

# INTRODUCTION

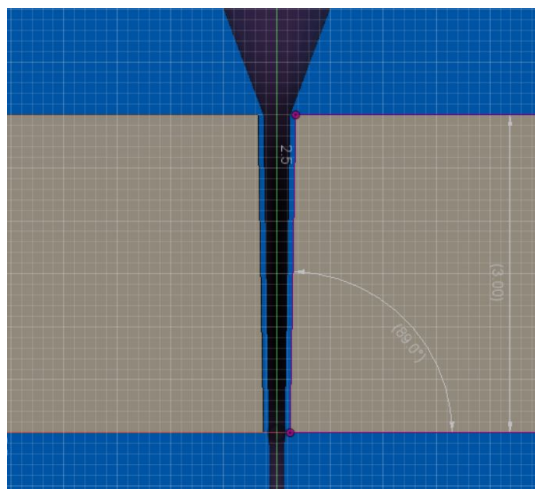
L'équipe Mako est issue du mouvement des Fablabs et des Makers. Nous avons donc jugé utile d'explorer les techniques de transformation des matériaux les plus souvent exploités dans les espaces Maker. Cet article portera sur les effets de la découpe et de la gravure au laser de PMMA (Polyméthacrylate méthyle) clair. Dans les semaines à venir, nous nous concentrerons sur le MDF (panneaux de fibres à densité moyenne), le PMMA coloré et le contreplaqué.

L'un des aspects les plus compliqués à prendre en compte lors de la découpe au laser est le délicat équilibre entre vitesse de translation et puissance du laser. Nous voulons couper le plus rapidement possible, mais y a-t-il des moments où il est préférable de ralentir ? La réponse courte est : "oui, absolument".

Nous allons partager avec notre communauté de makers les effets de la vitesse et de la puissance sur la largeur de coupe, l'angle de coupe et la profondeur de gravure. Ce sera la première édition d'une série d'articles à venir.

## Alors qu'est-ce que nous faisons, exactement ?

Tout "fabricant de laser" le sait : les deux paramètres les plus importants lors du calibrage d'un laser sont la vitesse de translation et la puissance du laser. D'autres paramètres tels que la résolution, la direction de gravure et la fréquence auront également une incidence sur le rendu final, mais aucun ne sera si critique que les deux les plus importants. Nous déterminerons dans quelle mesure ces deux paramètres ont un comportement prévisible sur la qualité de la coupe. Plus précisément, lorsque nous coupons un morceau de matériau, nous remarquons que le trait de scie, ou l'épaisseur de la coupe, dépend de l'énergie globale que nous focalisons sur un point de la surface de travail.



Un rayon laser perçant un matériau de 3 mm d'épaisseur donne un angle de 1 à 3 degrés et une largeur de trait de 0,25 mm.

Pour une première approximation en 2D, nous avons défini ce niveau d'énergie comme étant la puissance du laser x la surface focale du laser divisée par la vitesse de translation.

$$J = \frac{P*d}{V}$$

Dans nos tests:

$$P_{max} = 80W$$

$$d = 250 \text{ micron}$$

$$V_{max} = 33 \text{ cm/s}$$

Notre expérience a été simple : avec «AutoDesk Fusion 360», nous avons dessiné une série de carrés de 5 mm sur 5 mm et découpé 10 exemples de ceux-ci en utilisant différents paramètres Energie. Chaque carré individuel a été mesuré avec un micromètre pour deux caractéristiques différentes :

1. **Largeur moyenne du kerf** : La largeur moyenne du kerf (l.m.k.) est la largeur du faisceau laser qui coupe dans la pièce fabriquée. Cette mesure est importante car elle doit être prise en compte dans la conception pour réaliser des jonctions serrées lors de l'assemblage de plusieurs pièces.

