

LIVRE BLANC

Ajustement technique :

Optimisation de la conception d'assemblages fonctionnels imprimés en 3D

Les tolérances et l'ajustement sont des concepts essentiels que les ingénieurs utilisent pour optimiser les fonctionnalités des ensembles mécaniques et les coûts de production. Chez Formlabs, nous étudions minutieusement la précision de nos matériaux et nous nous efforçons de maximiser la répétabilité des impressions sur toutes nos imprimantes. Les données et les meilleures pratiques présentées dans ce livre blanc peuvent aider les utilisateurs d'imprimantes 3D Formlabs à concevoir des assemblages fonctionnels qui correspondent à leurs souhaits, avec un minimum de post-traitement ou de tâtonnements.

Table des matières

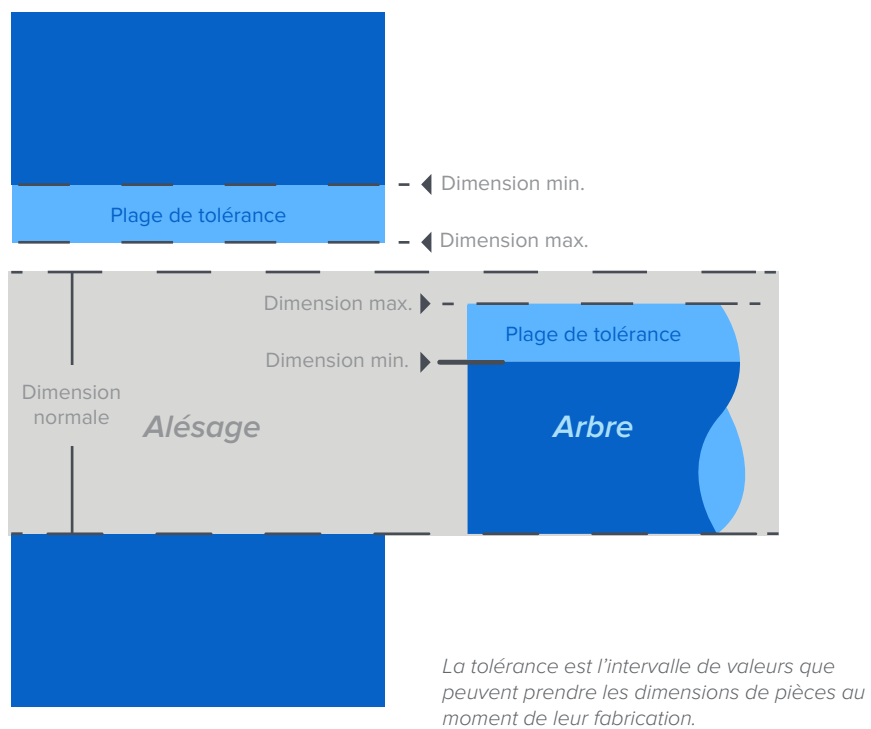
Valeur des tolérances en impression 3D	3
Choix de l'ajustement	4
Mesure et application de la tolérance	5
Alésage et arbre	6
Liaison sphérique.....	7
Liaison pivot glissant.....	8
Frottement	9
Diagramme à l'échelle microscopique de frottement entre des orientations de surface.....	10
Lubrification	11
Composants collés	11
Usinage des pièces imprimées	12
Quelles opérations d'usinage se prêtent le mieux aux résines SLA ?.....	12
Conclusion	13

Valeur des tolérances en impression 3D

En usinage traditionnel, les coûts augmentent de manière exponentielle lorsque les valeurs de tolérance diminuent. Un intervalle de tolérance faible implique des phases d'usinage plus nombreuses et plus lentes qu'un intervalle plus large. Les pièces usinées sont donc conçues avec des intervalles de tolérance les plus larges acceptables pour une application donnée.

