



Lionel ARNAUD
Enseignant-Chercheur, ENI Tarbes
Dirigeant de VIBRACTION

Vibrations d'usinage : la bête noire de l'usinage

Présentation du Laboratoire de Génie de Production (LGP)

Le laboratoire de Génie de Production (LGP) de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (ENIT), composé de 50 enseignants-chercheurs et de 50 doctorants, effectue ses recherches dans les domaines de la production automatisée, la modélisation mécanique des structures, des process, des matériaux et des interfaces.

Le LGP étudie notamment les vibrations d'usinage, par simulation et par mesures (vibrations et caméras 3D) sur ses centres d'usinages, en particulier un centre 5 axes avec broche à paliers magnétiques actifs. Son savoir-faire sur le domaine des vibrations d'usinage l'a conduit à de nombreuses actions de recherche et de transfert de technologie et récemment à la commercialisation d'un logiciel, par le lancement d'une *start-up* [1].

Historique des vibrations d'usinage

Dès le début du 20^e siècle, Frederic Winslow Taylor [2] voyait déjà les vibrations d'usinage comme « le plus obscur et délicat problème de tous ceux que doit affronter l'usineur, et dans le cas des pièces de formes complexes, il semble qu'il n'y ait aucune règle ou formule qui puisse guider l'usineur pour limiter les vibrations ». En 2010, ce constat est toujours vrai et les vibrations sont encore la bête noire des usineurs.

Après la Deuxième Guerre mondiale, les efforts des scientifiques [3] [4] [5] [6] ont permis de jeter les premières bases de compréhension du phénomène, pour le tournage, et de déterminer scientifiquement quelques règles pour limiter les vibrations. En particulier, les fameux « lobes de stabilité » qui font apparaître un domaine sans vibration avec en abscisse la fréquence de rotation et en ordonnée l'engagement outil, ou plus exactement le ratio « raideur du contact outil-pièce sur raideur outil ». Ce diagramme est toujours largement utilisé, car il permet de trouver rapidement une vitesse de rotation et un engagement outil sans vibrations. Chaque courbe, appelée lobe, est liée à un mode particulier

de vibration. Ainsi pour avoir un usinage sans vibration, il suffit de se situer en-dessous de toutes les courbes. L'adaptation de cette théorie des lobes au cas du fraisage, beaucoup plus complexe à modéliser, conduit en pratique à remplacer la fréquence de rotation de la pièce par la fréquence de passage de dent. À partir des années 60 et jusqu'à nos jours, l'essor scientifique a permis de développer de nombreuses méthodes théoriques et pratiques pour affiner l'analyse et les prédictions ([7] et [8] sont des ouvrages de synthèse). En pratique, l'utilisation du graphe des lobes de stabilité précédent permet de calculer efficacement, à partir de mesures (figure 1) ou uniquement par simulation, la meilleure vitesse d'usinage pour limiter les vibrations.

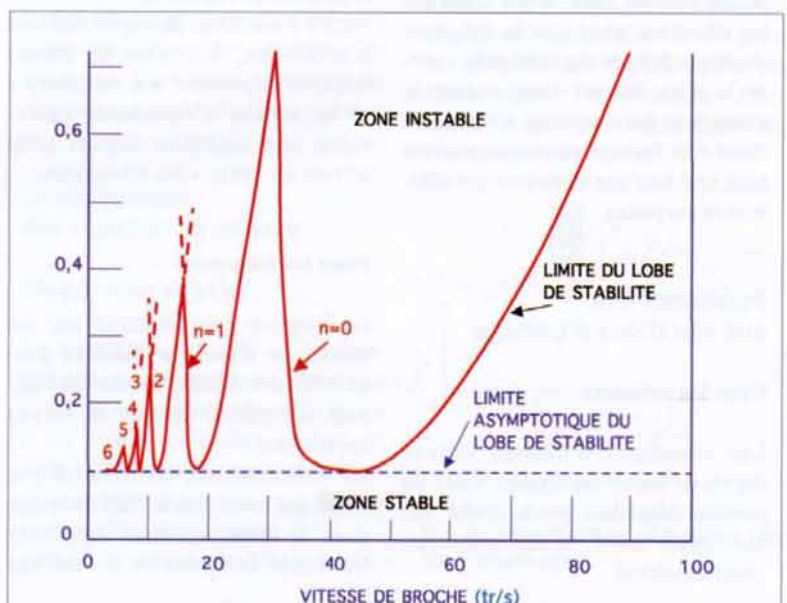


Fig. 1 : Lobes de stabilité



Fig. 2 : Mesure des vibrations par sonnage

Toutes ces études, théoriques et pratiques, ont ainsi contribué à développer un arsenal pour lutter contre les vibrations d'usinage : kits de sonnage (figure 2) et de tracé des lobes de stabilité, porte-pièces et porte-outils amortissant, outils à dentures décalées, stratégies d'usinage anti vibrations.

