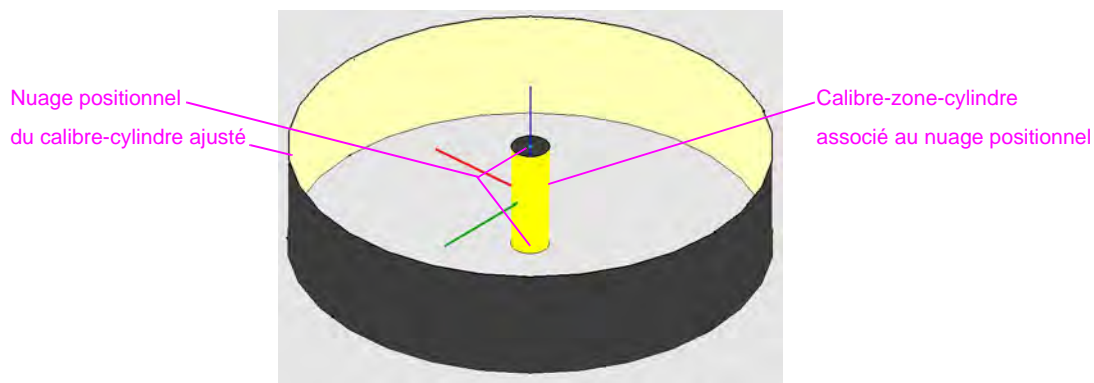


Figure 61 : Nuage positionnel d'un calibre-plan ajusté et Calibre-zone-Dplans associé.



A chaque élément positionnel est associé un calibre-zone. Ainsi, à l'axe limité est associé un **calibre-zone-cylindre** devant le contenir (voir figure 60), et, à la portion de plan, un **calibre-zone-Dplans** (voir figure 61).

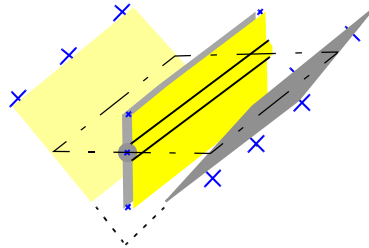
Enfin il existe un troisième et dernier calibre-zone : le **calibre-zone-sphère** associé à un nuage d'un seul point, représentant, par exemple, le centre d'un calibre-sphère ajusté.

Chacun des trois calibres-zones a un repère associé, une taille, un critère d'ajustement et, s'il est utilisé comme composant, un comportement et des mobilités éventuelles ; exactement comme les calibres élémentaires.

Dans une précédente version du logiciel, il était possible de déplacer les points délimitant l'axe limité pour le raccourcir, l'allonger ou le déplacer. L'équivalent pour le plan positionnel n'a jamais été développé mais seulement envisagé. Cette possibilité permet en particulier de vérifier les « *éléments tolérancés projetés* » définis dans les normes ISO.

Certains calibres élémentaires ou spéciaux, nécessitent deux éléments positionnels pour être situés dans l'espace. Par exemple le calibre-Aplans nécessite une portion de son plan médian et un axe limité correspondant à l'intersection de son plan de jauge avec le plan médian. Le résultat de l'extraction des éléments positionnels du calibre-Aplans est donc deux nuages de points auxquels sont associés deux calibres-zones distincts : un calibre-zone-Dplans et un calibre-zone-cylindre (voir figure 62).

Figure 62 : Nuages positionnels d'un calibre-Aplans ajusté et calibres-zones associés.



Les éléments positionnels s'apparentent aux *Éléments Géométriques de Référence Minimum*, EGRM, de la théorie SATT, à la différence près qu'ils sont limités.

1.3 Utilisation des CALIBRES AJUSTANTS en métrologie

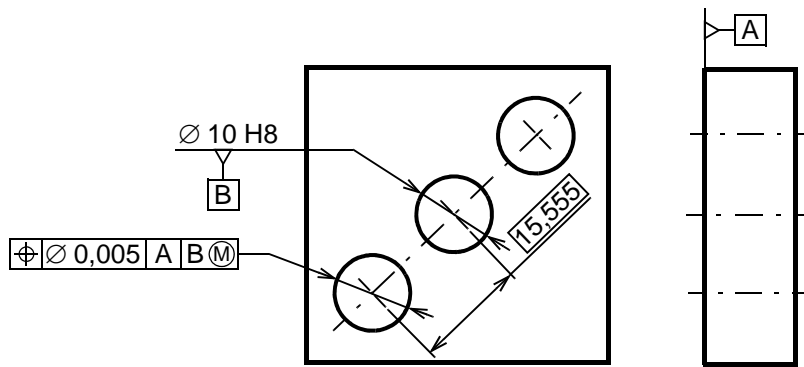
1.3.1 Utilisation sur un exemple général

La théorie des calibres Ajustants a été spécialement développée pour la métrologie tridimensionnelle et même, plus particulièrement, pour la vérification des limitations des défauts géométriques des objets, permises par les normes de spécification et de tolérancement géométrique, les normes ISO-GPS.

Les principes de limitation des défauts géométriques définis par les normes ISO consistent à vérifier que certains nuage de points, qui peuvent être extraits de la surface d'un objet réel, puissent être contenus dans des zones de l'espace, appelées *zone de tolérance*, ou bien demeurer à l'extérieur de surfaces frontières, appelées *états virtuels*, lorsque ces zones ou ces frontières respectent, ou non, des contraintes d'orientation et, éventuellement, de position par rapport à d'autres surfaces fictives, appelées *références*, ajustées hiérarchiquement à d'autres groupes de points extraits.

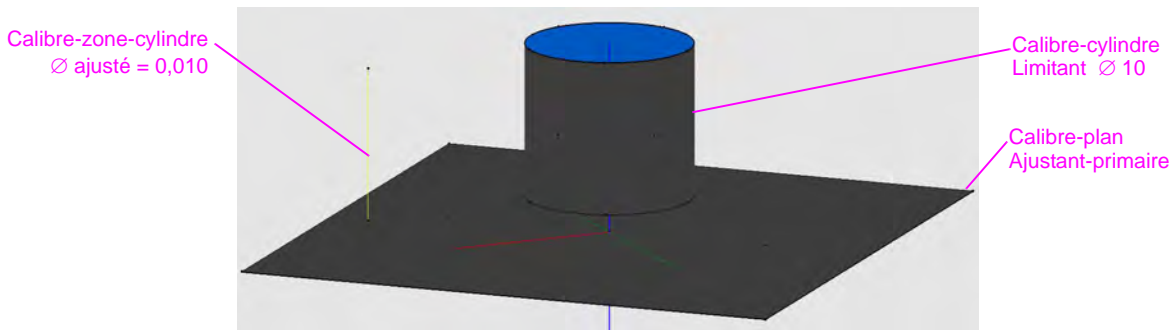
Par exemple, le *cadre de tolérance*, donné sur la figure 63, signifie que les centres de sections scannées dans le trou du bas puissent être contenus dans une zone cylindre de diamètre 0,020 mm dont l'axe est à 15,555 mm de celui d'une surface cylindrique frontière pour les points scannés dans le trou central de l'objet ; cette surface cylindrique frontière est orthogonale au plan fictif devant être ajusté aux points scannés sur la face inférieure de l'objet.

Figure 63 : Exemple de tolérance de localisation.



Il est clair que la signification d'un cadre de tolérance ISO correspond à un calibre composé de la théorie des calibres ajustants. La construction de ce calibre permettra donc de vérifier directement le respect, par l'objet mesuré, de la tolérance géométrique ISO. Ce calibre est donc composé (voir figure 64) d'un calibre-plan Ajustant-primaire, d'un calibre-cylindre Limitant de diamètre 10 mm et d'un calibre-zone-cylindre qu'il est plus judicieux de prendre Ajustant plutôt que Limitant pour mesurer directement la zone de tolérance minimale contenant l'axe limité extrait du calibre-cylindre initialement ajusté au nuage du trou de gauche. Dans cet exemple et pour l'objet mesuré, dont les points sont donnés en annexe F, GÉOVÉRIF, indique un diamètre de 0,010 mm pour le calibre-zone ajusté, soit 0,005 mm au-delà de la valeur de la tolérance. Cet objet est donc hors tolérance.

Figure 64 : Calibre composé permettant la vérification du respect, par l'objet mesuré, de l'indication ISO.

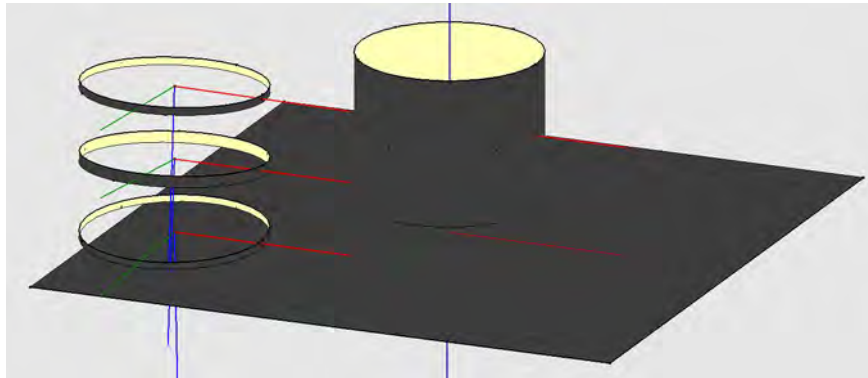


Cependant ce premier calibre ne respecte pas parfaitement le sens ISO du cadre de tolérance : en effet il aurait fallu que le calibre-zone-cylindre enferme des centres de cercles ajustés au trou ; or il enferme les points extrêmes de l'axe du Calibre-cylindre ajusté. En général les surfaces cylindriques sont scannées par sections. Il suffit donc, apparemment, de découper en sections le nuage de points du trou pour créer, ici, trois nuages et d'ajuster dessus des calibre-cylindres. La figure 65 montre les calibres élémentaires ajustés à chacun des nuages et notamment aux trois sections de points scannés dans le trou de gauche. Malheureusement, le moindre défaut de circularité de la section scannée fait « basculer », plus ou moins, le Cylindre ajusté selon, également, le critère d'ajustement. Les axes limités de ces calibres-cylindres seront donc également inclinés et ne pourront pas représenter les centres de cercles associés recherchés. J'ai pris conscience de ce problème à l'occasion du projet ÉTALON DE DÉFAUTS GÉOMÉTRIQUES que je mène depuis un an et demi avec les entreprises ANNECY

MÉTROLOGIE et SOMFY puisqu'il nous a permis de comparer nos démarches et nos résultats de mesure. J'entrevois néanmoins une solution consistant à implémenter un nouveau calibre élémentaire dans GÉOVÉRIF : le **calibre-cercle**. La particularité de ce calibre, par rapport au calibre-cylindre, sera sa méthode d'ajustement au nuage de points : il devra avoir le comportement d'un calibre composé d'un plan Ajustant-primaire en $\Sigma(e_i)^2$ et d'un Cylindre Ajustant-secondaire suivant le critère choisi par l'utilisateur. Malgré ce comportement, à l'ajustement, il établira la même liaison avec son nuage de points que celle du calibre-cylindre : une liaison pivot-glissant et non une liaison pivot.

L'ajout de ce nouveau calibre élémentaire ne demandera que peu de travail car GÉOVÉRIF est « orienté objet » : il suffira de dériver une nouvelle classe Calibre-cercle de la classe Calibre-cylindre et de redéfinir, pour elle, la méthode Ajuste(...).

Figure 65 : Calibres élémentaires ajustés notamment sur les trois sections du trou de gauche.



1.3.2 Utilisation pour les tolérances d'orientation et de position

Dans l'état actuel de la théorie des calibres ajustants, il est possible de vérifier la quasi-totalité des tolérances cohérentes indiquées sur les dessins techniques.

Sans connaître la totalité de l'ensemble des derniers symboles modificateurs des normes ISO-GPS, toute tolérance ISO devrait pouvoir être représentée sous la forme d'un calibre de la théorie des calibres ajustants. Par contre la réciproque est fautive ; c'est-à-dire qu'on peut construire un calibre qu'il est impossible d'exprimer sous la forme d'une tolérance géométrique ; par exemple un groupe de calibres-zones-cylindres de diamètres différents. Cela donne à la théorie des calibres ajustants une supériorité sur les normes ISO-GPS. C'est ce qui nous a aussi conduit à proposer l'utilisation de la théorie des calibres ajustants pour la modélisation des tolérances ISO-GPS [19].

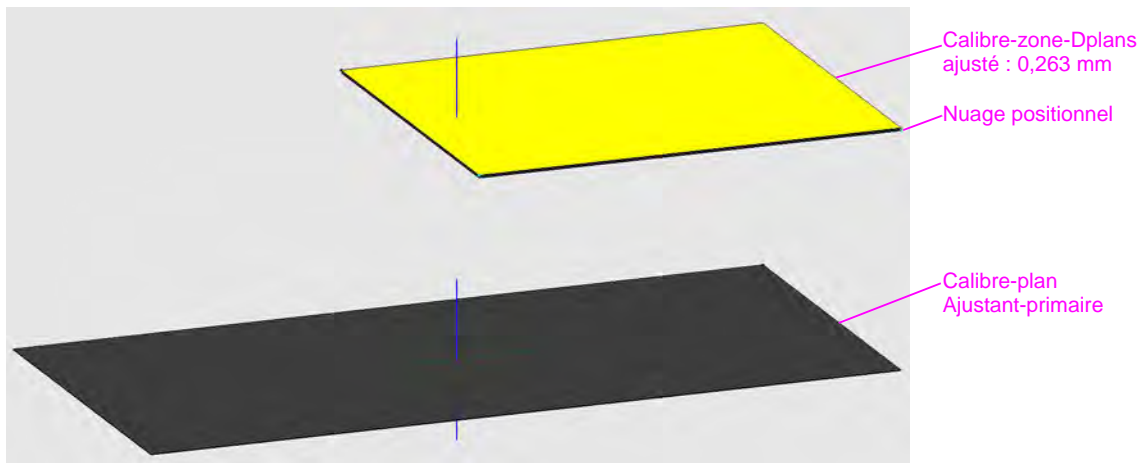
Nous avons présenté, dans la section 1.3.1 précédente, la vérification d'une tolérance de localisation d'une surface cylindrique en considérant, soit son axe limité, soit les centres des sections scannés. En fait cette dichotomie correspond à deux visions différentes de ce que sont, ou devraient être, les défauts de position ou d'orientation d'une surface : soit on considère les défauts de la surface associée, et donc indépendants du défaut de forme de celle-ci ; soit on considère le nuage de points scannés de la surface et donc aussi son défaut de forme ; à tel

point, d'ailleurs, que le défaut ainsi mesuré peut n'être que du défaut de forme pour une surface dont l'orientation et/ou la position « globale » est idéale.

Pour une surface idéalement plane, cette dichotomie est plus claire : en effet soit la zone de tolérance concerne le nuage de points de la surface de l'objet, soit elle concerne son nuage positionnel, c'est-à-dire le nuage de points délimitant le contour convexe d'un plan ajusté à la surface de l'objet.

Dans la théorie des calibres ajustants, il n'est pas possible d'assembler un calibre-zone-Dplans avec un nuage de points représentant une surface élémentaire. En effet, à ce type de nuage ne peut être associé qu'un calibre élémentaire. Il faudra donc procéder autrement (voir plus bas). En revanche, après l'extraction du nuage positionnel du calibre-plan ajusté à la surface scannée, un calibre composé permet, par exemple de vérifier le défaut de localisation d'un plan par rapport à autre : il suffit pour cela que ce calibre soit composé d'un calibre-plan Ajustant-primaire et d'un calibre-zone-Dplans ajusté sur le nuage positionnel extrait (voir figure 23).

Figure 66 : Calibre composé d'un calibre-plan Ajustant-primaire et d'un calibre-zone-Dplans Ajustant permettant de vérifier la localisation du nuage positionnel du plan ajusté (caché ici).

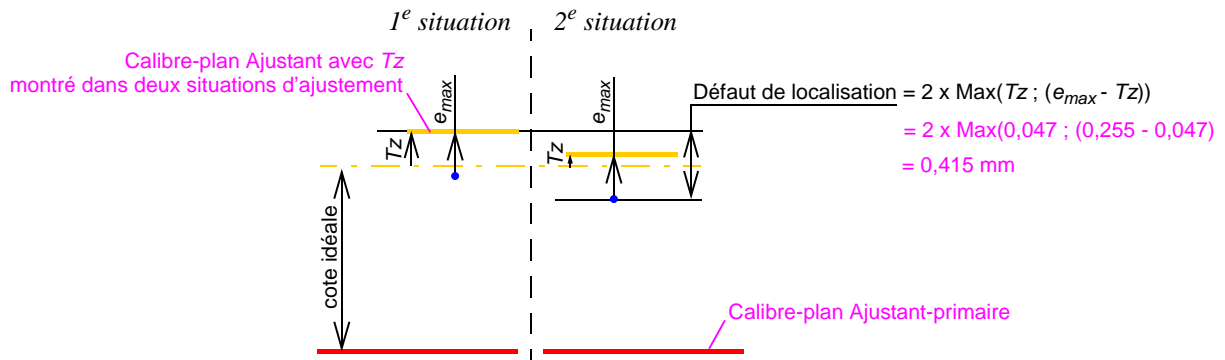


Si c'est une tolérance d'orientation qu'il faut vérifier, il suffira de donner une mobilité propre en translation suivant Z au calibre-zone-Dplans.

Si l'on souhaite évaluer le défaut d'orientation ou de localisation de la surface scannée elle-même, il faut utiliser un calibre-plan avec une mobilité en Z et un critère d'ajustement laissant la surface du calibre à l'extérieur matière.

Le défaut d'orientation est alors donné par l'écart du point le plus éloigné du calibre, e_{max} , et le défaut de position est la plus grande des deux valeurs Tz , $(e_{max} - Tz)$ (voir figure 24). A titre d'exemple, sur le même objet que précédemment, le défaut de localisation obtenu est de 0,415 mm, alors qu'il est de 0,263 sur le nuage positionnel (voir figure 66).

Figure 67 : Schéma pour le calcul du défaut de localisation au sens ISO.



1.3.3 Utilisation pour les références, références communes et systèmes de références

Les *références simples*, *systèmes de références* et *références communes* de la norme ISO 5459¹ de 2011 peuvent être modélisés par des calibres Ajustants-prioritaires, comme nous l'avons déjà montré, pour une référence simple, sur un exemple à la section 1.3.1.

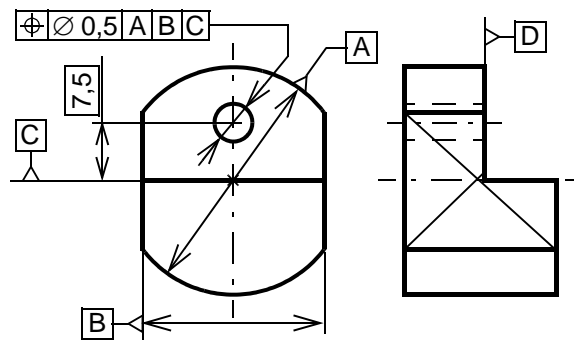
Concernant la référence commune, elle est modélisée par un calibre composé d'Ajustants. Par exemple deux calibres-cylindres parallèles Ajustants tels que présentés en figure 54. Le critère d'ajustement et les contraintes entre les diamètres des deux cylindres ne sont pas précisés par la norme. Elle précise toutefois que la distance entre les cylindres est implicitement fixe sauf si l'on indique explicitement dans le cadre qu'elle est variable. La variation angulaire n'est pas envisagée. La théorie des calibres ajustants permet toutes les mobilités pourvu qu'elles ne modifient pas la classe du calibre composé (Cf **règle des mobilités internes d'un Ajustant-prioritaire**, section 1.2.9). Il est donc parfaitement possible de définir un composant Ajustant-prioritaire formé de deux cylindres parallèles d'entre-axe variable et dont les diamètres, dans l'actuel version de GÉOVERIF, sont indépendants. L'entre-axe et les diamètres vont prendre des valeurs permettant de satisfaire le critère d'ajustement commun. Mais il est aussi possible, par exemple, de définir un composant formé de deux cylindres orthogonaux entre-eux et ayant, pour au moins l'un d'entre-eux, une mobilité en rotation pour que l'angle qu'ils forment soit variable. Cette possibilité n'est pas envisagée par la norme.

Concernant les systèmes de références, ils pourront tous être modélisés par des composants Ajustants-prioritaires. Les calibres-ajustants permettent beaucoup plus de constructions cohérentes de systèmes de références que la norme, notamment grâce au fait que les calibres peuvent être composés sur plus de rangs. Ainsi il est possible d'avoir une référence commune primaire composé de deux groupes de surfaces ayant entre-eux une ou plusieurs mobilités, par exemple. Les règles sur les comportements, énoncées à la section 1.2.7, permettent de garantir la cohérence des systèmes de référence ainsi construits. Elles permettent donc aussi leur vérification. Par exemple la référence C, dans le cadre de tolérance du dessin

1. NF EN ISO 5459 novembre 2011, Spécification géométrique des produits (GPS) - Tolérancement géométrique - Références spécifiées et systèmes de références spécifiées.

partiel présenté en figure 25, est une erreur car elle ne supprime aucune mobilité supplémentaire au calibre composé. La théorie ainsi que GÉOVÉRIF le détectent.

Figure 68 : Exemple de système de références erroné.



En revanche, selon les règles énoncées, la référence D pourrait être prise en référence tertiaire, à la place de C. En effet elle supprime la dernière mobilité du calibre composé. Pourtant elle est inutile à la tolérance de localisation. Cependant elle n'est pas contraignante, c'est-à-dire qu'elle n'a aucune influence sur le résultat de mesure. Dans la version actuelle de la théorie et de GÉOVÉRIF, cette référence inutile n'est pas signalée. Cela pourra être ajouté si on le souhaite.

Cette détection des erreurs sur les systèmes de références est essentielle en métrologie mais il est préférable qu'elle soit faite dès la création des dessins techniques. Malheureusement, peu de progiciels de CAO font cette détection. A ma connaissance, seul TOPSOLID le fait automatiquement dans sa version standard grâce aux travaux de doctorat de Gaëtan Legrais en CIFRE avec mes collègues Pascal Hernandez et Max Giordano et soutenus en novembre 2005.

La construction des systèmes de références par les règles relatives aux comportements Ajustants-prioritaires et aux mobilités, présentées en sections 1.2.7 et 1.2.9, est à la fois plus formelle et plus simple que par les explications et les règles de l'ISO 5459 version 2011.

Certains concepts, introduits dans cette norme, semblent donner plus de richesses que ne le permet la théorie des calibres ajustants. En fait ce n'est pas forcément le cas et, surtout, cela se fait au prix d'une complexification. Ces concepts sont notamment la possibilité de dire qu'une partie seulement des éléments de situation d'une référence est utilisée ; par exemple l'axe d'un cône uniquement et pas son point de centre. Cela se fait grâce aux modificateurs [PT], [SL] et [PL], qui signifient « Point », « Straight Line » et « Plane », placés à la suite de la référence dans le cadre. Les mobilités des composants permettent de prendre en compte, parfaitement, ces *modificateurs*.

D'autres concepts ont trait aux éléments de référence dont on ne veut prendre qu'une partie ; par exemple deux « génératrices » d'une surface cylindrique. Cela se fait grâce aux *références partielles* ou au modificateur [CF], qui signifie « Contacting Feature ». Bien que cela reste à étudier plus avant, a priori, il suffit de ne palper qu'une partie de la surface de

l'objet et d'y ajuster le calibre ayant la forme idéale de la surface pour reproduire les références partielles, voire les « Contact Feature ».

D'autre part certaines notions, très importantes en pratique, sont encore très floues dans la norme. C'est notamment le cas des méthodes d'ajustement qui hésitent entre les notions de taille minimale/maximale et de défaut de forme minimum.

Il en va de même pour les tailles et les distances entre références d'un système ou d'une référence commune : si une taille est encadrée, alors l'ajustement se fait avec une taille figée alors que si c'est une distance, l'ajustement se fait avec une distance fixe au sein d'une référence commune, et variable au sein d'un système de références. Ces choix semblent arbitraires et discutables.

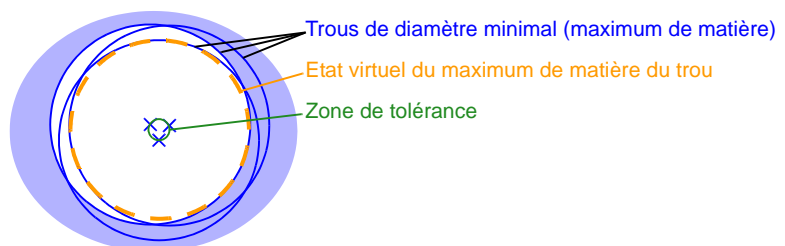
En conclusion la théorie de calibres Ajustants apparaît comme étant bien plus simple, plus claire, plus générale et plus formelle pour construire des système de références que l'ISO 5459 de 2011. Resterait, néanmoins, à pouvoir spécifier les calibres suivant cette théorie dans la documentation technique d'un objet à fabriquer. Nous y reviendrons plus loin.

1.3.4 Exigence du maximum de matière

L'exigence du maximum de matière, définie par la norme ISO 2692¹, permet d'augmenter la tolérance géométrique, de forme d'orientation ou de position, d'une entité dimensionnelle linéaire, telle qu'un cylindre par exemple, lorsque celle-ci n'est pas à sa taille donnant le maximum de matière à l'objet et autorisée par la tolérance dimensionnelle, par exemple un diamètre plus grand que le diamètre minimal autorisé pour un trou cylindrique ; ce diamètre étant bien celui qui donne le plus de matière à l'objet dans lequel il est réalisé.

L'augmentation de la tolérance géométrique est théoriquement égale à la différence entre la taille effective de l'entité dimensionnelle et sa taille au maximum de matière. Sans défaut de forme de l'entité cela revient à vérifier qu'elle ne franchit pas une surface frontière, appelée *état virtuel*. En effet, cet état virtuel est généré par l'ensemble des positions possibles de l'entité dimensionnel au maximum de matière lorsque son élément positionnel se déplace dans la zone de tolérance (voir figure 69).

Figure 69 : Génération de l'état virtuel au maximum de matière d'un trou (vu de bout).

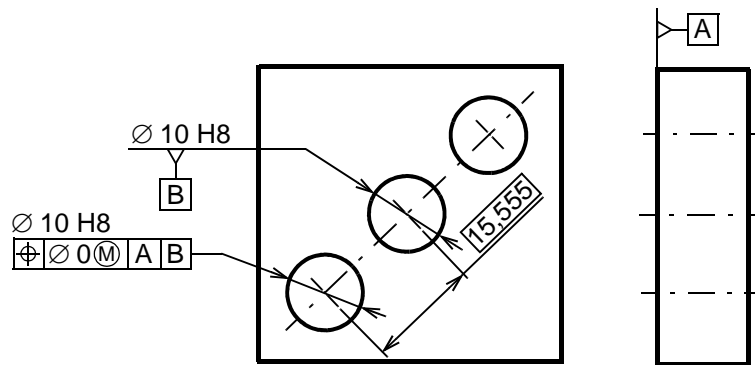


1. NF EN ISO 2692 mars 2015, Spécification géométrique des produits (GPS) - Tolérancement géométrique - Exigence du maximum de matière (MMR), exigence du minimum de matière (LMR) et exigence de réciprocité (RPR)

Cependant c'est avant tout le respect de l'état virtuel qu'il faut vérifier sur une pièce ainsi tolérancée. En effet l'équivalence entre l'augmentation de la tolérance géométrique et le non franchissement de l'état virtuel n'est vrai que si l'entité dimensionnelle n'a aucun défaut de forme, ce qui, évidemment, n'existe pas. Ce point n'est pas indiqué dans la norme et il est navrant de constater que les progiciels de métrologie vérifient l'exigence du maximum de matière suivant le principe de l'augmentation de la tolérance géométrique. En effet cela crée systématiquement des erreurs de vérification conduisant à rebuter des objets conformes aux tolérances ou au contraire à accepter des objets non conformes.

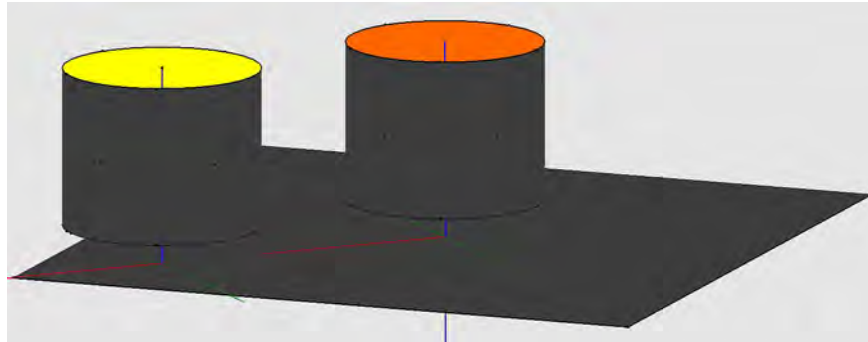
Prenons l'exemple d'une localisation au maximum de matière appliquée au trou dans le coin gauche de la pièce représenté figure 70. L'exigence du maximum de matière, spécifiée par le symbole \textcircled{M} , permet d'indiquer une tolérance nulle que devra respecter le trou s'il est à son diamètre minimal. Cette indication de tolérance nulle a été remplacée, dans la dernière version de la norme ISO 2692, par l'**exigence de réciprocité**. C'est malheureux car cela renforce l'idée d'équivalence entre l'interprétation en termes de transfert de tolérance du dimensionnel au géométrique et l'interprétation en termes d'état virtuel.

Figure 70 : Dessin partiel d'un objet avec une tolérance de localisation au maximum de matière par rapport à un système de deux références.



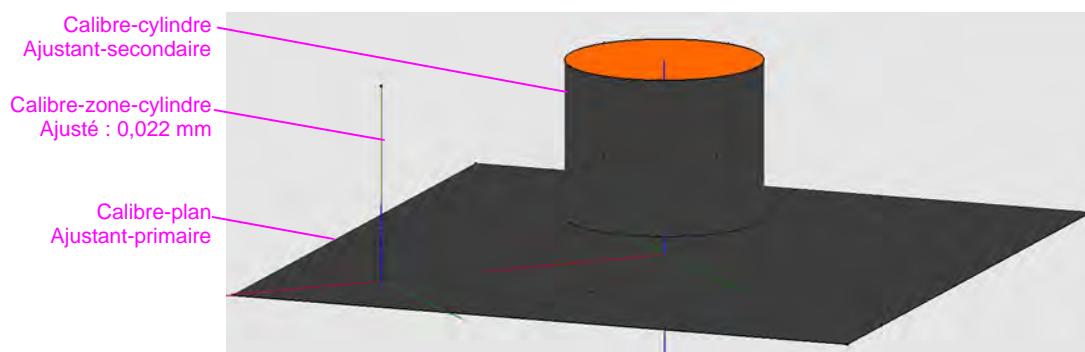
La vérification de cette tolérance de localisation consiste à assembler, avec les nuages de points pris en exemple, le calibre composé d'un Plan Ajustant-primaire, d'un Cylindre Ajustant-secondaire et d'un deuxième Cylindre Ajustant, à 15,555 mm du premier, et qui devra prendre une valeur supérieure à 10 mm qui est celle de son état virtuel. Le diamètre ajusté de ce dernier composant est de 10,012 mm, soit 0,012 mm de plus que son état virtuel. La pièce vérifiée est donc « largement » conforme à cette tolérance.

Figure 71 : Calibre composé d'un Plan Ajustant-primaire, d'un Cylindre Ajustant-secondaire et d'un deuxième Cylindre Ajustant, à 15,555 mm du premier pour vérifier la tolérance indiquée sur le dessin donné en figure 70.



Si maintenant, on vérifie cette tolérance de localisation par la zone de tolérance augmentée, il nous faut d'abord calculer la différence entre le diamètre du trou tolérancé et son diamètre au maximum de matière qui, lui, vaut 10 mm. Le diamètre mesuré dépend du critère d'ajustement. Son axe tolérancé aussi. Nous avons donc ici une source importante de variabilité du résultat. L'exigence du maximum de matière étant utilisée, traditionnellement, pour des surfaces devant s'assembler avec d'autres, il paraît logique de choisir un critère d'ajustement conduisant à une surface ajustée à l'extérieur de la matière. Si de plus nous voulons profiter de la plus grande augmentation de la tolérance géométrique, il nous faut utiliser le critère permettant de maximiser le diamètre du calibre-cylindre, soit le critère du volume minimal. Le diamètre ainsi mesuré sur le trou tolérancé est de 10,021 mm, soit 0,021 mm de plus que le diamètre au maximum de matière. Son axe limité doit donc pouvoir être compris dans une zone cylindrique de 0,021 mm de diamètre, à 15,555 mm de la référence secondaire et perpendiculaire à la référence primaire. Une fois extrait le nuage positionnel du trou tolérancé, le calibre composé, donné en figure 72, permet de mesurer la plus petite zone enfermant l'élément positionnel. Elle est de 0,022 mm, soit 0,001 mm de plus que la tolérance augmentée. La pièce est donc non-conforme par ce contrôle, alors qu'elle l'est largement par le calibre vérifiant l'état virtuel.

Figure 72 : Calibre composé d'un Plan Ajustant-primaire, d'un Cylindre Ajustant-secondaire et d'un calibre-zone-cylindre Ajustant, à 15,555 mm, pour mesurer la plus petite zone enfermant le nuage positionnel du trou.



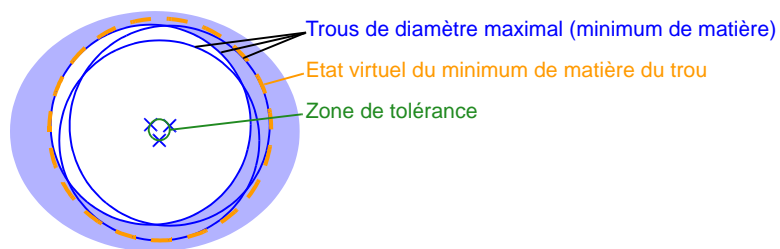
Cet exemple montre que la vérification en termes de tolérance augmentée n'est pas équivalente à celle en termes d'état virtuel, même pour une surface ayant un faible défaut de forme, ici de 0,012 mm.

Une erreur encore plus grave commise par les logiciels consiste à augmenter une seconde fois la tolérance de la valeur de l'écart mesuré sur le cylindre de référence s'il est pris en référence avec l'exigence du maximum de matière comme dans la figure 63.

La seule bonne méthode pour vérifier de telles tolérances est l'utilisation de calibres composés.

L'ISO 2692 définit également l'*exigence du minimum de matière*. C'est l'exigence duale de l'exigence du maximum de matière puisqu'elle consiste à permettre une augmentation théorique de la zone de tolérance géométrique égale à la différence entre la taille effective de l'entité dimensionnelle et sa taille au minimum de matière. Sans défaut de forme de l'entité cela revient à vérifier qu'elle ne franchit pas un état virtuel, se trouvant, cette fois, à l'intérieur de la matière. Cet état virtuel est généré par l'ensemble des orientations et/ou des positions de l'élément positionnel de l'entité dimensionnel dans son état au minimum de matière (voir figure 73).

