

---

# Formation à l'UGV pour l'aéronautique

## Exemple de réalisation d'une pièce aéronautique par usinage en l'air

Etienne Valdès<sup>\*,\*\*</sup>, Alain Fermy<sup>\*,\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Université de Toulouse UTM-IUT de Figeac ; LRP-mip (Laboratoire de Recherche Pluridisciplinaire du nord-est de Midi-Pyrénées), Avenue de Nayrac 46100 Figeac, France

<sup>\*\*</sup> Equipe de Recherche Technologique 66 (ERT), « moyens pour l'UGV du titane », CUFR Champollion– 81012 Albi Cedex 9

[valdes@univ-tlse2.fr](mailto:valdes@univ-tlse2.fr) ; [alain.fermy@univ-tlse2.fr](mailto:alain.fermy@univ-tlse2.fr)

**Sections de rattachement : 60, BIATOS**  
**Secteur : Secondaire**

*RÉSUMÉ. Dans le contexte d'une formation expérimentale à l'UGV menée au niveau DUT, une formation au Génie Mécanique Productive par la mécatronique et l'UGV au niveau licence est en cours de mise en place. Après avoir présenté le contexte industriel et pédagogique de cette formation, nous illustrons la pédagogie mise en place par la présentation de ce qui peut être attendu d'un des projets de synthèses que nous souhaitons développer dans ces formations.*

*MOTS-CLÉS : Usinage de pièces aéronautiques, Usinage Grande Vitesse (UGV), usinage en l'air, méthodes, mécatronique, pédagogie, formation par projets, génie mécanique et productive.*

### 1. Introduction

Dans le cadre d'une demande de formation à l'Usinage Grande Vitesse (UGV) émanant d'AIRBUS, une expérience pédagogique originale de formation a été menée au niveau DUT avec des experts dans le domaine de l'UGV et le soutien d'une ERT. Les résultats pédagogiques obtenus encouragent à la généralisation de cette pédagogie pour mettre en place une formation au GMP par la mécatronique et l'UGV au niveau licence (Valdès et al. 2009). L'analyse de la mutation actuelle des métiers de la production, montre que le recours systématique aux outils de calcul modifie la demande de formation, non seulement au niveau ingénieur, mais aussi dès les niveaux DUT et licence. Ces mêmes outils de calcul peuvent être introduits dans les formations en génie mécanique et productive, en facilitant grandement l'apprentissage des matières

scientifiques. Les formations intégrant des outils de simulation ne peuvent être mises en place que par des formations par projets où des projets de synthèses constituent une des validations les plus objectives de l'ensemble de la formation.

## **2. Contexte de la formation au génie mécanique et productique en Mecanic Vallée**

L'intégration de formations dans le tissu industriel dynamique de la Mecanic Vallée sollicite l'enseignement face aux défis industriels. La proximité et la convivialité des relations rendent propice la mise en œuvre de pédagogies innovantes devant répondre aux nouvelles formations.

### ***2.1. Le contexte industriel de la Mecanic Vallée***

Association loi 1901 créée en 2000, la Mecanic Vallée est née de la volonté des industriels du secteur de la mécanique, de l'aéronautique et de la machine-outil des départements de l'Aveyron, du Lot et de la Corrèze de se regrouper afin de rechercher avec les partenaires locaux, des synergies pour faire face aux exigences et aux contraintes d'un marché de plus en plus concurrentiel. Elle est actuellement constituée de plus de 90 entreprises représentant 90% des effectifs (Mecanic Vallée 2009). Complètement inscrits, dans le contexte de l'augmentation de productivité des moyens de production de l'aéronautique, les différents acteurs la Mecanic Vallée préservent leur compétitivité en contribuant activement au développement et au maintien de formations sur plusieurs sites. Le pôle de formation classique (Bac et BTS) sur les lycées de Decazeville et de Figeac ont été complétés par l'implantation de formations universitaires. Depuis 1995, un département de génie mécanique et productique a été créé. Avec deux autres départements : Techniques de Commercialisation et Carrières Sociales, l'IUT de Figeac est rattaché à l'Université de Toulouse II, Le Mirail.