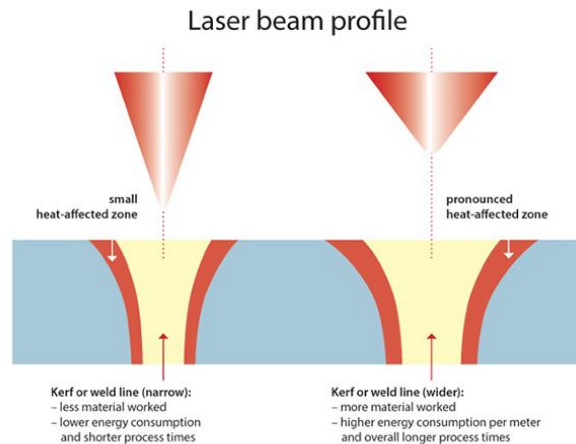
Expérimentalement nous avons déterminé la l.m.k. en mesurant les surfaces supérieure et inférieure de nos échantillons dans la direction X et dans la direction Y. La formule que nous avons utilisé pour la largeur moyenne du kerf est la suivante :

$$\text{Largeur du Kerf} = \frac{(\text{haut de X} + \text{haut de Y}) + (\text{bas de X} + \text{bas de Y})}{4}$$

2. **Angle moyen du kerf** : L'angle moyen du kerf (a.m.k.) est l'angle en forme de v du canal de combustion par rapport au faisceau laser. Expérimentalement, nous avons déterminé l'a.m.k. en mesurant la différence dimensionnelle entre la surface supérieure et les surfaces inférieures pour chaque échantillon. La formule utilisée pour l'angle de trait est la suivante :

$$\text{Angle du Kerf} = \text{Arctan} \left( \frac{(\text{haut de X} + \text{haut de Y}) - (\text{bas de X} + \text{bas de Y})}{2 * E} \right) \text{ où } E = \text{Epaisseur du Matériau}$$

Un deuxième test a été effectué. Nous avons gravé (par rastérisation) la surface des carrés de 5 mm x 5 mm tout en faisant varier les niveaux d'énergie et testé la quantité de matériau éliminée. Ce test nous a obligé à mesurer précisément l'épaisseur du matériau avant et après chaque test avec un micromètre de haute précision.



[Source: https://www.ophiopt.com/laser--measurement/knowledge-center/article/11347](https://www.ophiopt.com/laser--measurement/knowledge-center/article/11347)

Ce que nous montrons est une relation claire entre l'épaisseur de la coupe, l'angle de la coupe et de la profondeur de coupe et l'énergie laser. Au fur et à mesure que nous augmentons l'énergie, le faisceau laser conique brûlera le matériau de la surface de travail vers la base dans un volume cylindrique et créera donc des parois parallèles entre le trait de scie. Cependant, comme l'énergie sera beaucoup plus élevée, cela brûlera plus de matière et augmentera donc la tolérance globale dans le canal de coupe.