Figure 73 : Génération de l'état virtuel au minimum de matière d'un trou (vu de bout).



Dans la théorie des calibres ajustants, j'appelle *calibres négatifs* les calibres se trouvant à l'intérieur de la matière de l'objet vérifié. Seuls les calibres élémentaires peuvent devenir négatifs avec les mêmes propriétés que ceux-ci, qui sont alors qualifiés de « positifs ». Il devient alors possible de modéliser et de vérifier n'importe quelle tolérance géométrique utilisant à la fois l'exigence du maximum de matière et de l'exigence du minimum de matière, et éventuellement complétée de l'exigence la réciprocité qui peut s'appliquer aux deux.

Néanmoins, dans l'actuelle version de GÉOVÉRIF, les calibres négatifs n'existent pas. Cela fait partie des perspectives de développement de ce logiciel.

1.4 Conclusion sur l'utilisation des calibres Ajustants en métrologie et perspectives de développement de la théorie

Par les dernières sections précédentes, nous avons montré comment les calibres Ajustants pouvaient modéliser la plupart des tolérances géométriques indiquées sur les dessins techniques y compris lorsqu'elles utilisaient certains modificateurs normalisés, comme ceux

relatifs aux éléments de situation (section 1.3.3) ou ceux relatifs aux états virtuels (voir section 1.3.4).

L'ISO 1101, dans sa version de 2013¹, définit beaucoup d'autres modificateurs. Certains sont simplement des lettres placées dans le cadre, comme CZ qui veut dire « Collection de Zones » après avoir voulu dire « Zone commune » ; d'autres sont des lettres entre crochets, comme [PT] qui signifie que l'on ne considère que le point dans les éléments de situation ; et d'autres encore sont des lettres encadrées, comme \textcircled{M} ou \textcircled{E} .

Sans les avoir encore tous étudiés de près, il est fort probable que la théorie des calibres Ajustants puissent tous, sinon les modéliser, au moins les vérifier sur les géométries scannées. En effet, en l'état, cette théorie ne permet pas de spécifier les parties scannées de l'objet que suggèrent certains modificateurs. Il y a donc ici peut-être un développement possible de cette théorie. Néanmoins, celui qui me paraît le plus utile est la possibilité de définir des relations entre les paramètres variables d'un calibre composé, c'est-à-dire les tailles et entre les mobilités. Cela permettrait, par exemple, d'imposer que tous les diamètres des cylindres soient égaux ou que leurs entre-axes le soient aussi.

2 Spécification géométrique par CALIBRES AJUSTANTS

La modélisation, même mentale, du calibre composé correspondant à la tolérance indiquée sur un dessin, permet de détecter les erreurs d'une indication de tolérance géométrique sur un dessin. J'ai coutume de dire que si le calibre composé d'une tolérance géométrique peut être défini, alors la tolérance géométrique ne présente aucune erreur ni ambiguïté.

De ce constat est né l'idée d'utiliser directement cette théorie pour la spécification des tolérances géométriques, dans un format textuel qui permettrait l'échange des données de tolérancement entre logiciels et une neutralité par rapport aux normes et leurs évolutions. Cette idée a été présentée au Congrès international sur le tolérancement en 2005 (CAT2005) [32].

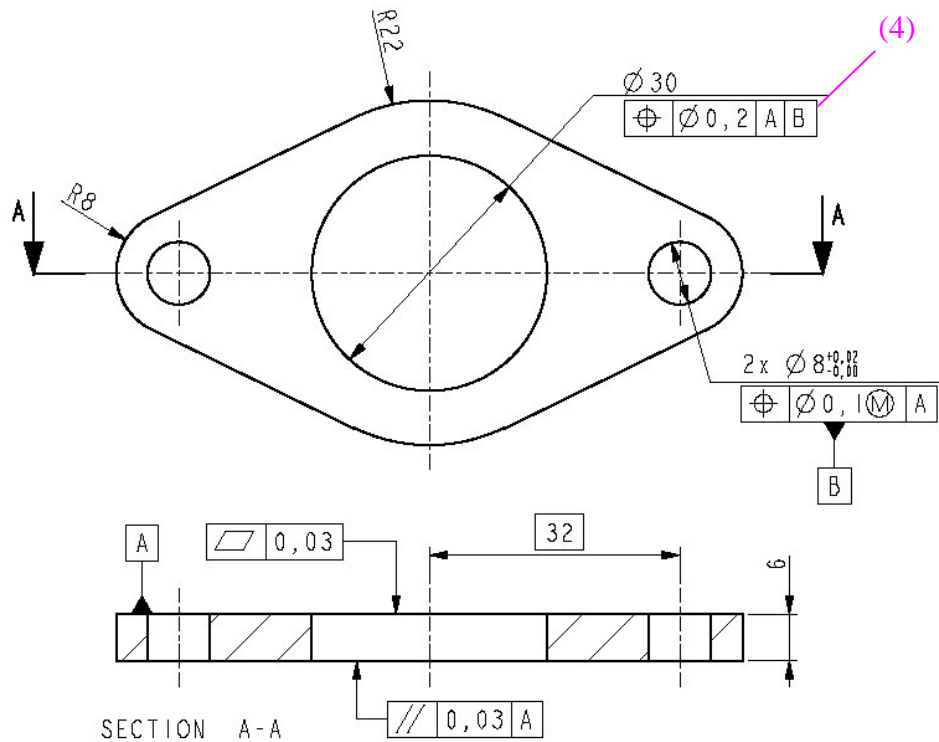
Très brièvement, cela consiste à décrire, textuellement, les tolérances géométriques d'un objet en faisant référence à sa géométrie CAO et ce, grâce à quelques mots-clés associés à la théorie des calibres ajustants et une syntaxe donnée.

Par exemple la tolérance n°4 du dessin donné dans la figure 74, est décrite dans un fichier texte par la ligne :

```
ToleranceNo4 = { SurfaceGauge(OnFeatureNo=1; Behaviour=PrimFit) ;  
SurfaceGauge(OnFeatureNo=3; Behaviour=SecondFit; Size= "Free") ;  
SurfaceGauge(OnFeatureNo=4; Behaviour=SecondFit; Size= "Free") } ;  
ZoneGauge(OnFeatureNo=5; TolValue=0.2; FreeToTranslate= FALSE) }
```

1. NF EN ISO 1101 mai 2013 ;Spécification géométrique des produits (GPS) - Tolérancement géométrique - Tolérancement de forme, orientation, position et battement

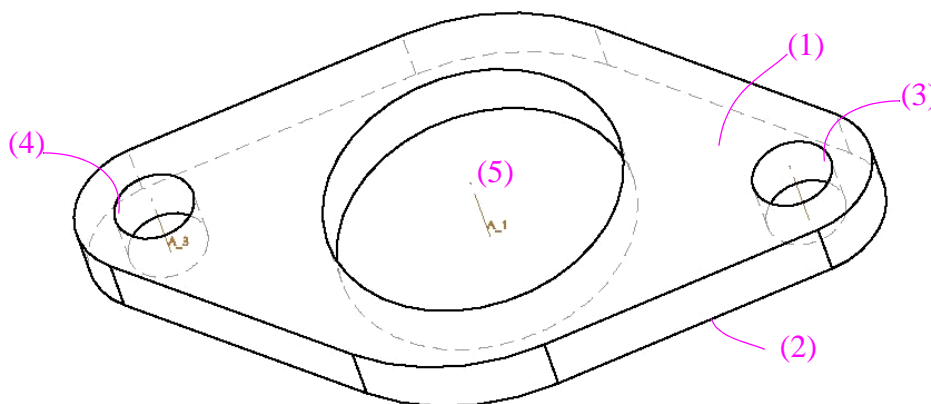
Figure 74 : Dessin technique avec des tolérances géométriques numérotées (extrait de [32]).



Cette ligne fait référence à des faces de l'objet, identifiées, pour la présentation, par des numéros, qui suivent le mot-clé « OnFeatureNo ». En effet le Calibre composé, que décrit cette ligne, a une géométrie qui correspond à la géométrie parfaite de l'objet. Cette géométrie peut être décrite par un fichier texte dans un format neutre, type IGES. Il suffit donc de faire référence aux identifiants des faces décrites par ce fichier.

La figure 75 donne, pour la présentation, une image de la géométrie décrite par ce fichier, avec le repérage de l'identifiant de chaque face (un numéro pour la présentation).

Figure 75 : Image du fichier décrivant la géométrie de l'objet (extrait de [32]).



Cette idée, qui reste à développer, permet une description sémantique des tolérances, c'est-à-dire donnant leurs sens, bien plus intéressante qu'une description syntaxique, c'est-à-dire donnant leurs codages graphiques sur les dessins, telle que la font les progiciels de CAO.

En effet, une description sémantique garantit l'indépendance de la description vis-à-vis des normes et de leurs évolutions, mais aussi, de fait, la cohérence sémantique des tolérances qu'il faut aujourd'hui vérifier sur les indications graphiques. Elle permet aussi la description de tolérances impossibles à exprimer par la syntaxe ISO, comme par exemple un groupe de zones de tolérance différentes les unes des autres alors que le GPS-ISO ne permet que des groupes de zones identiques. Enfin, elle permet une représentation tridimensionnelle des tolérances par l'affichage des calibres sur ou à côté de l'affichage de l'objet.

Néanmoins, la communication des tolérances entre acteurs de la production manufacturière doit aussi être visuelle et le dessin, avec des indications de tolérance, reste le support idéal. Par ailleurs, la représentation des tolérances par calibres ne constitue pas un modèle de tolérancement ; notamment, dans cette description, rien ne dit si les éléments tolérancés sont des éléments réels ou des éléments parfaits ajustés aux éléments réels.

D'autres travaux nous ont permis, plus tard, de proposer un modèle de limitation des écarts géométriques et son langage graphique. Nous le présentons à la section suivante.

3 Modèle formel des zones-liées

Partant des trois idées suivantes, nous avons établi, en 2011 avec Pierric Léonard alors en thèse, un modèle de tolérancement et son langage graphique. Ces idées sont :

- une surface parfaite unique, ajustée à la surface réelle, doit servir à définir l'écart de forme, de taille et de position ou d'orientation de la surface réelle ;
- fonctionnellement, il arrive assez souvent que diverses zones de tolérance doivent être liées entre-elles avec ou sans surface de référence ;
- la théorie des calibres ajustants apporte un support formel pour construire des groupes de zones avec ou sans système de références.

Nous ne donnons ici que les grandes lignes de ces travaux perfectibles et plutôt dans l'optique de montrer qu'on peut inventer d'autres langages de tolérancement.

Dans ce modèle nous distinguons quatre types de tolérance, avec, pour chacun, un seul symbole :

- \sim : tolérance de forme
- \pm : tolérance de taille
- $//$: tolérance d'orientation
- $\#$: tolérance de position

Ces symboles sont volontairement issus de polices de texte et donc disponibles au clavier, contrairement aux symboles des tolérances ISO.

Nous prenons le contre-pied d'une indication ISO qui, dans un même cadre, identifie plusieurs surfaces élémentaires : celle(s) qui est (sont) tolérancée(s) et celles qui servent de références ; aboutissant à des indications relativement compliquées.

Dans notre langage, une indication de tolérance ne « pointe » toujours qu'une seule surface élémentaire. La tolérance est construite par le regroupement des indications portant le même indice de groupe. Par exemple les trois indications de tolérance de position, qui commencent par la lettre « a » sur la figure 76 ci-dessous, définissent trois zones de tolérance liées rigidement entre-elles (voir figure).

Figure 76 : Dessin partiel d'une pièce avec trois indications de tolérance de position (en vert).

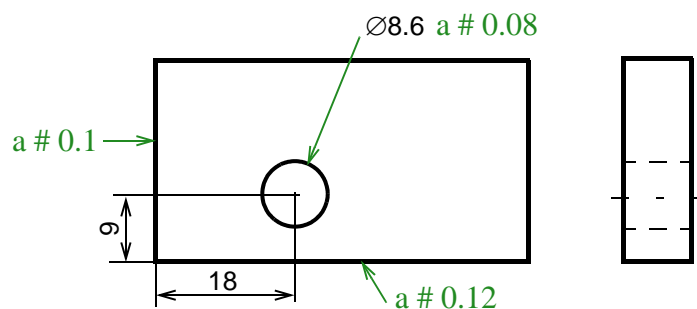
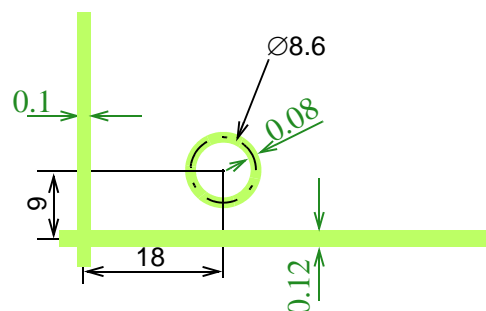


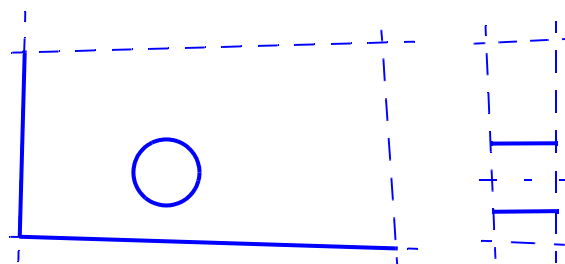
Figure 77 : Groupe de zones liées défini par les indications sur le dessin de la figure 76.



Ces zones concernent les surfaces élémentaires limitées ajustées aux surfaces élémentaires réelles et non directement ces dernières.

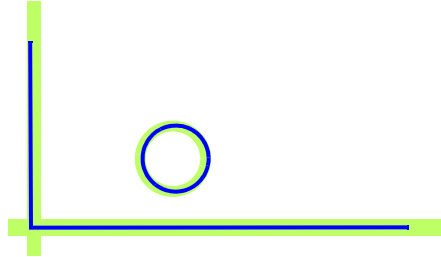
Pour cela, à chaque surface élémentaire de l'objet réel, est ajustée une surface élémentaire parfaite. Elle est ensuite limitée par ses intersections avec ses voisines. La figure 78 illustre le résultat obtenu : un ensemble de surfaces élémentaires parfaites limitées.

Figure 78 : Surfaces élémentaires ajustées aux surfaces réelles puis limitées.



L'objet, ainsi remplacé par des surfaces ajustées limitées, est conforme si ces surfaces peuvent être contenues dans le groupe de zones liées. La figure 79 montre une situation d'assemblage possible.

Figure 79 : Vérification de la tolérance (a).

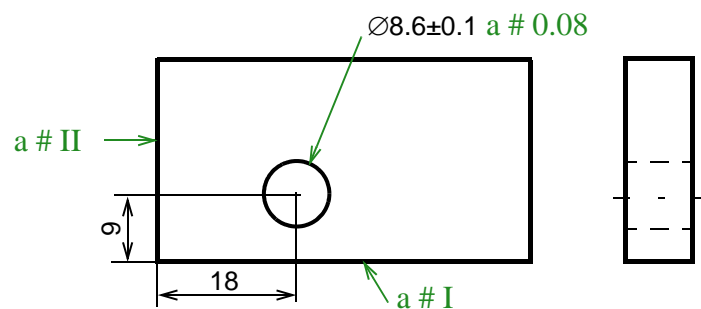


Cet exemple permet aussi d'illustrer comment la position du trou vis-à-vis des deux plans est vérifiée : le cylindre parfait a été ajusté à la surface réelle avec un diamètre figé à 8.6 mm car il n'a pas été tolérancé sur le dessin de la figure 76. C'est ce cylindre, limité par les plans avant et arrière de l'objet, qui doit être contenu dans la zone. L'axe du trou, qui n'existe que sur la géométrie cible, n'a pas d'existence réelle et n'a pas à être construit. D'ailleurs seule la surface est réellement fonctionnelle ; pas son axe. Cette approche permet ainsi de tolérer des quarts de cylindres pour lesquels les axes ne sont pas représentatifs de leurs positions.

Si une tolérance sur le diamètre du trou est ajoutée au dessin, par exemple ± 0.1 à la suite de $\varnothing 8.6$, alors l'ajustement du cylindre doit se faire avec un diamètre variable. Une fois ajusté, le diamètre du cylindre doit être dans l'intervalle de tolérance défini par cette indication supplémentaire. La zone de position du groupe (a) est alors une « couronne » dont le diamètre médian est égale au diamètre mesuré par le cylindre ajusté. Ainsi cette zone ne limite pas la taille du trou mais bien seulement sa position vis-à-vis des deux plans.

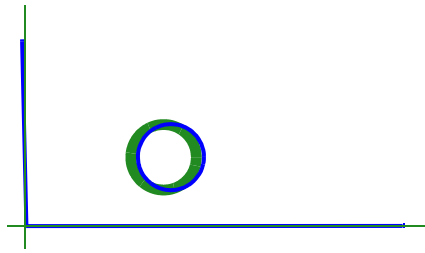
Par ailleurs les surfaces ajustées peuvent être prises en références seules ou dans des systèmes. Cela est indiqué par un chiffre romain en lieu et place de la valeur de la tolérance et donnant le numéro hiérarchique de la référence (voir figure 80 ci-dessous).

Figure 80 : Indication de références.



Les zones pour les plans ont alors une épaisseur nulle (voir figure 81 ci-dessous) et sont ajustées d'abord sur le plan limité pris en référence primaire, puis sur le plan limité pris en référence secondaire. Le cylindre ajusté limité doit alors pouvoir être contenu dans sa zone. La figure 81 montre une situation d'assemblage impossible au niveau du cylindre et donc d'un objet non conforme.

Figure 81 : Vérification de la tolérance (a).



Dans le groupe (a), si l'indication de position sur la référence primaire est remplacée par une indication d'orientation, c'est-à-dire le symbole //, la zone d'épaisseur nulle peut se traduire perpendiculairement à son épaisseur. La distance avec le cylindre peut alors varier et n'est pas astreinte à rester égale à 9 mm.

Enfin ce modèle prévoit des tolérances générales de forme et de position : les tolérances générales de forme limitent les écarts entre les surfaces réelles et leurs surfaces ajustées, tandis que les tolérances générales de position permettent de « construire » un groupe de zones liées entre-elles devant pouvoir contenir simultanément toutes les surfaces élémentaires ajustées.

Ainsi, ce modèle, proche sémantiquement du tolérancement ISO, est complet et cohérent, a contrario de ce dernier. Son langage graphique est très léger alors que les indications ISO sont si lourdes que se pose le problème de leur disposition autour du dessin.

Evidemment il n'offre pas toutes les possibilités du tolérancement ISO, mais, d'une part il doit pouvoir être complété, et d'autre part, toutes ses possibilités ne sont peut-être pas absolument nécessaires. Mieux vaut un modèle simple, cohérent, mais limité, qu'un système puissant mais plus compliqué.

4 De la vérification à la spécification : conclusions

Initialement développée pour la vérification par frontières, la théorie des calibres ajustants a été complétée pour permettre de vérifier aussi par zone et par paramètres. Ces trois méthodes de vérification correspondent à trois principes de limitation des défauts géométriques, illustrés sur la figure 82.

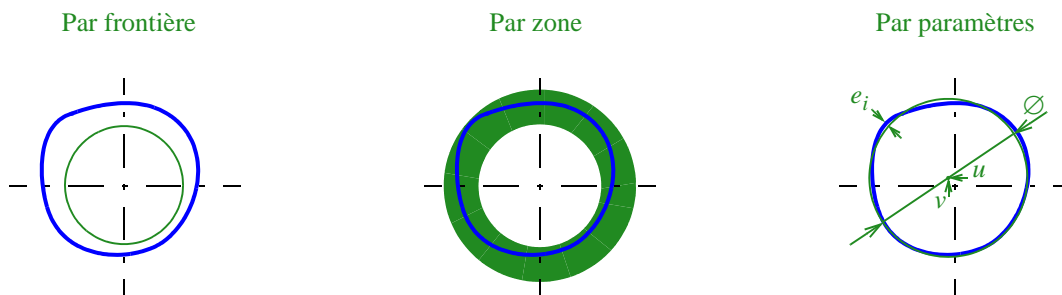
Soit on contraint la surface réelle à ne pas franchir une surface frontière. C'est ce que permet de faire le tolérancement ISO par l'usage de l'exigence du maximum, ou du minimum, de matière.

Soit on contraint la surface réelle, ou sa surface ajustée, à être contenue dans une zone. Pour le tolérancement normalisé il s'agit de la surface réelle ou de l'élément de situation « réel ».

Soit, encore, on limite des paramètres linéaires ou angulaires mesurés avec une surface ajustée. Le tolérancement ISO ne permet pas de limiter ainsi des paramètres sauf,

depuis peu, les tailles mesurées à partir de surfaces ajustées grâce à des modificateurs. Nous y reviendrons au prochain chapitre.

Figure 82 : Les trois principes de limitation des défauts géométriques.



Le modèle de tolérancement en zones liées, présenté à la section précédente, utilise les principes de limitation par zone, pour la position, et par paramètre pour les tailles et les écarts de forme. Plus précisément les zones concernent les surfaces ajustées et non les surfaces réelles comme dans l'ISO. Or c'est souvent le modèle d'un élément parfait dans une zone de tolérance qui est utilisé dans les méthodes proposées par la littérature scientifique pour calculer les valeurs des tolérances. Ce modèle semble donc bien adapté au tolérancement fonctionnel des produits.

Malheureusement, tout comme le GPS-ISO, il n'est pas adapté à la fabrication qui, nous l'avons vu au premier chapitre, nécessite le mesurage de paramètres tels que des cotes ou des distances de points vis-à-vis d'une surface ajustée.

La question est donc la suivante : faut-il envisager une transcription du tolérancement fonctionnel en un tolérancement paramétrique pour la fabrication, ou, tolérer fonctionnellement directement en paramétrique suivant un modèle qui reste à définir ?

Maurice Pillet a déjà montré que l'on pouvait proposer un modèle de tolérancement paramétrique simple. Ce modèle, qu'il a appelé le **tolérancement inertiel total**¹, consiste à limiter l'écart-type des écarts mesurés entre les points scannés et la surface ajustée avec ou sans contraintes de position ou d'orientation par rapport à d'autres surfaces ajustées.

Le besoin d'un tel modèle de tolérancement est grand ; d'autant que, comme nous le montrerons au prochain chapitre, les outils de spécification ISO ne constituent pas un modèle complet et cohérent pour la définition d'une géométrie optimale et des écarts tolérables, sur la géométrie réelle, vis-à-vis de celle-ci.

1. Améliorer la productivité – Déploiement industriel du tolérancement inertiel ; Maurice Pillet ; Ed. Eyrolles 2010.

CHAPITRE 3

Perspectives de recherches futures

1 Perspectives à court terme

Par les engagements pris auprès du CETIM-CTDEC et du projet SAPRISTI en démarrage, je vais, dans les quelques années qui viennent, travailler encore sur la correction et le pilotage des procédés de production, d'autant que je souhaite aussi participer à leur diffusion. Le rapprochement de nos méthodes avec celles de l'automatique seront peut-être aussi sources de nouvelles innovations. Pour cela je dois aussi me former à cette autre discipline.

Néanmoins, à plus long terme j'espère pouvoir revenir à la problématique de la spécification de la qualité géométrique des produits, qui n'est pas résolu et qui est une source énorme de gâchis industriels. Je m'en explique à la section suivante.

2 Perspectives à plus long terme

Ma motivation à travailler sur la création d'un modèle de spécification et de tolérancement vient aussi de l'état actuel du tolérancement normalisé ISO. Ci-après je présente différents problèmes majeurs de celui-ci en passant sous silence différentes indications des normes qui peuvent conduire à des interprétations différentes.

2.1 Les problèmes du tolérancement normalisé

2.1.1 La géométrie optimale ne peut pas être spécifiée

Dans le rapport technique ISO/TR 14638 de 1995¹, aujourd'hui remplacé par la norme ISO14638:2015, les deux objectifs de la spécification sont clairement indiqués : « *La*

1. ISO/TR 14638:1995 – Spécification géométrique des produits (GPS) -- Schéma directeur

spécification géométrique des produits, symbolisée GPS, consiste à définir, au travers d'un dessin de définition, la forme, les dimensions et les caractéristiques de surface d'une pièce qui en assure un fonctionnement optimal, ainsi que les dispersions autour de cet optimal pour laquelle la fonction est toujours satisfaite ».

Mais les normes ISO ne permettent pas de définir clairement la géométrie optimale d'un produit. D'ailleurs la notion de géométrie optimale, qui serait donc la cible pour la fabrication, est absente des normes qui distinguent essentiellement les géométries *nominale*, *idéale* et *non idéale*¹ avec un sens qui n'est pas le sens commun de ces adjectifs.

En effet, au sens ISO, une géométrie idéale est seulement une géométrie « *définie par une équation paramétrée* ». Ce n'est donc pas la géométrie optimale comme le sens commun peut le laisser entendre.

La géométrie optimale serait plutôt, au sens ISO, la géométrie nominale : « *modèle de forme parfaite défini par le concepteur. Le modèle nominal représente l'intention de conception* »². Pourtant les dimensions nominales ne sont que rarement optimales. Par exemple le diamètre nominal, d'un alésage « Ø12.5 g6 », est de 12.5 mm. Ce diamètre est en-dehors de l'intervalle de tolérance défini par la tolérance codifiée³ « g6 ». Ce n'est donc évidemment pas le diamètre optimal.

En fait il n'existe pas de moyen de spécifier que la dimension indiquée sur un dessin est la dimension optimale. Parfois, dans les entreprises, les dimensions indiquées sont celles des milieux des intervalles de tolérance, ce qui tend à faire entendre, que ce sont là les dimensions optimales. Pourtant rien ne l'indique explicitement sur le dessin. Par ailleurs, l'optimum n'est pas forcément le milieu de l'intervalle de tolérance. Par exemple, dans le cas de l'assemblage d'un arbre dans un alésage, l'optimum est plutôt du côté du jeu minimum et non du jeu moyen défini par les valeurs médianes des intervalles.

En conclusion, outre l'ambiguïté des adjectifs utilisés, le GPS-ISO ne permet pas de spécifier la géométrie optimale d'un produit, contrairement à l'un de ses objectifs annoncés.

2.1.2 Le tolérancement général n'est pas garanti

Il existe deux familles de tolérances générales normalisées^{4 5} : la première pour les cotes qui n'ont pas de tolérance sur le dessin et la seconde pour une partie des écarts de forme, d'orientation et de quelques positions qui ne sont pas tolérancés.

1. NF EN ISO 17450-1 Février 2012 – Spécification géométrique des produits (GPS) – Concepts généraux – Partie 1 : modèle pour la spécification et la vérification géométriques.

2. NF EN ISO 17450-1 Février 2012 – Spécification géométrique des produits (GPS) – Concepts généraux – Partie 1 : modèle pour la spécification et la vérification géométriques.

3. ISO 286-1:2010 – Système de codification ISO pour les tolérances sur les tailles linéaires.

4. ISO 2768-1:1989 – Tolérances générales -- Partie 1: Tolérances pour dimensions linéaires et angulaires non affectées de tolérances individuelles.

5. ISO 2768-2:1989 – Tolérances générales -- Partie 2: Tolérances géométriques pour éléments non affectés de tolérances individuelles.


Même si l'objectif des tolérances générales est de ne pas mesurer les défauts non tolérancés en considérant que le procédé de fabrication choisi permet de garantir le respect des tolérances générales, il peut être nécessaire, en phase de validation d'un procédé notamment, de vérifier qu'elles le sont bien. C'est alors pratiquement impossible.

Tout d'abord parce que sur les distances non tolérancées, les tolérances générales dimensionnelles n'ont pas de sens défini par les normes. Par exemple une hauteur de marche qui n'est pas tolérancée, ne peut de toute façon pas être mesurée selon l'ISO pour vérifier qu'elle respecte sa tolérance générale. Bien sûr on peut trouver une procédure personnelle pour la mesurer mais son résultat ne peut pas faire foi.

Ensuite, concernant les tolérances générales géométriques et notamment celles de perpendicularité et de parallélisme, elles posent le problème du choix des couples de surfaces à contrôler sur ces contraintes : par exemple, pour une surface plane, on peut contrôler sa perpendicularité avec ses voisines mais aussi son parallélisme avec tous les autres plans parallèles sur la pièce. C'est évidemment inapplicable industriellement.

2.1.3 La tolérance de forme qui limite aussi la taille

Alors que pour les cylindres de révolution une tolérance sur sa forme, appelée cylindricité, ne limite pas sa taille qui peut avoir une toute autre tolérance, ce n'est pas le cas pour les autres surfaces élémentaires et notamment la sphère et le cône.

Fonctionnellement cela peut être gênant, notamment pour les emmanchements coniques plus simples à maîtriser fonctionnellement par les intervalles de tolérances angulaires sur les deux cônes emmanchés. Malheureusement si ces angles sont tolérancés, le concepteur ne pourra pas tolérancer aussi simplement sa forme. Il devra utiliser des tolérances de rectitude et de circularité. D'un autre côté, s'il utilise le symbole générique de tolérance de forme, , le seul autorisé pour les autres surfaces que le cylindre et le plan, et curieusement appelé tolérance de « *profil de surface* », il devra encadrer l'angle du cône. Pour la sphère, il devra encadrer son diamètre. La tolérance de forme limite aussi la taille qui pourtant aurait pu fonctionnellement être plus grande. Par rapport au cylindre, il y a là une différence de traitement embêtante.

2.1.4 La quantification des défauts est impossible ou inutile

La caractérisation géométrique d'un produit, nécessaire au réglage de son procédé de fabrication – on l'a vu au premier chapitre – n'est pas correctement permise par le GPS-ISO.

La conséquence gênante la plus fréquente est liée au tolérancement dimensionnel réservé aux tailles des formes géométriques telles que les cylindres de révolution. En effet, une taille tolérancée sur un dessin, par exemple 10 ± 0.1 mm, ne permet pas de caractériser la taille de la forme fabriquée. Cette tolérance signifie seulement que toute dimension locale mesurée sur la forme ainsi tolérancée doit être dans l'intervalle de tolérance. Cela conduit le fabricant à choisir une autre procédure de mesure de cette taille ; par exemple en choisissant une des dimensions locales parfaitement localisée sur la forme.

Ce problème peut être évité en ajoutant un symbole modificateur à la suite de la tolérance, comme \textcircled{GX} par exemple, qui permet d'indiquer que l'intervalle de tolérance concerne alors la taille de la forme parfaite inscrite dans la forme réelle. Ce symbole fait partie d'un ensemble de symboles, introduits il y a quelques années dans les normes, mais leur usage risque bien d'être très limité dans l'industrie tant les techniciens et ingénieurs ont bien d'autres préoccupations, lors de la conception d'un produit, que de savoir comment une taille sera mesurée.

Le problème de caractérisation se pose aussi pour les tolérances d'orientation et de position. Celles-ci définissent des zones de tolérance, c'est-à-dire des domaines de l'espace tridimensionnel ou bidimensionnel, dans lesquels doivent pouvoir être contenu, soit pour la surface réelle elle-même, soit – et c'est le plus fréquent – un élément virtuel qui en est extrait comme un « axe réel » d'un trou cylindrique par exemple. Ces zones ont une taille égale à la valeur de la tolérance indiquée dans le cadre de tolérance. Comme pour les tolérances dimensionnelles, ces tolérances d'orientation et de position ne permettent théoriquement pas de caractériser l'orientation ou la position de l'élément tolérancé mais seulement de contrôler qu'il est dans la zone ou qu'il ne l'est pas.

La pratique métrologique consistant à mesurer, indirectement, la zone de tolérance de taille minimale enfermant l'élément tolérancé, n'a pas d'autre intérêt que de contrôler le respect de la tolérance car son résultat est inexploitable en fabrication : le défaut de position d'une surface, au sens de la zone minimale l'enfermant, peut n'être que du défaut de forme ou bien que du défaut d'orientation.

2.1.5 Des définitions complexes et peu significatives

Les normalisateurs ont cherché à formaliser les concepts historiques du tolérancement géométrique, sans les remettre en cause, en s'appuyant notamment sur les travaux de doctorat d'Alex Ballu en 1993¹.

Outre le nombre important de concepts relativement abstraits que cela a introduit dans diverses normes, nous souhaitons montrer ici que leurs définitions sont très souvent absconses et, en fait, n'ont pas de fondement solide. Nous reproduisons ici quelques-uns de ces concepts et leurs définitions donnés dans la norme ISO 17450-1:2011² :

« élément non idéal : élément imparfait totalement dépendant du modèle non idéal de la surface ou de la surface réelle de la pièce. »

« modèle non idéal de la surface : skin modèle <d'une pièce> modèle de l'interface physique de la pièce avec son environnement. »

1. Alex Ballu ; Identification de modèles géométriques composés pour la spécification et la mesure par coordonnées des caractéristiques fonctionnelles des pièces mécaniques ; thèse de doctorat de l'université de Nancy ; 1993.

2. ISO 17450-1:2011 Spécification géométrique des produits (GPS) — Concepts généraux — Partie 1: Modèle pour la spécification et la vérification géométriques

« *entité dimensionnelle de taille linéaire : entité géométrique possédant une ou plusieurs caractéristiques intrinsèques, dont une seule est considérée comme paramètre variable, qui, de plus, appartient à une «famille monoparamétrique» et obéit à la propriété de contenant monotonique, pour ce paramètre.* »

Le terme d'*entité géométrique* n'est pas défini mais semble équivalent au terme d'*élément géométrique*, qui cependant n'a pas de définition précise :

« *élément géométrique : point, ligne, surface, volume ou ensemble constitué des éléments précités.* ». Un élément géométrique peut donc être tout et n'importe quoi de géométrique !

Pourtant une autre définition indirecte de l'*élément*, ayant plus de sens, peut être trouvée dans l'ISO 8015¹ : « *une pièce doit être considérée comme étant constituée d'un ensemble d'éléments limités par des frontières naturelles.* » ; mais cette norme ne parvient pas à définir le nouveau concept de *frontières naturelles* introduit par cette définition, puisqu'elle indique, dans une note de la définition, qu'elles « *sont, dans la plupart des cas, des arêtes* », mais que « *ce n'est pas toujours le cas* » !

Nous le voyons, ces concepts se réfèrent les uns aux autres mais sont présentés dans un ordre quelconque et dans plusieurs normes. Certains semblent équivalents ; d'autres sont définis différemment selon la norme. Bien d'autres exemples de définition, notamment relatifs aux références mais aussi aux surfaces, présentent aussi ces problèmes.

La racine de tous ces concepts semble bien être l'*élément* qui, malheureusement, n'a pas de définition précise, comme nous venons de le voir.

En outre, on ne sait pas de quelle géométrie il est question dans ces définitions : est-ce la géométrie réelle, la géométrie parfaite, la géométrie ajustée... ?