Malheureusement, sur le terrain, ces outils peinent à éliminer les vibrations, le tâtonnement et l'expérience restent les fondamentaux de l'usineur face aux vibrations.

Ainsi, l'utilisation d'élastiques ou de pièces en bois pour tenter d'amortir les vibrations, ainsi que la réduction drastique de la productivité pour « sortir la pièce bonne » sont encore le quotidien des usineurs. Comme le disait déjà Taylor, l'usineur est souvent bien seul face aux vibrations qui détériorent ses pièces.

Problèmes liés aux vibrations d'usinage

Pour les usineurs

Les vibrations d'usinage engendrent, de façon récurrente, états de surface dégradés, productivité faible, casse outil, bruits pénibles, usure machine.

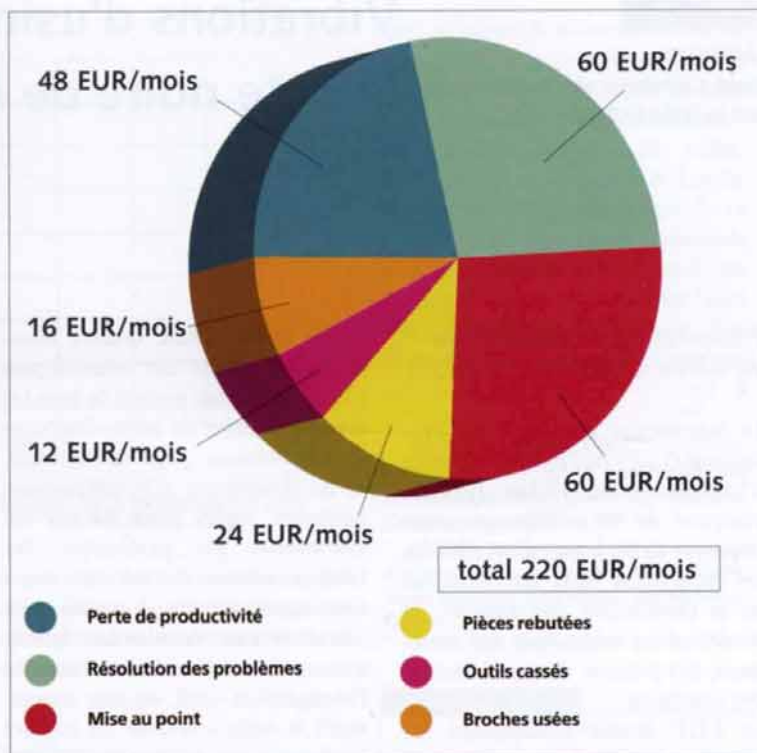


Fig. 3 : Coûts d'usinage associés aux vibrations

Les coûts associés, évalués au minimum à 200 euros par mois et par centre d'usinage, sont détaillés sur le graphique (figure 3).

À ceci s'ajoutent, de façon difficile à quantifier, les refus de pièces déclarées *a priori* « non rentables » et les années d'expérience nécessaires aux nouvelles recrues pour arriver à « gérer » les vibrations.

Pour les forgerons

Le forgeron est concerné par les vibrations d'usinage dans sa production d'outillages et lors de l'usinage des pièces (en interne ou par ses clients).

La réalisation des matrices est une étape qui prend beaucoup de temps pour le forgeron. Pour supprimer les délais additionnels à l'usinage

(c'est-à-dire trempe et polissage), il est devenu courant d'usiner la matière dans l'état trempé (jusqu'à 55 HRC) et de viser un quasi poli miroir; ce qui rend la tâche de l'usineur encore plus difficile.

■ Lors de l'ébauche, la maximisation de la productivité conduit à des efforts de coupe très importants et il est courant que des vibrations de la machine elle-même apparaissent. L'usinage doit être réalisé sur des machines-outils très rigides, donc coûteuses.

■ Lors de la finition, les outils utilisés sont de plus petit diamètre pour s'adapter aux détails de forme requis. Cela conduit cette fois à des vibrations d'outils qui sont d'autant plus gênantes que la surface finie doit être la plus lisse possible, donc



Fig. 4 : Matrice

sans vibrations. Ces usinages de finition durent ainsi de longues heures pour atteindre la qualité demandée.