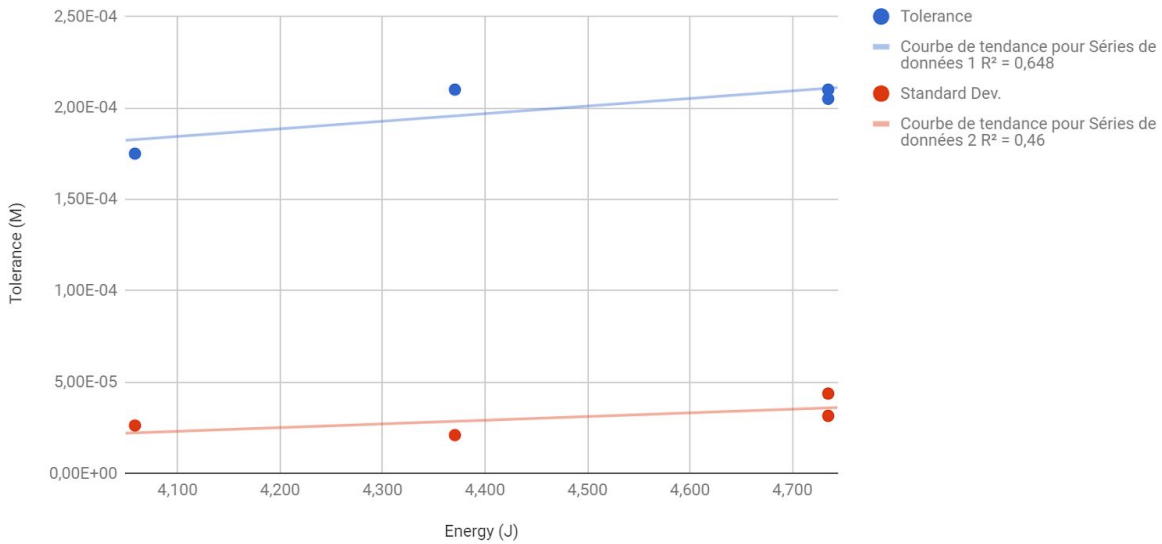
## RÉSULTATS

### Tolérance du Kerf :

La tolérance du kerf semble être assez prévisible et est liée au niveau d'énergie que nous concentrons sur la surface de travail. C'est très pratique car cela nous permet d'ajuster nos seuils de coupe en fonction du niveau de tolérance que nous recherchons !

Dans certaines limites, nous pouvons prédire la tolérance du Kerf en appliquant une équation linéaire simple. Cependant, nous devons faire attention car, comme nous pouvons le constater, plus nous concentrons d'énergie sur la zone de coupe, moins notre coupe sera précise. Lorsque nous commençons à fondre significativement le matériau dans la région localisée de la coupe, la nature liquide de la zone de coupe devient moins prévisible.

### Kirf-Tolerance in function of Energy (P/V) : 3mm Clear PMMA



$$Tol = 5.17 \times 10^{-5} * \left(\frac{P}{V} * d\right) - 3.5 \times 10^{-5}$$

Ou encore:

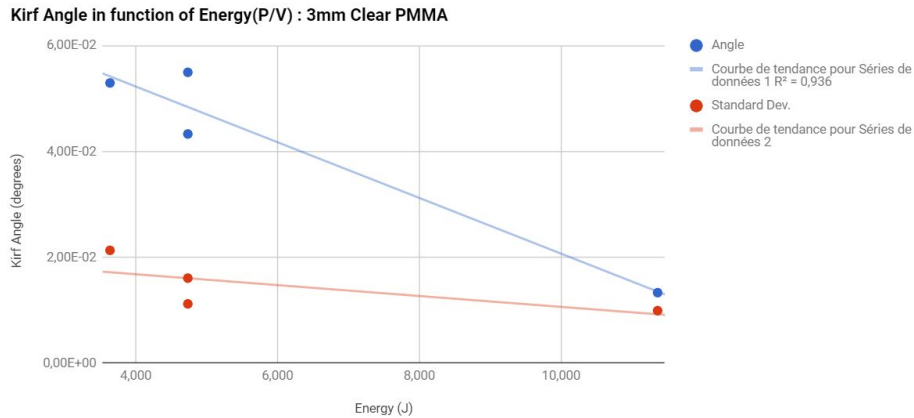
$$Tol = 5.17 \times 10^{-5} * \left(\frac{P}{V} * \left(\frac{X}{f} * \Delta z\right)\right) - 3.5 \times 10^{-5}$$

Où :  $X$  = diametre de la lentille ;  $f$  = distance focale ;  $\Delta z$  = Z hauteur de précision

Nous voyons que la tolérance est directement liée à la puissance et à la vitesse. De même, la taille, la distance focale de la lentille laser et la capacité de l'utilisateur à positionner précisément la hauteur en Z au-dessus de la surface de travail jouent un rôle important dans la précision de cette mesure. Cela sera expliqué plus en détail dans la section « Développements à venir » de cet article.