### ***2.2. Développement d'une Equipe de Recherche Technologique et d'un laboratoire de recherche sur la Mecanic Vallée***

Depuis janvier 2007, une Equipe de Recherche Technologique (ERT 66) est portée par le CUFR Champollion sur le site d'Albi dont une grande partie de l'activité scientifique est sur le site de l'IUT de Figeac. Soutenue par la Mecanic Vallée, son thème de recherche a été choisi en accord avec l'activité de cette dernière : « moyens pour l'usinage grande vitesse du titane ». Depuis janvier 2008, un laboratoire de recherche labélisé par Toulouse II a été créé. Le Laboratoire de Recherche

Pluridisciplinaire du nord-est de Midi-pyrénées (LRP-mip) est un laboratoire pluridisciplinaire constitué de deux équipes : une équipe en sciences humaines et sociales ; une équipe en sciences de la nature.

Les deux activités de recherche de l'ERT 66 sont d'une part , la conception mécatronique des machines dédiés à l'Usinage Haute Productivité (**UHP**) des métaux durs et d'autre part, le développement de moyens d'usinage et de leur surveillance (El Kabir et all 2009). L'activité de recherche de l'ERT permet le renforcement et le développement de nouvelles formations : Licences Professionnelles en partenariat avec les lycées de Figeac et de Decazeville ; Licence ISM avec le CUFR Champollion à Albi.

### ***2.3. Optimisation des moyens de production pour l'aéronautique***

L'optimisation de la masse des structures lors de la conception des avions engendrent des contraintes de production liées à la fabrication de pièces complexes nécessitant d'importants enlèvements de matière. Les petites et moyennes séries (souvent deux pièces par avion) ainsi que la très grande variété de pièces à fabriquer conditionnent les relations entre les donneurs d'ordres aéronautiques et leurs sous traitants. La conjugaison de ces deux facteurs a constitué le terrain privilégié du développement de moyens d'usinage plus performants : l'UGV pour les métaux légers ; et d'une façon plus générale l'UHP englobant l'usinage des métaux durs. Nous assistons actuellement au passage de la deuxième étape du développement de l'implantation de ces nouveaux moyens d'usinage dans le milieu industriel : son optimisation d'un point de vue organisationnel. En effet, jusqu'à la fin des années 90 l'UGV a été réservé à des experts qui ont développé du savoir-faire concrétisé par des outils logiciels (Greffioz 2004), Ces experts ont permis la mise en place de l'UGV au sein des donneurs d'ordres puis des principaux sous-traitants, au début des années 2000. L'UGV est arrivé à maturité du point de vue de la maîtrise du processus, entraînant maintenant la nécessité de réorganiser-optimiser l'outil de production pour utiliser pleinement les nouveaux potentiels. Ainsi, pour une pièce donnée, les choix des outils et des conditions de coupe ainsi que ceux de la stratégie d'usinage et des parcours d'outils sont liés entre eux et spécifiques aux performances et à la gestion de la maintenance de la machine choisie pour l'usinage. L'élévation du niveau scientifique des métiers de la maintenance et des méthodes est devenue une des conditions de survie des sous-traitants aéronautique les plus performants. En effet, l'optimisation constante de l'utilisation du parc machines et du parc outils, oblige au recours systématique, au sein des méthodes, à des outils scientifiques d'optimisation des conditions de coupe tels le Couple-Outil-Matière (COM). L'UHP valorise scientifiquement les métiers des méthodes et de la maintenance. Des nouveaux métiers destinés aux BTS, DUT et licences sont en émergence. L'implantation réussie de l'UHP dans un atelier de production doit donc être accompagnée de l'introduction de ce qui pourrait être nommé « la production intégrée » ou « l'approche globale », à l'image de l'introduction de la conception intégrée dans les bureaux d'études. Cette implantation exige aussi la mise sur le marché de nouveaux personnels possédant les compétences énoncées au 2.4.

#### **2.4. Cahier des charges des formations destinées aux personnels des méthodes et de la maintenance**

En accompagnement du projet «Best Cost Machining Suppliers » (BCMS) géré par AIRBUS et en parallèle d'une aide directe mise en œuvre par trois experts en UGV, un volet formation à niveau bac + 2 a été mis en place avec le département GMP de l'IUT de Figeac. Durant deux ans, une première expérience pédagogique, très inspirée de la pédagogie qui avait été mise au point à l'ISIV dans le cadre de l'Ingénierie de Systèmes de Production (Valdès et al 2005) a permis, d'une part, de prouver la faisabilité d'une pédagogie originale basée sur l'apprentissage direct des phénomènes, condition de réussite au niveau bac+2, et d'autre part, de mettre en place un réseau d'entreprises constitué d'une dizaine de sous-traitants d'AIRBUS. A partir de cette expérience pédagogique, où trois experts UGV ont été fortement impliqués, nous pouvons déduire le contenu des nouvelles formations nécessaires aux personnels des méthodes et de la maintenance pour mettre en œuvre l'UHP au sein des entreprises d'usinage.

