

BTS IPM

Les vibrations d'usinage

LIONEL ARNAUD, BRUNO SEGUIER^[1]

Les vibrations sont une cause récurrente de difficultés en usinage, causant dégradation des surfaces usinées, usure des outils et machines, nuisances sonores, etc. Une méthode pour les réduire, initialement utilisée dans l'industrie, a été testée avec succès dans une dizaine de lycées. Elle s'appuie sur les paramètres de rigidité et de fréquence vibratoire du système usinant. Bien adaptée au programme du BTS IPM, elle permet de structurer la démarche des élèves face aux vibrations d'usinage – une exigence du référentiel.

En 1907, dans son ouvrage fondateur sur l'art de la coupe, Frederic Winslow Taylor disait déjà que « le problème des vibrations d'usinage est le problème le plus obscur auquel ait à faire face l'usineur ». Taylor savait très bien de quoi il parlait, car il avait été pendant vingt-six ans le responsable d'un grand atelier d'usinage. Il avait consigné plus de 16 000 essais d'usinage et défini la loi d'usure qui porte son nom, toujours utilisée, un siècle plus tard. Aujourd'hui, les études sur le sujet signalent toujours que les vibrations sont un enjeu majeur pour l'usinage et l'un des facteurs limitant le plus la productivité.

Les enjeux industriels

Le constructeur automobile Renault a chiffré précisément le coût des vibrations d'usinage sur 3 millions de blocs-cylindres usinés par an. Le surcoût, ici uniquement lié à l'usure prématurée des outils, représentait en 2002 exactement 0,35 € par pièce, soit 120 000 €.

Des estimations montrent que la majorité des surcoûts viennent d'abord de la perte de productivité et du temps perdu pour les mises au point, puis des usures d'outils et de machines, et enfin des pièces rebutées **1**.

Les multiples facettes du problème

Certains éléments sont systématiquement associés au risque de vibrations :

- les pièces flexibles, à cause de leurs parois minces ou d'un porte-à-faux important ;
- les outils longs et fins ;

[1] Respectivement : expert en vibration d'usinage, fondateur de la société Vibration ; professeur agrégé en sciences industrielles de l'ingénieur option ingénierie mécanique au lycée des métiers Jean-Dupuy de Tarbes (65).

mots-clés

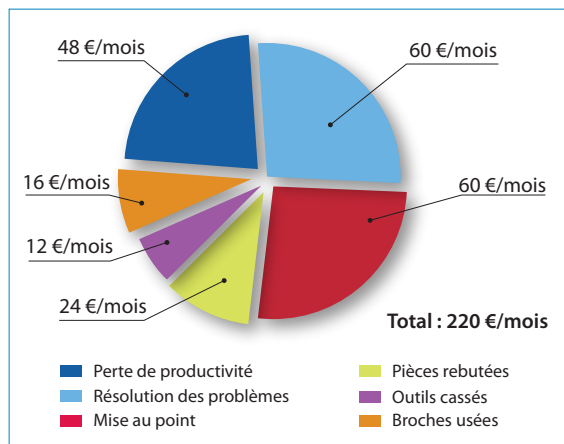
industrialisation, productive, simulation, usinage

– les machines peu rigides, et récemment les robots d'usinage ;

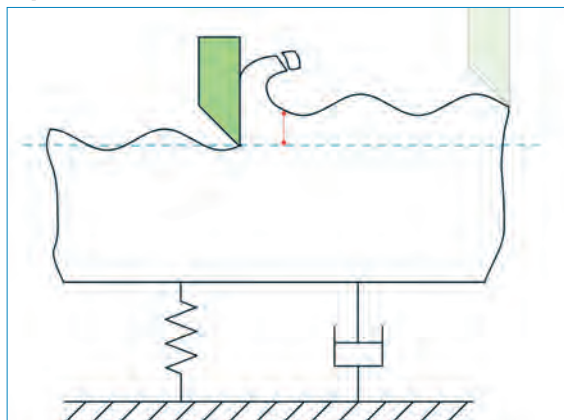
– les engagements importants, car ils sollicitent la rigidité machine, aussi élevée soit-elle.