Ces problèmes de forme proviennent aussi de la volonté de formaliser les concepts historiques du tolérancement, issus de la métrologie par instruments, sans jamais les remettre en cause. Le plus représentatif est sans doute le concept d'*axe réel* utilisé par les anciennes normes et qu'on a, depuis, cherché à définir, forcément de manière arbitraire et complexe.

2.1.6 Une forme inadaptée à sa diffusion

La spécification géométrique des produits est reconnue comme une discipline particulière des sciences de l'ingénieur, notamment par l'ISO² qui lui a associé l'acronyme « GPS », pour Geometrical Product Specification, depuis le début des années 1990. Ces organismes ont alors regroupé, sous cet acronyme, toutes les normes ayant un lien avec la géométrie, depuis la spécification, jusqu'à l'étalonnage des moyens de mesure, et les ont organisées dans un tableau à double entrées, appelé la *matrice GPS*, permettant de savoir

1. Traduit de la norme ISO 8015 Second edition 2011-06-01 – Geometrical product specifications (GPS) – Fundamentals—Concepts, principles and rules.

2. International Organization for Standardization, gestionnaires des normes internationales.

quelle norme consulter selon la caractéristique tolérancée et le maillon de la chaîne allant de la spécification à l'étalonnage. Ce travail a permis de détecter les doublons et les manques de normes.

Néanmoins il a aussi conduit à leur augmentation, en nombre et en volume, et à leur complexification. Ainsi le recueil¹, publié par l'AFNOR, contient environ 240 normes GPS, écrites ou révisées à des moments différents et par des groupes de personnes différents.

L'Europe et la France collaborent intensivement aux normes GPS-ISO et les reprennent en normes européennes et françaises, si bien qu'à quelques exceptions près, les normes françaises en GPS sont les normes ISO.

Pour le moins il aurait fallu séparer les normes de spécification des normes de vérification géométrique. D'autant qu'appeler, « normes de Spécification géométrique des produits », des normes de métrologie, crée des quiproquos.

Néanmoins cela n'aurait pas été suffisant pour garantir la cohérence des normes de spécifications qui doivent être environ 70 d'après un décompte que nous avons fait en 2011.

La diffusion des « bonnes pratiques », objectif des *normes volontaires* dont font partie les normes GPS, n'est donc pas facilitée par ces documents. L'approche américaine est, de ce point vue, bien plus pragmatique et pédagogique, puisqu'une seule norme² présente la spécification géométrique et seulement la spécification.

Si l'on met en vis-à-vis l'évolution normalisée de cette discipline et la capacité de d'intégration de concepts virtuels par les techniciens et ingénieurs, il est probable que nombre de concepts normalisés ne seront jamais utilisés et que la qualité de la spécification n'augmente plus beaucoup à l'avenir.

2.2 Les propriétés que devraient avoir un modèle de tolérancement

Nous l'avons déjà dit, le tolérancement devrait être utile à la fabrication et donc, probablement, être paramétrique. Il doit aussi permettre de mener des calculs en conception de produit.

Pour cela, il nous semble que chaque type de tolérance devrait ne limiter qu'un seul type de défaut de manière à ce que ces derniers puissent facilement être cumulés sans interférer.

Il doit reposer sur des définitions simples et claires et d'abord sur les diverses géométries manipulées. La définition de la notion de surface élémentaire semble, dans ce cadre, indispensable. En d'autres termes, la définition d'un modèle de tolérancement, ou plus exactement de spécification géométrique, ne doit pas reposer sur des exemples, comme c'est encore le cas dans l'ISO, mais sur des définitions.

1. GPS - Spécification géométrique des produits ; AFNOR, août 2011.

2. ASME Y14.5 - 2009 : Dimensioning and Tolerancing (GD&T).

Il doit permettre de spécifier indépendamment la géométrie optimale et les tolérances.

Le tolérancement général doit être garanti.

Il doit être possible d'appliquer une tolérance à un résultat de mesure individuel de la caractéristique mais aussi à un critère statistique calculé sur plusieurs résultats de mesure de la caractéristique. Maurice Pillet en a montré la nécessité fonctionnelle grâce à ses travaux sur le tolérancement inertiel.

Il doit aussi permettre l'utilisation des outils ISO qui ont fait leur preuve. Je pense notamment au système de codification des tolérances, communément appelé « système de tolérances et d'ajustements ».

Ces propriétés devront être précisées. Ce ne sont là qu'une première liste à reformuler et probablement à compléter.

2.3 Organisation scientifique d'un projet de définition d'un modèle de tolérancement

Ce thème me semble pouvoir faire l'objet de plusieurs thèses :

- Il y a d'abord la recherche d'un modèle et de son langage, sans perdre de vue les objectifs d'utilisation par les concepteurs et par les fabricants. Ce modèle pourra ensuite être complété, par exemple pour des vérifications géométriques sur des assemblages sur lequel il existe actuellement une spécification technique¹. Ce travail ne pourra donc pas se faire en ignorant les outils de tolérancement normalisé. Nous l'avons déjà dit, ce tolérancement doit permettre de caractériser la géométrie du produit et non pas seulement de la qualifier, en « bonne » ou « pas bonne ». Ainsi elle sera utilisable en production. Les tolérances sur les caractéristiques mesurées permettront une acceptation individuelle ou par lot de produits.

- Il faudra aussi informatiser son langage, pour le rendre accessible sur les CAO, mais aussi permettre son échange entre logiciels, et donc définir un format neutre d'échange.

- Il y a ensuite son utilisation en fabrication, en adaptant les méthodes de mesurage et de correction mises au point ces dernières années.

- Il y a enfin son utilisation en conception. Beaucoup de travaux ont déjà été conduits sur la synthèse, par calcul, des tolérances géométriques. Nous pensons que ces travaux ont été relativement « bridés » par les limites du tolérancement normalisé. Un modèle plus simple, plus générique, et sans doute paramétrique, devrait simplifier la conception de ces calculs.

Il y a donc, on le voit, encore beaucoup à faire dans le domaine de la spécification malgré déjà une vingtaine d'années de recherche.

1. 17863 ISO TS. (2013) – Tolérancement des assemblages mobiles.

Ces travaux seront difficiles à engager, d'une part vis-à-vis de leur financement, d'autre part vis-à-vis des jeunes chercheurs. En effet ces sujets, très amonts et généraux, auront du mal à trouver des financement privés. C'est donc davantage sur les appels à projet publics qu'il faudra essayer de les faire financer. Pour la même raison, le recrutement de doctorant risque aussi d'être difficile. Ce sera donc un travail de longue haleine.

TROISIÈME PARTIE

Implications

En plus des contrats recherche que j'ai présentés dans la première partie de ce mémoire, j'ai créé, animé, ou simplement participé, à différents groupes scientifiques. J'en dresserai l'inventaire au premier chapitre.

Depuis ma nomination, je me suis régulièrement impliqué dans le fonctionnement des structures de l'Université. Je présenterai mes mandats passés et actuels au second chapitre.

Enfin je m'investis beaucoup dans la pédagogie de mes enseignements dont j'ai la chance qu'ils soient liés, pour plusieurs, à mes activités de Recherche. Je présenterai ces enseignements au dernier chapitre en montrant leurs liens avec ma Recherche.

CHAPITRE 1

Implications scientifiques

1 Création et animation de groupes scientifiques

1.1 2006 – 2012 : groupe du programme TOLÉRANCEMENT ET QUALITÉ DES PRODUITS du pôle MONT BLANC INDUSTRIES

En 2003 et 2004, l'association THÉSAME MÉCATRONIQUE & MANAGEMENT¹, en la personne de Jean Breton, nous avait permis, à Max Giordano et à moi, de réaliser une expertise et une formation sur la spécification géométrique des produits pour la société NTN-SNR (voir chapitre 3, section 1). Ayant identifié, se faisant, une thématique de recherche intéressant vivement les entreprises de la région, l'association nous a proposé de créer un programme de R&D dans le cadre de l'appel à projet de création de pôles de compétitivité de l'État français.

En 2005, j'ai donc accepté de rédiger le programme 2 : TOLÉRANCEMENT ET QUALITÉ DES PRODUITS (TQP) du dossier de demande de création du pôle « Vallée de l'Arve ». Ce programme de R&D regroupait des projets de recherche du LMÉCA, des projets du CETIM-CTDEC et un autre de la société SOMFY. L'Annexe G reproduit en partie le texte de ce programme. Il a contribué à la labellisation du pôle ARVE INDUSTRIES en 2006 (aujourd'hui appelé MONT-BLANC INDUSTRIES) et a été financé à hauteur de 300 000 € par la région RHÔNE-ALPES et entre 35 000 € à 75 000 €, selon les années, par le Conseil général de la HAUTE-SAVOIE.

J'ai dirigé ce programme de 2006 à 2012, d'abord seul, puis, plus tard, avec Jacques Sappei, ingénieur-docteur au CETIM-CTDEC. Cela a consisté à animer les réunions du comité de pilotage, réunissant, quatre à six fois par an, les huit chercheurs en « Tolérancement » du laboratoire, Jacques Sappei et Marc Bouix de la société SOMFY ; à gérer les budgets : ce programme fédérait chaque année une dizaine de projets gérés chacun par un responsable de projet et avait de multiples sources financières.

1. Association fondée par l'UNIVERSITÉ SAVOIE MONT BLANC, le CETIM-CTDEC, le centre de ressource MIND-MICROTECHNOLOGIE et l'AGENCE ECONOMIQUE DÉPARTEMENTALE de HAUTE-SAVOIE. Elle emploie aujourd'hui une vingtaine de personnes.

Ce programme a permis le financement d'une thèse de doctorat, dirigée par Maurice Pillet et Alain Sergent, chercheurs au laboratoire SYMME, d'un ingénieur en programmation informatique et d'un post-doctorant, ainsi que de multiples missions.

Nous avons dû développer un classeur EXCEL® de gestion financière pour ce programme en particulier pour ventiler les prélèvements de l'Université mais aussi pour faire le bilan des dépenses de chaque projet.

Chaque année j'ai présenté un bilan de l'année écoulée et une demande financière pour les projets futurs à la commission économie du Conseil général.

J'ai dû également renégocier le contrat de la subvention de la Région Rhône-Alpes qui comportait de multiples erreurs financières.

Le total des subventions de 2006 à 2012 a été de 511 000€ pour le laboratoire.

A partir de 2011, faute d'une représentation au comité de direction du pôle, le programme TQP s'est progressivement éteint. Aujourd'hui il n'existe plus en tant que tel dans la feuille de route 3.0 du pôle mais les quelques projets du laboratoire dans ce domaine continuent à être labellisés par le pôle.

1.2 2013 – 2015 : équipe « Tolérancement » au laboratoire SYMME

En 2013, j'ai accepté de « re-constituer » le groupe des chercheurs en « tolérancement » du laboratoire suite à la disparition du programme TQP et à la demande de certains d'entre-eux, afin de relancer une certaine dynamique.

Ma nouvelle responsabilité officielle de groupe, au sein du labo (voir 2.3.2), ne me permet plus de réunir cette partie des chercheurs.

2 Participation à des groupes scientifiques

2.1 1995 – 1997 : groupe de travail du PÔLE PRODUCTIQUE

Au début de ma carrière, j'ai participé à un groupe de travail sur la « Modélisation géométrique et intégration technologique » du PÔLE PRODUCTIQUE de la Région RHÔNE-ALPES. Ce groupe, constitué de chercheurs de la région RHÔNE-ALPES, s'est réuni tous les deux mois de 1995 à 1997. Il n'a pas eu de suite à ma connaissance.

2.2 2001 – 2016 : Groupe de Recherche en Tolérancement (GRT)

Je suis un membre actif du GROUPE DE RECHERCHE EN TOLÉRANCEMENT (GRT), depuis sa création en 2001. Ce groupe n'a pas d'existence officielle mais réunit, deux fois par an et pour deux jours, l'ensemble des chercheurs français en tolérancement pour échanger sur leurs avancées respectives.

2.3 2011 – 2016 : Métrologie Grand Sud (MGS)

Depuis 2011 je suis membre de l'association MÉTROLOGIE GRAND SUD (MGS). J'ai accepté d'animer, pour elle, un projet d'inter-comparaison des logiciels de métrologie tridimensionnelle en 2014.

3 Organisation de congrès

3.1 2004, 2006, 2009 et 2015 : JOURNÉES EUROPÉENNES DU TOLÉRANCEMENT (JET)

Nous avons organisé, avec THÉSAME MÉCATRONIQUE & MANAGEMENT et mon collègue Max Giordano, la première édition d'un séminaire sur le tolérancement à destination des industriels en 2004, qui sera appelé, lors de la deuxième édition en 2006, les JOURNÉES EUROPÉENNES DU TOLÉRANCEMENT.

Devant le succès de ces deux premières éditions, j'ai participé à l'organisation de la troisième édition en 2009 et j'ai relancé son organisation en 2015 avec l'aide du CETIM de Senlis et du CETIM-CTDEC.

3.2 2009 : séminaire international COMPUTER AIDED-TOLERANCING (CAT2009)

J'ai participé à l'organisation du Congrès international sur le Tolérancement Assisté par Ordinateur (COMPUTER AIDED-TOLERANCING) à ANNECY en 2009.

3.3 2011, 2014 : Séminaires du Groupe de Recherche en Tolérancement français (GRT)

Je me suis chargé de la « logistique » des éditions de mai 2004, de mai 2011 et de juin 2014 du séminaire de deux jours du Groupe Recherche en Tolérancement.

4 Prestations de services

J'ai toujours accepté d'aider, dans mon domaine de recherche, les entreprises qui me le demandaient. C'est ainsi que j'ai réalisé les prestations suivantes :

- En 1995-1996 : aide au développement des algorithmes de vérification des tolérancements géométriques du progiciel METROLOG II de la société METROLOGIC GROUP à GRENOBLE ;

- En 2003 : expertise sur la façon de tolérancer du bureau d'études automobile de la société NTN-SNR à ANNECY [76] avec Max Giordano ;

- En 2005 : fourniture d'un rapport pour la programmation du « balançage », dans le plan, d'un groupe de points de centres pour la société MCE TECHNOLOGIE à EVIAN-LES-BAINS [77] ;
- En 2015 : fourniture d'un rapport d'étude sur le paramétrage CAO et le tolérancement d'une roue-libre pour la société MAVIC à ANNECY avec Max Giordano.

5 Collaborations internationales

Ma principale collaboration internationale s'est faite dans le cadre du projet INETFORSMEP de 2002 à 2005 et présenté à la sous-section 2.2 de la première partie.

En juillet 2015, j'ai accueilli un confrère algérien, Djezouli Moulai-Khatir, un mois au laboratoire ce qui nous a permis de publier un article [40]. Nous continuons depuis à collaborer sur un autre article qui devrait paraître en 2017.

En juillet 2016, j'ai accueilli une doctorante marocaine, Maroua Ghali Ep Ben Salem, pendant deux mois. Notre travail commun devrait déboucher, là aussi, sur une publication en 2017.

6 Bilan

Mon expérience en collaboration internationale est faible, j'en conviens. J'avoue ne pas chercher à la développer ayant déjà fort à faire par mes collaborations industrielles.

Je compte continuer à rester actif au sein du GRT s'il reste français. En effet, la dernière édition, en Allemagne, lui a fait prendre une forme plus proche de celle d'un congrès en anglais avec un appel à communication, donc plus formel.

Je vais continuer à œuvrer au sein de l'association MÉTROLOGIE GRAND SUD, notamment pour finaliser le projet d'inter-comparaison des logiciels de métrologie tridimensionnelle.

J'espère aussi pouvoir reprendre des prestations de services ou des formations pour les entreprises car ce sont toujours des expériences enrichissantes.

CHAPITRE 2

Implications administratives

1 Mandats passés de 1997 à 2006

1.1 Mandats à l'Université

Au niveau de l'Université, j'ai accepté, dès 1998, de faire partie du comité consultatif, alors appelé commission de spécialistes, de la 60^{ème} et 62^{ème} section CNU et de participer activement au recrutement des ATER et des maîtres de conférences. J'ai également fait partie d'une commission de recrutement à l'UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER à GRENOBLE en 2010.

En 2000, j'ai été élu au conseil scientifique de l'UNIVERSITÉ DE SAVOIE et j'ai accepté de faire partie de la commission des moyens qui se tient préalablement au conseil scientifique pour lui proposer un avis sur tous les contrats scientifiques de l'établissement.

1.2 Mandats à l'école

Au niveau de ma composante de rattachement, l'ESIA, j'ai accepté, dès 1997, de reprendre la responsabilité de la plateforme de CFAO de l'AIP PRIMECA DAUPHINÉ-SAVOIE localisée dans nos locaux.

Cette responsabilité consistait à participer aux réunions du bureau de l'AIP PRIMECA DAUPHINÉ-SAVOIE, à ses Conseils d'administration, à réaliser le suivi des heures de formation et de leurs coûts, ainsi qu'à coordonner les personnes devant garantir l'installation et le fonctionnement des logiciels de la plateforme.

En 1999, j'ai été élu au Conseil d'administration de l'ESIA.

En 2000, j'ai accepté de reprendre la responsabilité de la troisième année de la Licence de technologie mécanique localisée à l'ESIA. J'ai dû refondre son programme pour le « passage » au format LMD en 2005 en me coordonnant avec la direction de l'U.F.R. Sciences fondamentales et appliquée (SFA) localisée au BOURGET-DU-LAC.

De par ces responsabilités pédagogiques j'ai été membre du comité de direction de l'école de 1999 à 2007.

1.3 Synthèse des mandats passés de 1997 à 2006

Le tableau 1 résume mes mandats de 1997 à 2006.

Tableau 1 : Mandats de 1997 à 2006.

Université	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Comité consul. 60-62		1	1							
Commission de recrutement		ESIA	ESIA	ESIA	ESIA					
Conseil scientifique				1	1	1	1	1	1	
Commission des Moyens				1	1	1	1	1	1	
Composante	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Responsable CFAO AIP-DS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Responsable Licence TM				1	1	1	1	1	1	1
Comité de direction			1	1	1	1	1	1	1	1
Conseil d'administration			1	1	1					

2 Mandats actuels depuis 2007

2.1 Mandats à l'Université

Au niveau de l'Université, j'ai été ré-élu au comité consultatif en 2011 et je continue donc à participer au recrutement des ATER ; le recrutement de Maître de conférences étant devenu beaucoup plus rare.

En outre j'ai accepté, en 2013, 2014 et 2015, de faire partie de la commission de recrutement de professeurs agrégés à l'I.U.T. d'ANNECY-LE-VIEUX au département GÉNIE MÉCANIQUE ET PRODUCTIQUE.

2.2 Mandats à l'école

A la disparition de la Licence de Technologie mécanique, j'ai repris la responsabilité du dernier semestre de formation des élèves-ingénieurs en Mécanique-Matériaux de POLYTECH ANNECY-CHAMBÉRY de 2007 à 2013 (« Responsable semestre 9 MM » dans le tableau 2).

Depuis ma nomination en 1996, je suis responsable de quatre à cinq éléments constitutifs (E.C.) de la formation, selon les années (« Responsable de 4 à 5 E.C. » dans le tableau 2).

Chaque année je suis tuteur d'un ou deux élèves-ingénieurs en alternance à l'INSTITUT DES TECHNIQUES D'INGÉNIEUR DE L'INDUSTRIE 2 SAVOIES (ITII 2 SAVOIES), ainsi que d'élèves-ingénieurs en projet de fin d'études ou en stage (« Tuteur ITII, PFE, Stages » dans le tableau 2).

Depuis 2008 je suis responsable des sujets de stage des élèves en MÉCANIQUE-MATÉRIAUX en 3^{ème}, 4^{ème} et 5^{ème} année (« Responsable Stages MM » dans le tableau 2).

Depuis 2012 je suis élu au Comité d'orientation stratégique de l'école (« Comité d'Orientation Stratégique » dans le tableau 2) et depuis fin 2014 à son Conseil (« Conseil Polytech » dans le tableau 2).

2.3 Mandats au laboratoire

2.3.1 Correspondant valorisation

Au niveau du laboratoire, j'ai accepté, fin 2009, de reprendre la mission de correspondant valorisation (« Correspondant Valorisation » dans le tableau 2) qui consiste, d'une part, à être l'interface du laboratoire avec les organismes ou les personnes extérieures souhaitant un service scientifique et avec la cellule valorisation de l'Université ; et d'autre part à aider les membres du laboratoire à protéger et à valoriser leurs travaux. A cette fin, je me forme régulièrement sur ces sujets et je mets à disposition du laboratoire l'ensemble de l'information recueillie sur ces sujets.

En 2012, j'ai mis en place un outil d'aide au chiffrage et à l'édition de devis qui est maintenant largement utilisé au laboratoire. A cette occasion j'ai été l'instigateur de la mise en place de l'intéressement financier à la prestation de service à l'UNIVERSITÉ SAVOIE MONT BLANC, en m'appuyant sur des décrets le permettant. Ce dispositif est proposé à l'ensemble du personnel de l'Université depuis octobre 2014, avec la méthode de calcul de l'intéressement que j'ai mise au point en 2013. Je donne plus de détails sur cet outil de chiffrage dans l'Annexe H.

2.3.2 Responsable de groupe

Le laboratoire est organisé, fonctionnellement, en quatre groupes de compétences. Je fais partie du groupe « Qualité des produits et des systèmes (QPS) » qui rassemble, aujourd'hui, deux professeurs de 61^{ème} section, neuf maîtres de conférence de 60^{ème}, 61^{ème} et 27^{ème} sections, un professeur agrégé de 60^{ème} section, quatre doctorants et un programmeur informatique.

Fin 2014, j'ai accepté d'en être le nouveau responsable. A ce titre je suis membre du Bureau de direction du laboratoire qui siège toutes les semaines, ainsi que de son Conseil, toutes les six semaines.

J'anime les réunions du groupe, toutes les six semaines, qui ont pour but essentiel, aujourd'hui, de faire circuler l'information entre les chercheurs et la direction. J'ai mis en place un site ALFRESCO®¹ pour gérer nos documents communs (compte-rendus de réunion, ordre du jour des prochaines réunions, liste de nos compétences, de nos projets...).

1. Système de gestion de contenu choisi par l'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE.

2.4 Synthèse des mes mandats actuels

Le tableau 2 résume mes mandats actuels depuis 2007 présentés précédemment.

Tableau 2 : Mandats depuis 2007.

Université	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Comité consultatif 60-62	1	1			1	1	1	1	1	1
Commission de recrutement				UJF	Poly.		IUT A.	IUT A.	IUT A.	IUT A.
Composante	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Responsable semestre 9 MM	1	1	1	1	1	1	1			
Responsable de 4 à 5 E.C.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tuteur ITII, PFE, Stages	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Responsable Stages MM		1	1	1	1	1	1	1	1	1
Comité d'Orientation Stratégique						1	1	1	1	1
Conseil Polytech								1	1	1
Laboratoire SYMME	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Correspondant Valorisation				1	1	1	1	1	1	1
Responsable du groupe QPS									1	1
Bureau									1	1
Conseil									1	1
Externe	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
GRT	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
MGS					1	1	1	1	1	1

3 Bilan de mon implication dans le fonctionnement de l'établissement

Ma participation au conseil scientifique de l'Université m'a donné très tôt une assez bonne vision du fonctionnement d'une université. Néanmoins cette expérience est maintenant ancienne et je pense la renouveler prochainement d'une manière ou d'une autre.

L'animation que je fais des réunions depuis 2006 est, je crois, appréciée par mes collègues et m'a donnée une certaine expérience dans cet exercice.

Enfin, ma mission de correspondant valorisation, ainsi que la volonté de valoriser mes propres travaux, m'ont permis d'acquérir une assez bonne compétence en matière de protection intellectuelle.

CHAPITRE 3

Implications pédagogiques

1 Formation continue

En 2000, nous avons été sollicités, mon collègue Max Giordano et moi, par le CENTRE EUROPÉEN DE RECHERCHE NUCLÉAIRE, le CERN, à GENÈVE pour former leur personnel technique à la spécification géométrique des produits. La formation des techniciens et ingénieurs du CERN s'est déroulée en plusieurs stages de 2000 et 2001 ; d'abord en utilisant la formation « RENAULT - E.N.S. de CACHAN » puis la nôtre.

En effet, la même année nous avons été sollicité par l'IUFM de GRENOBLE et avons donc développé notre propre support de formation [74]. Nous avons formé la plupart des enseignants des lycées techniques de la région avec l'aide d'autres enseignants et grâce à plusieurs stages étalés de 2000 à 2002. J'étais le **coordinateur de ces formations** pour le compte de l'IUFM de GRENOBLE.

Notre support de formation a plusieurs fois été amélioré et comporte aujourd'hui plus de 150 diapositives. Il nous a permis de former d'autres techniciens et ingénieurs des entreprises DANA GLACIER VANDERVELL ; NTN-SNR ; et HOGGAR SOLUTION.

Au total, entre 2000 et 2005, j'ai personnellement formé plus de **150 enseignants, techniciens et ingénieurs** sur la spécification géométrique des produits

2 Formation initiale

Mes enseignements à POLYTECH ANNECY CHAMBÉRY sont du domaine du **Génie Mécanique**.

Outre des enseignements traditionnels en CAO et Mécanique du solide indéformable (statique et dynamique), je me suis spécialisé dans le domaine des **outils pour la qualité des produits** en créant des cours, des TD et des TP. Ce sont ces enseignements spécifiques que je développe ici, en soulignant comment ma recherche les a influencés, mais aussi comment l'enseignement peut nécessiter une recherche.

L'ensemble de mes supports sont numériques et accessibles aux élèves sur la **plateforme d'enseignement à distance**¹ de l'école.

2.1 Qualité en production

A la fin de ma thèse, en 1995, j'ai été recruté en tant que demi-ATER pour la première promotion d'ingénieurs de l'ESIA.

Alors qu'aucun programme précis ne m'avait été donné, j'ai construit un cours et ses exercices sur les méthodes statistiques pour la production manufacturière comme le « Contrôle statistique de lot » ou la « Maîtrise Statistique des Procédés ».

Ces dernières années, mes résultats de recherche sur le pilotage des usinages (présentés dans la deuxième partie du mémoire) m'ont donné **une vision plus évoluée de la « maîtrise statistique des procédés »** et mon enseignement s'en est trouvé très modifié.

Aujourd'hui **j'enseigne la matrice d'incidence**, développée dans COPILOT-PRO®, et je propose une carte de contrôle « unifiée » dans laquelle les limites peuvent être élargies depuis les « limites de Shewhart » traditionnelles, jusqu'aux « limites élargies » telles que je les ai développées dans COSELECT.

2.2 Plans d'expériences

Dès 1997, j'ai créé un cours de Plans d'expériences pour les DESS AII et MII de l'E.S.I.A. Je me suis fortement inspiré de l'enseignement de Maurice Pillet la première année, puis j'ai convergé vers une approche pédagogique personnelle ces dernières années.

2.3 Métrologie

Pour les élèves-ingénieurs en apprentissage et en formation continue, j'ai développé un cours de métrologie générale et dimensionnelle dès ma nomination aux fonctions de Maître de conférences en 1996. J'y développe les notions fondamentales de métrologie, comme son organisation et la propagation des incertitudes, puis aborde les méthodes de mesurage dans le domaine de la métrologie dimensionnelle.

2.4 Spécification géométrique des produits

En 2008, nous avons profité, avec Max Giordano, d'une réforme du programme pédagogique, pour instituer **un module de formation à la spécification géométrique des produits** d'une trentaine d'heures.

En plus de la méthode de la « chaîne minimale de cotes » et des normes d'interprétation des tolérances géométriques, nous avons cherché à proposer aux élèves des méthodes permettant d'aboutir aux tolérances géométriques.

1. <http://ead-polytech.univ-savoie.fr/user/policy.php>

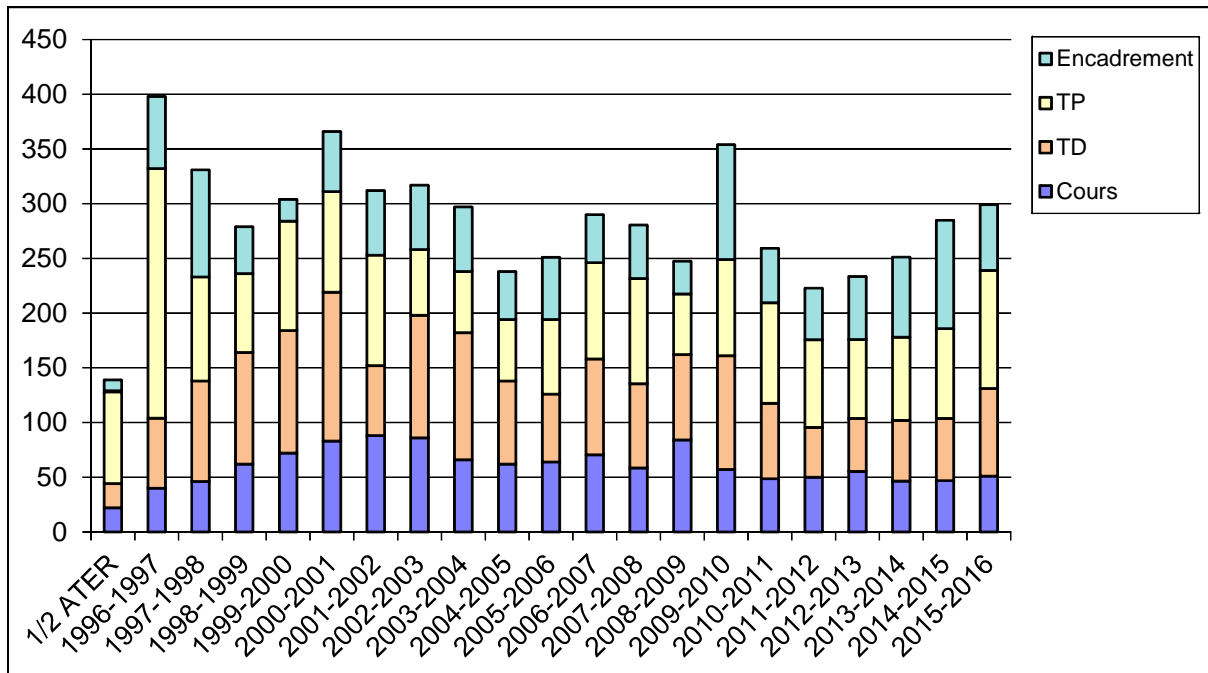
A partir de 2010, j'ai continué à faire évoluer ce cours seul avec le souci de donner **une démarche complète** aux élèves, partant du modèle nominal du mécanisme pour aboutir à la spécification de chacune des pièces sur un dessin.

Je n'y suis vraiment arrivé qu'en 2014, à force de développer une méthode originale pour déterminer les distances fonctionnelles dans les mécanismes que je nomme à présent la **méthode des contacts colorés**. Je donne le début de cette méthode dans l'Annexe I.

3 Charge en enseignement

Le sous-encadrement récurrent de l'école, tout particulièrement en génie mécanique, m'a conduit à faire davantage d'heures que souhaitées. C'est ainsi que j'ai fait chaque année **entre 250 et 350 heures effectives** (davantage en « équivalent TD ») de cours, TD, TP et d'encadrements de projets ou de stages (voir figure 1).

Figure 1 : Charges en heures effectives depuis ma nomination.



4 Bilan

Comme de nombreux collègues, je passe beaucoup de temps à préparer mes enseignements pour qu'ils soient intéressants et pédagogiques. J'ai la chance que plusieurs d'entre-eux correspondent à mes sujets de recherche. C'est une source de motivation supplémentaire.

Par ailleurs la **construction d'une pédagogie** oblige à formaliser les concepts et donc est en soi une activité de recherche. Ces deux métiers, enseignant et chercheur, sont donc pour moi parfaitement complémentaires.

CONCLUSION GÉNÉRALE

« L'habilitation à diriger des recherches sanctionne la reconnaissance du haut niveau scientifique du candidat, du caractère original de sa démarche dans un domaine de la science, de son aptitude à maîtriser une stratégie de recherche dans un domaine scientifique ou technologique suffisamment large et de sa capacité à encadrer de jeunes chercheurs. »¹.

Aussi, dans la première partie, j'ai retracé mon parcours professionnel en Recherche, pour montrer ma **capacité à élaborer des projets de recherche** sur contrat – quatre au total – **à animer ces projets** – six au total – et **à diriger de jeunes chercheurs** en doctorat – cinq au total. J'ai aussi voulu montrer ma forte volonté à faire aboutir, protéger et valoriser mes résultats de recherche.

Toute mon activité de recherche vise l'amélioration de la qualité géométrique des produits. Dans ce domaine, le poids des normes, des habitudes et des pratiques industrielles est presque « écrasant ». Pourtant, je pense avoir réussi à élaborer des **résultats originaux**, solides scientifiquement, et applicables en industries manufacturières. Je les ai présentés, en détail, dans la deuxième partie de ce mémoire, organisés par les quatre étapes de la qualité géométrique des produits :

- 1 sa **Spécification**, par les services études ;
- 2 sa **Préparation**, par les services méthodes ;
- 3 sa **Fabrication**, par les services de production ;

1. Arrêté du 23 novembre 1988 relatif à l'habilitation à diriger des recherches. Version consolidée au 22 septembre 2014.

4 et sa **Vérification**, par les services qualité mais aussi les services de production.

En «Préparation», j'ai notamment développé la méthodologie COPILOT-PRO® et en «Fabrication», la méthode COSELECT.

En «Vérification», j'ai développé la théorie des CALIBRES AJUSTANTS.

En «Spécification», j'ai examiné l'exploitation de cette théorie pour représenter les tolérances géométriques dans des fichiers pour l'échange de données de spécification entre logiciels.

J'ai aussi noté l'état complexe de la normalisation dans ce domaine et ai montré, par un exemple de modèle formel de spécification et de tolérancement – les zones liées – qu'il pouvait en être autrement.

C'est donc l'un des objectifs que je souhaite atteindre par les travaux que j'engagerai dans le futur et que j'ai présentés au dernier chapitre de la deuxième partie.

Enfin, même si cela ne fait pas partie, explicitement, du « cahier de charges » officiel d'une candidature à l'Habilitation à diriger des recherches, j'ai souhaité montrer mon investissement dans les structures auxquelles je suis rattaché, car cela fait aussi partie des qualités d'un enseignant-chercheur universitaire.

J'ai donc présenté, dans la dernière partie de ce mémoire, mon investissement pour faire « vivre » la recherche, au laboratoire ou dans des organisations extérieures, mes mandats et mon implication pédagogique.

Sur ce dernier point, comme sur l'activité en Recherche, je pense donc avoir démontré des qualités autorisant mon habilitation à diriger des recherches.