■ Les pièces forgées sont habituellement usinées pour réaliser les surfaces fonctionnelles. Pour atteindre ces surfaces, il peut être obligatoire ici aussi d'utiliser des outils relativement longs et fins, ce qui conduit à des problèmes de vibration (figure 5).

■ Les tolérances de forme inhérentes à tout procédé d'obtention de composants bruts conduisent à des variations parfois importantes (selon les procédés) des surépaisseurs à usiner, typiquement du simple au double, ce qui est souvent un facteur déclenchant des vibrations d'usinage. Ainsi, quand le balancement d'une pièce conduit à des prises de passe excessives, l'outil coupant se met à vibrer et l'état de surface obtenu est dégradé.

■ De nombreuses pièces ont vocation à être les plus fines possible. Lors de leur usinage, ces pièces se mettent facilement à vibrer, ce qui détériore la surface obtenue. Ainsi, parfois c'est uniquement l'usinabilité sans vibration qui limite la réalisation de certaines pièces, c'est-à-dire qu'on ne fait pas les pièces aussi fines qu'il le faudrait, car on ne sait alors plus les usiner. Là encore, les vibrations diminuent la rentabilité des pièces.

Le phénomène des vibrations d'usinage

Les principes de base

La modélisation simple et générale permettant d'expliquer les vibrations d'usinage est représentée sur la figure 6. La liaison de la pièce au bâti est définie simplement par sa rigidité et son amortissement (on peut raisonner de même avec l'outil).

L'effort de coupe est défini en pre-



Fig. 5 : Vibrations liées aux dimensions des outils

mière approximation par un effort simplement proportionnel à la section de copeau enlevée.

On peut comprendre naturellement que lorsque l'outil rentre et sort de la matière, cela génère des vibrations. Ceci est vrai, mais cette source de vibration est généralement mineure. Ce qui pose vraiment problème, ce sont les vibrations qui s'accroissent spontanément à chaque passage de l'outil. Il faut en effet savoir qu'il y a toujours des vibrations pendant l'usinage, même infimes. Ainsi, quand l'outil passe sur les vibrations laissées par le passage précédent, on peut distinguer deux situations caractéristiques : soit il y a moins de vibrations au passage suivant, soit il y en a plus. On dit alors que le phénomène est stable quand les vibrations diminuent, ou qu'il est instable quand les vibrations s'accroissent.

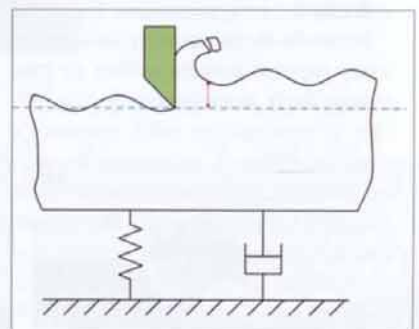


Fig. 6 : Modélisation simple des vibrations d'usinage

Il a été montré que ce qui fait qu'un usinage donné est stable (sans vibrations) ou instable (avec vibrations fortes) dépend principalement de la fréquence de passage de l'outil et de la longueur de l'arête de coupe en contact. Ces deux paramètres correspondent sur le diagramme des lobes de stabilité à l'abscisse et à l'ordonnée. Ainsi, pour savoir si l'usinage sera stable ou instable, il suffit de savoir si sur le diagramme on se situe en-dessous de toutes les courbes (usinage stable) ou en-dessus de l'une d'elles (usinage instable).

Cette approche, relativement simple, permet de prédire les conditions à utiliser, quand on a tous les paramètres, ou de servir de guide, quand on ne connaît que certains paramètres. En pratique, il y a toujours certaines fréquences où l'usinage se passe bien mieux qu'à d'autres. Sur le diagramme précédent, on voit qu'à une fréquence de 30 Hz (en abscisse), on peut beaucoup plus engager l'outil dans la pièce qu'à une fréquence de 40 Hz.

Les surfaces « vibrées »

Les états de surface obtenus font apparaître de nombreux motifs. Pour illustration, considérons 3 exemples classiques (figure 7) :

■ **cas 1** : imaginons que les vibrations de la pièce sont très lentes par rapport à la fréquence de passage de la dent de coupe. La sur-

face obtenue est alors illustrée sur la figure 7-A.