Si les nouveaux outils de calculs utilisés par les personnels des méthodes et de la maintenance s'intègrent naturellement dans les formations, ces outils de calculs ouvrent de nouvelles perspectives à ces nouveaux métiers et exigent le renforcement et l'acquisition de nouvelles compétences à acquérir durant les formations à ces métiers. Nous listons ici les grands types de compétences, qui nous paraissent devoir être renforcés pour mieux répondre à l'émergence de ces nouveaux métiers à l'UHP. Les arguments et les détails de ce cahier de charges font l'objet d'un travail publié par les auteurs (Valdès et al 2009).

- Maîtrise de la démarche scientifique. Il s'agit, à partir de phénomènes connus ou en partie, d'être capable de gérer une compréhension partielle pour l'insérer ensuite au sein d'une plate-forme de compréhension plus large.
- Maîtrise de la démarche expérimentale. Elle permet d'isoler et garantir des mesures grâce à une gestion scientifique de la complexité expérimentale, elle est la condition pour l'aboutissement raisonné des mises en œuvre concrètes.
- Capacité de compréhension synthétique des phénomènes. Elle permet la gestion des choix complexes grâce à la compréhension des conséquences de ces choix.
- Les qualités d'autonomie intellectuelle sont de plus en plus sollicitées, sans compter l'ensemble des valeurs humaines. Les capacités à entretenir l'esprit de coopération pour aboutir aux résultats attendus doivent être développées, elles permettent l'obtention de solutions intégrant la complexité, sans les rapports de force qui lui sont nuisibles.

Le développement de ces grands types de compétences impose implicitement de renforcer : l'art de la modélisation et le savoir interpréter. D'une façon générale, la formation pluridisciplinaire est une des clés du savoir coordonner. Afin d'illustrer la nature de la pédagogie qui répond au cahier des charges que nous venons de présenter, nous décrivons dans le chapitre suivant un projet de synthèse que nous destinons à chacun des groupes d'étudiants d'une de nos futures formations en Licence Pro et en licence Intégration des Système Mécanique (ISM).

### 3. Usinage en l'air d'une pièce aéronautique type

Parmi les projets de synthèses qui valideront les formations, deux projets seront demandés à des groupes d'étudiants, ils sont directement inspirés des collaborations avec nos partenaires industriels.

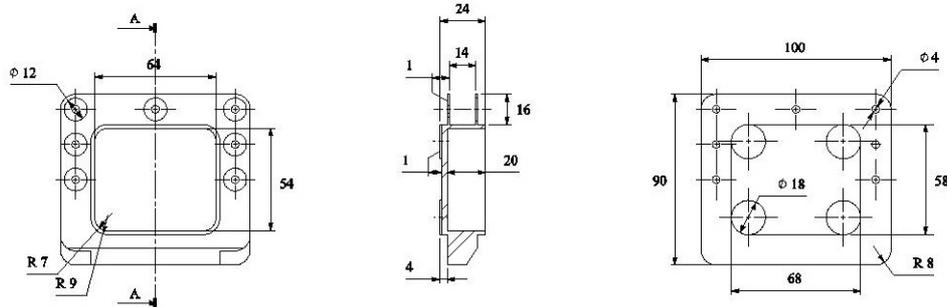
- Conception et fabrication d'une pièce synthétisant l'ensemble de la problématique de la dynamique de coupe lors de l'usinage d'une pièce aéronautique en métal léger (UGV). Il sera demandé de lister et hiérarchiser les difficultés et de proposer une pièce de synthèse de leur choix, dont la fabrication sera maîtrisée.
- Optimisation de l'usinage d'une pièce aéronautique en métal dur (UHP) par l'approche globale : optimisation prenant en compte le choix des outils, la réalisation de COM, du parc machine et des stratégies d'usinage).

#### 3.1. Cahier des charges et description de la pièce à usiner

Pour donner un aperçu de ce que pourrait être ce type de projet de synthèse, nous présentons la pièce de synthèse UGV que nous avons élaborée pour la journée portes ouvertes de l'IUT. Suite aux collaborations industrielles que nous avons développé avec les sous-traitants Aéronautique nous avons relevé les difficultés suivantes de fabrication des pièces aéronautiques. Comme nous l'avons déjà précisé dans le paragraphe 2.3, la maximisation du rapport performance/masse engendre les propriétés suivantes de la plupart des pièces aéronautiques. Ces pièces sont :

- entièrement usinées, sans aucune surface brute, impliquant un posage multiple ;
- de formes complexes reliées par des rayons de courbures normalisés ;
- avec des états de surface contraignants, essentiellement des surfaces non vibrées ;
- possédant des parois fines pouvant être de grandes dimensions (haute et large), de poches juxtaposées les unes à côté des autres reliées entre elles par des parois fines, les limites en finesse étant limitées par la faisabilité du maintien d'un état de surface non vibrée, que l'UGV a permis de repousser.