Un état de surface dégradé par des ondulations assez régulières ou des bruits stridents sont les manifestations les plus classiques. L'ébréçage ou l'usure rapide des arêtes de coupe sont aussi des signatures de vibrations d'usinage, qu'elles fassent du bruit ou non. Autre conséquence fréquente des vibrations puissantes, la détérioration rapide de la broche ou même des axes machines, même si les chocs accidentels restent ce qui dégrade le plus ces éléments.

La faible productivité est la conséquence la plus importante du problème. En effet, il est très courant de constater que ni les engagements outils ni la puissance machine ne sont exploités à 100 %.



1 L'origine des surcoûts d'usinage par machine et par mois



2 Modèle simplifié masse-ressort

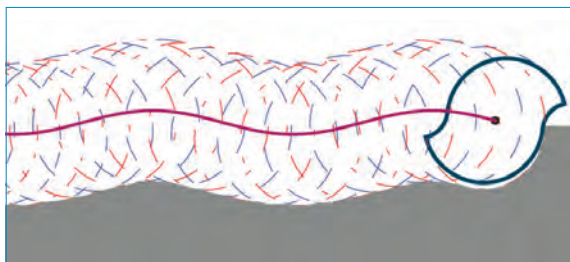
Un phénomène complexe

Un outil, ou une pièce flexible, peut se ramener, en première approximation, à un modèle simplifié masse-ressort **2**.

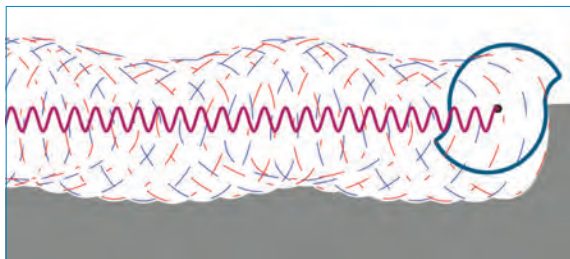
L'interruption de la coupe, lorsque l'outil entre et sort de la matière, génère naturellement des vibrations, dites forcées. Ces vibrations sont assez faciles à maîtriser en pratique, soit en réduisant la section copeau, soit en augmentant la continuité de la coupe (engagement, nombre de dents, hélice), soit en rigidifiant le système.

Ce sont les vibrations spontanées qui posent le plus de problèmes, c'est-à-dire celles qui s'amplifient spontanément à chaque passage de dent, indépendamment des chocs de la coupe. De telles vibrations peuvent même apparaître en filetage, alors même que l'outil ne repasse pas à chaque tour sur sa trace.

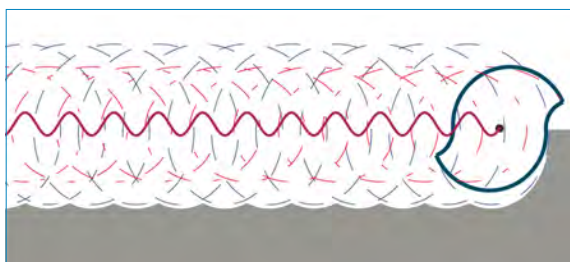
En fonction des paramètres de coupe, une infinité de configurations sont possibles (les mathématiciens disent même « non dénombrables ») ; en voici trois :



3 Vibrations basse fréquence



4 Vibrations haute fréquence



5 Une dent sur deux qui coupe

● Cas 1 : vibrations basse fréquence

Soit un outil rigide à 2 dents tournant à 12 000 tr/min, ce qui donne une fréquence de passage de dent à $(12\,000/60) \times 2 = 400$ Hz. Considérons l'usinage d'une pièce ou une machine de grande dimension sujettes à des vibrations basse fréquence, par exemple 40 Hz. De larges vagues apparaîtront alors sur la surface usinée **3**, image des vibrations basse fréquence.

● Cas 2 : vibrations haute fréquence

Considérons maintenant que l'outil, ou la pièce, vibre à 300 Hz. À nouveau de larges vagues apparaissent **4**, mais elles sont liées cette fois à la différence de phase entre les harmoniques de la fréquence de rotation et celles de la fréquence de vibration. Il existe alors de nombreux types de profils usinés, selon les fréquences en jeu.