### Angle du Kerf :

Dans certaines limites, il est possible de prévoir l'angle du Kerf en appliquant une simple équation linéaire. Cependant, nous devons faire attention car, comme nous pouvons le constater, plus nous concentrons d'énergie sur la zone de coupe, moins notre coupe devient précise. Les tests effectués sur l'angle de trait sont beaucoup moins précis, car le groupe d'échantillons est beaucoup plus petit et il n'y a pas assez de données pour vérifier qu'il existe une relation linéaire entre l'énergie et l'angle de trait. Les calculs suivants expriment une solution linéaire pour l'ensemble de données que nous avons mesurés.



$$\text{Angle du Kerf} = 4.5 \times 10^{-3} * \left(\frac{P}{V} * d\right) + 6.5 \times 10^{-2}$$

Ou encore:

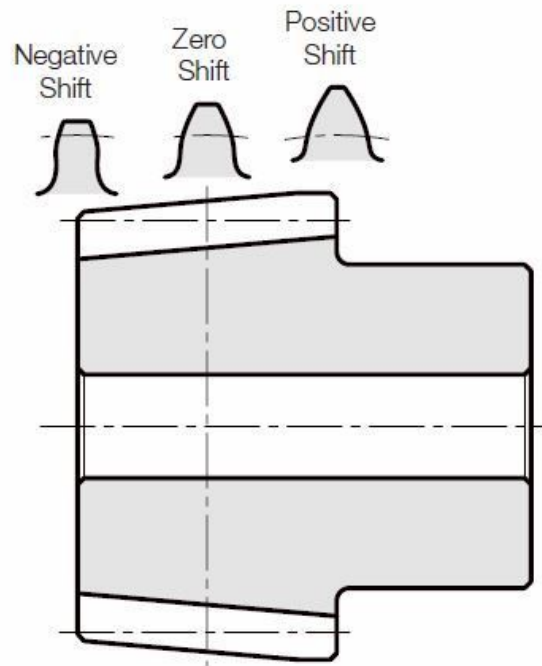
$$\text{Tol} = 4.5 \times 10^{-3} * \left(\frac{P}{V} * \left(\frac{X}{f} * \Delta z\right)\right) + 6.5 \times 10^{-2}$$

Où :  $X$  = diametre de la lentille ;  $f$  = distance focale ;  $\Delta z$  = Z précision de la hauteur

L'angle du kerf est également prévisible et lié au niveau d'énergie que nous concentrons sur la surface de travail. Ceci est peut-être généralement moins utile lors de l'usinage de pièces, mais il existe des cas très spécifiques dans lesquels il est très utile.

Exemple 1 (engrenages) :

Créer des engrenages : lors de la découpe au laser d'engrenages cylindriques, il est important de maintenir un décalage précis (afin de minimiser le jeu et d'assurer le contact des dents). Pour les engrenages à denture droite, il est également important de prendre en compte le profil de la dent. Comme le laser ne peut pas couper perpendiculairement à la surface, tous les engrenages droits coupés au laser sont en fait des « engrenages coniques ». Le profil de la dent sur la surface avant ne sera pas le même que celui du dos. Ce phénomène peut être totalement négligeable pour la plupart des applications pratiques, mais c'est certainement quelque chose dont il vaut mieux être consciente pour que des considérations puissent être prises en compte lors de la phase de conception.