ANNEXES

ANNEXE A

Curriculum Vitae

1 État civil

Nom Prénom : Pairel Éric

Date et lieu de naissance : 7 décembre 1967 à ANGERS

Nationalité : Française

Situation de famille : Marié, 2 enfants (1997 et 1999)

Situation militaire : Effectué de septembre 1991 à juin 1992 (10 mois)

Adresse personnelle : 465 route de Troinex, 74350 CRUSEILLES

Téléphones personnels : +33 (0)4 50 32 26 45 / +33 (0)6 17 07 88 78

Situation actuelle : Maître de conférences Hors classe à
l'UNIVERSITÉ SAVOIE MONT BLANC
Enseignant à POLYTECH ANNECY-CHAMBÉRY
Chercheur au laboratoire SYMME

Adresse professionnelle : Laboratoire SYMME, POLYTECH ANNECY-CHAMBÉRY,
BP 80439, 74944 ANNECY-LE-VIEUX Cedex

Téléphone professionnel : +33 (0)4 50 09 65 61

Adresse courriel : eric.pairel@univ-smb.fr

2 Formation en Génie mécanique et en Informatique

- 1986 :** Baccalauréat de CONSTRUCTION MÉCANIQUE (série F1) ; ANGERS ; mention Assez-bien.
- 1988 :** DUT¹ de GÉNIE MÉCANIQUE ET PRODUCTIQUE ; UNIVERSITÉ DE NANTES ; classé dans les trois premiers.
- 1990 :** MST² de PRODUCTIQUE APPLIQUÉE AUX INDUSTRIES MÉCANIQUES ; UNIVERSITÉ DE SAVOIE ; mention Bien ; major de promotion.
- 1991 :** DEA³ d'INFORMATIQUE, D'AUTOMATIQUE ET DE PRODUCTIQUE ; UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ ; BESANÇON ; mention Bien.
- 1995 :** Doctorat de GÉNIE MÉCANIQUE ; UNIVERSITÉ DE SAVOIE ; ANNECY ; mention Très honorable.
Jury : S. Tichkiewitch (président), Pr A. Clément (rapporteur), Pr P. Bourdet (rapporteur), Pr M. Giordano (directeur), Mcf D. Duret (codirecteur), Mcf L. Mathieu (examineur)

3 Parcours professionnel

- 1990 :** Stage de fin d'études de Maîtrise : quatre mois dans une entreprise de conception et de fabrication de boîtiers de montres ROLEX sur une problématique de diminution de la variabilité des masses des pièces usinées en métaux précieux.
- 1991 :** Jeune-chercheur, inscrit en DEA, au Laboratoire d'Automatique de Besançon de l'UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ sur la problématique du pilotage d'une cellule flexible d'usinage autonome.

1. Diplôme universitaire de technologie.

2. Maîtrise de Sciences Techniques ; ces maîtrises n'existent plus car elles ne délivraient pas la Licence à l'issue de la première année.

3. Diplôme d'études approfondies ; plus tard remplacé par le Master recherche.

1992 :	Service national militaire effectué à la DIRECTION DE LA PROTECTION ET DE LA SÉCURITÉ DE LA DÉFENSE à RENNES. Travail de saisie informatique de dossiers et développement d'une base de données et de sa documentation pour la gestion locale des dossiers.
1992-1995 :	Jeune-chercheur, inscrit en thèse de doctorat de Génie mécanique, au laboratoire LMÉCA de l'UNIVERSITÉ DE SAVOIE sur la problématique de la métrologie tridimensionnelle.
1994-1995 :	Vacataire à l'I.U.T. d'ANNECY-LE-VIEUX : 45h de T.D. en mécanique des solides.
1995-1996 :	1/2 Attaché temporaire d'enseignements et de recherche (ATER) à l'ÉCOLE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS D'ANNECY et au Laboratoire de Mécanique Appliquée (LMÉCA). Cours et TD de Qualité et de mécanique des solides.
1996 à aujourd'hui :	Maître de conférences en 60 ^{ème} section (Génie mécanique) à l'ÉCOLE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS D'ANNECY et au LMÉCA puis à l'ÉCOLE D'INGÉNIEURS POLYTECH ANNECY-CHAMBÉRY et au laboratoire SYMME.
2000-2005 :	Formateur en Spécification Géométrique des Produits ISO pour l'IUFM de GRENOBLE, le CERN, NTN-SNR...
2013 :	Promu à la Hors classe des Maîtres de conférences.

4 Profils sur internet

Profils pouvant être consultés en cliquant sur les liens Web ci-dessous, dans la version PDF de ce document :

- Sur le site du laboratoire [Symme](#)
- Sur le réseau social [ResearchGate](#)
- Sur [Google Scholar](#)
- Sur [HAL](#)

ANNEXE B

Liste exhaustive des communications scientifiques

Les communications scientifiques dont je suis auteur ou coauteur sont présentées suivant le classement du Haut conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur (HCERES) et par sujets.

Plusieurs de ces communications peuvent être téléchargées depuis [HAL](#).

1 Une publication de brevet international (ACL)

1.1 Sur le pilotage des usinages (COPILOT-PRO®)

- [1] Éric PAIREL, Ephraïm GOLDSCHMIDT, «Procédé de préparation de réglages d'outils, dispositif de préparation de réglages d'outils et procédé de réglage d'outils», Brevet Européen en copropriété entre le Centre Technique de l'industrie du Décolletage et l'Université de Savoie. Publiée le 04/08/2010 par l'INPI.
<http://www.google.com/patents/EP2213395A1?cl=fr&hl=fr>

2 Onze articles de revues internationales avec comité de lecture répertoriées par le HCERES (ACL)

2.1 Sur la théorie des calibres ajustants

- [2] Éric PAIREL ; Three-Dimensional Verification of Geometric Tolerances With the “Fitting Gauge” Model ; Journal of Computing and Information Science in Engineering ; Vol. 7, Issue 1, March ; 2007 ; pp. 26-30 ; ASME

2.2 Sur le calcul des tolérances par le modèle des domaines jeux et écarts

- [3] Serge SAMPER ; Pierre-Antoine ADRAGNA ; Hugues FAVRELIERE ; Éric PAIREL ; Pascal HERNANDEZ ; Rigid and Elastic Precision Domains of Ball Bearings ; Journal of Computing and Information Science in Engineering ; Vol 12 ; 2012

2.3 Sur l'optimisation des opérations d'emboutissage

- [4] Éric PAIREL ; Yann LEDOUX ; Robert ARRIEUX ; Laurent TABOUROT ; Olga INCANDELA ; Correction of geometrical defects of stamping parts by numerical simulation and design of experiment ; Archives of Civil and Mechanical Engineering ; Vol. IV, No. 4 ; 2004 ; pp 75-86
- [5] Yann LEDOUX ; Serge SAMPER ; Hugues FAVRELIERE ; Fabien FORMOSA ; Éric PAIREL ; Optimization of Stamping Process by a Design Of Experiments Linked to a Modal Analysis of Geometric Defects ; Archives of Civil and Mechanical Engineering ; Vol. II, No. 1-2 ; 2006 ; pp 5-17

2.4 Sur COPILOT-PRO®

- [6] Ephraïm GOLDSCHMIDT ; Éric PAIREL ; Max GIORDANO ; Maurice PILLET ; Changeover from the functional geometric tolerances to the dimensional parameters to be supervised in production ; CIRP Journal of Manufacturing Systems ; Vol. 36, No 4 ; 2007 ; pp 305-309
- [7] Éric PAIREL ; Ephraïm GOLDSCHMIDT ; Pierre-Antoine ADRAGNA ; Pascal HERNANDEZ ; Maurice PILLET ; The pilot dimensions method: reconciling steering and conformity in workshops ; International Journal of Production Research ; Vol. 49, No. 19 ; 2011 ; pp 5943-5956
- [8] Éric PAIREL ; Ephraïm GOLDSCHMIDT ; Benjamin VAYRE ; Pierre-Antoine ADRAGNA ; Maurice PILLET ; Copilot Pro® A full method for the steering of the machining ; International Journal of Metrology and Quality Engineering ; Vol. 2, No. 2 ; 2011 ; pp 51-60

2.5 Sur le pilotage inertiel

- [9] Maurice PILLET ; Éric PAIREL ; Determination of an adjusting rule in the case of multi-criteria inertial piloting ; International Journal of Metrology and Quality Engineering ; Vol. 2, No. 1 ; 2011 ; pp 39-44
- [10] Maurice PILLET ; Boukar ABDELHAKIM ; Éric PAIREL ; Bastien RIZZON ; Nassim BOUDAUD and Zohra CHERFI ; Multivariate SPC for total inertial tolerancing ; International Journal of Metrology and Quality Engineering ; Vol. 4, No.3, January 2013 ; pp 169-175

-
- [11] Boukar ABDELHAKIM ; Maurice PILLET ; Éric PAIREL ; Alain SERGENT ; Correction of machining operations with the Total Inertial Steering ; International Journal of Metrology and Quality Engineering ; Vol. 5, No 1, article n°103 ; January 2014

2.6 Sur COSELECT

- [12] Éric PAIREL ; CoSelect : réglage statistique et sélectif des procédés ; Journal Européen des Systèmes Automatisés ; Vol. 49, No 2, 2016 ; pp 127-141

3 Quatre articles de revues internationales avec comité de lecture non répertoriées par le HCERES (ACLN)

3.1 Sur les langages de tolérancement

- [13] Pierric LEONARD ; Éric PAIREL ; Max GIORDANO ; A Simpler and More Formal Geometric Tolerancing Model ; Procedia CIRP : The Twelfth CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing ; Vol. 10, 2013 ; pp 30–36 ; Elsevier

3.2 Sur l'optimisation des opérations d'emboutissage

- [14] Yann LEDOUX ; Éric PAIREL ; Robert ARRIEUX ; An Improved Process Optimization for Springback Compensation using FEM Simulation and Experimental Design ; International Journal of Forming Processes ; Vol. 10, No. 2, 2007 ; pp 219-233 ; Lavoisier

3.3 Sur COPILOT-PRO®

- [15] Éric PAIREL ; Ephraïm GOLDSCHMIDT ; Benjamin VAYRE ; Boukar ABDELHAKIM ; Maurice PILLET ; Process Plans and Manufacturing Dimensions for the Steering of Machining: The Copilot-Pro® Methodology ; Procedia CIRP : The Twelfth CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing ; Vol. 10, 2013 ; pp 323–331 ; Elsevier

3.4 Sur le pilotage inertiel

- [16] Maurice PILLET ; Dimitri DENIMAL ; Éric PAIREL ; Serge SAMPER ; Total Inertial tolerancing, a new way to drive production ; Journal of Machine Engineering ; Vol. 9, No. 3, 2009
- [17] Boukar ABDELHAKIM ; Malloum SOULTAN ; Maurice PILLET ; Éric PAIREL ; Machine-tool setting: Algorithm for passing the adjustment by points to the adjustment on dimensions ; International Journal of Engineering and Innovative Technology ; Vol. 5, No 5, November, 2015 ; pp 75-79

4 Six contributions à ouvrages scientifiques (OS)

4.1 Sur la théorie des calibres ajustants

- [18] Éric PAIREL; Métrologie fonctionnelle par calibre virtuel sur machine à mesurer tridimensionnelle ; Mémoire de thèse de doctorat de l'Université de Savoie; Université de Savoie, 1995

4.2 Sur les langages de tolérancement

- [19] Éric PAIREL ; Pascal HERNANDEZ ; Max GIORDANO ; Virtual Gauge Representation for Geometric Tolerances in CAD-CAM Systems ; Models for Computer Aided Tolerancing in Design and Manufacturing (Selected papers from 9th CIRP seminar on CAT) ; Springer ; 2007 ; pp 3-12 ; J.K. Davidson (Ed.)

4.3 Sur le calcul des tolérances par le modèle des domaines jeux et écarts

- [20] Max GIORDANO ; Bassam KATAYA ; Éric PAIREL ; Tolerance analysis and synthesis by means of clearance and deviation spaces ; Geometric Product Specification and Verification: Integration of Functionality (Selected Conference Papers of the 7th CIRP International Seminar on CAT) ; Kluwer academic publishers ; 2003 ; pp 145-154 ; P. Bourdet and L. Mathieu (Ed.)
- [21] Max GIORDANO ; Éric PAIREL ; Serge SAMPER ; Chapitre 7: Analyse et synthèse de tolérances : Méthode des domaines ; Tolérancement géométrique des produits ; Lavoisier 2007 ; pp 161-192 ; L. Mathieu & F. Villeneuve (Ed.)
- [22] Max GIORDANO ; Éric PAIREL ; Pascal HERNANDEZ ; Complex Mechanical Structure Tolerancing by Means of Hyper-graphs ; Models for Computer Aided Tolerancing in Design and Manufacturing (Selected papers from 9th CIRP seminar on CAT) ; Springer ; 2007 ; pp 105-114 ; J.K. Davidson (Ed.)
- [23] Max GIORDANO ; Éric PAIREL ; Serge SAMPER ; Chapter 7 : Tolerance Analysis and Synthesis, Method of domains ; Geometric Tolerancing of Products ; London: ISTE Ltd, Hoboken: John Wiley&Sons, Inc. 2010 ; pp 151-180 ; L. Mathieu & F. Villeneuve (Ed.)

5 Trente communications avec actes dans des congrès scientifiques internationaux (ACTI)

5.1 Sur la théorie des calibres ajustants

- [24] Éric PAIREL ; Verification of a Group of Functional Surfaces on Coordinate Measuring Machine ; XIII IMEKO World Congress, Vol. 3 ; Torino, Italy, September 5-9 ; 1994 ; pp 1670-1675
- [25] Éric PAIREL ; The "Gauge model": A New Approach for Coordinate Measurement ; XIV IMEKO World Congress ; Tampere, Finland, 1-6 june ; 1997 ; pp 278-283
- [26] Éric PAIREL ; Présentation d'un logiciel de métrologie tridimensionnelle par calibre virtuel ; 12ème congrès international de métrologie ; Lyon, France, 20-23 Juin ; 2005 ; CD ; Lavoisier
- [27] Éric PAIREL ; Three-dimensional metrology with the virtual fitting gauges ; 11th CIRP International Conference on Computer Aided Tolerancing ; Annecy, France, March, 26-27 ; 2009

5.2 Sur les langages de tolérancement

- [28] Éric PAIREL ; Proposition of a New Semantics for Standardized Tolerancing. Principle of its Verification on Coordinate Measuring Machine ; 7th International Congress of Metrology ; Nîmes, France, 16-19 october 1995
- [29] Éric PAIREL ; Max GIORDANO ; Serge SAMPER ; Towards easier and more functional semantics for geometrical tolerancing ; 6th CIRP International seminar on Computer Aided Tolerancing ; Twente Netherlands, 22-24 march ; 1999
- [30] Éric PAIREL ; Max GIORDANO ; A Formal Dimensioning and Tolerancing Model: The Linked Tolerance Zones ; 8th CIRP International Seminar on Computer-Aided Tolerancing ; Charlotte, North Carolina, USA, April ; 2003 ; pp 80-91
- [31] Max GIORDANO ; Serge SAMPER ; Éric PAIREL ; Paramétrage et tolérances géométriques ; Conférence internationale Conception et Production Intégrée (CPI 2003) ; Meknes, Maroc, 2003
- [32] Éric PAIREL ; Pascal HERNANDEZ ; Max GIORDANO ; Virtual Gauges Representation for Geometrical Tolerances in CAD-CAM Systems ; 9th CIRP International Seminar on Computer-Aided Tolerancing ; Tempe, Arizona, USA, April 2005
- [33] Éric PAIREL ; Pascal HERNANDEZ ; Max GIORDANO ; For a rewriting of the geometric tolerancing language ; 10th CIRP international Seminar on Computer Aided Tolerancing ; Erlangen, Germany, March 21-23 ; 2007 ; CD ; Shaker Verlag

- [34] Pierric LEONARD ; Éric PAIREL ; Max GIORDANO ; A simpler and more formal geometric tolerancing model ; 12th CIRP International Conference on Computer Aided Tolerancing ; Huddersfield, U.K., 18th - 19th April ; 2012 ; USB Key

5.3 Sur le calcul des tolérances par le modèle des domaines jeux et écarts

- [35] Max GIORDANO ; Éric PAIREL ; Serge SAMPER ; Mathematical representation of Tolerance Zones ; 6th CIRP International seminar on Computer Aided Tolerancing ; Twente, The Netherlands, 22-24 march ; 1999
- [36] Max GIORDANO ; Bassam KATAYA ; Éric PAIREL ; Tolerance analysis and synthesis by means of clearance and deviation spaces ; 7th CIRP International Seminar on Computer-Aided Tolerancing ; Cachan, France, 24-25 april ; 2001
- [37] Max GIORDANO ; Pascal HERNANDEZ ; Serge SAMPER ; Éric PAIREL ; Expression of geometric functional requirements dedicated to concurrent engineering ; International CIRP Design Seminar, Methods and tools for Co-operative and Integrated Design ; Grenoble, France, 12-14 May ; 2003
- [38] Max GIORDANO ; Éric PAIREL ; Pascal HERNANDEZ ; Complex mechanical structure tolerancing by means of hyper-graphs ; 9th CIRP International Seminar on Computer-Aided Tolerancing ; Tempe, Arizona, USA, April ; 2005 ; CD

5.4 Sur le calcul des tolérances statistiques

- [39] Maurice PILLET ; Éric PAIREL ; Stéphane TICHADOU ; Rénaud VINCENT ; Tolérancement inertiel pour processus à dérive : Optimiser le tolérancement statistique ; 11ème Congrès International QUALITA ; 17-19 March, Nancy (France), 2015
- [40] Djezouli MOULAI-KHATIR ; Éric PAIREL ; Pierre-Antoine ADRAGNA ; Impact du mode de répartition des tolérances sur l'assemblage de lots ; IXèmes Journées d'Etudes Techniques (JET'2016) ; 3-5 mai, Hammamet, Tunisie, 2016

5.5 Sur l'optimisation des opérations d'emboutissage

- [41] Éric PAIREL ; Yann LEDOUX ; Laurent TABOUROT ; Robert ARRIEUX ; A method to determine relations between process conditions and draw part geometry ; XVI International Scientific and Technological Conference on Design and Tech. of Drawpieces and Die Stampings ; Poznan-Wasowo, Poland, June 14-16 ; 2004
- [42] Yann LEDOUX ; Éric PAIREL ; Robert ARRIEUX ; P. TEIXERA ; A.D. SANTOS ; A method of springback and tool compensation based on finite element method and design of experiment ; 24th IDDRG Congress ; Besançon, France ; 2005

-
- [43] Éric PAIREL ; Yann LEDOUX ; Robert ARRIEUX ; Hervé LOUCHE ; Aude TARRIER ; Numerical Optimisation of an Industrial Multipass Stamping Plan: Approaches and Strategies ; International Conference "Net-Shape Sheet Metal Forming" ; Wasowo, POLAND, 13th May ; 2005 ; pp 85-96
 - [44] Robert ARRIEUX ; Yann LEDOUX ; Éric PAIREL ; Laurent TABOUROT ; Hervé LOUCHE ; A Method of Springback Compensation and Process Parameters Optimisation Based on Finite Element Method and Design Of Experiments ; International Conference "Net-Shape Sheet Metal Forming" ; Wasowo, POLAND, 13th May ; 2005 ; pp 69-83
 - [45] Yann LEDOUX ; Éric PAIREL ; Robert ARRIEUX ; Total Numerical Optimisation of an Industrial Multi-Steps Stamping Process by using the Design Of Experiment Method ; IDMME 2006 ; Grenoble, May 17-19 ; 2006

5.6 Sur COPILOT-PRO®

- [46] Ephraïm GOLDSCHMIDT ; Éric PAIREL ; Max GIORDANO ; Maurice PILLET ; Changeover from the functional geometric tolerances to the dimensional parameters to be supervised in production ; 10th CIRP international Seminar on Computer Aided Tolerancing ; Erlagen, Germany, March 21-23 ; 2007 ; CD ; Shaker Verlag
- [47] Éric PAIREL ; Ephraïm GOLDSCHMIDT ; Benjamin VAYRE ; Pierre-Antoine ADRAGNA ; Maurice PILLET ; Copilot Pro® : une méthode complète pour le pilotage des usinages ; 9ème Congrès international QUALITA ; March 23-25, Angers, France ; 2011
- [48] Éric PAIREL ; Ephraïm GOLDSCHMIDT ; Benjamin VAYRE ; Boukar ABDELHAKIM ; Maurice PILLET ; Process plans and manufacturing dimensions for the steering of machining: The Copilot-Pro methodology ; 12th CIRP International Conference on Computer Aided Tolerancing ; Huddersfield, U.K., 18th - 19th April ; 2012 ; USB Key

5.7 Sur COSELECT

- [49] Éric PAIREL ; Maurice PILLET ; CoSelect : Correction statistique et sélective des procédés de fabrication ; 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation (MOSIM'14) ; 5 -7 novembre, Nancy (France), 2014

5.8 Sur le pilotage inertiel

- [50] Maurice PILLET ; Éric PAIREL ; Détermination d'une règle de réglage dans le cas du pilotage inertiel multicritères ; 9ème Congrès international QUALITA ; March 23-25, Angers, France ; 2011
- [51] Maurice PILLET ; Éric PAIREL ; Jean-Luc MAIRE ; Boukar ABDELHAKIM ; Différentes stratégies de filtrage en pilotage inertiel multicritères ; 7th International Conference on Integrated Design and Production (CPI 2011) ; October 19, 20 & 21, Oujda, Morocco ; 2011

- [52] Maurice PILLET ; Boukar ABDELHAKIM ; Éric PAIREL ; Bastien RIZZON ; Nassim BOUDAUD and Zohra CHERFI ; Multivariate SPC for total inertial tolerancing ; 10ème Congrès International QUALITA ; 19-22 mars 2013 Compiègne (France) ; 2013
- [53] Boukar ABDELHAKIM ; Maurice PILLET ; Éric PAIREL ; Détection du dérèglement le plus probable d'un processus d'usinage par outil coupant ; 9ème Conférence Internationale : Conception et Production Intégrées (CPI 2013) ; Université de Tlemcen, Algérie, 21-23 octobre 2013

6 Neuf communications avec actes dans des congrès scientifiques nationaux (ACTN)

6.1 Sur les langages de tolérancement

- [54] Éric PAIREL ; Références et systèmes de références ; Séminaire sur le tolérancement de l'ENS de Cachan; Cachan, 1995
- [55] Éric PAIREL ; Max GIORDANO ; Qualité géométrique des produits; 4ème congrès Pluridisciplinaire Qualité et sûreté de fonctionnement (QUALITA 2001) ; Annecy, France, 22-23 Mars ; 2001 ; pp 241-247

6.2 Sur le calcul des tolérances

- [56] Serge SAMPER ; Max GIORDANO ; Éric PAIREL ; Tolérancement d'un réducteur avec prise en compte des déformations ; Congrès Français De Mécanique (CFM), 1999

6.3 Sur la théorie des calibres ajustants

- [57] Éric PAIREL ; Métrologie par calibre virtuel sur machine à mesurer tridimensionnelle ; Actes du colloque national PRIMECA ; La Plagne, France ; 1997 ; pp 155-161
- [58] Éric PAIREL ; Un logiciel pour la vérification directe du respect des tolérances géométriques normalisées sur produits fabriqués ; Journée thématique AIP-PRIMECA ; ENS de Cachan, France, 23 Septembre 2005

6.4 Sur COPILOT-PRO®

- [59] Ephraïm GOLDSCHMIDT ; Éric PAIREL ; Détermination systématique des étapes de contrôle et des cotes de fabrication pour les procédés d'usinage ; 18ème Congrès Français de Mécanique (CFM2007) ; Grenoble, 27-31 août ; 2007 ; CD

6.5 Sur le pilotage inertiel

- [60] Maurice PILLET ; Boukar ABDELHAKIM ; Éric PAIREL ; Stratégies de réglage optimales d'un processus de fabrication mécanique ; 7ème Assises Machines et Usinage à Grande Vitesse 2012 ; ENISE – CETIM, Saint-Étienne, 16-18 octobre ; 2012
- [61] Boukar ABDELHAKIM ; Éric PAIREL ; Maurice PILLET ; Alain SERGENT ; Utilisation du tolérancement géométrique pour le réglage des machines-outils : le pilotage inertiel total ; 7ème Assises Machines et Usinage à Grande Vitesse (MUGV 2012) ; ENISE – CETIM, Saint-Étienne, 16-18 octobre ; 2012
- [62] Éric PAIREL ; Maurice PILLET ; Stéphane TICHADOU ; Ephraïm GOLDSCHMIDT ; Réglage ultra-précis des usinages en tournage ; 8ème Assises Machines et Usinage à Grande Vitesse (MUGV 2016) ; Polytech-Tours ; 8 et 9 Juin ; 2016.

7 Un article de revue sans comité de lecture (ASCL)

- [63] Éric PAIREL ; Un modèle de calibres virtuels pour la métrologie tridimensionnelle ; Revue Pratique de Contrôle Industriel N°201 ; 1996 ; pp 52-57.

8 Sept communications orales sans actes dans des congrès scientifiques nationaux (COM)

8.1 Sur la théorie des calibres ajustants

- [64] Éric PAIREL ; Métrologie par calibres ajustant : développement d'un nouveau logiciel ; Ateliers de la métrologie ; Nantes, France, 2008
- [65] Éric PAIREL ; Présentation d'un logiciel novateur pour la métrologie tridimensionnelle ; Séminaire du Groupe de Recherche en Tolérancement ; Polytech Annecy-Chambéry ; Annecy, mai 2011

8.2 Sur COPILOT-PRO®

- [66] Éric PAIREL ; Comment optimiser l'industrialisation : la méthode Copilot-pro ; Journées Européennes du Tolérancement (JET09) ; Annecy, France, 24-25 Mars ; 2009
- [67] Éric PAIREL ; Ephraïm GOLDSCHMIDT ; Copilot-Pro® : une méthode innovante d'instrumentation et de pilotage de la production ; INTERCUT 2009 ; Cluses, France, Octobre ; 2009

- [68] Éric PAIREL ; Cotation pour le Pilotage de la Production : la méthodologie Copilot-Pro ; Séminaire du Groupe de Recherche en Tolérancement ; CERN, Genève, 5-6 juin 2014
- [69] Éric PAIREL ; Genevieve LEGRAND ; Copilot-Pro® : gammes et cotation pour le réglage des machines ; Journées Européennes du Tolérancement (JET15) ; Impérial Palace, Annecy, France, 21-22 janvier 2015

8.3 Sur les travaux de recherche du laboratoire SYMME

- [70] Éric PAIREL ; Du laboratoire à l'industrie : panorama des initiatives en cours ; Journées Européennes du Tolérancement (JET09) ; Annecy, France, 24-25 Mars ; 2009

9 Trois logiciels (AP)

- [71] COPILOT-PAA ; Logiciel prototype mettant en œuvre la méthodologie COPILOT-PRO®. Ce logiciel a été développé entre 2009 et 2011 avec un post-doctorant mais n'a pas été mis à la disposition du public. Il a été déposé en 2009 à l'Agence pour la Protection des Programmes sous le numéro IDDN 09-170021-000.
- [72] GÉOVÉRIF ; Logiciel de métrologie tridimensionnelle par calibres virtuels ajustant. Ce logiciel a été développé entre 2007 et 2011 avec un programmeur informatique. Il est disponible en licence prêtée depuis juin 2011 sur www.tolerancement.org. Il a été référencé en 2011 à l'Agence pour la Protection des Programmes.
- [73] COSELECT V2 ; Logiciel pour le réglage statistique et sélectif des procédés. Après une première version en 2012, basée sur le critère des moindres carrés, la V2, basée sur l'optimisation sous contraintes, a été développée fin 2014 avec un programmeur informatique et a été référencée à l'Agence pour la Protection des Programmes début 2015.

10 Cinq rapports techniques (AP)

- [74] Éric PAIREL ; Max Giordano ; Olivier Valentin ; Spécification Géométrique des Produits (GPS) - Tolérancement dimensionnel et géométrique ; Support de formation pour l'IUFM de GRENOBLE ; 2000
- [75] Éric PAIREL ; Programmation linéaire : Algorithme du simplexe. Rapport interne LMÉCA ; 2002
- [76] Éric PAIREL ; Max Giordano ; Rapport d'expertise sur les méthodes de spécification du bureau d'études automobile de la société NTN-SNR à ANNECY ; 2003

-
- [77] Éric PAIREL ; Méthodes mathématiques et algorithmiques pour le balançage 2D d'un groupe de points de centre ; Rapport technique à l'attention de la société MCE TECHNOLOGIE ; 2005
- [78] Éric PAIREL ; Max Giordano ; Paramétrage CAO et tolérancement d'une roue-libre pour la société MAVIC à ANNECY ; 2015

En outre, j'ai écrit les documentations techniques des logiciels développés pour y présenter les méthodes mathématiques et algorithmiques.

11 Deux rapports de stage (AP)

- [79] Éric PAIREL ; Etude des écarts de poids des éléments en matière précieuse ; Mémoire de Maîtrise de sciences et technique de Productique appliquée aux industries mécaniques ; GENEX S.A. (filiale ROLEX S.A.) ; 1990
- [80] Éric PAIREL ; Contribution à la conception du pilotage des systèmes flexibles d'usinage ; Mémoire de D.E.A ; Université de Franche-Comté ; 1991

ANNEXE C

*Extrait du dossier de demande
d'une allocation doctorale de
recherche sur les langages
formels de spécification
géométrique en 2010*

Projet de recherche détaillé
(2 à 3 pages maximum)

Une part importante de l'économie nationale est basée sur la production manufacturière et mécanique (aéronautique, automobile, équipements industriels, équipements de consommation...). L'une des fréquentes problématiques des entreprises de ce secteur industriel, est la maîtrise de la **qualité géométrique** de leurs produits qui impacte directement leur qualité générale et notamment la qualité perçue.

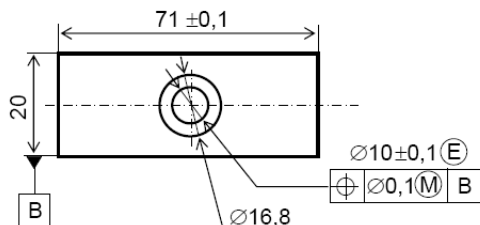
En effet tous les produits manufacturés étant constitués par l'assemblage de composants, il est nécessaire de maîtriser, à tous les **étapes du cycle de vie** des produits, la qualité géométrique de ces composants, pour permettre leur assemblage d'une part, et d'autre part obtenir les critères de qualité de fonctionnement visés (niveau de bruit, rendement...).

L'un des premiers maillons de la **chaîne de la maîtrise de la qualité géométrique des produits** est le bureau en charge de la conception des produits dans les entreprises, communément appelé **le Bureau d'études**. L'une de ses missions est de **définir la géométrie optimale** de chacune des pièces constituant le produit, c'est-à-dire celle qui en assure un fonctionnement optimal, ainsi que **les variations admissibles autour de cet optimal** pour permettre leur production. Cette tâche est appelée le «**tolérancement**» des produits. Le tolérancement est donc une problématique clairement industrielle mais c'est aussi une problématique scientifique complexe sur laquelle travaillent plusieurs universitaires du monde entier depuis une vingtaine d'années environ.

Pour tolérer il faut disposer en tout premier lieu, d'un **modèle géométrique tridimensionnel** permettant de donner des limites aux défauts géométriques des pièces produites, auquel est associé un ou plusieurs langages d'expression de ces limites. En outre il faut disposer de **méthodes permettant de déterminer** les défauts à limiter et la valeur de ses limites à partir des conditions géométriques fonctionnelles entre pièces (non contact, précision de positionnement relatif...).

Le **langage de tolérancement normalisé** par les organismes nationaux, AFNOR et ASME en particuliers, et par l'organisation internationale de normalisation, l'ISO, ne définit pas, précisément, de modèle complet et cohérent de limitation des défauts géométrique et encore moins de méthode de calcul. Les normes définissent des écritures graphiques utilisées sur les dessins techniques ainsi que, pour la plupart d'entre-elles, le sens de chacune d'elles vis-à-vis de la pièce fabriquée pris en exemple.

La figure suivante donne une illustration d'écritures normalisées de tolérances.



Ces écritures ne sont pas définies par des règles générales mais par une multitude d'exemples. Les inconvénients d'une telle définition sont multiples :

- Cela ne donne pas une définition générale et globale **du tolérancement par zones de tolérance**, sous-jacent au tolérancement par cadres de tolérance.



**ÉCOLE DOCTORALE
SCIENCES ET INGÉNIERIE DES SYSTÈMES,
DE L'ENVIRONNEMENT ET DES ORGANISATIONS
(SISEO)**

DRED - 27 rue Marcoz - B.P. 1104
73011 Chambéry Cedex

- L'expression du tolérancement est uniquement symbolique et graphique : Il doit être porté sur une représentation visuelle de la pièce qui est aujourd'hui essentiellement un dessin technique plan. L'échange informatisé de données de tolérancement ne peut se faire que par ces représentations visuelles entre les personnes et cet échange est aujourd'hui encore impossible entre les logiciels !
- Cela complique fortement l'apprentissage des méthodes de tolérancement : Les divers exemples doivent être présentés et on ne perçoit pas immédiatement les liens entre eux. En se focalisant sur le codage syntaxique des tolérances, au travers des cadres de tolérance, on en oublie l'essentiel : leurs sens sur les pièces fabriquées.
- Cela conduit les techniciens et ingénieurs de l'industrie à extrapoler, soit les exemples normalisés, soit d'autres exemples, à leur propre problème de tolérancement, sans maîtriser parfaitement ni leurs sens ni le respect des quelques règles d'écriture normalisées, si bien qu'il est fréquent de voir, sur les dessins, des indications qui n'ont aucun sens et qui ne peuvent donc pas être contrôlées par mesurage sur les pièces produites !

Le premier objectif du projet de recherche proposé est donc de construire un ou plusieurs **modèles formels de définition et de limitation des défauts géométriques** des produits.

Ces modèles devront pouvoir être utilisés dans des méthodes de calcul et de détermination des tolérances. Ainsi nous ne retiendrons pas de modèle trop éloigné des conditions géométriques fonctionnels. Certains modèles seront destinés à être utilisés par les concepteurs de produits, parce que très proches des conditions géométriques d'assemblage et de fonctionnement, alors que d'autres seront utilisés par les fabricants en raison de leur intérêt pour le pilotage des machines. Il faudra alors mettre au point les méthodes de passage des tolérances d'un modèle à un autre.

Les caractéristiques de tous ces modèles devront être les suivantes :

- Ils seront **définis indépendamment de toute syntaxe** (manière d'écrire),
- Ils seront **complets et cohérents**, en ce sens que, dans leur champ d'application, ils permettront de limiter tous les défauts géométriques qu'ils définissent, voire permettre de ne laisser aucun défaut non limité (complétude). Ils devront ne pas permettre de spécifier des tolérances contradictoires (cohérence).
- Ils devront permettre de spécifier les **conditions statistiques de vérification** de leurs tolérances (nombre de pièces, taux de non-conformité accepté...).