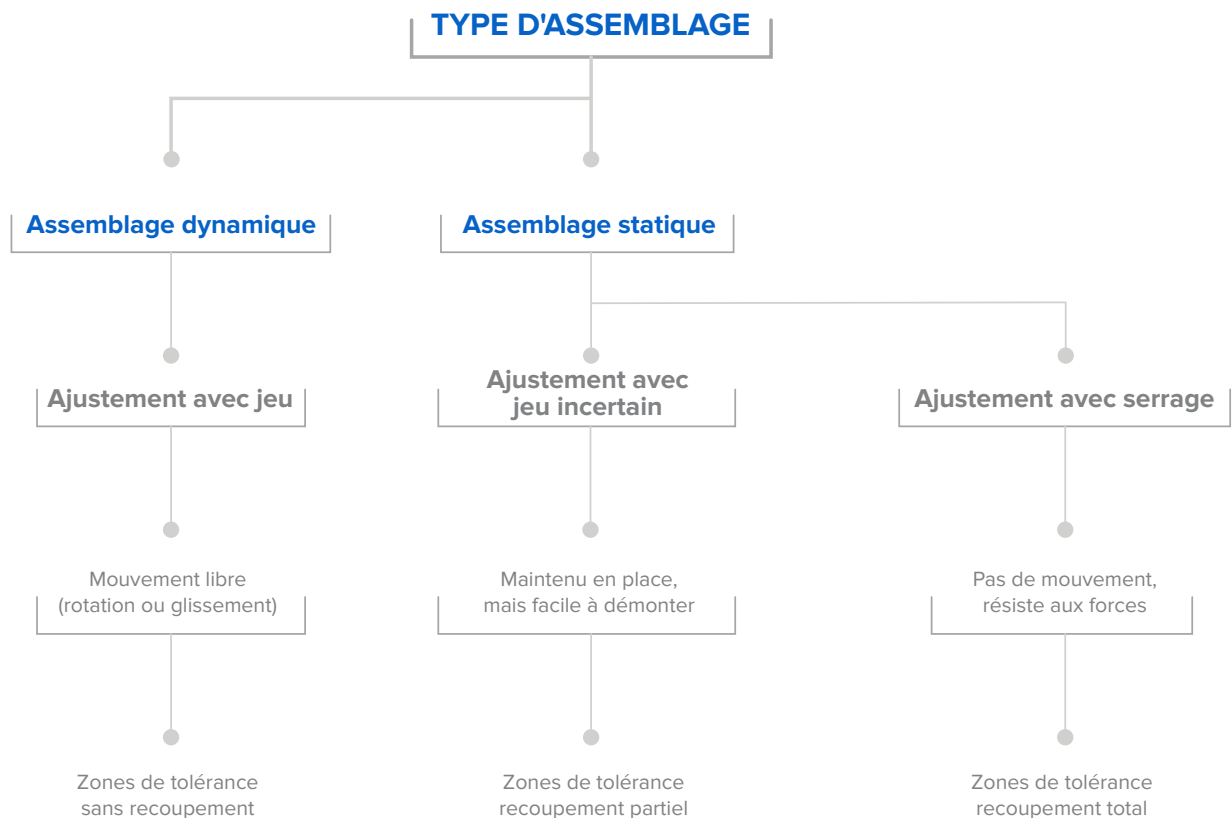
Contrairement à l'usinage, qui ajuste progressivement les pièces pour diminuer les tolérances, la stéréolithographie (SLA) se fait en une seule phase de production automatisée. Un bon tolérancement dimensionnel réduit le temps passé au post-traitement, facilite l'assemblage et réduit les coûts de matériaux dûs aux itérations. À l'inverse, des tolérances inadéquates pour un matériau précis peuvent provoquer la rupture de la pièce, surtout dans le cas d'un montage à la presse impliquant des matériaux fragiles.

Dans le cas d'assemblages volumineux ou de la production d'une pièce en série, un tolérancement dimensionnel exact devient vite avantageux.



Les étapes de post-traitement des assemblages imprimés comprennent le nettoyage, le ponçage des supports et la lubrification. Le ponçage de la surface de contact est une méthode envisageable pour obtenir l'ajustement voulu si la pièce doit être imprimée en un seul exemplaire, car cela nécessite moins de travail de tolérancement lors de la phase de conception. Dans le cas d'assemblages volumineux ou de la production d'une pièce en série, un tolérancement dimensionnel exact devient vite avantageux.