● Cas 3 : une dent sur deux qui coupe

Cette fois, considérons toujours le même outil générant des coups de dents à 400 Hz, mais avec une fréquence de vibration à 200 Hz, c'est-à-dire exactement la moitié. Cette fois, si l'amplitude des vibrations est suffisamment importante, l'une des dents passe dans le vide, et la suivante coupe à sa place **5**, ce qui conduira à une usure accélérée de l'outil. Comme à chaque prise de passe ce n'est pas forcément la même dent qui coupe, l'usure paraîtra uniforme sur l'outil, ce qui rendra mystérieux le phénomène d'usure accélérée, le même outil s'usant beaucoup moins sur une autre pièce ou dans des conditions d'usinage différentes. On tombe souvent par hasard sur cette configuration, car elle produit un son d'usinage agréable, sans les variations du cas 1 ni les sifflements stridents du cas 2.

Ces trois cas illustrent la variété des phénomènes, et la difficulté à les comprendre et à les distinguer sans mesures précises pendant l'usinage.

Les 4 facteurs clefs

Taylor disait déjà en 1907 que, face aux vibrations, les usineurs testaient différentes fréquences de rotation en changeant la vitesse de coupe et que, si cela ne suffisait pas, ils réduisaient l'engagement de l'outil pour limiter les efforts. Il disait aussi qu'ils utilisaient, sur des pièces creuses, des sangles en cuir ou en caoutchouc ainsi que des cales en bois tendre sur les porte-outil de tournage, pour amortir les vibrations. Il disait également qu'il fallait toujours chercher à avoir des

Contexte technique

Les vibrations d'usinage apparaissent le plus souvent dans les contextes bien identifiables ci-dessous, essayez d'associer les contextes aux images.

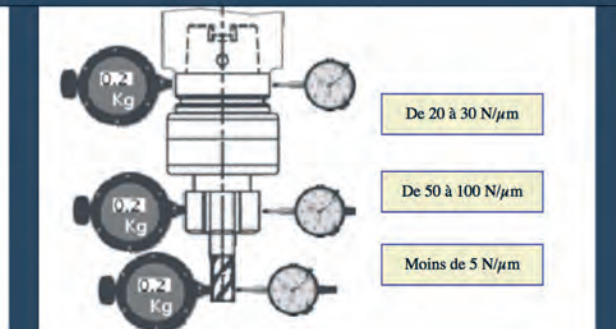
Outils longs ou fins Parois minces Pièces ou montages flexibles

Usinage robotisé Ébauche avec forts engagements

Comprendre les vibrations en usinage (13/47)

Comprendre les vibrations en usinage (27/47)

	Coût		
	30 € / pièce	4 pièces / mois	
	30 € / outil	6 outils / mois	
problèmes	60 € / heure	5 heures / mois	
ant	60 € / heure	5 heures / mois	
	16000€/broche/5ans	Usure +30% ?	
	60 € / heure	1% de 400 heures/mois ?	
Total mensuel		1100 €	



6 La séquence pédagogique interactive

bâties de machine solides, bien au-delà de ce que les calculs de résistance mécanique demandaient, et qu'il était important que tous les éléments soient fixés fermement, pour une meilleure rigidité.

L'analyse scientifique des vibrations d'usinage a montré que, malgré la multitude des paramètres en jeu et des manifestations, il est possible d'attaquer méthodiquement le problème en se basant uniquement sur les quatre paramètres clefs suivant : rigidité, fréquence, amortissement et effort de coupe.

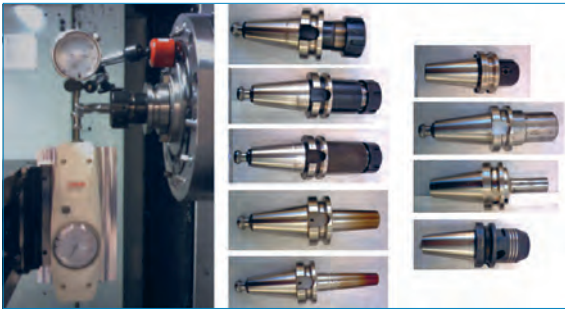
Des applications pédagogiques en BTS IPM

Le référentiel du BTS IPM précise, dans le savoir S7.6.1, que l'acquisition et la maîtrise des connaissances sur l'incidence des vibrations des outils et des outillages doivent être de niveau 4, « maîtrise méthodologique ». La sous-épreuve E52, dite de présentation du projet de qualification de processus, précise que le thème du projet doit faire apparaître des problèmes techniques et cite par exemple les pièces sensibles aux vibrations au cours de l'usinage.