Deux modèles sont principalement envisagés aujourd'hui, à partir des travaux déjà réalisés au laboratoire Symme [PAI03], [PAI05], [GIO05] :

- Un modèle, par zones et surfaces frontières, appelé **tolérancement en zones liées** [PAI03], généralisant et formalisant les exemples normalisés du tolérancement géométrique. L'intérêt de ce modèle est que les zones et les surfaces frontières correspondent directement aux conditions d'assemblage et de jeu entre les pièces. Il permettra de passer le plus directement possible de ces conditions aux tolérances. C'est un modèle fait essentiellement pour les concepteurs.
- Un **modèle paramétrique** dans lequel les défauts des surfaces sont caractérisés par des paramètres dimensionnels linéiques (longueur) ou angulaires. Ce type de modèle est nécessaire aux méthodes de calcul de tolérances connues à ce jour. Il permet en outre d'analyser la source des écarts géométriques sur les machines-outils et donc de les corriger.

D'autres modèles devront être étudiés pour compléter ou être reliés aux deux modèles précédents. Il s'agit du « **tolérancement modal** » et du « **tolérancement inertiel** » tous deux récemment inventés au laboratoire Symme [PIL08], [ADR07].

Le second objectif du projet de recherche, dans la continuité du premier, sera de définir un ou plusieurs **langages** pour les modèles de tolérances destinées à être utilisés pour la spécification de tolérances. Il s'agit ici de permettre la communication univoque des tolérances d'un opérateur à un autre dans la chaîne de la qualité géométrique des produits qu'il s'agisse de personnes ou de systèmes informatiques.

Au moins deux langages d'expression des tolérances d'un modèle sont à envisager :

- Un langage graphique et symbolique destinée à être utilisée sur les représentations visuelles des produits (les dessins techniques).
- Une autre textuelle pour permettre l'échange informatisé des données de tolérancement entre systèmes informatiques.

Ainsi qu'un premier contact avec Patrice Moreaux, chercheur au LISTIC, semble le montrer, ce sujet requerra des compétences en informatique **et une collaboration avec un ou plusieurs chercheurs en informatique** sera établie.

Ces travaux, relativement théoriques, permettront l'amélioration ou l'élaboration de nouvelles normes de tolérancement indispensables aux entreprises du secteur manufacturier. Le laboratoire Symme a déjà pris pied dans ce domaine par sa participation, avec un groupe d'entreprises locales, à la rédaction d'une norme sur le tolérancement statistique unidimensionnel [AFN09].

[PAI03] : E. PAIREL, M. GIORDANO, "A Formal Dimensioning and Tolerancing Model : The Linked Tolerance Zones", 8th CIRP International Seminar on Computer-Aided Tolerancing, Charlotte, North Carolina, USA, April 2003, pp 80-91.

[GIO05] : M. GIORDANO, S. SAMPER, E. PAIREL, "Paramétrage et tolérances géométriques", 4eme conférence internationale Conception et Production Intégrée (CPI 2005), Casablanca, Maroc, 9-11 nov. 2005.

[PAI05] : E. PAIREL, P. HERNANDEZ, M. GIORDANO, "For a rewriting of the geometric tolerancing language", 10th CIRP international Seminar on Computer Aided Tolerancing, Erlangen, Germany, March 21-23 2007

[AFN09] : XP E 04-008, "Spécification géométrique des produits (GPS), Calcul de tolérance, indications et critères d'acceptation, Méthodes arithmétique, statistique quadratique et statistique inertielle", Sept. 2009.

[PIL08] : M. PILLET, D. DENIMAL, P.-A. ADRAGNA, S. SAMPER, "Interest of the Inertial Tolerancing Method in the Case of Watch Making Micro Assembly", IFIP International Federation for Information Processing Micro-Assembly Technologies and Applications (2008), pp 189-197.

[ADR07] : P.-A. ADRAGNA, S. SAMPER, F. FORMOSA, M. PILLET, "Modal tolerancing - application to gap and flush analyses", Advanced Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering II, Springer Series in advanced Manufacturing, ISBN 978-1-4020-6760-0 (2007), pp 417-430.

ANNEXE D

*Article sur la méthodologie
COPILLOT-PRO®, paru dans la
revue PROCEDIA CIRP
en 2013 [15]*

12th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing

Process plans and manufacturing dimensions for the steering of machining: The Copilot-Pro® methodology

Éric Pairel^{a,*}, Ephraïm Goldschmidt^c,
Benjamin Vayre^b, Boukar Abdelhakim^a and Maurice Pillet^a

^a Université de Savoie, Polytech Annecy-Chambéry, SYMME lab., BP 80439, 74944 Annecy Cedex, France^b Grenoble INP Génie industriel, G-SCOP lab., 46, avenue Félix Viallet - 38031 Grenoble Cedex 1 - France^c Centre Technique des industries du Décolletage (Ctdec), 750 avenue de Colomby, BP 65, 74301 Cluses, Cedex, France

Abstract

To set the machining, the technique commonly used is to measure dimensions between each machined surface and the one which locates the workpiece into the workpiece holder. This technique leads to dimensions with much smaller tolerances than the ones specified on the design drawing and to long time setting. On an example of a screw machining process we present the first stage of the Copilot-Pro® methodology. It consists in identifying the groups of manufacturing operations which must be done before extracting the workpiece from the machine-tool to measure the surfaces achieved. Thus, the number of workpieces extracted from the machine-tool is minimized which reduces the setting times, the number of unfinished and rejected workpieces and which permit to select manufacturing dimensions with higher tolerances.

© 2013 The Authors. Published by Elsevier B.V.

Selection and peer-review under responsibility of Professor Xiangqian (Jane) Jiang

Keywords: Automatic lathe, Screw machining, Process plan, Manufacturing dimensions, tool correction, Copilot-Pro®

1. Introduction

One of the daily issues of the setters of machining is to correct the shape and location of the cutting tools in order that workpieces meet the tolerances specified by the designers. The technique commonly used is to machine a first workpiece, then to extract it from the machine tool in order to measure it and finally to compute the corrections to the tools.

The dimensions which are measured on the workpiece do not correspond to the dimensions specified by the designer of the part. For instance, in order to adjust the final location of the tool 1 (see figure 1), the setter will measure the manufacturing dimension $CF1$ instead of the dimensions $CE1$ and $CE2$ specified by the designer. Indeed it is easier to calculate the correction of tool 1 by measuring $CF1$ than by measuring $CE1$ and $CE2$ which

also depend on the location of tool 2. However, this method has several disadvantages:

- The setter will tend to measure $CF1$ before making the surface 2. He will therefore mount and unmount the workpiece twice: Once for $CF1$ and a second time for $CF2$, which lengthens the setting times.
- The tolerances of these manufacturing dimensions should be much smaller than the ones of the design dimensions CEi . On this example, $CF1$ and $CF2$ must have a tolerance about 0.1mm (± 0.05 mm) in order that the tolerance about 0.2mm (± 0.1 mm) of the $CE2$ is guaranteed, which is a division by two of the tolerances on this example.
- The conformity of the workpieces cannot be declared from these manufacturing dimensions because one would take the risk to reject workpieces which meet the design dimensions. For instance, $CF1$ and $CF2$ may have a deviation of 0.07mm and therefore be out

* Corresponding author. Tel.: +33 (0)4 50 09 65 61
E-mail address: eric.pairel@univ-savoie.fr

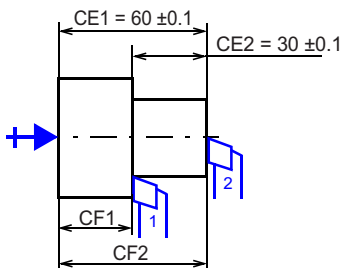
of the tolerance of $\pm 0.05\text{mm}$, whereas neither $CE1$ nor $CE2$ are out of their tolerances. Indeed, in this case, $CE1$ has got a deviation of 0.07mm and $CE2$ none.

Nevertheless this method, historically attributed to Wade [1], [2], has largely been developed [3-13].

The main objective of the Copilot-Pro® methodology [14], presented in this paper, is to minimize the number of extracted workpieces from the machine. In this example, the workpiece, to be measured, will be extracted from the machine only once the two machining operations are performed. This objective has several advantages:

- The setting time, which include measuring time, is minimized.
- The number of setting workpieces is greatly reduced especially when the extracted workpiece can no longer be re-introduced in the machine. This is particularly the case in screw machining that requires the sawing of the workpiece from the bar in which it is machined (see figure 4).
- The manufacturing dimensions to measure, have got tolerances wider than those of the Wade's dimensions. They may even correspond, in some cases, to the tolerances of the design dimensions which permit, in this case, to verify the conformity of the workpieces without the risk of rejecting good parts [15].

Fig. 1. Design dimensions specified by the designer, CE_i , and manufacturing dimensions used by the setter, CF_i .



In this example, the workpiece will be extracted after the machining of surfaces 1 and 2. The setter will be able to directly measure the design dimensions $CE1$ and $CE2$ which will allow to decide of the conformity of the workpiece and to calculate the corrections, c_p , to do on the tools through the following relationships, in which e_{CEi} are the deviation of the dimension CE_i :

$$c_2 = -e_{CE1} \quad (1)$$

$$c_1 = e_{CE2} - e_{CE1} \quad (2)$$

These relationships are difficult to determine mentally in front of the machine, but it can be done in advance and provided to the setter who has then only to use them. We do not detail, in this paper, this aspect of the Copilot-Pro® methodology which has already been presented [16], but the technique used to group the machining operations

before the extraction of a workpiece to measure the manufacturing dimensions and to correct the tools.

The conditions that permit to group the manufacturing operations, before the exit of a workpiece from the machine to measure its dimensions and to correct the tools, are not trivial. They are related to the work-in-progress of workpieces in the production flow and to the time constraints between operations especially when there are roughed surfaces to measure before the finishing operations are performed. We study these different conditions in the following sections before the presentation of the manual method for determining these groupings of manufacturing operations and the manufacturing dimensions for the correction of the tools.

2. Manufacturing phases and stages of the setting and monitoring plans Copilot-Pro®

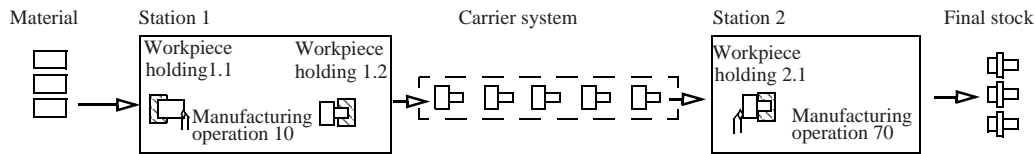
We consider that the general case of a **manufacturing process** consists of **manufacturing stations**, after which the workpieces are stored or carried, and within which there are one or more **workpiece holders** enabling the achievement of one or more **manufacturing operations** (see figure 2).

The description of the process according to the hierarchical model "Process / Station / Workpiece holding / Manufacturing Operation" is the formatted input data of the Copilot-Pro® method. Stocks and carriers systems are associated with stations that they precede.

To set the manufacturing tools, it is necessary to measure at the start of production, and periodically during it, a workpiece just being machined (or multiple workpieces to reduce the random deviations by averaging the measured deviations). The least expensive is to measure and set the tools accordingly, just before it enters in a stock in order to do so in hidden time respected to production. However if the measured workpiece has a geometrical deviation greater than a defined acceptance limit, all the work-in-progress workpieces, from the manufacturing operation on responsible for this deviation and that probably also have the same geometrical deviation, will have to be scrapped. This is the first, of the two reasons, why it is not possible, in general, to wait until the end of the manufacturing process, to measure a workpiece and to set its tools accordingly. The second reason is that at the end of the process, the setter of the last manufacturing operations, may not have the control of the setting of the first operations, either because they are performed by another person, or because they have already been made on all workpieces.

So we have to divide chronologically the manufacturing process into manufacturing phases, at the end of which the measuring of workpieces will allows to set the manufacturing operations that they contain.

Fig. 2. General diagram of a manufacturing process according to the hierarchical model "Station / Workpiece-holders / Operations" of Copilot Pro®.



We define the **manufacturing phase** as the grouping of a set of manufacturing operations, performed on one or more workpiece holders, and which can be jointly set.

In classical productions, which are push flows, the Copilot-Pro® manufacturing phases correspond to manufacturing stations because those last end with stocks. We find here the commonly accepted sense of the term of the manufacturing phase. But the Copilot-Pro® definition, more general and more precise, allows to consider more important grouping of operations, especially in just-in-time flows.

The addition of a workpiece holding, and the manufacturing operations performed in this workpiece holder, in a manufacturing phase already containing the previous workpiece holders, should be done taking into account the following two criteria:

- Can we jointly control the setting of the new operations with the operations already in the phase?
- Can we accept the work-in-progress increasing of workpieces that would result?

In fact, even if all the manufacturing operations of a phase can be set, this will require measurement stages before the end of the phase because some surfaces will then disappear. This is especially true for rough surfaces of which the setting is nevertheless important because it determines the quality of the finished surface and the lifetime of the finishing tool.

However the introduction of intermediate measuring stages leads to, in most cases, increased cycle time of the measured workpiece. In order for this to not be the case, the intermediate measurement should be done at the storage or the carrying of the workpiece between workpiece-holders.

However, the grouping in a single phase of two workpiece-holders, separated by a carrying or stock, is rarely possible. It is therefore in the just-in-time flow of the manufacturing operations that these measuring stages should be introduced to measure the surfaces that disappear. The increase in cycle time that would result is often not acceptable in industry. This has therefore led to define two Copilot-Pro® manufacturing plans for any manufacturing process:

- The **monitoring plan** for which a single measuring stage is defined at the end of each manufacturing stage and therefore can not set the tools of surfaces that

disappear during the phase. This plan will be used with high frequency when the production is in progress.

- The **setting plan** in which intermediate measuring stages are defined in order to be also able to set the tools of which the surfaces disappear, including roughed surfaces. These intermediate measuring stages leading, in general, to an increase in cycle time, the setting plan will be used with a lower frequency than the monitoring plan and mostly requires a production stop in order to have time to extract the workpiece out of the machine and to measure it. It will also be used for initial setting of all tools before starting production.

To limit the number and duration of the intermediate measuring stages of the setting plan, we are going to seek to achieve the most manufacturing operations possible before having to do a measuring stage.

These groupings of operations before the measuring stages, are called the **manufacturing stages**. In the case of the monitoring plan, there is only one single manufacturing stage, followed by a single measuring stage and a single setting stage in a manufacturing phase, while for the setting plan, there may be several manufacturing stages, each followed by a measuring stage, and completed at the end of the phase, by a setting stage. The figure 3 illustrates this hierarchical organization of a plan in phases, stages and manufacturing operations, and their chronological sequences.

3. Manufacturing process taken in example

We consider the example of a part, of which the design drawing is given in figure 5, machined from a free-cutting bar on a automatic lathe, also called screw machine, according to the manufacturing process shown in figure 4.

The design dimensions of the workpiece are named *CE1*, *CE2* and *CE3* (see figure 5). The diameter dimensions are not indicated in order to simplify the presentation). These dimensions have got tolerances even if they are not indicated here. At any time, the location of the second workpiece holding (operation 50 on figure 4), which is performed by the secondary spindle of the machine, is well known relatively to the location of first workpiece holding, which is performed by the main spindle.

Fig. 3. Hierarchical organization of the Copilot-Pro® plans and typical chronological process of phases, stages and operations.

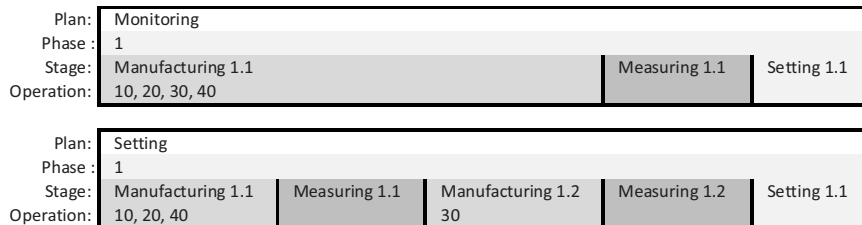
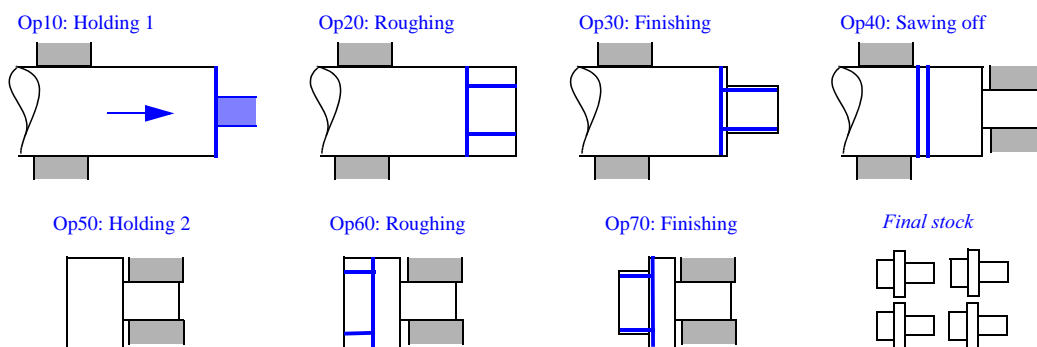


Fig. 4. Manufacturing process: A unique manufacturing station which is an automatic lathe with a secondary spindle

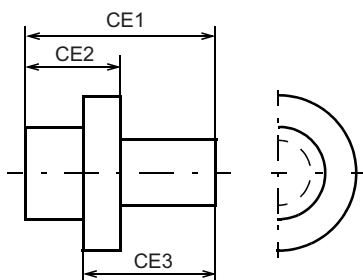


This is why the workpiece is not laid on its plate surface in the second workpiece holder. The secondary spindle pinches the workpiece before the sawing off (operation 40), then moves back (operation 50) to permit the achievement of the operations 60 and 70.

4. Setting plan of the example process

On the manufacturing process presented in the previous section, the setter can simultaneously control all settings of the tools. In addition the work-in-progress of workpieces is acceptable.

Fig. 5. Design drawing of the part.



If it is a single spindle lathe, it is about of two workpieces: One on the main spindle, the other on the secondary spindle. The two workpieces holders, and the manufacturing operations they allow to perform, can be placed in the same phase.

However, at the end of the manufacturing phase, the rough surfaces will be gone (operations 20 and 60). The

monitoring plan does not allow us to adjust the location of these surfaces. We are therefore going to determine the manufacturing stages and the measuring stages of the setting plan necessary to set all the manufacturing operations.

To group the largest number of manufacturing operations before performing a measuring stage, we are going to discuss the constraints between operations, in relation with their grouping into a single manufacturing stage.

The most obvious constraint is that no operation of a stage in the setting plan, should remove a surface already done in the stage otherwise the operation which has machined this last surface could not be set. In particular, a roughing operation should be performed in a manufacturing stage **anterior** to the one containing the finishing operation. This constraint is the first in table 1. As the manufacturing stages are not yet established, this constraint will be introduced between the two operations. Graphically, we represent by an arc in thick line, oriented from the roughing operation towards the finishing operation (see arcs between operations 20 and 30 on the one hand, and 60 and 70 on the second hand, in figure 1).

On the other hand, there are technological constraints that impose a chronological order between operations (some operations can only be achieved if others have been before). These constraints, three in number, are explained in table 1, numbered 2, 3 and 4. They require that the first operation, in chronological order, is in an **anterior or identical** stage to the one containing the second operation.

Table 1: Constraints between operations for their grouping in manufacturing stages.

#	Constraints	Representations on the graph of constraints
1	If an operation (like a finishing) removes the surface achieved by another (like a roughing), this last one must be in an anterior stage to the one containing the first ^a .	Thick arc from the roughing operation towards the finishing operation.
2	Any workpiece holding must be made in an anterior or identical stage to those containing the manufacturing operations performed in this workpiece holding ^b .	Dashed arc from the workpiece holding towards the manufacturing operations performed in this workpiece holding.
3	A surface must be machined in an anterior or identical stage to those containing a workpiece holding using this surface ^c .	Dashed arc from the machining operation of the surface towards the workpiece holders using this surface.
4	The sawing off must be machined in an anterior or identical stage to the one containing the next workpiece holding if it exists ^d .	Dashed arc from the sawing off operation towards the following workpiece holding.
5	The latest manufacturing operations, performed in the first workpiece holders of a manufacturing phase, must be performed in the anterior stages to the one containing a workpiece holder using a surface neither machined nor laid on in this phase ^e .	Thick arcs from the latest manufacturing operations performed in the first workpiece holders of a manufacturing phase towards the workpiece holder using a surface neither performed nor laid on in this phase.

- This constraint has been highlighted by Ephraïm Goldschmidt [14]. We have generalized it for every operation removing a surface made by another operation.
- This constraint has been also highlighted by Ephraïm Goldschmidt [14].
- This constraint has been expressed by B. Vayre [17].
- This constraint had not been introduced into any work before this article. If it is not respected, there is a risk of getting a stage containing machining operations performed before and after a sawing off, while this last one is in a subsequent stage, which is not technically possible.
- This constraint has been highlighted by B. Vayre [17]. If this constraint is not respected, there is a risk of placing the new workpiece holding in the stage containing the previous workpiece holders and then to introduce manufacturing dimensions between, on the one hand, surfaces made by the manufacturing operations of the previous holders and, on the other hand, the surface used by the new workpiece holding. But the location of this last surface is unknown and uncontrolled in the previous workpiece holders.

These constraints are represented graphically by a dashed arc oriented from the first operation to the second operation in the chronological order (see arcs in dashed lines on figure 1).

A last constraint is related to the Copilot-Pro® method of determining the manufacturing dimensions presented below. If, in a phase, a workpiece holding, uses a surface not manufactured or laid on in the phase, then it should open a new manufacturing stage. This is obviously the case of the first workpiece holding of the phase but it can also be the case for further workpiece holders in the phase even if it is uncommon.

In order that this workpiece holding opens a new stage, we should introduce constraints between the last manufacturing operations of the previous workpiece holders and this workpiece holder, in the aim to indicate that those operations should be placed in stages **anterior** to the one containing this new workpiece holding. This constraint is number 5 in the table 1. It occurs only very rarely and is not present on the process presented in this article. The table 1 lists the five constraints that seem

necessary and sufficient, until now, for the grouping of operations in manufacturing stages.

These constraints are said automatic. Other constraints, which can not be determined automatically from the description of the process, can be introduced. For example to indicate that it is not possible to perform a groove in a bore as the bore has not been achieved. These constraints are of type "anterior or identical". Indeed the groove may be machined in the same stage as the bore.

By systematically applying these constraints to the operations of the manufacturing process used as an example, we obtain the graph of figure 1, which then determines the grouping of operations in manufacturing stages. Indeed, one finds that the operation 40 can be performed without having achieved the operation 30 (since there is no arc between them). The first stage will be made up of the operations 10, 20 and 40 which are connected by a constraint of kind "anterior or identical stage". The machined part will have the form shown on the first drawing of the figure 9.

Fig. 6. Graph of constraints between manufacturing operations.

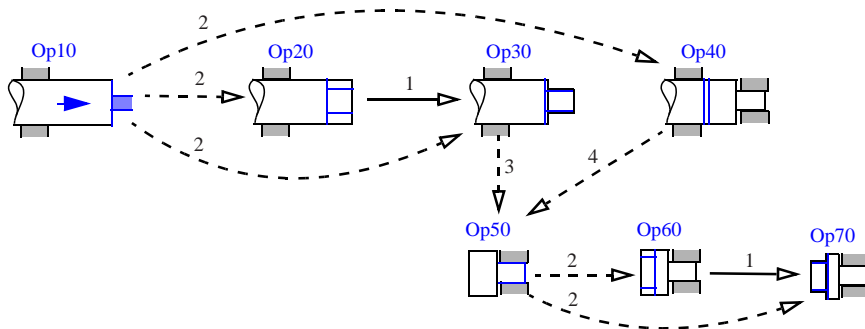


Fig. 7. Manufacturing stages of the setting plan and design and stock removal dimensions.

	Z1	Z2a	Z2	Z3	Z3a	Z4	Y0	Y1	Y2a	Y2	Y3a	Y3	Operations
Stage 1.1	X				X	O	I	O			X		Op10, 20, 40
Stage 1.2	I	X		X		I	I	I	X			XO	Op30, 50, 60
Stage 1.3	I		X	I		I	I	I		X		I	Op70

CE1	<					>
CE2	<			>		
CE3			<			>
CM1		<	>			
CM2				<	>	

The operation 30 should be performed in a second stage with the operations 50 and 60 which are connected by constraints of kind "anterior or identical stage". The workpiece after the first stage can not be reused for the second stage. It will be necessary to make a second workpiece with the operations 10, 20, 30, 40, 50 et 60. In other words the new manufacturing stage adds operations to those made in previous stages. Finally a third stage will be needed to perform the operation 70.

The workpieces coming from the three manufacturing stages are represented in figure 9 (although this is not useful for determining the manufacturing stages, we have identified the number of the constraint of each arc).

5. Manufacturing dimensions of the setting plan

Next, we need to identify each surface. The identifier of a surface begins with a capital letter, corresponding to the direction of the dimension which locates it, followed by a serial number and a lowercase letter if it is a rough surface (see figure 8).

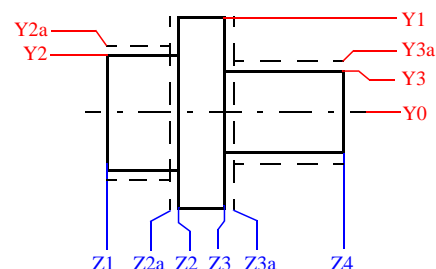
To determine the manufacturing dimensions, we create a table (see figure 7) in which, for each stage in line, we place the X character for each machined surface and the O character for each holding surface (or both if the surface is first machined then placed on a workpiece holder).

Since for each new stage, the setter will have made the operations of the previous stage, the surfaces of these operations remain after the new stage (unless it was the roughed surface of the finished surface machined in the stage). This information is indicated by the I character. For

example, Z1 is made in stage 1.1 and is not removed by any following operations. So this surface is present on the workpiece in stages 1.2 and 1.3. This is indicated by the I character in these stages (see figure 7).

The manufacturing dimensions that can be measured and controlled by the setting of tools, are those which link two surfaces present in the same stage, that is to say surfaces identified by the X, O or I characters. Thus, at the end of stage 1.1, any dimension between Z1, Z3a and Z4 can be measured and controlled by the setter. In contrast, the dimension between Z2 and Z2a, for example, is never measurable (in none of the lines, the two surfaces are present simultaneously).

Fig. 8. Identification of the machined surfaces.



To search for all the manufacturing dimensions that need to be measured at the end of each stage, we build a second table (see figure 7), under the first, to represent the surface linked by design dimensions and stock removal dimensions (see figure 7). The stock removal dimensions

correspond to the thickness given for finishing operations. They are also tolerated.

For each design dimension and stock removal dimension, we are looking, in the first table (see figure 7), for the shortest path between the surfaces which the dimensions connect. Thus, for the design dimension $CE1$, $CE2$ and $CE3$, are obtained manufacturing dimensions CF_{Z1Z4} , CF_{Z1Z3} and CF_{Z2Z4} measurable at the end of stage 1.3 (or even earlier for CF_{Z1Z4} , CF_{Z1Z3}).

For the stock removal dimensions $CM1$ and $CM2$, the surfaces they connect are never simultaneously present in the stages. They should therefore be measured indirectly by a chain of at least two manufacturing dimensions. We can use, for instance, the previous manufacturing dimensions, CF_{Z2Z4} and CF_{Z1Z3} :

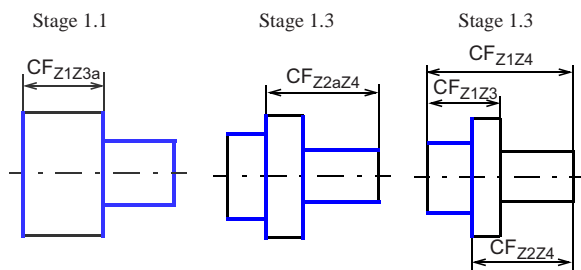
$$CM1 = -CF_{Z2Z4} + CF_{Z4Z2a} \quad (3)$$

$$CM2 = -CF_{Z1Z3} + CF_{Z1Z3a} \quad (4)$$

This choice can result in reduced tolerances of the dimensions CF_{Z2Z4} and CF_{Z1Z3} , especially if the tolerances of the stock removal dimensions, are of the same order of magnitude as those of the design dimensions. Other chains would be possible to prevent this decrease, however, they would introduce additional manufacturing dimensions. So, by choosing this solution, we can specify the state of the workpiece after each manufacturing stage and the manufacturing dimensions to be measured, on three manufacturing designs (figure 9).

The measurement of the deviation of these manufacturing dimensions will permit to set all the tools [16]. One of the tools should be fixed, that is to say, considered without deviation, to calculate the deviations of others. Otherwise an infinite number of solutions are possible. In general, in screw machining, it is the sawing off tool which is fixed because it is very close to the spindle.

Fig. 9. Manufacturing drawings for the setting plan, with the manufacturing dimensions to measure (the machined surfaces are highlighted with blue thick lines).



6. Monitoring plan of the example process

The monitoring plan is used during the production. The measurement of the workpiece is done only at the end of each manufacturing phase. As some rough surfaces have then disappeared, some manufacturing dimensions of the

setting plan are no longer measurable. In our example, these are the manufacturing dimensions CF_{Z1Z3a} and CF_{Z2aZ4} . Only the manufacturing dimensions, of the surfaces remaining at the end of the manufacturing phases, remain, that is to say, for the example, the dimensions CF_{Z1Z4} , CF_{Z1Z3} and CF_{Z2Z4} which correspond, in this example, to the design dimensions (it is not always the case). However, their tolerances must be re-calculated because they are no longer used to control the stock removal dimensions $CM1$ and $CM2$. They will have, in this example, directly the tolerances of the design dimensions. The manufacturing dimensions to measure in this monitoring plan are only a part of the manufacturing dimensions of the setting plan. This has the advantage of being able to use the same process of measurement at the end of the manufacturing phases for the setting plan as for the monitoring plan.

7. Influence of intermediate stocks on the plans and on the manufacturing dimensions

By way of comparison, and of explanation of the Copilot-Pro® methodology, we will now determine the setting plan and the manufacturing dimensions of a variant of the previous manufacturing process. This variant consists in producing the part in two times: First operations from 10 to 40 are performed and, after an intermediate stock, operations from 50 to 70 are performed (see figure 10). For this variant, the holding 2 is different. The workpiece must be located on the flat surface Z2 (see figure 10).

Due to the intermediate stock, we consider that it is not possible to wait for the end of the process to set the tools. The work-in-progress, which may be put off, is too big. The setting and monitoring plans will therefore consist of two manufacturing phases.

By performing the constraint graph, it is possible to determine that each phase will consist of two manufacturing stages. We have therefore, for this variant, two manufacturing phases and consequently two setting stages, instead of a unique, and four manufacturing stages, each one followed by a measuring stage, instead of three. Moreover, by representing the design dimensions and the stock removal dimensions in a table under the setting stages (see figure 11), we observe that, for this variant of the process, the design dimension $CE3$ can no longer be measured directly because the surfaces that it connects do not exist simultaneously in any manufacturing stage (see figure 11).

Fig. 10. Manufacturing process with an intermediate stock

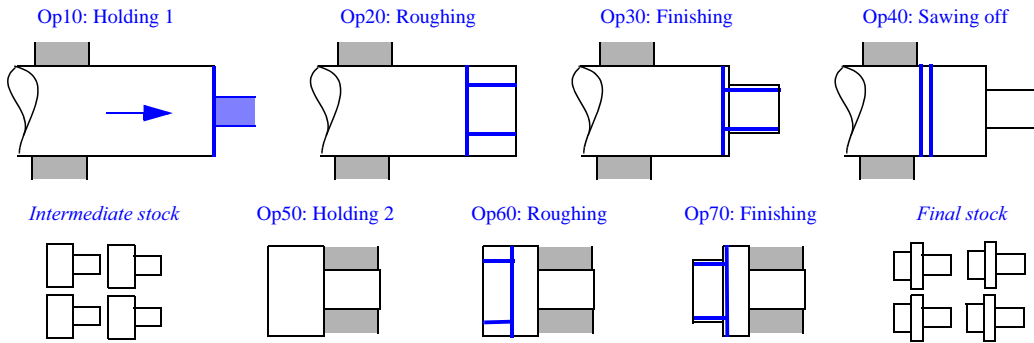
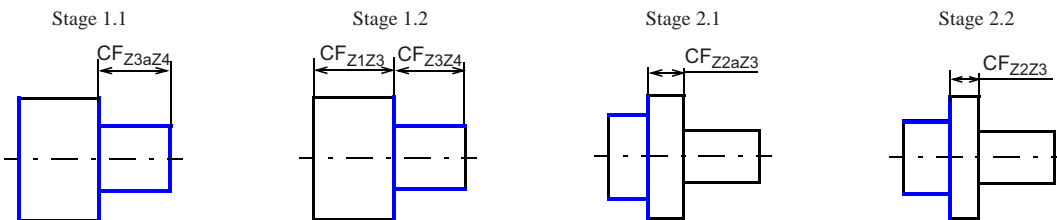


Fig. 11. Setting plan for the variant manufacturing process: Two manufacturing phases of two setting stages each one.

	Z1	Z2a	Z2	Z3	Z3a	Z4	O	Y1	Y2a	Y2	Y3a	Y3	Operations
Stage 1.1	X				X	O	I	O			X		Op10, 20, 40
Stage 1.2	I			X		I	I	I				X	Op30
Stage 2.1		X		O			I		X			O	Op50, 60
Stage 2.2			X	I			I			X		I	Op70
CE1	<					>							
CE2	<			>									
CE3			<			>							
CM1		<	>										
CM2				<	>								

Fig. 12. Manufacturing drawings of the setting plan for the process with an intermediate stock (the machined surfaces are highlighted with blue thick lines).



Several sets of manufacturing dimensions are possible. When seeking for a set with a minimum number of manufacturing dimensions, we can obtain those ones given from equation 5 to equation 9. For the most part of them, they use the Z3 surface, common to the two manufacturing phases.

$$CE1 = CF_{Z1Z3} + CF_{Z3Z4} \quad (5)$$

$$CE2 = CF_{Z1Z3} \quad (6)$$

$$CE3 = CF_{Z2Z3} + CF_{Z3Z4} \quad (7)$$

$$CM1 = CF_{Z2aZ3} - CF_{Z2Z3} \quad (8)$$

$$CM2 = CF_{Z3Z4} - CF_{Z3aZ4} \quad (9)$$

Those manufacturing dimension can be indicated on the manufacturing drawings (see figure 12). Compared with the initial process, we see that it is better to have a single manufacturing phase rather than two. Indeed, the

design dimension CE3 can no longer be measured even in the monitoring plan. The tolerances on the two manufacturing dimensions which replace CE3 should have smaller tolerances, especially if the stock removal dimensions have tolerances of the same order of magnitude as the design dimensions.