Surface de contact Région du modèle où deux surfaces se touchent, avec ou sans mouvement de l'une par rapport à l'autre.



Choix de l'ajustement

Ce sont les besoins fonctionnels de l'assemblage qui définissent comment les pièces devront s'ajuster. Pour que l'une des pièces puisse se mouvoir librement, il faut qu'un jeu, c'est-à-dire un espace libre, existe entre les surfaces de contact. Ce jeu est obtenu en faisant en sorte d'éviter que les zones de tolérance de chacune des surfaces de contact se recouvrent. Si les pièces doivent être immobiles entre elles, un ajustement à jeu incertain permettra un montage et un démontage de l'assemblage plus faciles. L'ajustement à jeu incertain présente des intervalles de tolérances qui se recouvrent partiellement.

Un ajustement à serrage fournit une liaison des pièces rigide et solide, mais requiert une force de bien plus grande intensité à l'assemblage.

Remarque : L'ajustement à serrage présente des intervalles de tolérance qui se recouvrent complètement et nécessite une résine offrant un allongement élevé telle que Durable Resin, Tough 2000 Resin, Tough 1500 Resin, Flexible Resin ou résines standard.

De petits écarts étant inévitables lors de la fabrication, l'ajustement des pièces est à considérer comme une échelle continue et non comme trois niveaux clairement séparés. Augmenter la tolérance d'un ajustement à jeu favorise la liberté de mouvement aux dépens de la précision. Les ajustements à jeu incertain plus serrés sont plus solides mais la liaison des pièces est soumise à une contrainte plus forte. Un ajustement à serrage requiert plus de force appliquée à l'assemblage, mais celui-ci sera plus difficile à désassembler.

AJUSTEMENT AVEC JEU

Ajustement coulissant

Ajustement tournant

AJUSTEMENT AVEC JEU INCERTAIN

Ajustement par clavetage

Ajustement dur

AJUSTEMENT AVEC SERRAGE

Ajustement pour emmanchement en force

Ajustement pour emmanchement à la presse

L'ajustement est un spectre qui peut être divisé en trois catégories, ce qui aide à calculer le jeu en fonction des nécessités de l'assemblage. Le même code couleur que celui utilisé dans ce spectre s'applique aux graphiques ci-dessous.

L'ajustement se classe en trois catégories : ajustements avec jeu, ajustements à jeu incertain et ajustements à serrage.

Jeu

Un ajustement coulissant présente un jeu latéral, alors qu'un ajustement tournant ne présentera pratiquement pas de jeu. Un ajustement tournant présente plus de frottement mais un mouvement plus précis.

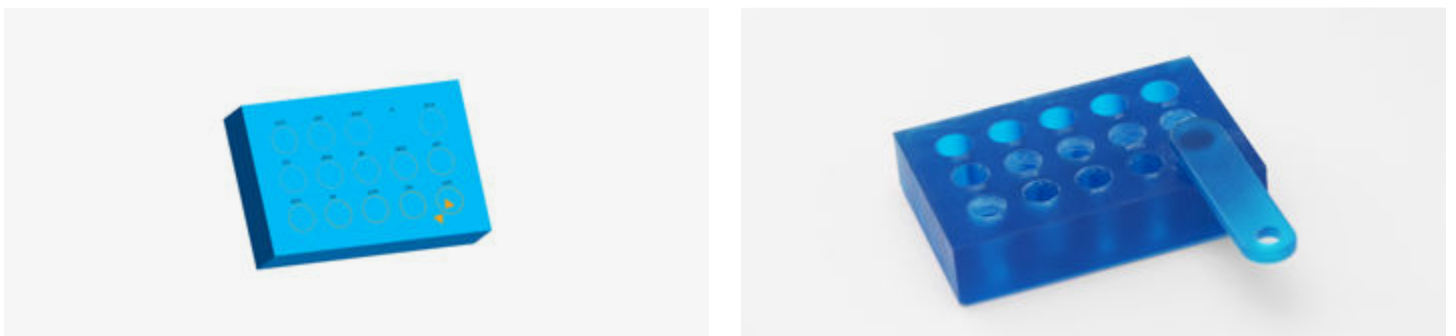
Jeu incertain

Dans un ajustement par clavetage, l'une des pièces s'insère avec précision dans l'autre ou autour d'elle. Elles s'assemblent ou se désassemblent en appliquant une force de faible intensité. Un ajustement dur demandera une force de plus haute intensité pour assembler et désassembler les pièces, mais cela pourra encore se faire manuellement.