Afin de ne valider que notre savoir-faire UGV, la pièce ne possèdera pas de forme complexe. Elle sera complètement usinée et tirée d'un brut laminé d'alliage d'aluminium 7075. La pièce possèdera des ailettes de 1 mm d'épaisseur sur une hauteur de 16mm, une poche profonde de 20mm de profondeur avec une paroi fine et un fond de 1mm. Le dessin de définition du plan 1 précise les dimensions de la pièce.

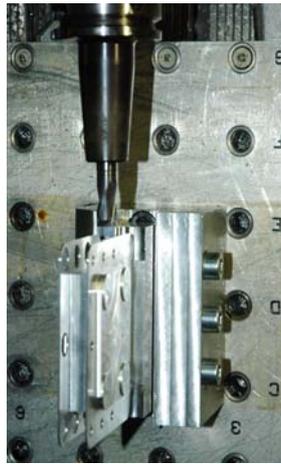


Plan 1. Dessin de définition de la pièce à usiner

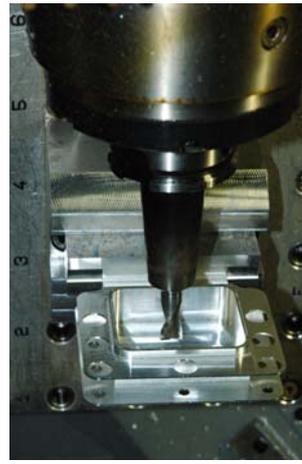
Afin d'être plus proche des difficultés classiques d'obtention de bons états de surface de parois fines, nous avons ajouté des perçages dans les ailettes. Le souhait de n'avoir qu'un seul posage, nous contraint alors au recours à un « usinage en l'air », usinage en porte à faux. Une machine possédant 5 axes positionnés est alors nécessaire pour réaliser toutes les faces sans aucun démontage. Les photos 2 3 et 4 présentent les différents étapes de la réalisation.



*Photo 2.* Brut sur support



*Photo 3.* Usinage ailette



*Photo 4.* Usinage poche

### **3.2. Conditions de coupe et stratégie d'usinage**

Les dimensions de la pièce ont été définies afin que les conditions de coupe soient déterminées par les vibrations de la pièce. Conditions de coupe les plus difficiles à déterminer et les plus changeantes. En effet, les conditions de coupe pour les métaux légers sont optimisées par la mesure de la dynamique de la coupe. La vitesse de rotation optimale de la broche est définie en utilisant le nombre de dents de la fraise et la fréquence du mode le plus souple à la coupe. Ce mode le plus souple peut provenir de la vibration de flexion de l'ensemble broche-outil ; de la pièce et pour les métaux durs potentiellement de la machine. Différentes techniques permettent de déterminer le mode possédant la plus grande souplesse (Greffioz2004). Afin de privilégier les vibrations de la pièce nous avons choisi un outil court et une pièce suffisamment souple en diminuant son épaisseur. Pouvant estimer par calcul la fréquence du brut s'il est encastré (Photo 2), nous avons évalué sa hauteur libre et l'avons ajuster ensuite pour que la fréquence propre du brut soit inférieure à 800 Hz. Ainsi, avec un outil à deux dents, la plage des vitesses de rotations de la broche correspondant aux bonnes conditions de coupe est proche et inférieure à la vitesse maximale de la broche : 24.000 Tr/min. Nous disposons ainsi du débit de copeaux maximal.