Ceci dit, si la fréquence de vibration est proche de la fréquence de passage de dent, c'est-à-dire si les deux sont presque en phase, on obtiendra un résultat similaire. De même, si la fréquence de vibration est proche du double ou du triple de la fréquence de dent.

On voit ici que cela est déjà plus compliqué qu'il n'y paraît, car un même état de surface peut correspondre à plusieurs fréquences possibles.

■ **cas 2** : imaginons maintenant que les vibrations de la pièce sont un peu moins lentes qu'auparavant. La surface obtenue fait apparaître alors des traces beaucoup plus resserrées, figure 7-B.

Là aussi cela se complique si l'on considère que l'on peut avoir le même état de surface avec une fréquence de vibration un peu supérieure à deux ou trois fois la fréquence de dent.

Il y a encore quelque chose à remarquer avec ces deux illustrations : c'est que ce qui n'apparaît en pratique à l'œil nu que comme une marque qui aurait pu être faite par un seul coup de dent, est en réalité la conséquence de plusieurs coups de dent successifs qui ont généré une ondulation.

■ **cas 3** : imaginons maintenant que la fréquence de vibration est précisément égale à deux fois la fréquence de dent. Dans ce cas,

illustré figure 7-C, il est possible que seulement une dent sur deux coupe vraiment la matière, l'autre passant dans le vide.

Cette situation est néfaste pour l'outil, qui souffre beaucoup plus. En pratique elle est difficile à repérer, car ce n'est pas toujours la même dent qui usine, et tout ce que l'on constate c'est que l'outil s'use beaucoup plus vite que d'habitude.

Les vibrations d'usinage sont un phénomène très riche et difficile à maîtriser, car influencé par presque tous les paramètres du process. Ce n'est pas pour rien que c'est la « bête noire » des usineurs depuis plus d'un siècle.

4 facteurs clefs et 40 paramètres

Les facteurs raideur, amortissement, force et fréquence correspondent en pratique pour l'usiner à de nombreux leviers à sa disposition :

■ **raideur** : outil, porte-outil, pièce, porte-pièce, axes machine, etc.

■ **amortissement** : matériau outil et détails de forme, porte-outil, porte-pièce, etc.

■ **force** : angles de coupe, matériau d'outil, stratégie d'usinage, etc.

■ **fréquence** : rotation outil, nombre de dents, répartition des dents, etc.

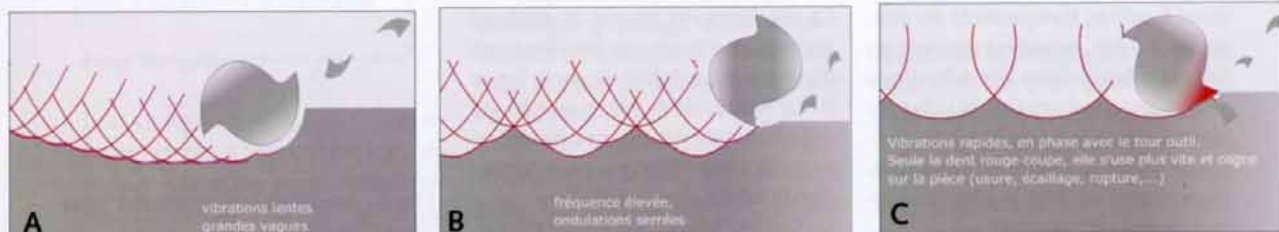


Fig. 7 : Profils de surface obtenus avec différents types de vibrations

Ensuite, pour actionner n'importe lequel de ces leviers, plusieurs paramètres techniques sont disponibles, par exemple pour augmenter la raideur de l'outil :

- diamètre outil plus important,
- longueur de sortie réduite,
- matériaux plus rigides (ex. carbure de tungstène),
- porte-outils plus rigides (ex. fretés),
- attachements machine plus rigides,
- etc...

De même, il existe de nombreuses possibilités pour mieux amortir, pour réduire l'impact de la force de coupe et pour modifier les fréquences en jeu.

Ainsi, l'usineur a l'embarras du choix avec au total pas moins de quarante possibilités techniques pour un process donné. Ce qui lui manque le plus actuellement c'est un outil d'aide pour trouver rapidement le coupable et agir sur les leviers les plus efficaces dans chaque contexte.