Serrage

Un ajustement pour montage en force requiert une force de grande intensité à l'assemblage, produite généralement à l'aide d'un outil tel un maillet. L'assemblage est conçu pour être permanent. Avec un ajustement pour montage à la presse, l'assemblage requiert une force encore plus importante, produite par une presse à levier ou un outil équivalent.

Jeu : espace libre permettant un mouvement dans une direction incertaine à l'intérieur d'un assemblage mécanique.



Mesure et application de la tolérance

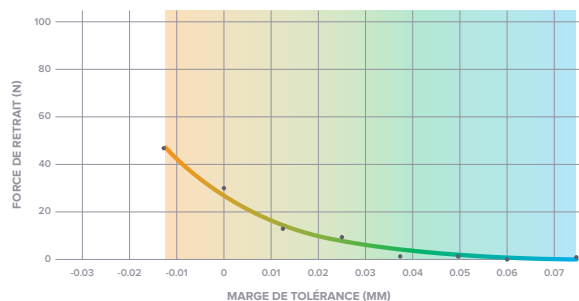
Formlabs a analysé toute une gamme de figures géométriques communes pour trouver la tolérance à appliquer à chaque type d'ajustement en conditions réelles. Les deux matériaux SLA testés sont Tough Resin et Durable Resin, qui ont été conçus pour l'impression de

prototypes fonctionnels exposés à des contraintes mécaniques et tribologiques (frottement). Depuis les tests originaux, Tough Resin a laissé sa place dans la sélection à Tough 2000 Resin de Formlabs, sa reformulation aux propriétés mécaniques améliorées. Les exemples suivants démontrent pourquoi il est judicieux d'appliquer le matériau correct à son application. Les conditions d'ajustement de chaque graphique suivent un code couleur : bleu pour un jeu, vert pour un jeu incertain et orange pour un serrage.

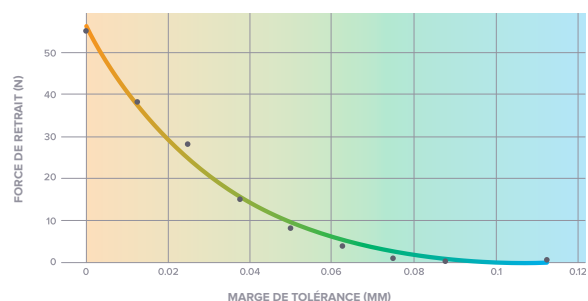
ALÉSAGE ET ARBRE

Un assemblage « alésage et arbre » nécessite généralement un jeu qui peut aller d'un ajustement coulissant à un ajustement tournant en fonction de la précision requise. Un ajustement tournant demandera une lubrification adéquate pour permettre la liberté de mouvement. L'impression d'un alésage et de son arbre est généralement un test révélateur des conditions d'ajustement pour Durable Resin et Tough Resin.