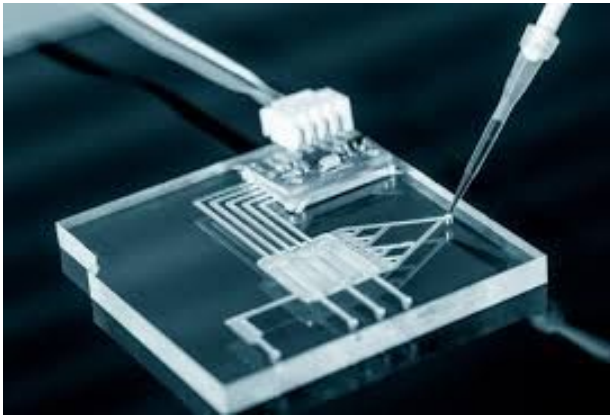
Tappered Spur gear Cross section

Source: [https://khkgears.net/new/gear\\_knowledge/gear\\_technical\\_reference/gear\\_backlash.html](https://khkgears.net/new/gear_knowledge/gear_technical_reference/gear_backlash.html)

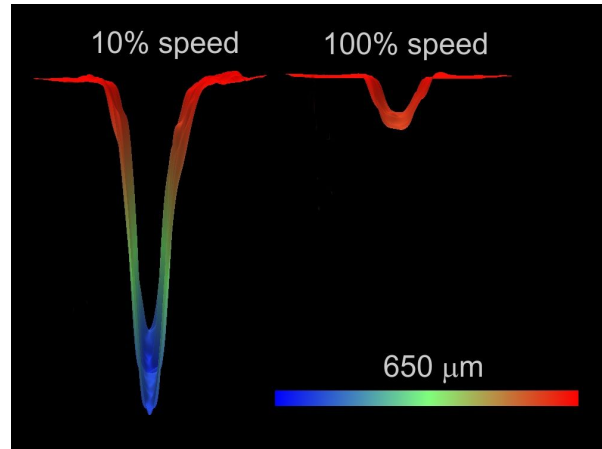
### Example 2 (Microfluidics):

George Whitesides définit la microfluidique comme « la science et la technologie des systèmes qui manipulent de petits volumes de fluides ( $10^{-9}$  à  $10^{-18}$  litres), en utilisant des canaux de la dimension de quelques dizaines de micromètres »<sup>1</sup>. Selon Patrick Tabeling, « on peut définir la microfluidique comme [une discipline] portant sur les écoulements de fluides simples ou complexes, mono ou multiphasiques, dans des microsystèmes artificiels, c'est-à-dire fabriqués à l'aide des nouvelles techniques ». - Wikipedia

En raison de l'échelle relative et de la cohérence requises pour la fabrication d'un système microfluidique, il est impératif de prendre en compte la géométrie capillaire, car elle aura un impact sur les performances du système.