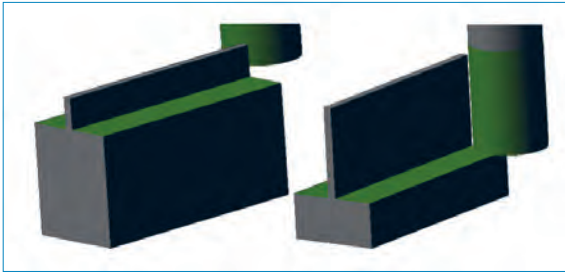
L'élève doit donc impérativement acquérir de la méthode pour la résolution des problèmes vibratoires en

usinage, puis démontrer sa capacité à définir et mettre en œuvre des essais réels et/ou des simulations, pour éliminer les vibrations, mais aussi pour optimiser la productivité. Cette acquisition peut se faire en 1^{re} année de BTS, sous la forme de TP au cours du second semestre dans la période « approfondissement », afin de pouvoir appréhender en 2^e année le projet de qualification de processus.

La méthode appelée ChatterMaster, mise en place initialement dans l'industrie, s'est révélée très efficace pédagogiquement. Des échanges avec les enseignants du lycée Jean-Dupuy à Tarbes dès 2009 ont permis de mettre au point une approche pédagogique bien adaptée. Cela a conduit Lionel Arnaud, expert en vibration d'usinage, fondateur de la société Vibration, à multiplier les contacts avec les lycées par le biais de journées de démonstration en présence d'élèves et d'industriels usineurs (plus de 10 journées ont déjà été organisées). En 2014, l'ensemble des lycées de l'académie de Toulouse et quelques lycées de la région parisienne se sont équipés du matériel et du logiciel ChatterMaster pour les utiliser avec leurs élèves. Le lycée Jean-Dupuy, avec MM. Castaño, Segurier, Béard,



7 TP1 : rigidité outil



8 TP3 : rigidité pièce

Bironneau, a été le premier lycée à se lancer dans cette démarche pédagogique innovante ; il a donc servi de référence aux autres lycées. Voyons donc les activités pédagogiques réalisées.

Des TP de 1^{re} année de BTS IPM

En introduction, les professeurs présentent généralement quelques documents illustrés et une séquence d'autoformation [6](#), proposés via Internet, permettant à chaque élève d'intégrer les notions et calculs de base à leur propre rythme. Cette séquence interactive a été réalisée conjointement par Lionel Arnaud, de la société Vibration, et Damien Renou, de la société Ange Softs. Elle dure un peu moins d'une heure et comprend des illustrations, films, questions et calculs au sujet des quatre paramètres clefs. Puis des TP sont proposés aux élèves.

TP 1 : rigidité outil

Ce premier TP consiste à mettre en charge un outil avec un dynamomètre, et à mesurer sa flexion avec un comparateur [7](#).

Avec cette expérience simple, les élèves « voient » la flexion d'un outil, par le comparateur qui bouge lors de la mise en charge. Dans le cas où une rigidité de pièce est mesurée, les élèves apprécient de pousser simplement à la main, éventuellement avec des gants, et d'observer la déformation. C'est même parfois une révélation pour ceux qui connaissent le phénomène, mais ne l'ont jamais analysé aussi simplement.

Ce TP permet de quantifier la rigidité, qui est un paramètre fondamental pour limiter les vibrations d'usinage, de comparer les rigidités pour différents diamètres et longueurs de sortie d'outil, puis éventuellement de comparer différents porte-outil entre eux, en définissant des protocoles adaptés. Cela conduit à des enseignements aussi utiles aux élèves qu'aux industriels. L'image [7](#) montre une comparaison faite pour toute sorte de porte-outil, pour un même outil, de la même longueur de sortie. N'hésitez pas à contacter

Bruno Segulier (bruno.seguier@ac-toulouse.fr), du lycée Jean-Dupuy, qui se fera un plaisir de vous communiquer les résultats obtenus ; c'est instructif... et parfois très contre-intuitif.

Il a été constaté par les professeurs qu'après ce TP les élèves réalisent (enfin) l'importance de la longueur de sortie de l'outil, et l'intègrent en FAO alors que l'outil n'est qu'une représentation sur l'écran. Rien que pour cela, ce TP est très bénéfique.