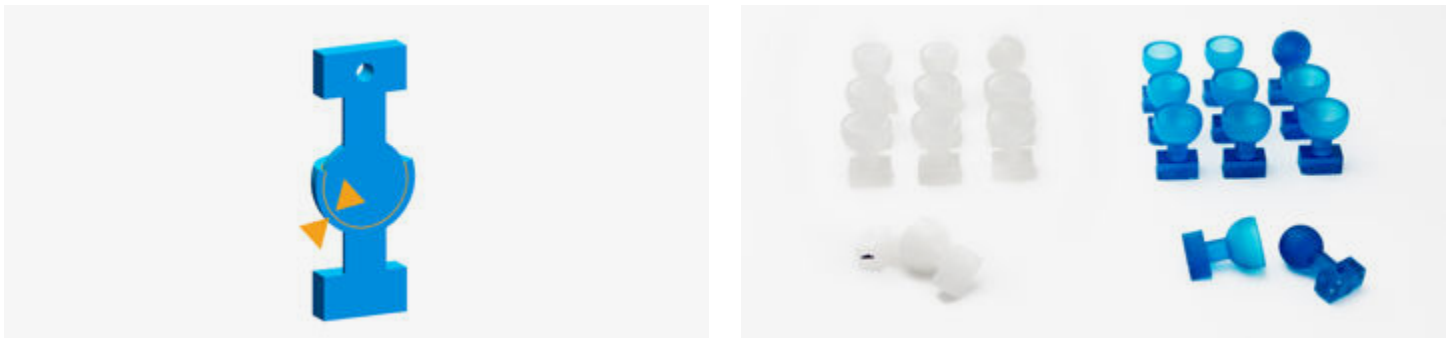
Télécharger le modèle de test « alésage et arbre »



Résultats de Tough Resin : À partir de 0,05 mm de tolérance, l'ajustement présentait un jeu libre entre l'alésage et l'arbre. Entre 0,0 mm et 0,0375 mm, un jeu incertain a été observé : l'arbre pouvait être inséré dans l'alésage moyennant une pression manuelle modérée. En dessous de 0,0 mm (ajustement à serrage), l'arbre devient beaucoup plus difficile à insérer et l'effort nécessaire a vite dépassé la limite des 55 N au dynamomètre. L'arbre a pu être inséré à l'aide d'une presse à levier à -0,0375 mm de tolérance, mais n'a plus pu être retiré de l'alésage.



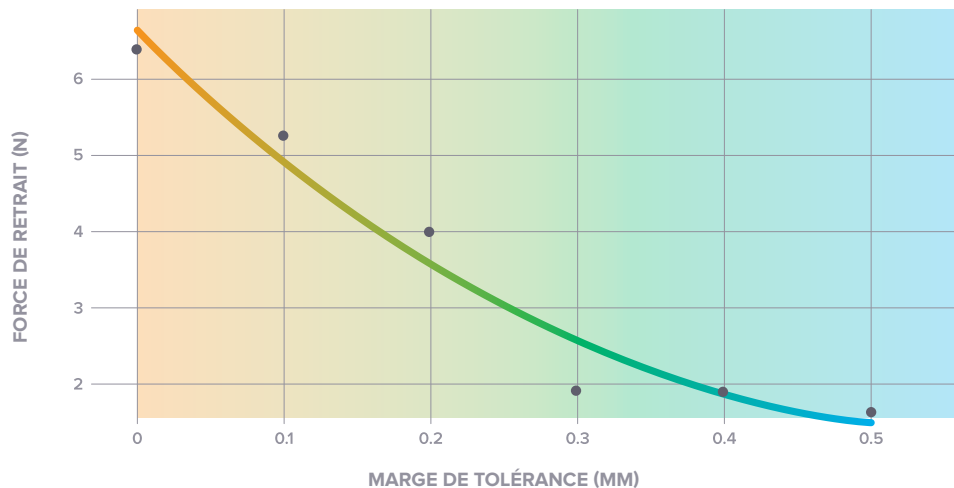
Résultats de Durable Resin : Lors de ce test, la pièce en Durable Resin est passée d'un jeu incertain à un jeu libre permettant une insertion facile à 0,0625 mm de tolérance. À partir de 0,0125 mm de tolérance et en dessous de cette valeur, les pièces présentaient un jeu à serrage et devenaient difficiles à séparer. Cependant, les pièces pouvaient toujours être assemblées, même avec une tolérance négative de -0,0375 mm. Ceci est dû à l'allongement élevé de Durable Resin.