8. Conclusion

We have presented a method to arrange the manufacturing operations in order to minimize the number of measuring stages necessary to set the cutting tools during the manufacturing of a part. This method is part of a comprehensive methodology, called Copilot-Pro®, for the preparation of the manufacturing and the setting of the tools in production or in a production halt. It streamlines the operations of measuring workpieces and setting tools that are too often left up the setters in industry, leading to

many scrapped workpieces, long times of production halt and lower quality for the batches of workpieces.

If the manual preparation, as presented in this paper, can be engaged on workpieces with few machined surfaces, the use of software for more complex workpieces is essential. We are currently developing a software implementing this innovative method.

9. References

- [1] Wade, O.R., 1967. Tolerance control in design and manufacturing. New York: Industrial Press.
- [2] Wade, O.R., 1983. Tolerance control. In: Tool and manufacturing engineering handbook, volume 1: machining. Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers, 2/1–2/60. [Chapter 2].
- [3] Johnson, A., 1954. Index tolerance chart simplifies production. *The Tool Engineer*, 32 (2), 53–62.
- [4] Mooney, C.T., 1955. How to adjust tolerance charts. *The Tool Engineer*, 35 (4), 75–81.
- [5] Gadzala, J.L., 1959. Dimensional control in precision manufacturing. New York: McGraw-Hill.
- [6] Ngoi, B.K. A. and Cheong, K.C., 1998. The apparent path tracing approach to tolerance charting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14 (8), 580–587.
- [7] Irani, S.A., Mittal, R.O., and Lehtihet, E.A., 1989. Tolerance chart optimization. *International Journal of Production Research*, 27 (9), 1531–1552.
- [8] Whybrew, K., et al., 1990. A graph-theoretic approach to tolerance charting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 5 (2), 175–183.
- [9] Britton, G.A., Whybrew, K., and Tor, S.B., 1996. An industrial implementation of computer-aided tolerance charting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 12 (2), 122–131.
- [10] Britton, G.A. and Whybrew, K., 1997. CATCH: Computer-aided tolerance charting. In: H.C. Zhang, ed. *Advanced tolerancing techniques*. New York: John Wiley & Sons, 461–489.
- [11] Ngoi, B.K.A. and Tan, C.K., 1995. Computer-aided tolerance charting: a ‘black box’ approach. *International Journal of Production Research*, 33 (4), 1117–1134.
- [12] Xue, J. and Ji, P., 2002. Identifying tolerance chains with a surface-chain model in tolerance charting. *Journal of Materials Processing Technology*, 123 (1), 93–99.
- [13] Ji, P. and Xue, J., 2006. CAATC – a computer-aided angular tolerance charting system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 220 (6), 883–892.
- [14] Ephraïm Goldschmidt, «Gammes et cotation pour le réglage des machines-outils de décolletage», mémoire de Doctorat de l’Université de Savoie, 2009.
- [15] Éric Pairel, Ephraïm Goldschmidt, Pierre-Antoine Adragna, Pascal Hernandez & Maurice Pillet «The pilot dimensions method: reconciling steering and conformity in workshops», *International Journal of Production Research*, Vol. 49, No. 19, October 2011, 5943–5956.
- [16] Éric Pairel, Ephraïm Goldschmidt, Benjamin Vayre, Pierre-Antoine Adragna & Maurice Pillet, «Copilot Pro®: A full method for the steering of the machining», *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, Vol. 2, No. 1, 2011, 51–60.
- [17] Benjamin Vayre, «Algorithme de génération des étapes de mesurage et de réglage pour Copilot-Pro®», Mémoire de Mater recherche, Université de Savoie, 2010.

ANNEXE E

*Article sur la correction par
points, publié dans les actes du
congrès international
MACHINES ET USINAGE
À GRANDE VITESSE
en 2016 [62]*



Réglage ultra-précis des usinages

**Eric PAIREL^(a), Maurice PILLET^(a),
Ephraïm GOLDSCHMIDT^(b), Stéphane TICHADOU^(a)**

(a) Université Savoie Mont Blanc, SYMME, F-74000 Annecy, France. Mail :

eric.pairel@univ-smb.fr

(b) Cetim-ctdec, 750 Avenue de Colomby, 74300 Cluses, France. Mail :

e.goldschmidt@cetim-ctdec.com

Résumé : La qualité géométrique des produits dépend essentiellement de la qualité du réglage des machines-outils. Ce réglage est aujourd'hui effectué des régleurs et on constate une proportion encore importante de pièces rebutées malgré la très grande précision des machines-outils actuelles. Le laboratoire SYMME a proposé une méthode générale de réglage des outils et des repères en usinage. Son principe est de mesurer l'écart entre les points usinés et les points en position idéale. Nous étudions ici l'origine de ces écarts et montrons comment ils peuvent être réduits en tournage. Une simulation numérique montre l'importance en particulier de la jauge du rayon de bec permettant d'atteindre un réglage ultra-précis.

Mots clés : Usinage ; Réglage ; Ajustement ; Jauge-outil ; Qualité géométrique

1 Introduction

Alors que les déplacements relatifs des outils de coupe par rapport aux pièces sont ultra-précis sur les machines-outils actuelles, les utilisateurs de ces machines fabriquent encore des pièces qui ont des écarts géométriques bien plus grands et même trop grands au regard des tolérances.

La raison est qu'aujourd'hui encore, les ingénieurs laissent aux opérateurs et aux réglers le soin de régler les jauges outils et les prises de référence à partir de cotes mesurées sur la pièce ou entre la pièce et la machine. La conséquence est que les pièces sont loin d'avoir la précision des machines et que beaucoup doivent encore être rebutées malgré la haute-précision des nouvelles machines-outils à commande numérique (MOCN).

Pourtant, à la fois on pourrait disposer d'une information sur la géométrie de la pièce beaucoup plus riche que celles fournies par des cotes et en plus nous avons maintenant, dans les ateliers, des ordinateurs pour faire tout type de calcul. C'est donc juste par manque de méthode que l'on n'est pas capable de régler au mieux les MOCN initialement puis régulièrement pour compenser les dérives dues aux dilatations et surtout à l'usure des outils et dont au recul de leurs arrête coupante.

L'objectif de cette publication est de présenter une méthode ultra-précise de réglage des MOCN fondée sur les travaux de Pillet *et al.* (2009).

Malgré l'enjeu industriel important de ce sujet, comme on vient de le voir, la recherche scientifique sur le sujet est quasi inexistante. Une recherche bibliographique sur les expressions «réglage d'usinage, de tournage ou de fraisage», en français et en anglais, fait ressortir une quinzaine d'articles scientifiques. Sans tous les citer, nous pouvons les classer en trois groupes :

Les articles du premier groupe sont des propositions pour réduire les éventuels écarts géométriques sans que ces derniers ne soient ni définis ni mesurés.

Ainsi Yang & Sim (1993) proposent un modèle permettant d'ajuster la vitesse d'avance d'une fraise-boule pour limiter sa flexion et ainsi réduire l'écart entre la surface usinée et la surface idéale.

Les articles du second groupe définissent les écarts géométriques à mesurer mais pas les paramètres à ajuster sur le procédé.

Ainsi, Martin *et al.* (2004) proposent d'ajuster par calcul un modèle géométrique tridimensionnel de la pièce à fabriquer aux points palpés sur la pièce fabriquée. Ce modèle est composé de cylindres de révolution et de plans dont les distances entre-eux sont rendus variables de manière à mesurer leurs écarts de distances et/ou d'orientation. Ainsi, selon les auteurs, il est possible de régler la machine-outil. Cependant ils n'indiquent pas quels paramètres de la machine ou du programme de la commande numérique il faut modifier.

Une approche similaire est proposée par Goldschmidt *et al.* (2007) cependant plus générale puisque l'ensemble des écarts géométriques de position est considéré pour chaque tolérance géométrique. Néanmoins comme la proposition précédente les paramètres effectivement modifiés sur le procédé ne sont pas précisés.

Enfin les articles du dernier groupe, dont fait partie le présent article, définissent les écarts géométriques à mesurer, les paramètres du procédé et une méthode pour les ajuster.

Ainsi, Pairel *et al.* (2004) caractérisent la déformée d'une plaque emboutie par un ensemble de cotes linéaires et angulaires. Ils paramètrent le procédé d'emboutissage et calculent l'incidence de ces paramètres sur les cotes grâce à un plan d'expériences réalisé sur une simulation numérique par éléments finis. Pour chaque cote ils obtiennent ainsi une équation fonction des paramètres du procédé et ils cherchent ensuite plusieurs solutions de réglage pour que la somme des carrés des écarts résiduels sur les cotes soit minimale.

Pairel *et al.* (2011) ont montré qu'il était possible de créer automatiquement une matrice reliant les cotes de pièces de tournage aux jauges des divers outils utilisés. L'inversion de cette matrice permet alors d'annuler, aux dispersions aléatoires près, les écarts des cotes par rapport à leurs valeurs idéales.

Enfin Pillet *et al.* (2009) expliquent qu'il est souvent possible de relier les paramètres d'ajustement d'un procédé aux caractéristiques de ses produits, soit par «calcul», soit par «expérimentation». Ils montrent, pour la première fois, comment relier les écarts, mesurés en différents points, entre la surface usinée et sa situation idéale, aux paramètres d'ajustement de celle-ci. Grâce à la méthode des petits déplacements [], ils obtiennent ainsi un modèle direct linéaire exprimé sous forme matricielle. La pseudo-inversion de ce modèle permet de calculer l'ajustement de la position du repère-programme et des jauges-outils de l'exemple de fraisage présenté.

Cette technique est réutilisée par Abdelhakim *et al.* (2012) sur un exemple de pièce de tournage. Les paramètres sont alors seulement les jauges en X et en Z des outils de tournage réalisant les diverses surfaces d'une pièce de tournage expérimentale. Les jauges de rayon de bec des outils ne sont pas considérées alors qu'elles sont tout aussi influentes que les autres, comme nous le montrerons. Des points sont mesurés sur quatre génératrices de la pièce. Enfin, dans Abdelhakim *et al.* (2012), comme dans Pillet *et al.* (2009), il n'y a qu'un seul repère commun aux paramètres de position du repère-programme et aux jauges-outils alors que leurs repères peuvent différer.

Nous proposons donc, dans ce nouvel article qui prolonge ceux-là, une généralisation du calcul de l'influence des paramètres de position des repères-programme et des jauges-outils sur les écarts de points mesurés à la surface de la pièce. Après un rappel détaillé du principe du réglage des outils par mesurage des points usinés (section 2), nous étudierons l'influence des repères en commande numérique (section 3) puis celle des jauges-outils en tournage (section 4) et nous terminerons sur une simulation montrant notamment l'importance de la jauge du rayon de bec.

2 Principe du réglage par mesure de points

Nous rappelons ici, de façon un peu plus précise, la méthode introduite par Pillet *et al.* (2009) qui permet d'établir un modèle direct d'influence des paramètres géométriques du procédé sur la position et la forme des surfaces fabriquées.

Le principe est de mesurer la distance d'un point de la surface fabriquée à la surface idéale. Techniquement, l'écart est en fait mesuré entre un point Q_i de la surface idéale et la surface usinée suivant la direction \vec{n}_i orthogonale à la surface idéale en ce point (voir figure 1).

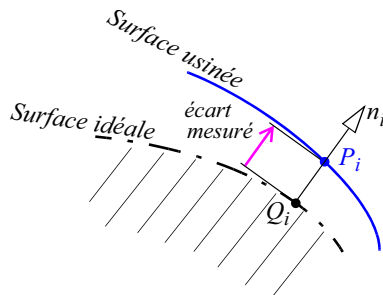


Figure 1 : Mesure de l'écart de la surface usinée en un point de la surface idéale.

Ce mesurage peut être effectué grâce à un comparateur de déplacement dans l'axe (Q_i , \vec{n}_i), qui donc va toucher la surface usinée en P_i , ou bien grâce à une machine à mesurer tridimensionnelle, ou même la machine-outils elle-même, qui va numériser des coordonnées du point P_i .

En supposant, à ce stade de nos explications, que chaque paramètre j d'ajustement du procédé, déplace et/ou «déforme» la surface usinée, le point P_i va donc subir une translation qui, du fait des pré-réglages, reste relativement petite par rapport à la courbure locale de la surface. Cette hypothèse réaliste permet d'une part d'utiliser le principe de superposition et d'écrire que la translation totale du point P_i est égale à la somme des translations dues à l'ensemble de paramètres (voir équation 1), et d'autre part d'écrire que le prochain écart e_i^1 est approximativement égal à l'ancien écart, e_i^0 , plus la projection du déplacement de P_i , $\overrightarrow{D(P_i)}$, sur la normale \vec{n}_i (voir équation 2 et figure 2).

$$\overrightarrow{D(P_i)} = \overrightarrow{D_1(P_i)} + \dots + \overrightarrow{D_j(P_i)} + \dots + \overrightarrow{D_k(P_i)} \quad (1)$$

$$e_i^1 = e_i^0 + \overrightarrow{D(P_i)} \cdot \vec{n}_i \quad (2)$$

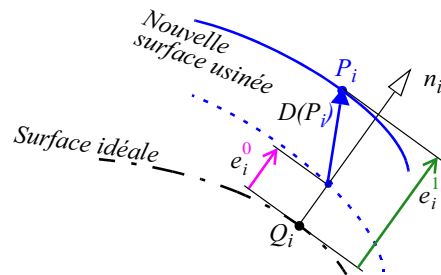


Figure 2 : Schéma de calcul du nouvel écart entre la surface déplacée et déformée et la surface idéale.

L'ensemble des équations e_i^1 forme le modèle variationnel direct d'incidence des paramètres sur les écarts. Ce modèle peut ensuite être utilisé pour calculer le réglage qui annule, ou au moins réduit, théoriquement, les prochains écarts.

Nous allons donc, dans la suite, déterminer l'incidence de chaque paramètre d'usinage sur l'écart d'un point «usiné».

3 Repère de référence et repère-programme vis-à-vis de la mise-en-position

Lors de l'usinage d'une surface, quelle qu'elle soit, la pièce est appuyée dans la machine-outil sur d'autres surfaces de la pièce. Ces autres surfaces sont les références de la surface usinée, au sens de la norme de spécification géométrique NF EN ISO 5459 (2011). Il est indispensable que la position idéale de la surface usinée soit connue par rapport à ces références. Cela peut demander un travail de «re-cotation» de la pièce si ce n'est pas le cas sur son dessin de définition initial.

Pour illustrer nos propos, nous considérons l'usinage d'une ogive et d'un trou borgne en tournage, alors que la pièce est appuyée sur un plan et serrée dans un mandrin sur son cylindre (voir figure 3).

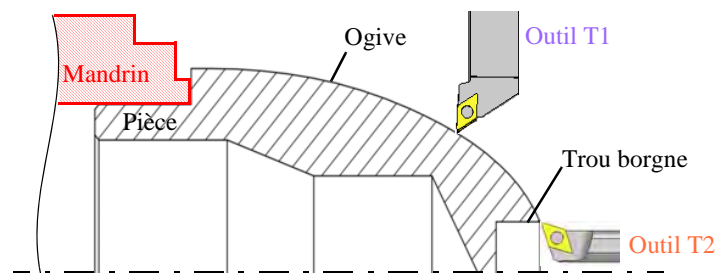


Figure 3 : Tournage de l'ogive et trou borgne (demi-vue).

La cotation la plus générale est celle qui définit la position de quelques points de la surface par rapport au repère construit sur les références. Ce n'est toutefois pas suffisant

pour le mesurage tridimensionnel de la surface. Il faut en outre disposer des normales locales à la surface en ces points car elles serviront de direction de mesure de l'écart de chaque point par rapport à sa position idéale. Nous supposons donc dans la suite que la surface idéale est donnée sous la forme d'un ensemble de points et de leurs normales locales, dans un repère construit sur les surfaces de référence et que nous appelons le repère de référence, R_f (voir figure 4).

Le mesurage des écarts des points de la surface usinée par rapport à la surface idéale devrait donc se faire dans ce repère. Ce n'est pas toujours le cas notamment si le mesurage est effectué par la machine-outil elle-même. En effet, dans ce cas, le mesurage est effectué dans un repère-programme de la MOCN. Ce repère-programme a été construit sur les éléments de la machine-outil et non sur les surfaces de référence de la pièce. Il faut donc que ces deux repères se superposent lorsque la pièce est dans le porte-pièce, c'est-à-dire il faut que le repère-programme soit sur les surfaces du porte-pièce en contact avec la pièce.

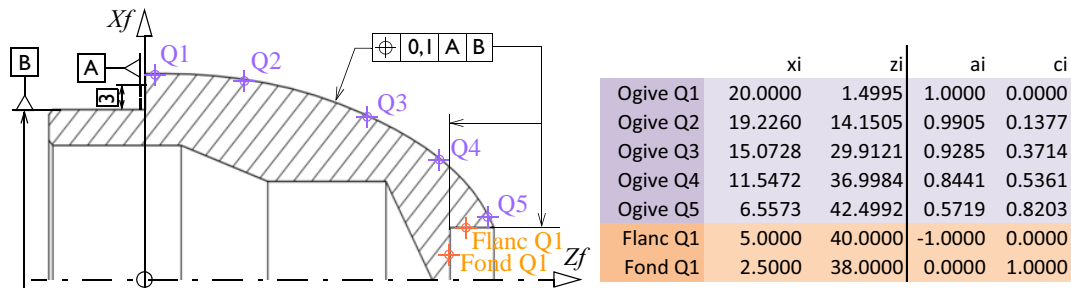


Figure 4 : Cotation par points de l'ogive et du trou borgne.

Les zones de contact réelles entre la pièce et le porte-pièce, ainsi que l'ordre des contacts doivent être respectés dans la construction du repère de référence comme dans celle du repère-programme.

Par exemple en tournage si la pièce est d'abord appuyée sur une partie de son plan, puis serrée sur son cylindre, le repère de référence devra être défini et construit sur cette partie du plan (repérée **A** sur le dessin de la figure 4) puis sur la partie serrée de son cylindre (repérée **B** sur le dessin de la figure 4).

La figure 5 montre une situation dans laquelle le repère de référence **A** puis **B**, ne correspond pas à la mise-en-position de la pièce dans le porte-pièce et donc ne correspond pas au repère-programme R_p . Il va en résulter un écart important entre la surface usinée et la surface idéale définie dans le repère de référence. Cet écart sera constaté si la surface usinée est mesurée dans le repère de référence mais pas si elle est mesurée dans le repère-programme.

Cependant, tenter de corriger cet écart serait une erreur car, étant dépendant des défauts

des surfaces de référence et en particulier ici de leur défaut de perpendicularité, il varie d'une pièce à l'autre de façon incontrôlé a priori.

Cela montre que la prise-de-pièce et le repère de référence doivent concorder en tournage, mais aussi en fraisage.

Comme on vient de le voir, il peut y avoir un écart du repère de référence vis-à-vis de la prise-de-pièce qui ne peut pas être corrigé, mais il peut aussi y avoir un écart du repère-programme vis-à-vis de cette même prise-de-pièce. En tournage cet écart sera principalement un décalage suivant Z_p de l'origine Op par rapport au plan d'appui de la pièce.

Les autres écarts, en position comme en orientation, sont négligeables si les décalages, nommés DEC sur les commandes numériques, depuis l'origine du porte-pièce R_{pp} ont été correctement mesurés ou calculés.

Ce décalage de l'origine pourrait être corrigé en prévoyant le calcul d'un paramètre de translation selon Z_p comme en fraisage (voir ci-après), mais le même résultat sur les écarts des points peut aussi être obtenu par les jauges en Z des outils. Or il vaut mieux prendre en compte les jauges en Z des différents outils pour pouvoir régler la position des surfaces usinées entre-elles, plutôt qu'un seul paramètre de décalage global de l'ensemble des surfaces usinées. Sauf cas très particulier, nous conseillons donc de ne pas modifier la position du repère-programme en tournage.

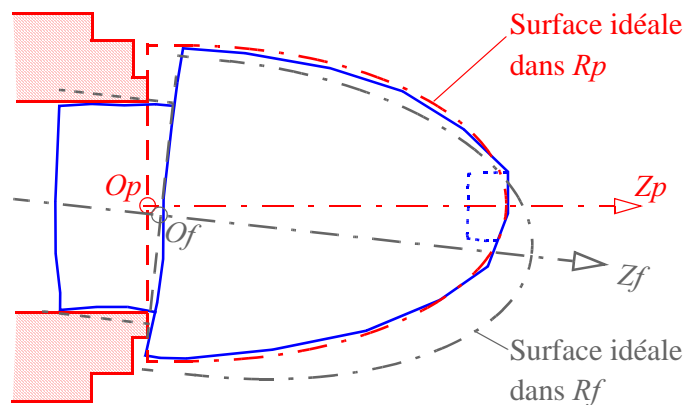


Figure 5 : Mauvaise construction du repère de référence R_f .

En revanche en fraisage, il faut prévoir des paramètres de translation et de rotation du repère-programme pour compenser son écart initial par rapport à la mise-en-position réelle de la pièce dans le porte-pièce car cet écart ne pourra pas être corrigé par les jauges outils.

Cet écart initial peut provenir d'une mauvaise construction du repère-programme qui, par

exemple, n'aurait pas pris en compte la butée 1 du montage d'usinage représenté sur figure 6. Cette construction est assez fréquente car le repère programme est rarement orienté ; les régleurs se contentant d'un décalage d'origine depuis l'origine du porte-pièce.

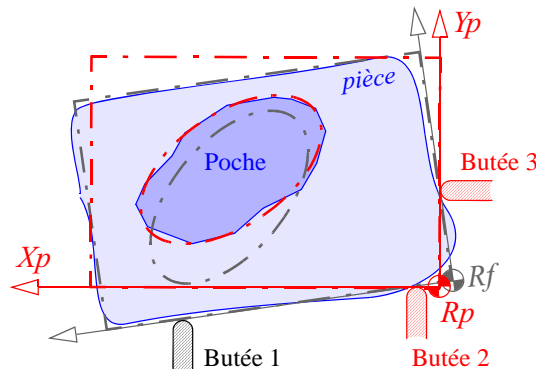


Figure 6 : Mauvaise construction initiale du repère programme R_p .

La poche usinée dans le repère-programme n'a évidemment pas la bonne position dans le repère de référence qui est ici correctement construit car prenant en compte les appuis réels de la pièce. Ici encore le défaut de position de la poche ne sera pas vu si elle est mesurée dans le repère-programme. Si elle est mesurée dans le repère de référence, il pourra être corrigé si l'on se donne des paramètres de déplacement du repère programme c'est-à-dire, dans ce cas d'usinage trois axes, les translation selon X_p et Y_p et la rotation autour de Z_p .

Marty & Linares (1999) ont eux aussi suggéré l'idée de recaler le repère-programme en mesurant quelques points en fraisage ; mais ils n'ont pas précisé leur méthode.

En nommant $\vec{\Omega}$ le vecteur représentant la petite rotation du repère-programme R_p et $\vec{D}(Op)$, la translation de son origine, il est possible de calculer le déplacement de chaque point usiné qui va en résulter en considérant que les déplacements sont un champ de moments (méthode des petits déplacements due à Bourdet & Clément (1988)) :

$$\vec{D}(P_i) = \vec{D}(Op) + \vec{\Omega} \wedge \vec{OpP_i} \quad (3)$$

D'autre-part un champ de moments est équi-projectif, c'est-à-dire qu'il vérifie la relation suivante :

$$\vec{D}(P_i) \cdot \vec{n_i} = \vec{D}(Q_i) \cdot \vec{n_i} \quad (4)$$

Cela permet d'utiliser les coordonnées connues du point idéal Q_i en lieu et place de celles du point usiné P_i dans l'expression du prochain (voir équation 2) :

$$e_i^1 = e_i^0 + \left(\overrightarrow{D(Op)} + \vec{\Omega} \wedge \overrightarrow{OpQ_i} \right) \cdot \vec{n}_i \quad (5)$$

Soit, en distribuant le produit scalaire et en permutant les opérations du produit mixte :

$$e_i^1 = e_i^0 + \overrightarrow{D(Op)} \cdot \vec{n}_i + \vec{\Omega} \cdot \overrightarrow{OpQ_i} \wedge \vec{n}_i \quad (6)$$

Les vecteurs pourraient être exprimés dans n'importe quelle base mais les composantes du déplacement sont plus simples à interpréter dans le repère-programme. D'autre part les points Q_i et leurs normales \vec{n}_i sont initialement connus dans ce repère. En nommant de la façon suivante les composantes des vecteurs apparaissant dans l'équation 6, dans R_p :

$$\overrightarrow{D(Op)} = (u, v, w)_{R_p} \quad (7)$$

$$\vec{\Omega} = (\alpha, \beta, \gamma)_{R_p} \quad (8)$$

$$\vec{n}_i = (a_i, b_i, c_i)_{R_p} \quad (9)$$

$$\overrightarrow{OpP_i} \wedge \vec{n}_i = (L_i, M_i, N_i)_{R_p} \quad (10)$$

L'équation 6 devient :

$$e_i^1 = e_i^0 + a_i u + b_i v + c_i w + L_i \alpha + M_i \beta + N_i \gamma \quad (11)$$

Nous obtenons donc, par la méthode des petits déplacements, une expression linéaire du prochain écart en fonction du déplacement du repère-programme. Selon le nombre de composantes retenues pour ce déplacement, il faudra mesurer au moins le même nombre de points. Pour l'exemple du fraisage de la poche donné en figure 6, u , v et γ suffisent à ajuster la position du repère programme de sorte qu'il corresponde au repère de référence. Il suffit donc de mesurer l'écart en seulement trois points. Néanmoins davantage peuvent être mesurés. Avec les incertitudes de mesure sur les écarts initiaux, le système d'équations n'a alors pas de solution exacte puisque davantage d'équations que d'inconnues. Nous pouvons alors rechercher un réglage des paramètres qui satisfasse un critère sur les prochains écarts, comme, par exemple, de rendre minimale la somme de leurs carrés (critère des moindres carrés).

Dans la suite nous ne prolongerons pas l'exemple du fraisage mais celui du tournage qui, par rapport au fraisage, comporte davantage de jauges-outils. Retenons de cette section que l'écart du repère de référence par rapport à la mise-en-position n'est pas corrigible et doit donc être réduit autant que possible par construction alors que celui du repère-

programme l'est et qui le sera en fraisage. Les écarts des repères par rapport à la mise-en-position ne sont observables que si les points sont mesurés dans le repère de référence.

4 Les jauges-outils

En tournage, la commande numérique calcule le mouvement du porte-outil, Rpo , pour que le bec arrondi de l'outil suive exactement le contour idéal défini dans le repère-programme. Cependant selon l'importance des erreurs faites les jauges-outils, le bec ne tangente pas exactement le contour idéal si bien que la surface usinée n'est pas confondue avec la surface idéale. D'autre-part les outils s'usent et donc les jauges doivent être réajustées. D'autres paramètres peuvent également créer un écart entre les deux surfaces, notamment la flexion de l'outil et/ou de la pièce, la dilatation, etc, mais leurs effets systématiques peuvent être réduits en partie par les jauges-outils.

Un outil de contournage a quatre jauges :

- une jauge en X , Jx , qui est la distante mesurée en X entre la pointe théorique de l'outil Po et l'origine du porte-outil Opo ;
- une jauge en Y , Jy , qui est la distante, réglée si possible à zéro, en Y entre la pointe théorique de l'outil Po et l'origine du porte-outil Opo ; cette jauge est appelée la hauteur de pointe ;
- une jauge en Z , Jz , qui est la distante mesurée en Z entre la pointe théorique de l'outil Po et l'origine du porte-outil Opo ;
- et enfin une jauge de rayon Jr donnant le rayon renseigné dans la CN de la pointe de l'outil et qui est souvent appelé rayon de bec d'outil et noté $r\epsilon$.

Pour un outil de forme, les dimensions de l'outil et plus généralement sa forme peuvent aussi être considérées comme des jauges. La différence avec les premières est que leur réglage nécessite un ré-affûtage ou un changement de l'outil. Nous n'étudierons pas ces jauges de forme dans cet article.

Chacune de ces jauges déplace ou déforme sur la surface usinée. Nous quantifierons ces modifications dans la suite. Les jauges Jx , Jy et Jz sont relatives au repère du porte-outil, Rpo , toujours tel qu'un déplacement positif éloigne l'outil de la pièce. Les centres de tournage ont plusieurs tourelles porte-outil ; ils ont donc plusieurs repères porte-outil. Pour calculer l'impact des jauges en X , Y et Z des outils d'une tourelle, il faut que les points de mesure soient exprimés dans le repère de la tourelle. En fait nous pouvons considérer que c'est toujours le cas puisque les axes Z des porte-outils sont tous confondus avec l'axe Z du repère-programme et que les axes X sont tous orientés vers l'extérieur de la pièce et que les points idéaux peuvent être mesurés sur n'importe quelle

génératrice de la pièce. Lorsqu'une pièce est usinée en broche principale puis en contre-broche, les repères de référence et leurs repères-programmes changent et leurs axes correspondent alors à ceux des tourelles agissant sur la contre-broche.

En conclusion, en tournage, quelque soit la complexité de la machine, il n'y a pas de changement de repère à effectuer sur les points idéaux et leurs normales dès lors qu'ils sont exprimés dans le repère-programme. En revanche en fraisage le repère-programme peut avoir été réorienté ; ses axes ne sont plus, alors, parallèles à ceux de la machine (voir section 3). De plus, en fraisage cinq axes, le repère du porte-outil peut avoir deux rotations par rapport au repère-programme. Pour calculer l'impact des jauges de la fraise sur les points usinés suivant la méthode développée dans cet article, les points idéaux et leurs normales doivent être exprimés dans un repère dont l'origine est l'origine-programme et la base celle du repère du porte-outil. Nous développerons pas plus les opérations nécessaires au réglage des jauges-outils en fraisage dans cet article. Nous allons dans la suite, quantifier l'impact des jauges en tournage.

4.1. Incidence des jauges Jx et Jz

Supposons que nous ayons commis une erreur de δJx sur la jauge en X et de δJz sur la jauge en Z (voir figure 7). Le contour usiné correspond au contour idéal translaté du vecteur $(\delta Jx, 0, \delta Jz)$ et donc chaque point aussi :

$$\overrightarrow{D(Q_i)} = (\delta Jx, 0, \delta Jz)_{R_{po}} \quad (12)$$

Soit, en projection sur \vec{n}_i :

$$\overrightarrow{D(Q_i)} \cdot \vec{n}_i = a_i \delta Jx + c_i \delta Jz \quad (13)$$

Il en va de même pour le point P_i , autrement-dit une augmentation des jauges, en X ou en Z, ou des corrections dynamiques positives, vont traduire le contour usiné vers l'extérieur de la matière suivant l'équation 13.

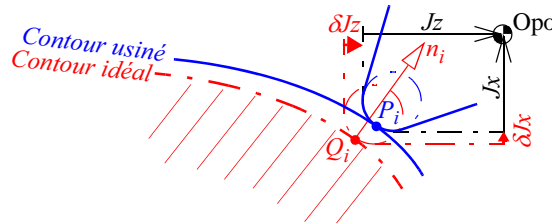


Figure 7 : Translation du contour due aux jauges Jx et Jz .

4.2. Incidence de la jauge J_y

La jauge J_y mesure l'écart suivant Z entre le bec de l'outil et l'axe de révolution de la pièce. Cette jauge peut avoir été initialement mal réglée mais l'augmentation de la force de coupe liée à l'usure de l'outil peut aussi augmenter cet écart par flexion de l'outil. Il s'ensuit une augmentation $\delta\rho$ du diamètre local usiné (voir figure 8).

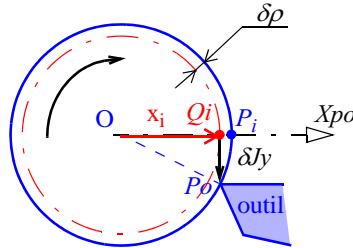


Figure 8 : Translation du contour due à la jauge J_y .

Le théorème de Pythagore dans le triangle (O, Q_i, P_o) permet alors d'obtenir la relation entre cette augmentation et celle de J_y :

$$(x_i + \delta\rho)^2 = x_i^2 + \delta J_y^2 \quad (14)$$

Soit en développant le carré et en négligeant $\delta\rho^2$:

$$\delta\rho = \frac{1}{2x_i} \delta J_y^2 \quad (15)$$

Cette variation de rayon crée un déplacement du point Q_i dans la direction $\overrightarrow{X_{po}}$:

$$\overrightarrow{D(Q_i)} = \delta\rho \overrightarrow{X_{po}} \quad (16)$$

Ce déplacement, projeté sur la normale locale \vec{n}_i , permet de calculer l'incidence de cette jauge sur l'écart du point :

$$\overrightarrow{D(Q_i)} \cdot \vec{n}_i = \frac{a_i}{2x_i} \delta J_y^2 \quad (17)$$

Cette jauge ne doit être utilisée que si l'outil réalise des diamètres très différents sinon elle risque de prendre des valeurs de plusieurs dizaines de millimètre pour compenser de tout petits écarts.

4.3. Incidence de la jauge Jr

Supposons que nous ayons commis une erreur de δJr sur le rayon de bec de l'outil, valant réellement Jr . La commande numérique va alors calculer le mouvement de l'outil pour que cet arrondi, plus grand, reste tangent au contour idéal. Il va en résulter un contour usiné «déformé» par rapport au contour idéal (voir figure 9).

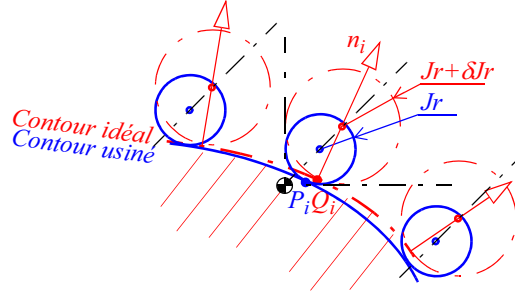


Figure 9 : Déformation du contour usiné due à la jauge Jr .

Cette «déformation» peut être calculée en chaque point Q_i du contour par la chaîne de vecteurs passant par les centres des arrondis (voir figure 10 et équation 18).

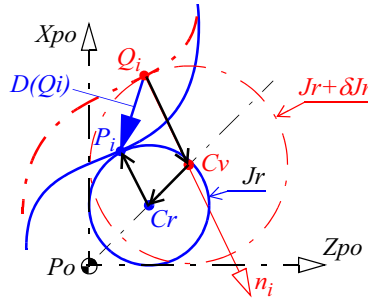


Figure 10 : Chaîne vectorielle nécessaire au calcul de l'incidence de la jauge Jr .

$$\overrightarrow{D(Q_i)} = \overrightarrow{Q_iCv} + \overrightarrow{CvCr} + \overrightarrow{CrP_i} \quad (18)$$

Par les propriétés de tangence, on a :

$$\overrightarrow{Q_iCv} = (Jr + \delta Jr) \vec{n}_i \quad (19)$$

$$\overrightarrow{CvCr} = \delta Jr (-\vec{Xpo} - \vec{Zpo}) \quad (20)$$

$$\overrightarrow{CrP_i} = -Jr \vec{n}_i \quad (21)$$

Cette somme vectorielle en projection \vec{n}_i donne :

$$\overrightarrow{D(Q_i)} \cdot \vec{n}_i = (Jr + \delta Jr) + \delta Jr(-a_i - c_i) - Jr = (1 - a_i - c_i) \delta Jr \quad (22)$$

L'expression du vecteur \overrightarrow{CvCr} dépend du cadran utilisé pour l'outil. Dans l'expression précédent, il était exprimé pour le cadran 1 qui place le centre du bec d'outil en X et Z positif (voir figure 11). L'outil 2 d'usinage du trou borgne est placé dans le cadran 7 (X négatif et Z positif).