TP 2 : rigidité pièce

Un TP similaire pour la rigidité des pièces à parois plus ou moins minces est aussi réalisé, ce qui permet de diagnostiquer lequel de la pièce ou de l'outil est le plus souple, et ensuite de choisir les actions les plus appropriées pour gagner en rigidité, en renforçant en priorité le maillon faible du système usinant.

TP 3 : stratégie d'usinage et rigidité pièce

L'objectif de ce TP est d'aller plus loin dans la démarche d'amélioration de la rigidité, en exploitant la stratégie d'usinage d'une pièce taillée dans la masse pour maximiser cette rigidité.

Il est tout d'abord mis en œuvre une première stratégie d'usinage : une ébauche générale de la paroi suivie d'une finition sur toute la hauteur pour éliminer les marques d'usinage [8](#). Dans ce cas, la finition se passe en général très mal, avec des vibrations très prononcées, et il peut être expliqué par le professeur que divers essais à différentes conditions de coupe ont tous conduit au même résultat. Les TP précédents, de rigidité d'outil et de pièce, peuvent venir alimenter l'analyse de ce TP3. En pratique, la rigidité de la pièce est ici très inférieure à celle de l'outil, et très insuffisante pour l'opération visée (résultat que peut donner le logiciel ChatterMaster).

Une seconde stratégie est alors proposée aux élèves, avec ébauche et finition niveau par niveau, afin d'augmenter la rigidité jusqu'à la valeur requise.

Avec une simulation simplifiée [9](#), les élèves trouveront rapidement le meilleur compromis. L'objectif est ici de rigidifier la paroi en l'ébauchant et en la finissant par niveaux de hauteur H. Il s'agit d'obtenir la rigidité visée pour l'opération sans significativement dépasser la rigidité de l'outil, car cela multiplierait le nombre de petites passes sans apporter un vrai gain sur la rigidité globale du système.

Ce TP sensibilisera les élèves à l'importance de la stratégie d'usinage sur la rigidité et donc la stabilité de la pièce en usinage. Le critère de rigidité est quantifié et comparé à celui de l'outil afin de déterminer l'optimum à viser. Plus généralement, cela incite les élèves à maximiser la rigidité sur toute la gamme d'usinage, et leur permet de faire des choix sur la chronologie des opérations.

En pratique, le fait de maîtriser la rigidité peut autoriser à se passer de la phase de finition. En effet, quand la rigidité est telle que la flexion est négligeable vis-à-vis de

2.3 Raideur de la pièce

Donnez la valeur calculée de la raideur de la pièce
N/micron

Spécifiez la source et/ou l'indice de confiance
Ne sais pas 100 %

Si par contre vous avez une valeur mesurée, veuillez la renseigner dans le module 3.3.

Si vous ne connaissez pas la valeur de la raideur de l'ensemble pièce/porte pièce, nous allons l'estimer ci-dessous.

Sinon : Estimation de la raideur de la paroi mince :

Similitude de l'illustration avec la pièce réelle 100 %

Votre pièce présente une courbure :
(à comparer avec l'épaisseur «e»)
Nulle (plaque plane ou quasi)