lab-on-a-chip technology



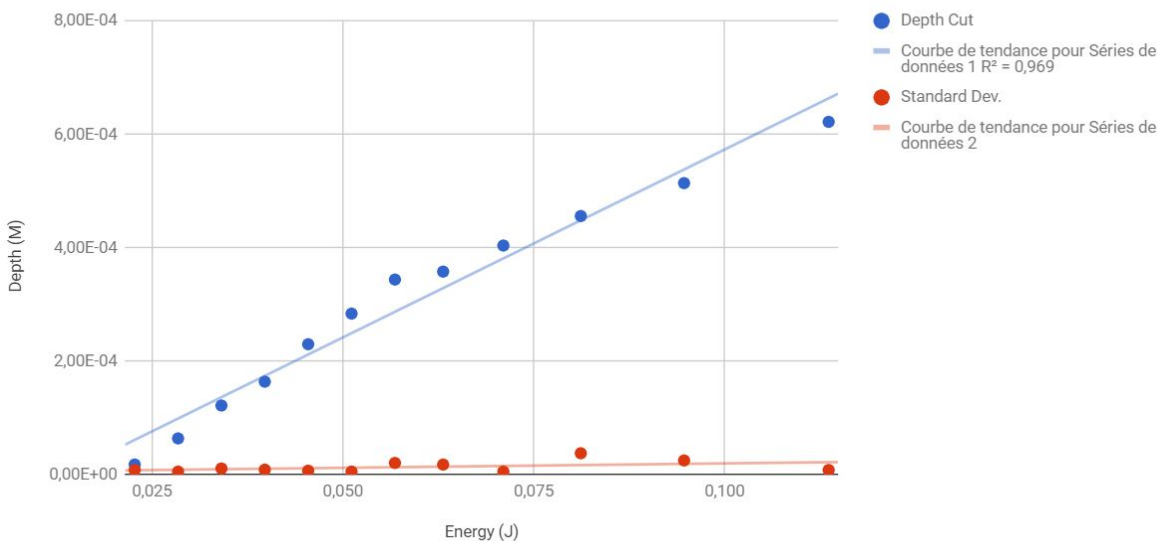
Microfluidic capillary cross-section

Il faut tenir compte de la section transversale du capillaire, dont les deux dimensions principales seront la profondeur et la réduction (voir figure). Les calculs proposés pour l'angle de dépouille pourraient permettre de développer des systèmes microfluidiques plus précises.

## Profondeur de coupe

La profondeur de coupe est très prévisible et liée au niveau d'énergie que nous concentrons sur la surface de travail, ce qui nous permet d'ajuster notre profondeur de gravure ainsi que nos paramètres de coupe pour différentes épaisseurs de PMMA.

Cut depth in function of Energy (P/V) : 3mm Clear PMMA



Les tests ont tous été réalisés à des niveaux d'énergie relativement bas, car nous voulions réduire l'impact de la fumée. Les tests à puissance plus élevée sont moins précis car nous avons une forte concentration de fumée qui reste dans le canal, ainsi

que la réfraction du laser contre les parois non parallèles du kerf. Les résultats de ces tests nous ont tout de même permis de nous situer dans les 10% des niveaux d'énergie requis pour couper des matériaux jusqu'à 6 mm.

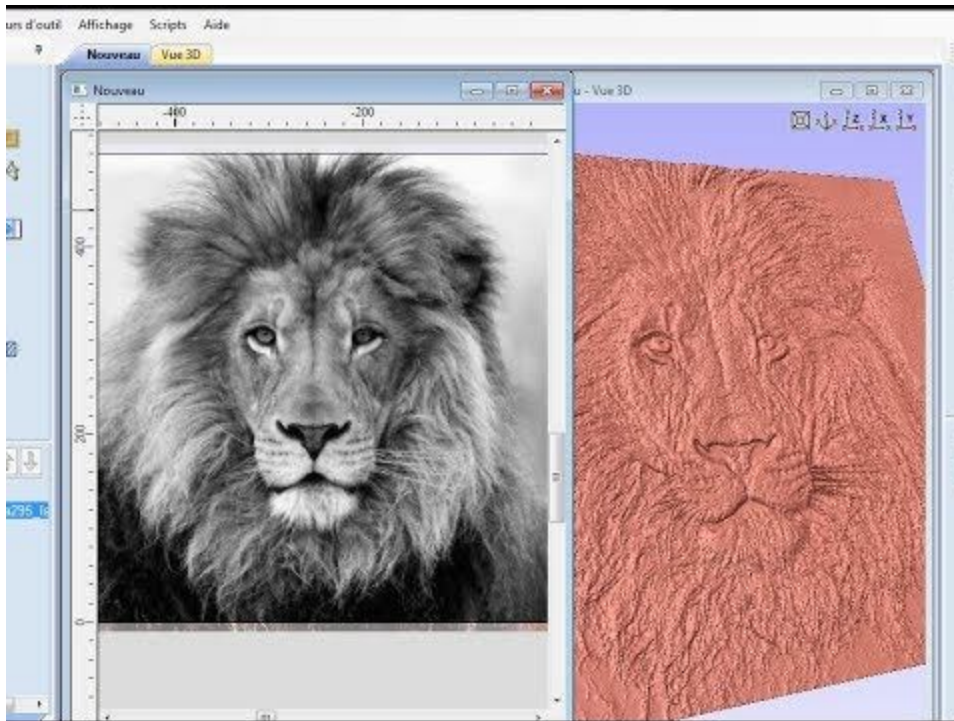
$$Profondeur = 4.9 \times 10^{-3} * \left(\frac{P}{V} * d\right) + 6.6 \times 10^{-5}$$