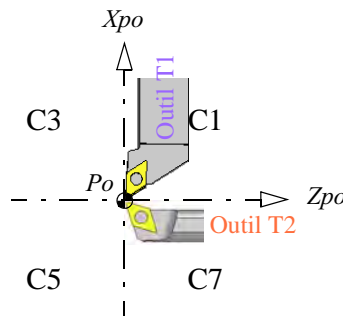


Figure 11 : Cadran de l'outil à prendre en compte dans l'incidence de Jr.

Dans ce cadran, \overrightarrow{CvCr} a pour expression (voir aussi figure 10) :

$$\overrightarrow{CvCr} = \delta Jr (\overrightarrow{Xpo} - \overrightarrow{Zpo}) \quad (23)$$

Par conséquent, l'expression du déplacement projeté de Q_i est alors :

$$\overrightarrow{D(Q_i)} \cdot \vec{n}_i = (1 - a_i + c_i) \delta Jr \quad (24)$$

Les autres cadrans peuvent facilement s'en déduire.

4.4. Expression linéaire du prochain écart en fonction des jauges-outils en tournage

En tenant compte des quatre jauges d'un outil de contournage, l'expression du prochain écart d'un point usiné, par rapport à sa situation idéal, est :

$$e_i^1 = e_i^0 + a_i \delta Jx + c_i \delta Jz + \frac{a_i}{2x_i} \delta Jy^2 + (1 \pm a_i \pm c_i) \delta Jr \quad (25)$$

Un simple changement de variable pour δJy permet de rendre cette expression linéaire en fonction des jauges-outils. Les signes devant a_i et c_i du coefficient sur δJr dépendent du cadran de l'outil. Ils sont négatifs si l'outil est dans le cadran X+, Z+.

5 Simulation d'une correction d'usinage

Supposons que nous ayons les erreurs suivantes sur les jauges des outils (figure 12).

J1x	J1y	J1z	J1r	J2x	J2y	J2z	J2r
0.2000	0.0500	0.1000	0.1500	0.0600	0.0500	0.0800	0.1500

Figure 12 : Erreurs sur les jauges-outils en mm.

Ces erreurs conduisent aux écarts suivants sur les points (figure 13) :

Point	e_i0
Ogive Q1	0.1999
Ogive Q2	0.1926
Ogive Q3	0.1778
Ogive Q4	0.1653
Ogive Q5	0.1374
Flanc Q1	-0.0603
Fond Q1	0.8000

Figure 13 : Écarts initiaux des points usinés.

Ces écarts ont été calculé géométriquement à partir des erreurs sur les jauges et à l'aide, notamment, d'un logiciel d'esquisse, type esquisseur CAO. L'objectif de la simulation est de vérifier que la matrice d'incidence des jauges sur les points, reposant sur l'hypothèse de petits déplacements, permet retrouver les erreurs sur les jauges. La matrice d'incidence est bâtie à partir de l'équation 25 (voir figure 14).

Même si les jauges $J2y$ et $J2r$ ont des erreurs, elles n'ont pas été prises en compte dans la matrice car d'une part $J2r$ est sans influence sur les points «Flanc Q1» et «Fond Q1» et d'autre part l'outil n'usine qu'un seul diamètre ; celui du flanc. Il n'est donc pas possible de savoir si l'écart sur diamètre est dû à la jauge $J2y$ ou $J2x$. En outre, $J2y$, comme $J1y$, est nettement moins influente que les autres jauges (environ dix fois moins). La conséquence est que pour compenser l'erreur sur une autre jauge, les jauges Jy , devraient prendre une très grande valeur, éventuellement négative, ce qui n'est possible physiquement. Autrement-dit les jauges en Y ne devront être utilisées qu'en complément de toutes les autres et que si l'outil usine divers diamètres.

En notant MI cette matrice d'incidence, le système d'équations donné par l'équation matricielle ci-dessous, dans laquelle J représente le vecteur des jauges et e^0 celui des écarts initiaux, n'a pas de solution puisqu'il est surdéterminé.

$$MI \cdot J + e^0 = [0] \quad (26)$$

	J1x	J1y ²	J1z	J1r	J2x	J2z
Ogive Q1	1.000	0.025	0.000	0.000	0	0
Ogive Q2	0.990	0.026	0.138	-0.128	0	0
Ogive Q3	0.928	0.031	0.371	-0.300	0	0
Ogive Q4	0.844	0.037	0.536	-0.380	0	0
Ogive Q5	0.572	0.044	0.820	-0.392	0	0
Flanc Q1	0	0	0	0	-1.000	0.000
Fond Q1	0	0	0	0	0.000	1.000

Figure 14 : Matrice d'incidence des jauges sur les points.

Il faut donc lui chercher une approximation. Pillet *et al.* (2009) proposent de calculer la pseudo-inverse de MI pour calculer une approximation conduisant à la somme minimale des carrés des prochains écarts. En utilisant cette méthode de calcul, nous obtenons les erreurs calculées suivantes sur les jauges (voir figure 15) :

J1x	J1y ²	J1z	J1r	J2x	J2z
0.2000	-0.0033	0.0998	0.1498	0.0603	0.8000

Figure 15 : Erreurs calculées grâce à la matrice d'incidence complète.

Le carré de $J1y$ prend une valeur très faible et négative ce qui n'a pas de sens physiquement. En revanche, nous retrouvons bien les erreurs volontairement introduites sur les jauges données en figure 12. Les jauges en Y ont une influence tellement faible dans cet exemple, qu'elles peuvent être supprimées de la matrice d'incidence. Ainsi la matrice d'incidence sans $J1y$ conduit à des erreurs calculées pratiquement identiques (voir figure 16).

Evidemment la correction de ces erreurs sur les jauges permettent d'annuler les prochains écarts à 10^{-6} près. En revanche ne pas prendre en compte de $J1r$, conduit à des erreurs calculées assez différentes de leurs valeurs réelles (voir figure 17), surtout pour $J1z$ le plus à même de compenser l'erreur de $J1r$ (voir figure 9).

J1x	J1z	J1r	J2x	J2z
0.1999	0.0996	0.1496	0.0603	0.8000

Figure 16 : Erreurs calculées grâce à la matrice d'incidence sans $J1y^2$.

J1x	J1z	J2x	J2z
0.1909	0.0234	0.0603	0.8000

Figure 17 : Erreurs calculées grâce à la matrice d'incidence sans $J1y^2$ ni $J1r$.

La correction de ces erreurs calculées ne permet pas d'annuler les prochains écarts (voir figure 18).

Point	e_i^1
Ogive Q1	0.0091
Ogive Q2	0.0003
Ogive Q3	-0.0081
Ogive Q4	-0.0083
Ogive Q5	0.0091
Flanc Q1	0.0000
Fond Q1	0.0000

Figure 18 : Prochains écarts avec la correction des jauges $J1x$, $J1z$, $J2x$ et $J2z$.

Les prochains écarts sont de l'ordre du centième de millimètre alors que l'erreur sur $J1r$ n'est que de cinq centièmes sur un rayon de bec réel de 0,5 mm, c'est-à-dire seulement le dixième du rayon, ce qui est très faible, l'usure pouvant être bien plus grande.

6 Conclusion

La technique du réglage des machines-outils par mesurage de points à la surface des produits est la plus efficace que nous connaissons. Nous l'avons détaillée dans cet article avec notamment une étude approfondie de l'influence des repères de mesurage et de programmation. Ainsi nous avons montré que le repère de référence pour le mesurage des points doit correspondre le mieux possible à la mise-en-position de la pièce dans la machine. Le repère-programme peut lui différer de la mise en position puisqu'en tournage son écart sera compensé par les jauges-outils et qu'en fraisage il pourra être corrigé.

Nous avons étudié l'ensemble des jauges-outils en tournage en montrant l'importance de celle du rayon de bec qui, pour le moment, n'est quasiment jamais corrigée dans les ateliers, les régleurs ayant déjà fort à faire avec les jauges en X et en Z.

La méthode présentée suppose des moyens numériques à l'atelier pour mesurer et calculer mais c'est le prix à payer pour atteindre la plus grande précision sur les usinages.

Nous avons simulé des erreurs sur les jauges en tournage et montré que cette méthode permettait bien de les retrouver par calcul à partir des écarts des points, à condition toutefois de tous les prendre en compte.

Des expériences de réglage par mesurage de points ont déjà été conduites au CETIM-CTDEC. Elles ont permis d'atteindre des écarts résiduels de quelques micromètres sur quelques pièces. Les recommandations de cet article sur les repères et la prise-en-compte de la jauge de rayon de bec, voire de la jauge de hauteur de pointe, devraient permettre de maintenir ce niveau de précision sur l'ensemble des pièces d'une production en série.

Forts des connaissances établies dans cet article, il nous paraît possible de les appliquer au réglage des usinages en fraisage cinq axes.

7 Références

- Abdelhakim, B., Pairel, E., Pillet, M., & Sergent, A. (2012). Utilisation du tolérancement géométrique pour le réglage des machines-outils : Le pilotage inertiel total. 7^{ème} assises Machines et Usinage à Grande Vitesse (MUGV) ; pp. 1–10 ; Saint-Etienne.
- Bourdet, P., & Clément, A. (1988). A study of optimal-criteria identification based on the small-displacement screw model. *Annals of the CIRP*, 37(1), 503–506.
- Goldschmidt, E., Pairel, E., Giordano, M., & Pillet, M. (2007). Changeover from the functional geometric tolerances to the dimensional parameters to be supervised in production. *CIRP Journal of Manufacturing Systems*, 36(7), 305–309.
- Martin, P., Schneider, F., & Dantan, J.-Y. (2004). Optimal adjustment of a machine tool for improving the geometrical quality of machined parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26(5-6), 559–564. doi:10.1007/s00170-003-2004-4
- Marty, C., & Linares, J.-M. (1999). *Industrialisation des produits mécaniques - Tome 2 : contrôle et gestion des processus* (Hermes.).
- NF EN ISO 5459 (2011). *Spécification géométrique des produits (GPS) - Tolérancement géométrique - Références spécifiées et systèmes de références spécifiées*.
- Pairel, E., Ledoux, Y., Arrieux, R., Tabourot, L., & Incandela, O. (2004). Correction of geometrical defects of stamping parts by numerical simulation and design of experiment. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, IV(4), pp. 75–86.
- Pairel, E., Goldschmidt, E., Adragna, P.-A., Hernandez, P., & Pillet, M. (2011). The pilot dimensions method: reconciling steering and conformity in workshops. *International Journal of Production Research*, 49(19), 5943–5956.
- Pillet, M., Denimal, D., Pairel, E., & Samper, S. (2009.). Total inertial tolerancing, a new way to drive production. *Journal Of Machine Engineering*, 9(3), 15–28.
- Yang, M. Y., & Sim, C. G. (1993). Reduction of machining errors by adjustment of feedrates in the ball-end milling process. *International Journal of Production Research*, 31(3), 665–689. doi:10.1080/00207549308956750

ANNEXE F

Nuages de points utilisés dans la deuxième partie du présent mémoire

Nous donnons, ci-dessous, les coordonnées des points palpés sur une pièce expérimentale du laboratoire et utilisée en exemple dans la présentation de la théorie de calibres ajustants de ce mémoire, au format GÉOVÉRIF, c'est-à-dire :

- une lettre donnant le type de surface ;
- le nombre de points scannés sur cette surface ;
- la constante palpeur, c'est-à-dire le rayon apparent de la bille de palpé ;
- les coordonnées d'un point dans le vide au-dessus du premier point palpé ;
- puis les coordonnées de chacun des points scannés.

P		
8		
1.24890		
110	100	180
109.64799	133.26477	184.56948
142.64807	133.26554	184.58915
126.14666	126.26539	184.57976
116.14707	116.26541	184.56946
136.14666	116.26536	184.57111
126.14710	106.26523	184.56574
109.64837	99.26532	184.57373
142.64795	99.26564	184.56956
P		
8		
1.24890		
150	133	194
146.81611	133.24861	194.83304
146.81753	133.25002	188.83257

146.93567	126.24931	191.83077
147.10774	116.24986	194.82806
147.10568	116.25284	188.82759
147.27463	106.25210	191.82481
147.39100	99.25252	194.82297
147.38494	99.25555	188.82249

C

15

1.24890

125	115	187
130.10189	115.96409	187.82349
127.53077	119.70859	187.82339
123.15909	118.14996	187.82239
123.46360	113.71901	187.82198
127.51027	112.56315	187.82204
129.46490	118.23594	191.82390
125.06421	119.68640	191.82333
122.59261	115.84029	191.82189
125.32671	112.51295	191.82198
129.31539	113.83097	191.82399
130.10147	115.96229	195.82343
127.53185	119.71531	195.82333
123.15467	118.14917	195.82233
123.46468	113.71870	195.82243
127.50984	112.55883	195.82248

C

15

1.24890

115	105	187
119.11581	104.99833	187.81762
116.49160	108.71051	187.81852
112.18545	107.14792	187.81702
112.43039	102.75111	187.81662
116.50345	101.53182	187.81668
118.44136	107.27350	191.81853
114.05928	108.65624	191.81746
111.60535	104.87484	191.81752
114.28416	101.50004	191.81562
118.34325	102.82469	191.81713
119.12138	104.99748	195.81757
116.49067	108.71167	195.81847
112.18701	107.14257	195.81696
112.42895	102.74774	195.81706
116.50351	101.52495	195.81713

C

14

1.24890

138	126	187
141.09306	126.93036	187.82875
138.56479	130.69684	187.82960
134.14755	129.14581	187.82813
134.49109	124.68429	187.82679
138.52132	123.57829	187.82736
140.48904	129.19674	191.82963

136.07819	130.69520	191.82855
133.58309	126.80568	191.82867
136.36324	123.51114	191.82830
140.29654	124.83221	191.82829
141.09066	126.92912	195.82869
138.56489	130.70211	195.82955
134.13765	129.14858	195.82808
134.49368	124.68203	195.82824

C

15

1.24890

139	104	187
141.86550	103.15882	187.82188
139.97089	106.02018	187.82229
136.71461	104.77272	187.82229
137.04204	101.57981	187.82088
139.89025	100.75335	187.82142
141.43104	104.88258	191.82279
138.09974	105.96798	191.82173
136.36558	103.06908	191.82229
138.35364	100.73965	191.82187
141.21494	101.61467	191.82138
141.86008	103.15695	195.82182
139.96746	106.01532	195.82223
136.71268	104.76986	195.82223
137.03861	101.57544	195.82232
139.89032	100.74648	195.82186

C

15

1.24890

112	129	187
116.34209	128.73636	187.82404
114.50830	131.49877	187.82495
111.24883	130.37416	187.82397
111.50439	127.08017	187.82407
114.47733	126.27678	187.82411
115.90656	130.39172	191.82495
112.67657	131.52109	191.82390
110.83883	128.64503	191.82447
112.89164	126.21709	191.82306
115.76406	127.20372	191.82355
116.33819	128.73363	195.82449
114.51289	131.51905	195.82390
111.23992	130.37693	195.82441
111.51098	127.08343	195.82451
114.47342	126.28003	195.82456

ANNEXE G

PROJET 2 DU PÔLE DE COMPÉTITIVITÉ ARVE INDUSTRIES : «Qualité géométrique des produits dans leur cycle de vie»

1 Les enjeux industriels du projet

Les exigences industrielles en terme de fiabilité et de précision des composants techniques ne cesse de croître. Un atout majeur de la compétitivité des entreprises réside dans la maîtrise et l'amélioration de la qualité des produits, en particulier géométrique. Cette qualité se traduit par une amélioration de la précision, une définition de la géométrie optimale idéale mais aussi une maîtrise des dispersions de production de la géométrie autour de la géométrie optimale. Ces aspects concernent donc les principales étapes du cycle de vie d'un produit : Conception, industrialisation, fabrication et en contrôle.

Si l'exigence en terme de qualité des produits est, en général, satisfaite pour des composants industriels sensibles (aéronautiques, certains composants automobile) cela s'accompagne souvent d'un surcoût. L'objectif consiste à assurer une qualité optimale maîtrisée et à moindre coût pour tous les produits industriels.

Une part importante de l'économie du département de la Haute-Savoie est basée sur la production manufacturière et mécanique (Biens de consommation courante, sous-traitance automobile, équipements industriels, aéronautique, domotique, bureautique....). L'une des grandes problématiques, quasi-quotidienne, de ces entreprise, est la maîtrise de la qualité géométrique de leurs produits.

En effet tous les produits étant constitués par l'assemblage de composants, il est nécessaire de maîtriser, à tous les niveaux de l'entreprise, la qualité géométrique de ces composants, pour permettre leur assemblage d'une part et d'autre part obtenir les critères de qualité de fonctionnement visés.

On pourrait croire ces problèmes résolus, tant l'industrie mécanique est ancienne. En fait il n'en n'est rien : La croissance des volumes de production, l'externalisation de la

fabrication voire de la conception, la croissance des exigences de qualité sur les produits sont autant de facteurs qui, au contraire, conduisent à des difficultés nouvelles de maîtrise de la qualité géométrique des produits.

Les conséquences directes sont immédiates, visibles et coûteuses : Toutes les entreprises peuvent témoigner de telles conséquences : Lot de pièces inutilisables, délai de mis au point rallongé, relations difficiles entre donneurs d'ordre et sous-traitants...

Les conséquences indirectes sont peut être les pires : Perte de notoriété, perte de marché, perte d'activité. Bilan écologique défavorable : Plus d'énergie consommée, de produits directs et indirects à traiter, à recycler (outillage, effluents), etc...

Les entreprises de la région doivent faire, de la qualité géométrique de leurs produits, un atout supplémentaire face à la concurrence des pays en fort développement économique pour conserver et développer leurs activités et leurs parts de marché.

Le projet présenté ici a pour objet global d'aider et d'accompagner ces entreprises vers une meilleure maîtrise de la qualité de leurs produits, en développant des méthodes, des outils logiciels, des formations, et des expertises.

2 Origines du projet et objectif global

La qualité fonctionnelle d'un produit, c'est à dire celle qui est perçue par son utilisateur final, est, notamment, intimement liée à sa qualité géométrique. On peut s'en convaincre simplement en utilisant un stylo dans lequel la mine présente un jeu par rapport au corps du stylo: son usage est plutôt désagréable.

Industriellement cette qualité géométrique des produits n'est pas si simple à maîtriser. Tout d'abord parce qu'elle fait intervenir de nombreuses étapes depuis l'expression du besoin jusqu'à la livraison au client :

- "Traduction" de la qualité fonctionnelle, en qualité géométrique (du client aux études)
- Spécification de la qualité géométrique sur la documentation technique des produits et des composants (en bureau d'étude),
- Exploitation des spécifications en production,
- Vérification finale du respect des spécifications (métrologie, service contrôle).

Ensuite parce qu'à ces différentes étapes, les méthodes utilisées aujourd'hui sont trop rudimentaires, basées sur l'expérience et les habitudes plutôt que sur une approche fondée scientifiquement.

3 Les acteurs du projet

3.1 Le Laboratoire de Mécanique Appliquée de l'Université de Savoie

Ce thème a émergé localement grâce à la communication qu'en a fait le **laboratoire de mécanique appliqué** de l'Université de Savoie (**LMéca**), aidé par Thésame.

Ce laboratoire, plus exactement l'une de ses deux équipes de recherche intitulée "**Maîtrise de la Qualité Géométrique des Produits**" (**MQGP**), travaille depuis plus d'une douzaine d'année sur ce sujet spécifique, encore largement délaissé par la recherche technologique en France et à l'étranger. Elle peut aujourd'hui s'enorgueillir d'être une des équipes de recherche publique les plus importantes et les mieux structurées au monde.

Cette équipe possède une solide expérience concernant divers aspects de la qualité géométrique des produits manufacturiers plus particulièrement dans les domaines de la modélisation des systèmes mécaniques prenant en compte les défauts géométriques, l'amélioration de la précision, les normes ISO de spécification, la détermination des tolérances en bureau d'étude, les problèmes liés au contrôle métrologique et le tolérancement en fabrication.

Elle participe activement au "**Groupe de Recherche national sur le Tolérancement**" (**GRT**) et elle a des liens étroits avec les autres équipes nationales spécialisées dans ce domaine.

Elle a une riche expérience de coopération avec plusieurs entreprises industrielles de la région ou à l'échelon national, que ce soit sur l'aspect expertise, formation, ou par des contrats allant de quelques mois à trois ans (CIFRE).

Elle travaille depuis quelques années avec le deuxième éditeur national de logiciels de CFAO (MISSLER Software) pour développer des modules d'aide au tolérancement.

L'objectif de ce projet est de permettre d'accélérer la progression et la diffusion des travaux de recherche et des méthodes que développe le laboratoire pour les entreprises de la région.

3.2 Le Centre Technique du Décolletage de la vallée de l'Arve

Le Centre technique du décolletage (le **C.T.Dec**) est également un pôle de compétences fort de la région sur ce sujet. Il propose depuis plusieurs années divers stages de formation sur les tolérances ISO.

Néanmoins, le C.T.Dec fait aujourd'hui le constat que, même si la formation aux normes sur le tolérancement géométriques est nécessaire, elle est loin d'être suffisante. Il manque aujourd'hui de nombreux outils pour correctement s'en servir et l'exploiter.

Ces outils supposent des développements théoriques que les industriels ou le C.T.Dec ne peuvent pas conduire seuls sans le support scientifique que peut apporter un laboratoire.

4 Organisation du projet de recherche

Il s'agit d'un projet de recherche et de développement global sur la problématique de qualité géométrique des produits.

Nous l'avons structuré en actions qui répondent aux différentes causes actuelles des difficultés rencontrées dans l'industrie mécanique, soit au niveau des études (Cf. "Au niveau des études"), soit au niveau de la production (Cf. "Au niveau de la production").

Ces actions, listées ci-dessous, ont des stades d'avancement différents. Certaines sont en cours et d'autres démarreront si les moyens sont réunis à la rentrée 2005 (Cf. "Planification des actions").

Le partenariat industriel se fera soit sous la forme de contrats de coopération direct avec le Laboratoire sous la forme de contrats CIFRE, soit sous la forme d'une mutualisation entre plusieurs entreprises sur le thème proposé mais avec des objectifs ciblés communs afin de financer un doctorant.

Des coopérations avec d'autres équipes des laboratoires de l'ESIA sont envisagés dans le cadre de ce projet (Professeur Maurice Pillet du LISTIC)

4.1 Six actions répondant aux problématiques des bureaux d'études

4.1.1 1^{ère} cause : Mauvaise connaissance et mauvaise utilisation des tolérances géométriques normalisées

- Action 2.1 : Formation et développement d'outils de formation sur le tolérancement ISO

- Action 2.2 : Développement d'un module intégré à la CAO d'indication de tolérances normalisées (contrat en cours avec MISSLER, éditeur de logiciel de CFAO français)

4.1.2 2^{ème} cause : Déficit de méthode en conception

- Action 2.3 : Développement d'un logiciel de tolérancement automatique (LMécA)

- Action 2.4 : Prise en compte des dispersions statistiques dans le calcul des tolérances (LMécA)

- Action 2.5 : Utilisation du tolérancement inertiel avec la caractérisation modale des défauts : (Contrat INTERREG: LMécA, Listic, consortium d'industriels)

- Action 2.6 : Conception robuste de micro-systèmes (LMécA)

4.2 Quatre actions répondant aux problématiques de la production

4.2.1 1^{ère} cause : Mauvaise connaissance des tolérances géométriques normalisées

Voir l'action 2.1 : formation et développement d'outils de formation sur le tolérancement ISO

4.2.2 2^{ème} cause : Tolérancement ISO inadapté au pilotage des procédés de production et à leur suivi statistique

- Action 2.7 : Développement d'un "tolérancement de fabrication" (CT-DEC, LMéca)
- Action 2.8 : Diffusion du tolérancement inertiel chez les sous-traitant (SOMFY, Listic)
- Action 2.9 : Développement d'un logiciel de calcul de chaînes de cotes (LMéca)

4.3 3^{ème} cause : Logiciels de métrologie tridimensionnel généralement inadaptés au contrôle des tolérances ISO

- Action 2.10 : Développement d'un logiciel de métrologie tridimensionnelle basé sur les calibres virtuels (LMéca)

4.4 Planification des actions

Le planning ci-dessous présente les actions actuellement en cours ainsi que celles qui sont prévues pour démarrer à la rentrée universitaire 2005 si les conditions sont réunies à leur lancement.

Celles qui sont en cours ont déjà leur financement. La section suivante présente les budgets alloués ou nécessaires à chacune d'elles.

TABEAU 1. Planification des actions

Action	2003	2004	2005	2006	2007	Maître d'oeuvre
2.1: Outils multimedia de formation						LMéca
2.2: Module CAO "tolérances ISO"						MISSLER LMéca
2.3: Module "tolérancement automatique"						LMéca
2.4: Prise en compte des dispersions statistiques						LMéca

TABLEAU 1. Planification des actions

Action	2003	2004	2005	2006	2007	Maître d'oeuvre
2.5: Caractérisation modale et inertielle						Consortium INTERREG
2.6: Conception robuste de micro-systèmes						LMéca
2.7 : Tolérances de fabrication						CTDEC LMéca
2.8: Tolérancement inertiel sous-traitants SOMFY						SOMFY Listic
2.9: Logiciel de calcul de chaîne de cotes						LMéca
2.10: Logiciel de métrologie par calibre virtuel						LMéca

5 Descriptif des actions

(partie exclue de l'annexe pour en limiter son volume)

6 Moyens humains et bilan financier du projet

Les actions surlignées, dans le tableau ci-dessous, sont celles qui nécessitent la recherche d'un financement. Leur lancement dépendra également des partenariats institutionnels ou industriels qui seront établis.

TABLEAU 2. Moyens et budgets par action

Action	Maître d'oeuvre	Moyens humains	Déjà financé	Restant à financer
2.1: Outils multimedia de formation	LMéca : E. Pairrel	2 mois de Chercheur 2 mois de programmeur	NON	45 keuros
2.2: Module CAO "tolérances ISO"	MISSLER LMéca	36 mois jeune-chercheur 4 mois de chercheur	OUI : 150 keuros	
2.3: Modules "tolérancement automatique"	LMéca : H. Hernandez, M. Giordano	2x 36 mois jeune-chercheur 8 mois de chercheur 18 mois de programmeur	NON	400 keuros
2.4: Tolérancement statistique tridimensionnel	LMéca : M. Giordano	36 mois jeune-chercheur 4 mois de chercheur	OUI : 150 keuros	
2.5: Caractérisation modale et inertielle	Consortium INTERREG	2x 36 mois jeune-chercheur 8 mois de chercheur	OUI : 655 keuros	
2.6: Conception robuste de micro-systèmes	LMéca : F. Toussaint	36 mois jeune-chercheur 4 mois de chercheur	NON	160 keuros

TABLEAU 2. Moyens et budgets par action

Action	Maître d'oeuvre	Moyens humains	Déjà financé	Restant à financer
2.7 : Tolérances de fabrication	CTDec : M. Leseul LMéca : E. Pairel	36 mois jeune-chercheur 4 mois de chercheur 2 mois ingénieur CTDec	NON	200 keuros
2.8: Tolérancement inertiel sous-traitants SOMFY	SOMFY : M. BOUIX	3 mois ingénieurs Somfy	NON	60 keuros
2.9: Logiciel de calcul de chaîne de cotes	LMéca : D. Duret	4 mois de chercheur	NON	45 keuros
2.10: Logiciel de métrologie par calibre virtuel	LMéca	4 mois de chercheur 4 mois de programmeur	NON	90 keuros
TOTAUX :		4x 36 mois de jeune-chercheur 24 mois de programmeur		1 M euros

Au total, c'est **4 fois 36 mois de jeune-chercheurs** qui seront nécessaire pour mener à bien toutes ces actions, ainsi que **24 mois de programmeur de niveau ingénieur**.

ANNEXE H

Outil de chiffrage

1 Description des onglets

L'outil de chiffrage, que j'ai réalisé en 2013 et amélioré plusieurs fois en 2014, est un classeur EXCEL® comportant principalement trois onglets :

- Chiffrage
- Devis
- Fiche de liaison

1.1 Onglet de chiffrage

C'est le principal onglet à remplir par la personne souhaitant établir un chiffrage et un devis pour une prestation de service ou un projet de recherche (voir figure 1).

Le chiffrage est très automatisé puisqu'il lui suffit de noter le nom des personnes qui travailleront sur le projet et le nombre d'heures pour chacune. Selon la catégorie des personnes, le coût salarial de l'opération est calculé.


Les coûts de matériel, de consommable ou de prestations, et les frais de mission ou de livraison, peuvent être ajoutés.

La difficulté du chiffrage du coût d'une opération résidait dans le fait que l'Université prélève un pourcentage de la Recette. Or la Recette ne peut pas être fixée tant que le coût complet de l'opération, y compris le prélèvement de l'Université, n'est pas établi. Il y a donc là un problème de référence circulaire.

Je l'ai résolu en calculant le montant à facturer par multiplication de tous les coûts directs par un coefficient donnant approximativement la marge souhaitée. Ainsi le prélèvement de l'Université, que j'ai considéré comme un coût indirect, est pris sur la marge de l'opération.

Par ailleurs, un prélèvement du laboratoire peut, de la même manière, est intégré. Il correspondait, pour le laboratoire SYMME, aux allocations de retour à l'emploi (ARE) que nous avions à assumer jusqu'à la fin 2014.

Figure 1 : Onglet Chiffrage.

Chiffrage hors TVA. Document interne SYMME							Commentaires : cette zone est libre pour prendre des notes.	
Responsable de l'action : PAIREL Eric					COEFFICIENTS de Valo pour le Devis :			
Nom de l'action : Exemple					Coef. Marge Salaires	2		
Etabli le : 23/07/2015					Coef. Marge Achats Utilisation	1.5		
					Coef. Marge Mission Livraison	1.23		
DEPENSES					BILAN UDS avant intéressement			
Nature	Coût	Qté / h	Total		Nature	€ HT		
Dépenses à la charge des services généraux :					Recette selon devis	1 623.36		
Personnel de l'Université ayant droit à l'intéressement :					Autre recette			
PAIREL Eric	50.24	7	351.68		RECETTE TOTALE	1 623.36		
					DEPENSES	(1 111.19)		
Personnel de l'Université n'ayant pas droit à l'intéressement :					RESULTAT	512.17		
					INTERESSEMENT MAX	256.09	50% Résultat	
					INTERESSEMENTS	€ décret	€ UDS	%
Frais de gestion (10%)		1	162.34		Intervenant			
BQR (5%)		1	81.17		PAIREL Eric	110.96	110.96	43%
TOTAL Charges des Services généraux			595.18					
Dépenses à la charge du laboratoire								
Personnel ayant droit à l'intéressement :								
Personnel n'ayant pas droit à l'intéressement :								
FRELIN Fabrice	23.00	20	460.00					
Achat d'investissement 1								
Achat d'investissement 2								
Cout utilisation Equipement1								
Cout utilisation Equipement2								
Achat de consommable 1								
Achat de consommable 2								
Achat de consommable 3								
Achat d'une prestation 1								
Achat d'une prestation 2								
Missions, Livraison								
Cotisation aux ARE de 3%		1	56.01					
TOTAL Charges du Laboratoire			516.01					
TOTAL DEPENSES HT			1 111.19					
					BILAN Laboratoire sur prestation	€ HT	BILAN Laboratoire sur vente	
					Nature	(intér. 50%)	€ HT	
					RECETTE totale	1 623.36	1 623.36	
					Frais & BQR UDS	(243.50)	(243.50)	
					Interessements	(110.96)	(110.96)	
					Résultat labo brut	1 268.90	1 268.90	
					Dépenses labo (hors ARE)	(460.00)	(460.00)	
					RESULTAT NET LABO	808.90	808.90	

Le Résultat (bénéfice ou déficit) peut alors être calculé et s'affiche en vert s'il est positif (voir figure 1). Il permet alors le calcul de l'intéressement de chaque personne.

C'est là, la deuxième difficulté que j'ai dû résoudre. En effet les décrets prévoient que l'intéressement peut atteindre 50% du bénéfice mais, évidemment, ils ne donnent pas les règles de répartition entre les personnes ayant œuvré à l'opération. En outre le Conseil d'administration de l'Université a ajouté une deuxième limite : celle d'un total d'intéressement ne devant pas dépasser 20% de la Recette. En pratique, c'est souvent ce plafond qui est atteint avant celui des 50%.

La règle que j'ai fixée, et que les services centraux de l'Université ont adoptée, est une répartition au prorata du nombre d'heures travaillées par chaque personne et de leur coût horaire salarial. Cette règle évite bien des écueils comme celui de voir l'intéressement d'une personne augmenter lorsqu'une autre y renonce ou n'y a pas droit.

1.2 Onglets Devis

J'ai créé trois «sous-onglets» devis : le premier reprend les intitulés et les montants de l'onglet de chiffrage et calcul automatiquement le total avec la TVA ; le second reprend les montants mais les intitulés peuvent être détaillés; enfin le troisième est entièrement manuel permettant de saisir le montant hors taxe indépendamment du coût de l'opération. Ce montant «écrase» alors celui qui est calculé automatique par l'onglet de chiffrage pour recalculer le Résultat et les intéressements.

Par ailleurs le devis a été travaillé avec la cellule valorisation de l'Université et le service juridique pour qu'il soit juridiquement valable. Notamment, lors de son impression, le verso comporte les conditions générales du contrat qu'il établit.

La figure.2 donne l'allure du devis manuel.

1.3 Onglet Fiche de liaison

La Direction de la recherche et des études doctorales utilisait, préalablement à mon travail, une fiche de chiffrage et une fiche de liaison permettant d'aider les porteurs de projet à chiffrer leur opération et à résumer celle-ci sur la fiche de liaison. Cependant la fiche de chiffrage était entièrement manuelle et n'apportait qu'une aide très mineure au chiffrage.

Mes travaux sur le sujet, et la mise en place de l'intéressement, a conduit ce service à établir une nouvelle fiche de liaison et de chiffrage (voir figure 3). Je l'ai alors intégré à mon classeur EXCEL® pour qu'elle soit remplie le plus automatiquement possible à partir de l'onglet de chiffrage. En effet le chiffrage de la fiche de liaison apporte moins d'assistance que ma propre fiche notamment pour calculer la Recette.