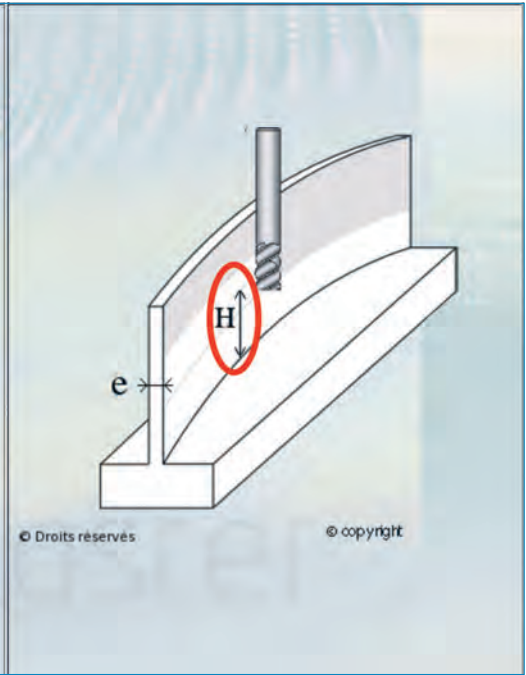
Hauteur «H» mm

Épaisseur «e» de la paroi mm

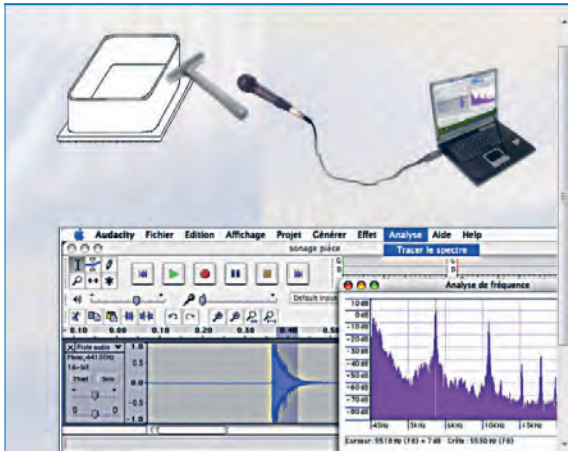
Précisez le matériau usiné
Aluminium

Uniquement si connu précisément, donnez le module de Young du matériau usiné GPa (Acier 210, Alu 70) 0 %

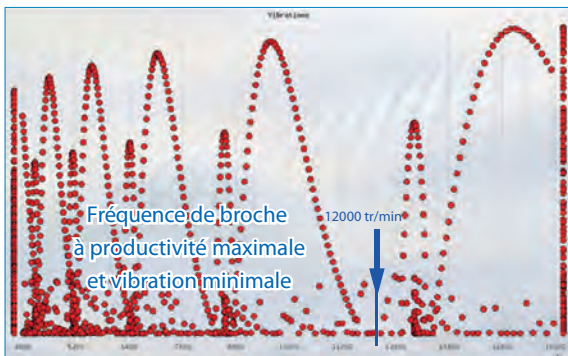
déposé MKDH93 Copyright France.com



9 Le calcul de rigidité d'une pièce à paroi mince avec le logiciel ChatterMaster



10 Analyse fréquentielle avec le logiciel Audacity



11 Fréquence de rotation minimisant les vibrations

la précision demandée, la phase de finition n'apporte pas une meilleure qualité sur la dimension finie – ce qui incite à une réflexion systématique sur le découpage classique ébauche, demi-finition, finition, qu'il faut réinterpréter avec la notion de rigidité et de flexion, pour l'optimiser.

TP 4 : fréquence de vibration et rotation optimale

Les élèves sont amenés à utiliser un logiciel *open source*, Audacity 10, que certains pratiquent déjà pour enre-

gistrer et traiter des fichiers sonores de type MP3. Il présente l'avantage de permettre d'analyser très facilement les fréquences, soit à partir d'un simple microphone si les vibrations s'entendent bien soit à partir d'un accéléromètre piézoélectrique USB.

Le TP consiste dans un premier temps à usiner la pièce avec les conditions préconisées pour le couple outil-matière et à constater le problème vibratoire qui détériore l'état de surface. Il s'agit ensuite de déterminer s'il existe une vitesse de rotation optimale. L'élève « sonne » une pièce, et en déduit sa fréquence naturelle de vibration, ainsi que son amortissement, éventuellement. Puis la mesure est réalisée sur l'outil, en utilisant cette fois l'accéléromètre. L'élève produit alors avec le logiciel ChatterMaster des graphes prédisant le niveau vibratoire en fonction de la vitesse de rotation, pour l'outil et pour la pièce, en intégrant les informations sur la rigidité précédemment mesurée dans les autres TP 11. En fonction des résultats, il déduit s'il existe une vitesse de rotation optimale, et il refait l'usinage. Ici, en passant de 10 000 tr/min à 12 000 tr/min, on obtient moins de vibrations avec une productivité plus grande. Au passage, on constate qu'un plan d'expériences n'aurait pas garanti que l'on trouve la vitesse de rotation idéale sans vibrations : la fenêtre de tir est parfois très étroite (ici ± 200 tr/min), et ce sont des dizaines de tests qu'il aurait fallu mener pour y arriver. De plus, cette méthode permet de constater que parfois aucune vitesse optimale n'existe, et qu'il faut donc uniquement travailler sur les autres leviers.