Ou encore:

$$Tol = 4.9 \times 10^{-3} * \left(\frac{P}{V} * \left(\frac{X}{f} * \Delta z\right)\right) + 6.6 \times 10^{-5}$$

Où :  $X = Diamètre de la lentille$  ;  $f = distance focale$  ;  $\Delta z = Z$  précision de la hauteur

Cette information est utile lors de la gravure en niveaux de gris pour les images, les reliefs 3D et les travaux de lithophanie. En utilisant un logiciel du style Photoshop, CorelDraw ou tout autre logiciel de traitement d'image, nous pouvons transformer n'importe quelle image en image noir et blanc. À partir de laquelle nous pouvons appliquer un flux de travail de rastérisation à l'aide de notre laser.



En règle générale, nous ajustons l'image pour créer une image en niveaux de gris 16 bits de 120 dpi à 300 dpi. L'augmentation de la résolution ou de la profondeur de couleur nécessite des vitesses de gravure extrêmement lentes pour extraire toute amélioration de la qualité. Une fois l'image téléchargée dans notre logiciel de traitement laser (RdWorks V8 à Mako), nous calibrons notre laser pour graver les régions noires (RGB: 255,255,255) à notre profondeur maximale et les régions blanches (RGB: 0,0,0) à notre profondeur minimale requise (généralement 0,1 mm).



Cette technique nous permet de graver des images au laser dans du plastique ou d'avoir des profondeurs de poche précises pour les pièces mécaniques. La profondeur et la portée de cette technique et de tous les paramètres importants ne relèvent pas du cadre de cet article.

## DEVELOPPEMENTS A VENIR

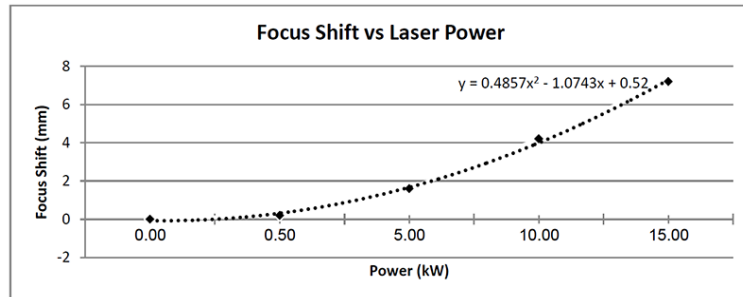
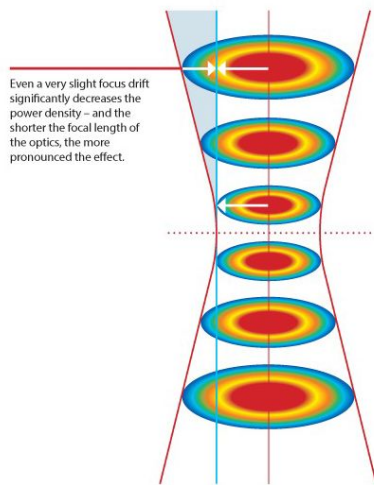
Ce modèle présente plusieurs lacunes.

Dans les prochains articles, nous aimerions déterminer 4 critères supplémentaires :

- 1) L'incertitude du placement du laser en axe Z.
- 2) Les taux d'accélération X, Y de notre laser (et une méthode définie pour le mesurer) permettant de calculer des transferts d'énergie cohérents.
- 3) Un modèle plus développé qui prenne en compte l'intensité du laser et l'absorption optique, la réfraction et la réflexion lors de la combustion du matériau.
- 4) Dissipation de la chaleur dans le matériau de travail et ses effets sur la largeur du kerf.