Figure 2 : Onglet Devis manuel.



SYMME

Devis

Domaine Universitaire - BP 80439
74944 Annecy-le-Vieux Cedex France
 Tél. : +33 (0) 450 096 560 / 567 Fax : +33 (0) 450 096 543
 N° de SIRET : 197 308 588 00072
 N° de TVA : FR 571 973 08588

Devis à l'attention de :

NOM Prénom
 NOM SOCIETE
 adresse
 Code postal, Ville

Responsable : NOM Prémon
 Valide jusqu'au : 21/09/2015

Annecy-le-vieux le 23/07/2015

DESCRIPTION	TVA	MONTANT HT
Description de la prestation et de ses livrables	Oui	1 623.36
SOUS-TOTAL		€ 1 623.36
Taux T.V.A.		20.00%
T.V.A		324.67
AUTRE		-
TOTAL		€ 1 948.03

Conditions générales au verso.

Délai de réalisation à compter de la réception du devis signé : x jours ouvrés (ou date de fin)

Pour acceptation, veuillez nous retourner un exemplaire
 de ce devis daté et signé avec la mention manuscrite
 "Lu et approuvé. Bon pour accord"



Figure 3 : Onglet Fiche de liaison de la Direction de la recherche et des études doctorales.

FICHE DE LIAISON				réservé DRED : N° CONTRAT _____	
DOCUMENT INTERNE, à ne pas transmettre au(x) partenaire(s)				N° ORIGINE _____	
IDENTIFICATION DU CONTRAT					
Titre du Contrat :	Exemple				
Objet du contrat :	Etude et proposition de solution pour la maîtrise de la qualité géométrique d'un produit MAVIC				
Responsable du contrat à l'Université de Savoie :	Nom / Prénom :	Corps / Grade	Laboratoire	Composante	
	PAIREL Eric	MCF	SYMME	POLYTECH	
Nom du contractant et adresse complète où devra être envoyé le contrat original pour signature :					
Description sommaire du contrat :					
Durée (mois): _____	Date d'effet : _____	réservé DRED			
		Date de signature : _____			
Prévoyez-vous de l'embauche de personnel(s) sur ce contrat ? <input type="text" value="NON"/> (pas d'embauche)					
Les cases grises sont calculées automatiquement, veuillez compléter les cases blanches UNIQUEMENT					
Personnels de l'Université de Savoie (et autres tutelles du laboratoire) impliqués dans l'exécution du contrat					
<u>Personnels ne demandant pas d'intéressement sur ce contrat :</u>					
NOM, Prénom	Corps / Grade	Laboratoire	Coût horaire	Nb heures	Coût total
			0.00 €	0	0.00 €
			0.00 €	0	0.00 €
			0.00 €	0	0.00 €
			0.00 €	0	0.00 €
FRELIN Fabrice	CDD	SYMME	23.00 €	20	460.00 €
			0.00 €	0	0.00 €
NOM, Prénom					0.00 €
NOM, Prénom					0.00 €
NOM, Prénom					0.00 €
NOM, Prénom					0.00 €
				TOTAL	460.00 €
<u>Personnels demandant un intéressement sur ce contrat :</u>					
NOM, Prénom	Corps / Grade	Laboratoire	Coût horaire	Nb heures	Coût total
PAIREL Eric	MCF	SYMME	50.24 €	7	351.68 €
			0.00 €	0	0.00 €
			0.00 €	0	0.00 €
			0.00 €	0	0.00 €
			0.00 €	0	0.00 €
			0.00 €	0	0.00 €
			0.00 €	0	0.00 €
NOM, Prénom					0.00 €
NOM, Prénom					0.00 €
NOM, Prénom					0.00 €
				TOTAL	351.68 €
Si demande d'intéressement : date du conseil de laboratoire autorisant l'intéressement sur ce contrat (jj/mm/aaaa) : précisez la date --> <input style="width: 100px;" type="text"/>					
Informations complémentaires					
Montant total du contrat (recettes en €)	<input style="width: 100px;" type="text" value="1 623.36 €"/>		HT ou TTC	<input style="width: 100px;" type="text" value="HT"/> (HT)	
Laboratoire assujetti à la TVA ? (précisez)	<input style="width: 100px;" type="text" value="OUI"/> (TVA déductible)				
Subvention ANR ? (précisez)	<input style="width: 100px;" type="text" value="NON"/> (BQR = 5%)				
Opération pluriannuelle ? (précisez)	<input style="width: 100px;" type="text" value="NON"/> (opération dans l'année)				

ANNEXE I

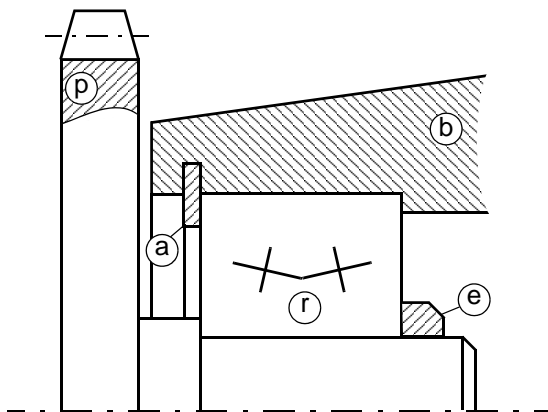
Méthode des contacts colorés développée pour les élèves- ingénieurs de POLYTECH ANNECY-CHAMBÉRY

1 Problème de la détermination des cotes fonctionnelles

La conception nominale d'un mécanisme aboutit à un assemblage virtuel de pièces parfaites sans jeu ni serrage.

L'exemple didactique que nous traitons en cours est celui du montage d'un pignon (p) dans un bâti (b) avec un roulement à double rangées de billes (r) (voir figure 4 ci-dessous).

Figure 4 : Dessin d'ensemble nominal.



Sur ce dessin n'apparaît aucun jeu (jour) entre les pièces contrairement aux dessins généralement donnés aux élèves dans les formations sur les chaînes de cotes.

La première difficulté consiste donc à les localiser, mais cela n'est pas non plus suffisant pour faire correctement la chaîne de cotes fonctionnelles dont dépend un jeu. Il faut

aussi préciser la configuration du jeu : est-ce en rapprochant les pièces ou au contraire en les écartant ?

Je n'ai vu explicitées ces notions, pourtant très importantes, dans aucun ouvrage. C'est ce qui m'a poussé à développer la méthode des contacts colorés.

2 Méthode des contacts colorés

2.1 Coloration des vis-à-vis sur le dessin d'ensemble

Il y a trois types de vis-à-vis entre faces dans les mécanismes :

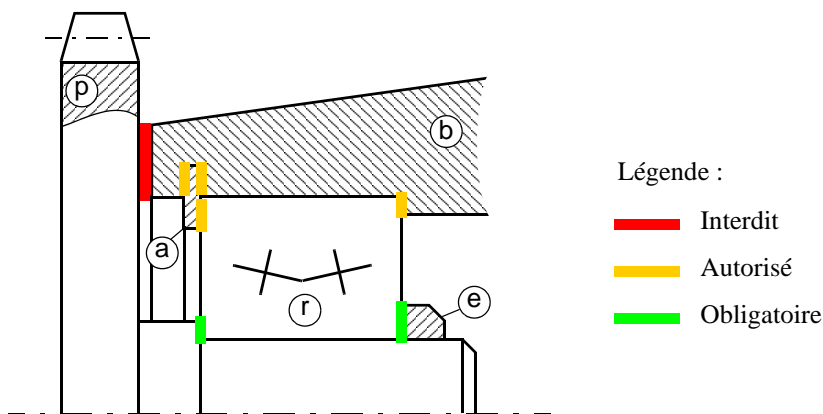
- Même en utilisant les jeux entre pièces pour rapprocher les deux faces en vis-à-vis, il ne doit pas être possible de les mettre en contact. Nous dirons que le contact est **interdit** et le surlignerons en rouge sur le dessin ;

- Le contact entre les faces en vis-à-vis est possible, mais, en utilisant les jeux entre pièces, il doit être possible de les séparer. Nous dirons que le contact est **autorisé** et le surlignerons en orange sur le dessin ;

- Le contact des faces en vis-à-vis est permanent du fait des efforts ou des serrages. Nous dirons que le contact est **obligatoire** et le surlignerons en vert.

Les couleurs sont celles d'un feu tricolore pour qu'il soit plus facile de retenir les qualificatifs : rouge : interdit ; orange : autorisé ; vert : obligatoire.

Figure 5 : Coloration des contacts.



Le type de contact souhaité est souvent un choix de conception même s'il est nécessaire au tolérancement. Sur l'exemple didactique le type des contacts s'impose (voir figure 5) :

- le pignon (p) ne doit pas pouvoir venir en contact du bâti (b) : contact interdit ;

- le roulement (r) est monté avec un jeu (débattement) axial possible dans le bâti (b) ; l'anneau élastique (a) aussi : contacts autorisés ;
- en revanche le roulement est monté serré par l'écrou (e) sur l'épaule du pignon (p) : contacts obligatoires.

2.2 Recherche des chemins de contacts établis par les distances configurées

Un **contact interdit** (rouge) implique, qu'en rapprochant les faces en vis-à-vis, une distance minimale doit subsister entre-elles. La distance est donc configurée et nous la qualifions de **distance rapprochée**. Une valeur minimale positive doit lui être attribuée.

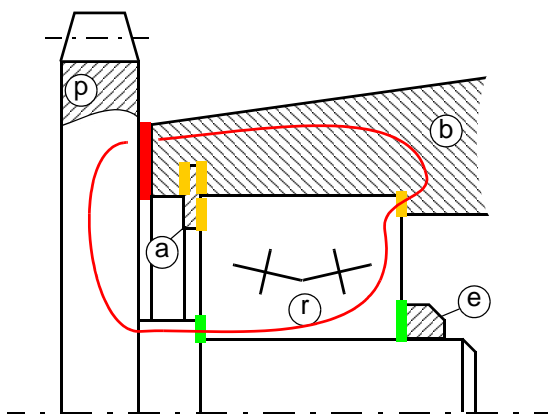
Un **contact autorisé** (orange) implique, qu'en écartant les faces en vis-à-vis, une distance minimale doit apparaître entre-elles. La distance est donc configurée et nous la qualifions **distance écartée**. Une valeur minimale positive doit également lui être attribuée.

Enfin un **contact obligatoire** (vert) implique une distance nulle entre les faces en vis-à-vis.

Pour chaque contact interdit ou autorisé on trace le chemin reliant les deux faces en vis-à-vis en passant par les pièces et par les contacts établis lorsque la distance est configurée (**rapprochée** si le contact est **interdit** et **écartée** si le contact est **autorisé**).

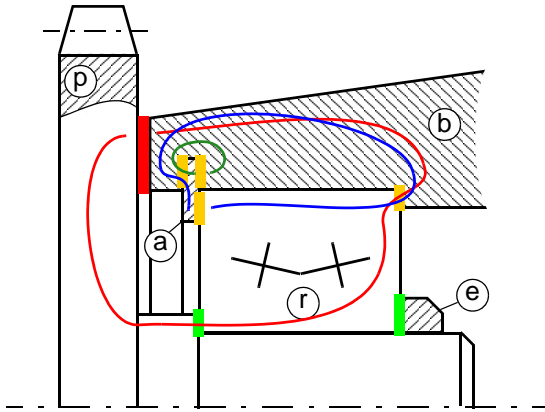
Par exemple, le **contact interdit** entre le pignon (p) et le bâti (b), il faut rapprocher ces pièces l'une de l'autre. Le pignon va alors s'appuyer sur le roulement (r) qui lui-même va s'appuyer sur l'anneau élastique (a), qui va s'appuyer sur le flanc droit de la rainure du bâti. Le **chemin de contacts** passe donc par ces trois contacts établis (voir figure 6).

Figure 6 : Chemin des **contacts établis** par le **contact interdit**.



Deux contacts autorisés (orange sur la figure 6) sont encore en-dehors de tout chemin de contacts : ils introduisent deux nouvelles **distances configurées** et donc deux nouveaux **chemins de contacts** (voir figure 7).

Figure 7 : Chemins des **contacts établis** par les **contact autorisés**.

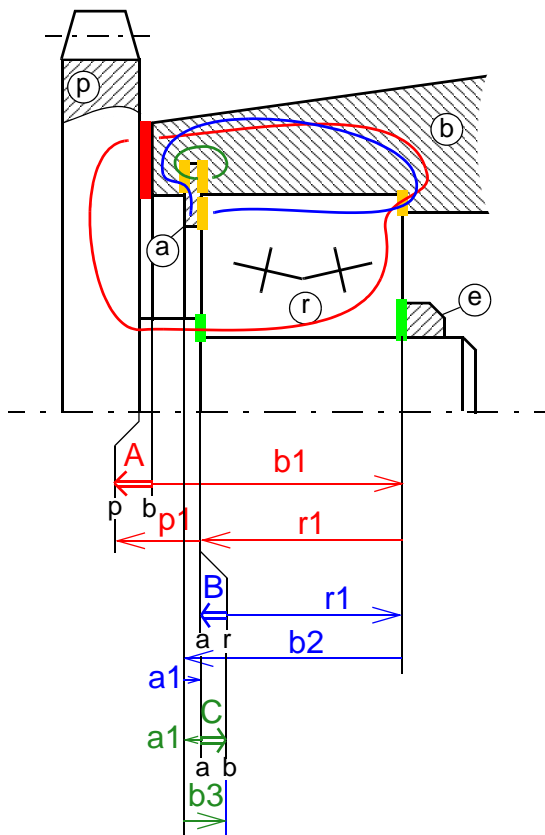


2.3 Traçage des chaînes de cotes fonctionnelles

En suivant chaque chemin de contacts, on obtient la chaîne minimale de cotes fonctionnelles dont dépend la distance configurée associée au chemin (voir figure 8).

A partir de ces chaînes, l'intervalle de tolérance de chaque cote fonctionnelle peut être calculé dans un **tableau de répartition**. Ce tableau, assez connu, n'est pas présenté ici.

Figure 8 : Chemins des contacts interdits et autorisés.

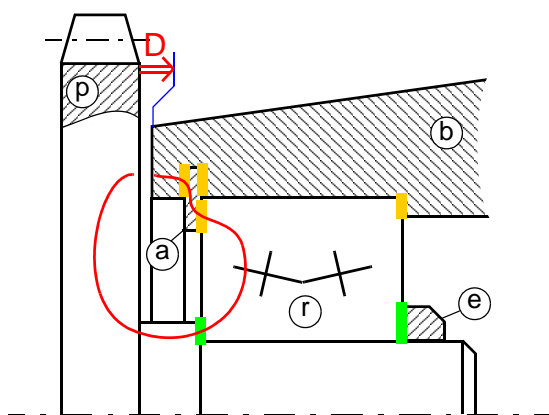


3 Discussion sur la méthode des contacts colorés

La méthode des contacts colorés, que je développe depuis quelques années, permet de déterminer les distances configurées fonctionnelles garantissant l'assemblage et les contacts interdits.

D'autres distances fonctionnelles peuvent être introduites. Certaines sont fixes ; par exemple la distance entre le bout fileté du pignon (p) et l'écrou (e) ; d'autres sont aussi à configurer : sur l'exemple cela pourrait être la *distance écartée* dans le vis-à-vis du pignon et du bâti. Cette seconde distance configurée fait intervenir un nouveau chemin de contacts (voir figure 9).

Figure 9 : Chemin de contacts établis pour la distance écartée D entre le pignon et le bâti.



Cette notion de *distance configurée* est donc fondamentale car elle lève l'ambiguïté des expressions de «jeu minimum» et de «jeu maximum». En effet ces dernières peuvent se comprendre comme étant les distances entre les deux pièces en les rapprochant ou en les écartant mais aussi comme étant les valeurs minimale et maximale d'une de ces distances !

Par ailleurs j'utilise le terme de «distance» plutôt que de «jeu» car d'une-part il est plus générique : toutes les distances fonctionnelles dans les mécanismes ne sont pas des jeux ; et d'autre-part le terme de jeu a au moins deux acceptions : il peut désigner le débattement d'une pièce ou désigner un «jour» entre pièces. De plus, je réserve le terme de «cote» pour les pièces.

Enfin certaines distances fonctionnelles peuvent être configurées autrement qu'en écartant ou en rapprochant les faces en vis-à-vis. On pourrait donc introduire un vocabulaire plus général, notamment pour les surfaces planes, en utilisant les qualificatifs de «tiré-tiré», «tiré-poussé», «poussé-tiré» et «poussé-poussé», mais cela reste, comme la généralité de la méthode des contacts colorés, à explorer.

INDEX

A

Agence pour la Protection des Programmes (APP) 8

Alfresco 116

Allocation doctorale de recherche (ADR) 10

Association nationale de la recherche et de la technologie (ANRT) 14

B

Banque publique d'investissement (BPI) 16

C

Calibres ajustants 69

carte aux limites élargies 54

carte de Shewhart 53

carte du T^2 55

Cetim 10

Convention industrielle de formation par la recherche (CIFRE) 14

Copilot-pro 14

correction par points 49

CoSelect 18

cotation de fabrication évolutive 12

cotes-études, 29

cotes-méthodes 35

D

décolletage 15

domaine jeu 11

E

École Supérieure d'ingénieurs d'Annecy (ESIA) 6

éléments de situation 70

étapes de fabrication 34

G

Gamar 14

gamme de réglage 34

gamme de surveillance 33

Geometrical Product Specification (GPS) 9

Géovérif 8

Groupe Recherche en Tolérancement (GRT) 15

H

hauteur de pointe 49

HCERES 23

I

INETFORSMEP 13

Intercut 15

J

Jitec 9

Journées Européennes du Tolérancement 15

L

limites alpha 53

limites bêta 53

limites de contrôle 53

LMécA 6

M

matrice de pilotage 38

matrice GPS 104

Méthode des contacts colorés 120

Métrologie Grand Sud 9

Modèle des domaines jeu et écart 10

modèle variationnel direct 38

N

norme volontaire 105

P

phase de fabrication Copilot-pro 32

pilotage inertiel total 48

Plans d'expériences 43

R

rayon de bec 49

réglage statistique des procédés 55

retour élastique 42

S

SAPRISTI 68

Statistical Process Adjustment 55

Symme 7

T

tendance centrale 53

Tolérancement et qualité des produits (TQP) 110

tolérancement inertiel total 99

U

Usitronic 16

Z

zones liées 10

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

1^E PARTIE : PARCOURS PROFESSIONNEL 5

Chapitre 1 : Parcours universitaire 6

Chapitre 2 : Parcours scientifique 8

1 De la vérification géométrique à sa spécification 8

1.1 1992 – 2016 : vérification géométrique par CALIBRES AJUSTANTS 8

1.2 1995 – 2013 : langages formels de spécification géométrique 9

1.3 1999 – 2010 : calcul des tolérances « 3D » par le modèle des domaines jeux et domaines écarts 10

1.4 2015 – 2016 : calcul des tolérances « 1D » par les méthodes statistiques « inertielles » 11

2 De la cotation de fabrication au pilotage statistique 12

2.1 1988 : cotation de fabrication évolutive 12

2.2 2002 – 2007 : correction par cotes 2D - réglage des procédés d'emboutissage 13

2.3 2006 – 2016 : correction par cotes 1D - méthodologie COPILOT-PRO® 14

2.4 2009 – 2016 : correction par points - méthodologie INERTIEL TOTAL et projet USITRONIC 16

2.5 2014 – 2016 : développement du logiciel COPILOT-PRO® - thèse GAMAR 17

2.6 2014 – 2016 : pilotage statistique et sélectif des procédés - méthode COSELECT 18

Chapitre 3 : Bilans 21

- 1 Bilan de l'activité Recherche 21
 - 1.1 Sujets de recherche et temps passé 21
 - 1.2 Responsabilité de contrats 21
 - 1.3 Directions de thèse 22
 - 1.4 Direction de DEA ou de Master 22
- 2 Bilan des communications 22
- 3 Bilan des autres productions 24

2E PARTIE : RÉSULTATS SCIENTIFIQUES ET PERSPECTIVES 27

Chapitre 1 : De la cotation de fabrication au pilotage statistique 28

- 1 Correction par cotes 1D des produits usinés : méthodologie COPILOT-PRO® 28
 - 1.1 Etat de l'art, en 2006, concernant les cotes de fabrication et le réglage des machines-outils 28
 - 1.2 Génération de la gamme de surveillance et de la gamme de réglage 32
 - 1.3 Génération des cotes de fabrication 35
 - 1.4 Génération de la matrice d'incidence 36
 - 1.5 Utilisation à l'atelier 38
 - 1.6 Conclusions et perspectives pour COPILOT-PRO® 40
- 2 Correction par cotes 2D des produits d'emboutis 42
 - 2.1 Préambule 42
 - 2.2 Méthode d'ajustement d'un procédé d'emboutissage, mise au point en 2004 42
 - 2.2.1 Etape 1 : simulation de l'embouti initial 43
 - 2.2.2 Etape 2 : caractérisation géométrique de l'embouti initial 44
 - 2.2.3 Etape 3 : recherche des paramètres influents 44
 - 2.2.4 Choix du type de modèle pour les caractéristiques et réalisation du plan d'expériences associé 45
 - 2.2.5 Etape 5 : Mesurage des caractéristiques 45
 - 2.2.6 Etape 6 : Calcul et validation des modèles polynomiaux 46
 - 2.2.7 Etape 7 : Ajustement des paramètres du procédé 47
 - 2.3 Conclusion et discussions sur la méthode mise au point en 2004 48
- 3 Correction par points des produits usinés 48
 - 3.1 Préambule 48
 - 3.2 Principe de la correction par points 49
 - 3.3 Discussions sur la correction par points 52
- 4 Pilotage statistique et sélectif des procédés : méthode COSELECT 52
 - 4.1 Préambule 52
 - 4.2 Etat de l'art préalable et introduction des notions utilisées par COSELECT 52
 - 4.3 Modèle variationnel direct utilisé par COSELECT 56
 - 4.4 Principe de COSELECT 57

4.4.1	Cible et limites de contrôle des caractéristiques	57
4.4.2	Formulation du problème d'optimisation	57
4.4.3	Prise en compte du classement des paramètres de réglage	59
4.5	Simulation du pilotage par COSELECT d'un procédé industriel	60
4.5.1	Présentation du procédé industriel et de son modèle variationnel direct	60
4.5.2	Mise en place de la simulation	61
4.5.3	Pilotage avec la matrice de pilotage (pseudo-inverse de la matrice d'incidence partielle)	63
4.5.4	Pilotage par COSELECT	64
4.5.5	Comparaison des performances des deux pilotages	65
4.6	Conclusion sur COSELECT	66
5	De la cotation au pilotage : conclusions	67
Chapitre 2 : De la vérification à la spécification géométrique 69		
1	Vérification géométrique par CALIBRES AJUSTANTS	69
1.1	Etat de l'art de la vérification géométrique	69
1.2	Théorie des CALIBRES AJUSTANTS	70
1.2.1	Préambule	70
1.2.2	Base de calibres élémentaires	71
1.2.3	Identification des surfaces élémentaires d'un objet	72
1.2.4	Construction d'un calibre composé	74
1.2.5	Comportements Ajustant et Limitant des composants	75
1.2.6	Comportements Ajustant-prioritaires des composants	77
1.2.7	Sept règles sur les comportements des composants	78
1.2.8	Une règle sur les critères d'ajustement des composants	79
1.2.9	Quatre règles sur les mobilités des composants	80
1.2.10	Calibres composés spéciaux	81
1.2.11	Calibres-zones	82
1.3	Utilisation des CALIBRES AJUSTANTS en métrologie	83
1.3.1	Utilisation sur un exemple général	83
1.3.2	Utilisation pour les tolérances d'orientation et de position	85
1.3.3	Utilisation pour les références, références commune et systèmes de référence	87
1.3.4	Exigence du maximum de matière	89
1.4	Conclusion sur l'utilisation des calibres Ajustants en métrologie et perspectives de développement de la théorie	92
2	Spécification géométrique par CALIBRES AJUSTANTS	93
3	Modèle formel des zones-liées	95
4	De la vérification à la spécification : conclusions	98
Chapitre 3 : Perspectives de recherches futures 100		
1	Perspectives à court terme	100
2	Perspectives à plus long terme	100
2.1	Les problèmes du tolérancement normalisé	100

- 2.1.1 La géométrie optimale ne peut pas être spécifiée 100
- 2.1.2 Le tolérancement général n'est pas garanti 101
- 2.1.3 La tolérance de forme qui limite aussi la taille 102
- 2.1.4 La quantification des défauts est impossible ou inutile 102
- 2.1.5 Des définitions complexes et peu significatives 103
- 2.1.6 Une forme inadaptée à sa diffusion 104
- 2.2 Les propriétés que devraient avoir un modèle de tolérancement 105
- 2.3 Organisation scientifique d'un projet de définition d'un modèle de tolérancement 106

3E PARTIE : IMPLICATIONS 109

Chapitre 1 : Implications scientifiques 110

- 1 Création et animation de groupes scientifiques 110
 - 1.1 2006 – 2012 : groupe du programme TOLÉRANCEMENT ET QUALITÉ DES PRODUITS du pôle MONT BLANC INDUSTRIES 110
 - 1.2 2013 – 2015 : équipe « Tolérancement » au laboratoire SYMME 111
- 2 Participation à des groupes scientifiques 111
 - 2.1 1995 – 1997 : groupe de travail du PÔLE PRODUCTIQUE 111
 - 2.2 2001 – 2016 : Groupe de Recherche en Tolérancement (GRT) 111
 - 2.3 2011 – 2016 : Métrologie Grand Sud (MGS) 112
- 3 Organisation de congrès 112
 - 3.1 2004, 2006, 2009 et 2015 : Journées Européennes du Tolérancement (JET) 112
 - 3.2 2009 : séminaire international Computer Aided-Tolerancing (CAT2009) 112
 - 3.3 2011, 2014 : Séminaires du Groupe de Recherche en Tolérancement français (GRT) 112
- 4 Prestations de services 112
- 5 Collaborations internationales 113
- 6 Bilan 113

Chapitre 2 : Implications administratives 114

- 1 Mandats passés de 1997 à 2006 114
 - 1.1 Mandats à l'Université 114
 - 1.2 Mandats à l'école 114
 - 1.3 Synthèse des mandats passés de 1997 à 2006 115
- 2 Mandats actuels depuis 2007 115
 - 2.1 Mandats à l'Université 115
 - 2.2 Mandats à l'école 115
 - 2.3 Mandats au laboratoire 116
 - 2.3.1 Correspondant valorisation 116
 - 2.3.2 Responsable de groupe 116
 - 2.4 Synthèse des mes mandats actuels 117

3 Bilan de mon implication dans le fonctionnement de l'établissement 117

Chapitre 3 : Implications pédagogiques 118

- 1 Formation continue 118
- 2 Formation initiale 118
 - 2.1 Qualité en production 119
 - 2.2 Plans d'expériences 119
 - 2.3 Métrologie 119
 - 2.4 Spécification géométrique des produits 119
- 3 Charge en enseignement 120
- 4 Bilan 120

CONCLUSION GÉNÉRALE 123

ANNEXES 1

Annexe A : Curriculum Vitae 2

- 1 État civil 2
- 2 Formation en Génie mécanique et en Informatique 3
- 3 Parcours professionnel 3
- 4 Profils sur internet 4

Annexe B : Liste exhaustive des communications scientifiques 5

- 1 Une publication de brevet international (ACL) 5
 - 1.1 Sur le pilotage des usinages (COPILOT-PRO®) 5
- 2 Onze articles de revues internationales avec comité de lecture répertoriées par le HCERES (ACL) 5
 - 2.1 Sur la théorie des calibres ajustants 5
 - 2.2 Sur le calcul des tolérances par le modèle des domaines jeux et écarts 6
 - 2.3 Sur l'optimisation des opérations d'emboutissage 6
 - 2.4 Sur COPILOT-PRO® 6
 - 2.5 Sur le pilotage inertiel 6
 - 2.6 Sur COSELECT 7
- 3 Quatre articles de revues internationales avec comité de lecture non répertoriées par le HCERES (ACLN) 7
 - 3.1 Sur les langages de tolérancement 7
 - 3.2 Sur l'optimisation des opérations d'emboutissage 7
 - 3.3 Sur COPILOT-PRO® 7
 - 3.4 Sur le pilotage inertiel 7
- 4 Six contributions à ouvrages scientifiques (OS) 8
 - 4.1 Sur la théorie des calibres ajustants 8
 - 4.2 Sur les langages de tolérancement 8

4.3	Sur le calcul des tolérances par le modèle des domaines jeux et écarts	8
5	Trente communications avec actes dans des congrès scientifiques internationaux (ACTI)	9
5.1	Sur la théorie des calibres ajustants	9
5.2	Sur les langages de tolérancement	9
5.3	Sur le calcul des tolérances par le modèle des domaines jeux et écarts	10
5.4	Sur le calcul des tolérances statistiques	10
5.5	Sur l'optimisation des opérations d'emboutissage	10
5.6	Sur COPILOT-PRO®	11
5.7	Sur COSELECT	11
5.8	Sur le pilotage inertiel	11
6	Neuf communications avec actes dans des congrès scientifiques nationaux (ACTN)	12
6.1	Sur les langages de tolérancement	12
6.2	Sur le calcul des tolérances	12
6.3	Sur la théorie des calibres ajustants	12
6.4	Sur COPILOT-PRO®	12
6.5	Sur le pilotage inertiel	13
7	Un article de revue sans comité de lecture (ASCL)	13
8	Sept communications orales sans actes dans des congrès scientifiques nationaux (COM)	13
8.1	Sur la théorie des calibres ajustants	13
8.2	Sur COPILOT-PRO®	13
8.3	Sur les travaux de recherche du laboratoire SYMME	14
9	Trois logiciels (AP)	14
10	Cinq rapports techniques (AP)	14
11	Deux rapports de stage (AP)	15
Annexe C : Extrait du dossier de demande d'une allocation doctorale de recherche sur les langages formels de spécification géométrique en 2010		16
Annexe D : Article sur la méthodologie COPILOT-PRO®, paru dans la revue PROCEdia CIRP en 2013 [15]		20
Annexe E : Article sur la correction par points, publié dans les actes du congrès international MACHINES ET USINAGE À GRANDE VITESSE en 2016 [62]		30
Annexe F : Nuages de points utilisés dans la deuxième partie du présent mémoire		49
Annexe G : Projet 2 du Pôle de compétitivité Arve industries : «Qualité géométrique des produits dans leur cycle de vie»		52
1	Les enjeux industriels du projet	52
2	Origines du projet et objectif global	53
3	Les acteurs du projet	54
3.1	Le Laboratoire de Mécanique Appliquée de l'Université de Savoie	54

3.2	Le Centre Technique du Décolletage de la vallée de l'Arve	54
4	Organisation du projet de recherche	55
4.1	Six actions répondant aux problématiques des bureaux d'études	55
4.1.1	1ère cause : Mauvaise connaissance et mauvaise utilisation des tolérances géométriques normalisées	55
4.1.2	2ème cause : Déficit de méthode en conception	55
4.2	Quatre actions répondant aux problématiques de la production	56
4.2.1	1ère cause : Mauvaise connaissance des tolérances géométriques normalisées	56
4.2.2	2ème cause : Tolérancement ISO inadapté au pilotage des procédés de production et à leur suivi statistique	56
4.3	3ème cause : Logiciels de métrologie tridimensionnel généralement inadaptés au contrôle des tolérances ISO	56
4.4	Planification des actions	56
5	Descriptif des actions	57
6	Moyens humains et bilan financier du projet	57
Annexe H : Outil de chiffrage 59		
1	Description des onglets	59
1.1	Onglet de chiffrage	59
1.2	Onglets Devis	61
1.3	Onglet Fiche de liaison	61
Annexe I : Méthode des contacts colorés développée pour les élèves-ingénieurs de POLYTECH ANNECY-CHAMBÉRY 64		
1	Problème de la détermination des cotes fonctionnelles	64
2	Méthode des contacts colorés	65
2.1	Coloration des vis-à-vis sur le dessin d'ensemble	65
2.2	Recherche des chemins de contacts établis par les distances configurées	66
2.3	Traçage des chaînes de cotes fonctionnelles	67
3	Discussion sur la méthode des contacts colorés	68
INDEX 71		
TABLE DES MATIÈRES 75		

L'habilitation à diriger les recherches (HDR) est le diplôme universitaire nécessaire à la direction de thèse de doctorat et à l'accès au corps des Professeurs d'Université. C'est une reconnaissance, d'une part, de la capacité à élaborer des projets de recherche, à les animer et à diriger de jeunes chercheurs ; et d'autre part, de la qualité et de l'originalité scientifique des recherches développées.

Aussi, dans la première partie, les projets de recherche que j'ai élaborés et des codirections de thèse que j'ai assumées sont présentés chronologiquement. Pour chacun, le bilan de la production scientifique est dressé et un récapitulatif final classe cette production suivant différents critères.

Dans la deuxième partie, les résultats scientifiques obtenus depuis mon doctorat sont présentés en détail, organisés par les quatre étapes de la **qualité géométrique des produits**, thème général de mes travaux :

- en **Préparation**, il s'agit essentiellement d'établir les caractéristiques à mesurer sur les produits, d'identifier les paramètres du procédé qui les fabrique, et d'établir un **modèle variationnel direct** des caractéristiques en fonction des paramètres. Trois méthodes sont présentées : COPILOT-PRO® permettant de corriger des cotes «1D» ; une correction des profils « 2D » obtenus par emboutissage ; et une méthode « 3D » de correction par points. En outre la méthode COPILOT-PRO® permet d'établir les étapes de mesurage à introduire dans le processus de fabrication.

- en **Fabrication**, il s'agit essentiellement d'utiliser les modèles variationnels directs couplés à une **surveillance statistique** des caractéristiques mesurées sur les exemplaires successifs du produit. La méthode COSELECT permet ce couplage ainsi qu'une sélection des paramètres à ajuster.

- en **Vérification**, il s'agit essentiellement d'être capable de vérifier le respect, par les produits, des tolérances géométriques par zones ou par frontières. La théorie des CALIBRES AJUSTANTS, élaborée pour cela, est présentée ainsi que son usage en métrologie.

- enfin en **Spécification**, il s'agit d'être capable de spécifier la géométrie optimale du produit et les tolérances d'écart autour d'elle pour les produits fabriqués. Un modèle, dit en « zones liées », et son langage graphique sont présentés avant d'être critiqués au regard des besoins de la Fabrication. La critique concerne aussi les outils de tolérancement normalisés par l'ISO qui utilisent également les zones de tolérance.

Du besoin et de l'analyse des outils de spécification actuels, l'axe des recherches futures, sur le sujet de la spécification, est présenté.

Enfin la troisième partie dresse le panel de mon implication dans des groupes scientifiques, dans les structures de l'Université et dans la pédagogie de mes enseignements.

Mots clés : COPILOT-PRO ; COSELECT ; CALIBRES AJUSTANTS ; Métrologie ; Tolérancement