Des projets de 2^e année de BTS IPM

Après avoir été sensibilisés en 1^{re} année par ces TP, les élèves seront éventuellement amenés à mettre en place des méthodes et des essais pour résoudre ce type de problèmes en projet de 2^e année.

Près de la moitié des élèves sont confrontés aux problèmes de vibrations d'usinage lors de leur projet



12 Exemples de problématiques en projet



13 Le logiciel MACHpro, simulant forces x-y-z, flexions, vibrations, pendant l'usinage

de qualification de processus, qu'il s'agisse de parois minces, de pièces déformables ou d'outils longs 12. L'application de la méthode ChatterMaster, en se basant sur les rigidités et les fréquences de vibration des différents éléments, permet de limiter les vibrations d'usinage tout en maximisant la productivité.

Pédagogiquement, la rigidité est l'élément le plus important pour commencer, orientant fortement les choix de la gamme d'usinage. L'élève est poussé à comparer les différentes stratégies en fonction de la rigidité de l'outil et de la pièce, soit par mesure soit par calcul. Ensuite, en cas de vibrations lors des premiers tests, les mesures de fréquence permettent de déterminer la vitesse de broche la plus productive sans vibrations, comme indiqué sur le graphe 11.

Les plus avancés, maîtrisant la flexion de l'outil ou de la pièce, pourront valider ou invalider le besoin de décomposer en ébauche, demi-finition ou finition, ce qui enrichira les discussions et guidera les élèves les plus novices en usinage.

Conclusions et perspectives

Le problème des vibrations d'usinage est ainsi abordé méthodiquement, en parfaite cohérence avec le référentiel

de BTS, apportant une méthode pratique se basant sur l'analyse de la rigidité et des fréquences.

La rigidité est calculée ou mesurée avec des moyens simples, côté pièce et côté outil, puis comparée à des valeurs de référence afin de déterminer si elle est insuffisante, à peine suffisante ou largement suffisante pour l'opération visée. Cette analyse permet de faire des comparaisons, des choix, de proposer des améliorations et de vérifier qu'elles sont effectives. Tout cela aide efficacement les élèves dans le choix d'une gamme d'usinage efficace, assurant la rigidité juste nécessaire. Les fréquences de vibration sont mesurées simplement, et permettent de trouver les vitesses de rotation évitant les vibrations tout en maximisant la productivité.

Si besoin, l'analyse méthodique peut être étendue aux deux autres paramètres clés pour les vibrations, à savoir l'amortissement et les efforts de coupe, ce qui permet de s'adapter à toutes les situations.

Cette approche méthodique a déjà été transmise en 2014 à tous les professeurs enseignant en STS IPM de l'académie de Toulouse ainsi qu'à ceux de trois établissements de la région parisienne, qui ont acquis le matériel de mesure nécessaire et ont suivi une formation pratique de deux jours.

Le lycée Jean-Dupuy à Tarbes a été précurseur sur l'application pédagogique de cette méthode, initialement uniquement industrielle, et il a fortement contribué à l'adapter au contexte du BTS IPM. Il s'est maintenant engagé à ajouter une corde à son arc en utilisant le logiciel MACHpro permettant de simuler les engagements outil, les efforts x-y-z, les flexions et les vibrations tout le long de la trajectoire outil 13. Pédagogiquement, il s'agit d'aider les élèves à visualiser les contacts outil-pièce et les efforts générés, pour analyser et corriger leurs programmes d'usinage. Ainsi, en ébauche, ils pourraient rapidement vérifier que les efforts restent acceptables pour l'outil et la machine, et détecter de façon autonome leurs erreurs de programmation. En finition, ce serait la flexion outil qui serait surveillée, pour vérifier que l'outil ne fléchit pas trop et garantit la cote finale. Enfin, une optimisation globale est possible, par régulation et optimisation automatiques de l'avance à la dent, tout le long de l'usinage, garantissant par exemple un effort radial constant. Cette nouvelle approche, simulant l'usinage, aiderait des élèves avec peu d'expérience pratique de l'usinage à détecter leurs erreurs et à réaliser des programmes optimisés en matière de débit copeau et de précision. ■

En ligne

Films et illustrations sur les vibrations d'usinage :

www.vibration.fr

Retrouvez tous les liens sur <http://eduscol.education.fr/sti/revue-technologie>