La gamme d'usinage est élaborée pour conserver la raideur maximale de la pièce à l'endroit de la coupe. Elle est réduite à une succession de sous-phases car nous n'avons aucun démontage de pièce. Dans notre cas nous avons tout d'abord effectué les perçages puis le contournage de la pièce. Ensuite, les ailettes ont été usinées avant le fond et la poche. L'ailette supérieure avant les deux ailettes latérales. Enfin le pied et la préparation de la découpe de la pièce ont été usinés en dernier. Mise à part pour les perçages, l'ensemble de la pièce est usiné avec un seul outil monobloc KENDU de diamètre 12, fretté dans le porte outil. La stratégie d'usinage a été obtenue par FAO, les conditions de coupe ont ensuite été optimisées par mesures au pied de la machine. Pour chacune des sous phases, avec une avance par dents  $f_z$  petite, nous avons évalué les vitesses de rotations optimales en ébauche et en finition, pour déterminer ensuite la profondeur de coupe  $a_p$  maximale avec le petit  $f_z$  choisi. Nous avons ainsi « maximiser » la stratégie d'usinage par les choix des profondeurs de passes maximales sur chaque sous phase lors de la FAO. La dernière phase de l'optimisation consistant alors, au pied de la machine, à ajuster finement les vitesses de rotations et maximiser les avance par dents. Ainsi, lors de mise en place du programme, 14 vitesses de rotations de la broche et avances par dents ont permis de maximiser le débit de copeau tout en garantissant l'état de surface.

### 3.3. *Comparaison de différentes stratégies d'usinage*

Lors de la conception de la pièce, nous avons choisi les 3 ailettes pour comparer différentes stratégies d'usinages. Nous décrirons dans ce chapitre les différentes stratégies et les résultats obtenus, ainsi nous pourrions illustrer l'importance que revêt la stratégie d'usinage pour réussir l'usinage d'une pièce aéronautique.

- **Ailettes latérales gauches**. Nous avons choisi une stratégie conventionnelle d'usinage avec une ébauche complète en plusieurs fois avec un  $a_p$  de 2 mm suivie d'une finition couche par couche avec un  $a_p$  de 0.8 mm. La finition est réalisée avec très peu de matière « sous l'usinage » et malgré le  $a_p$  faible, la surface est vibrée particulière d'un seul côté et d'autant plus que l'usinage est loin du pied de la pièce, photo 5. C'est la plus mauvaise stratégie, elle ne permet pas d'usiner la pièce.
- **Ailettes supérieures**. La stratégie est de nouveau conventionnelle pour ce qui est de la finition effectuée après l'ébauche complète. Par contre, la finition en rampe décalée de par et d'autre de chacune des deux ailettes, procure un bien meilleur état de surface homogène de chaque côté de l'ailette malgré un  $a_p$  de 1mm, supérieur à celui des ailettes latérales gauches.
- **Ailettes latérales droites**. Nous avons choisi une stratégie d'usinage caractéristique de l'UGV avec un montage en l'air : les deux ailettes ont été ébauchées et finies niveau par niveau, avec un changement de niveau de 4.75mm. La raideur au point d'usinage étant maximisée, même lors de la finition, les surfaces des ailettes ne sont pas vibrées, même éloignées de l'accrochage, photo 6.



**Photo 5.** Ailette gauche vibrée



**Photo 6.** Ailette droite non vibrée

#### **4. Conclusion et remerciements**

Nous avons pu montrer, que sous certaines conditions universitaires, la recherche en IUT peut non seulement être de qualité, mais qu'elle est aussi un facteur d'innovation du contenu et de la pédagogie des formations.

##### **Remerciements**

Les auteurs souhaitent marquer leurs remerciements à André GREFFIOZ (ELPS) ; Christian FRAYSSINET (AIRBUS) ; François BAGUR (Bagur Consulting) et Jean-Claude MIREY (UGV Conseil) ainsi qu'aux collègues des lycées de Figeac et de Decazeville.

##### **Bibliographie**

Greffioz A., «L'usinage à grande vitesse : problèmes vibratoires, exemples de simulation d'usinage et machine de nouvelle génération», Actes des : 3ième Assises Machines et Usinage Grande Vitesse, pp. 287-298 , IFMA mars 2004.

Mecanic Vallée 2009, <http://www.mecanicvallee.com/accueil.php>

Valdès E., Liénard Ch. Lefevbre F., Dequidt A., Riche D., «Formation à l'Ingénierie des systèmes de production et projets UGV», 9ème Colloque National AIP PRIMECA, La Plagne - 5-8 avril 2005.

Valdès E., Simon T. Lagarrigue P., «Formation au génie mécanique et productique par la mécatronique à l'IUT de Figeac», 11ème Colloque National AIP PRIMECA, La Plagne - 22-24 avril 2009.

El Kabir T., Valdès E., Fermy A., Simon T., «Faisabilité d'une mesure sans contact de l'usure de l'outil dans une opération d'usinage», 10 ème CNRIUT, Lille 08-10 juin 2009.