En ce qui concerne les perspectives, deux révolutions sont à l'horizon. Premièrement, il y a la simulation numérique qui permettra un jour de modéliser de façon fiable le phénomène de vibration d'usinage. Deuxièmement, il y a le contrôle actif des machines-outils qui sera un jour capable d'agir rapidement (0,001 seconde) contre les vibrations. Bien que de nombreux laboratoires de par le monde y travaillent, et no-

tamment le LGP avec ses compétences de simulation numérique et sa machine-outil à paliers magnétiques actifs (temps de réaction 0,001 seconde), il faudra encore plusieurs années avant d'aboutir à des solutions industrielles.

La méthode ChatterMaster

Le travail du LGP, depuis 10 ans, a conduit récemment au lancement d'un logiciel novateur dédié aux vibrations d'usinage, fruit de l'articulation de modèles mécaniques de l'usinage (15 modèles) et de règles métier (100 règles).



La méthode proposée se déroule en 3 étapes claires :

- formaliser le problème,
- effectuer quelques calculs et mesures simples pour déterminer la source du problème et quantifier les paramètres clés,
- proposer des solutions concrètes, adaptées à la situation, et guider

l'usineur dans l'optimisation du *process*.

Les éléments clés de cette approche sont notamment la prise en compte simultanée de tous les paramètres de l'usinage afin de déterminer les meilleurs leviers et les meilleures solutions techniques.

Le fait est que c'est une approche rapide et simple à mettre en œuvre, dans le langage naturel de l'usineur, avec des procédures de mesure simples qui ne prennent pas plus de 5 minutes chacune.

Cette méthode a déjà été appliquée avec succès dans de nombreux domaines (aéronautique, automobile,

mécanique générale), aussi bien pour l'unitaire que la grande série, en amont de la production jusqu'à la résolution de problèmes en urgence. Considérons pour illustration un cas récemment traité.

La situation était la suivante : « lors de la réalisation de moules de petites dimensions, nous avons très souvent des problèmes d'état de surface ou de casse outil nous obligeant à prendre d'innombrables précautions et parfois à reprendre ou refaire la pièce. »

L'utilisation de cette méthode a alors permis à l'usineur d'être méthodique et efficace, d'apprendre à anticiper vraiment les problèmes en quantifiant les paramètres clés (raideurs, fréquences, forces) avant l'usinage. Quand un problème apparaît, en amont ou à chaud, l'outil logiciel permet de trouver rapidement la meilleure solution et aussi de capitaliser et de former tous les intervenants sur ces aspects.

Conclusion

Ainsi, en attendant l'avenir idyllique du "tout simulation" et des machines intelligentes, le choix a été fait de synthétiser tout le savoir-faire disponible dans un même outil, de façon pragmatique, pour venir en aide à l'usinage maintenant.

En production mécanique, tout acteur de la chaîne de valeur est confronté directement ou indirectement aux vibrations d'usinage, avec des conséquences importantes pour ses fournisseurs et ses clients, et un impact potentiel sur les délais et les coûts. ■

Références bibliographiques

- [1] ChatterMaster®, logiciel développé et commercialisé par la société VIBRACTION, www.vibration.fr
- [2] Fred. W. Taylor, *On the art of cutting metal*, *Transaction of ASME*, 28, 31-350, 1907.
- [3] M. E. Merchant, *Basic mechanics of the metal-cutting process*, *Journal of applied physics*, 16, 267-275, 1945.
- [4] S.A. Tobias, W. Fishwick, *Theory of regenerative machine tool chatter*, *Engineer, London*, 205, 199-238, 1958.
- [5] H.E. Merritt, *Theory of self-excited machine tool chatter*, *ASME 64-WA-Prod-13*, 1964.
- [6] H. Optiz, F. Bernardi, *Investigation an calculation of the chatter behaviour of lathes and milling machines*, *Annals of the CIRP*, 18, 335-343, 1970.
- [7] Cheng K., *Machining dynamics*, Springer, 2008.
- [8] CETIM, Guide méthodologique des vibrations en UGV, CETIM, 2006.

ENGLISH

Machining Vibration

National School of Engineers of Tarbes (ENIT LGP laboratory of the) gave rise to VIBRACTION, company developing the ChatterMaster software, dedicated to machining vibrations reduction. Machining vibrations problems cost more than 200 euros per machining center each month. The main phenomenon mainly occur on poorer machined surface finish, increased tools wear or breakage and sometimes unbearable whistles. The phenomenon of machining vibrations is very difficult to control due to the number of parameters involved (original illustrations are given in the article). After ten years of research and 3 years of intensive programming and workshop tests, the ChatterMaster software was born. It articulates about fifteen mechanical models of machining with a hundred rules, integrated in an interface using the natural language of the machinist.