Tout d'abord, notre premier traitement ne prend pas en compte l'imprécision du placement du laser sur la surface de travail. Nous avons simplement fourni une approximation où nous considérons que le diamètre du laser était de 250 microns et que l'intensité du laser était constante sur le faisceau. Comme on peut le voir dans les figures ci-dessous, l'intensité et le diamètre focal sont des conséquences directes de la capacité de l'utilisateur à focaliser correctement le faisceau. Dans les prochains articles, nous aimerions utiliser des simulateurs optiques de traçage de rayons pour obtenir un meilleur modèle qui nous permettra de déterminer le gradient de l'intensité du faisceau en fonction de notre hauteur Z.

## Relationship between power density and focus drift



Source:

<https://www.ophiopt.com/laser--measurement/knowledge-center/article/11347>

Deuxièmement, la vitesse de traduction des lasers n'est pas constante. Lorsque nous réduisons la longueur totale d'un segment de ligne, les effets de l'accélération / décélération du chariot laser deviennent plus apparents. Cela signifie que pour une petite ligne de 5 mm, il peut s'avérer impossible de tester avec des vitesses de translation supérieures à quelques mm/s, car la machine n'aura jamais le temps d'atteindre la vitesse spécifiée. Certaines sociétés ont intégré cette accélération/décélération dans leur estimation de temps et il sera nécessaire de déterminer la « vitesse critique » pour des longueurs de ligne données, sur laquelle la transmission d'énergie calculée peut être considérée comme fausse.

Pour finir, nous souhaiterions développer un modèle plus complet permettant de prendre en compte l'absorption de la lumière à 1016 nm par des matériaux donnés, leur capacité à réfracter la lumière et leur capacité à transmettre cette énergie sous forme de chaleur. L'essai actuel montre qu'il existe une certaine corrélation avec ce que nous appelons grossièrement la « transmission d'énergie » et ses effets sur l'usinage. Il serait beaucoup plus souhaitable et utile d'avoir une formule à appliquer, définie par des caractéristiques physiques réelles, qui nous donnerait les effets sur l'usinage.

## CONCLUSION

Nous espérons que cet article offre aux Fablabs et espaces maker existants une nouvelle perspective sur la finesse que nous pouvons obtenir avec la technologie de gravure au laser Co2. De même, pour les nouveaux labs, cet article peut vous aider à trouver votre premier jeu de paramètres « approximatifs » pour obtenir votre découpe au laser de manière efficace et en toute sécurité. Nous continuerons à tester sur différents matériaux et nous espérons développer une communauté de fabricants souhaitant contribuer à ce projet.

Nous devons améliorer le modèle physique que nous avons développé pour pouvoir prendre en compte les propriétés physiques des matériaux. À long terme, l'objectif serait de corréler les effets de la découpe au laser aux propriétés (réfraction et absorption optiques, conductivité thermique, énergie de vaporisation, etc.) mises à disposition sur les fiches techniques des nouveaux matériaux. Avec ces moyens, nous pourrions peut-être prévoir les paramètres des matériaux et déterminer leur faisabilité avant de devoir les acheter ou les tester.

Notre objectif final serait de développer une appli/un widget permettant aux utilisateurs de saisir la puissance nominale et le choix matériel de son laser afin que l'application fournisse les paramètres requis. Cela permettrait aux nouveaux fabricants de devenir plus rapidement opérationnels et aux ateliers d'être plus rentables.

Cette série d'expériences a été intéressante et éclairante pour nous à Mako. Nous espérons que nos lecteurs la trouvent aussi intéressant et utile. Nous sommes ouverts à toute discussion en vue de travailler à construire une communauté pour affiner et perfectionner notre projet. Nous vous souhaitons bonne chance avec votre tir laser et vous invitons à ne pas rater notre prochain papier : « Effets mécaniques de la calibration laser sur MDF 3mm ».