LIAISON SPHÉRIQUE (sphère et rotule)

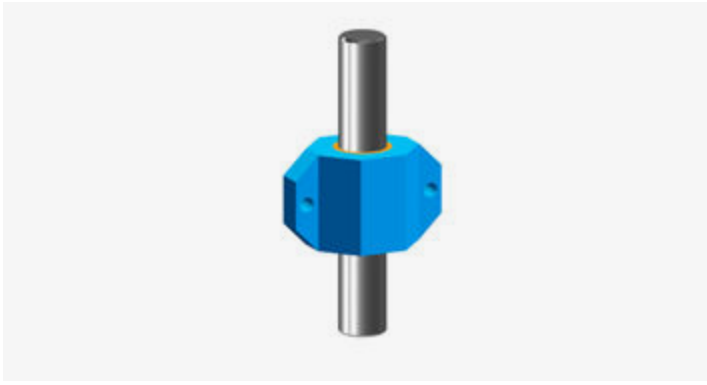
Un jeu suffisant est impérativement nécessaire pour permettre à la sphère de tourner librement dans la rotule. Cependant, il existe une très grande interférence entre le rayon de la sphère et l'ouverture de la rotule. Cette ouverture doit se déformer suffisamment pour permettre l'insertion de la sphère, mais sans lui permettre de s'échapper lors d'un usage normal.

[Télécharger le modèle de test « sphère et rotule »](#)



Résultats de Durable Resin : Lors de ce test, un point d'inflexion a été observé entre 0,2 mm et 0,3 mm de tolérance, zone où laquelle la sphère et la rotule deviennent plus faciles à séparer. Entre 0,0 mm et 0,2 mm, la sphère tourne librement dans la rotule mais reste en position. Un ajustement à serrage dans cet intervalle serait idéal pour des figurines articulées dont les parties doivent garder leur orientation. Au-delà de 0,3 mm, la sphère tourne librement dans la rotule mais présente un léger branle. En-deçà de 0,0 mm, la sphère n'a pas pu être insérée dans la rotule.

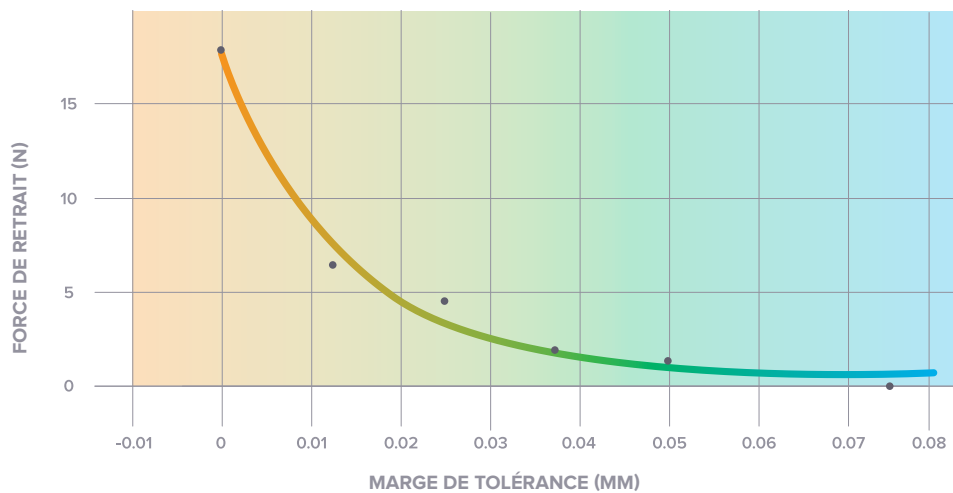
Résultats de Tough Resin : Le modèle « sphère et rotule » a aussi été imprimé en Tough Resin, mais n'a pas pu être assemblé à la main en raison du frottement élevé et de la haute solidité du matériau. Durable Resin est donc plus indiquée pour une liaison sphérique en raison de sa résistance à l'usure.



Liaison pivot glissant (tige et bague)

Une bague est un type de palier lisse conçu pour pouvoir glisser librement et de manière fluide le long d'une tige. Un ajustement avec jeu est nécessaire entre la tige et la bague. En fonction de l'application, ce jeu peut être plus ou moins élevé.

[Télécharger le modèle de test « tige et bague »](#)



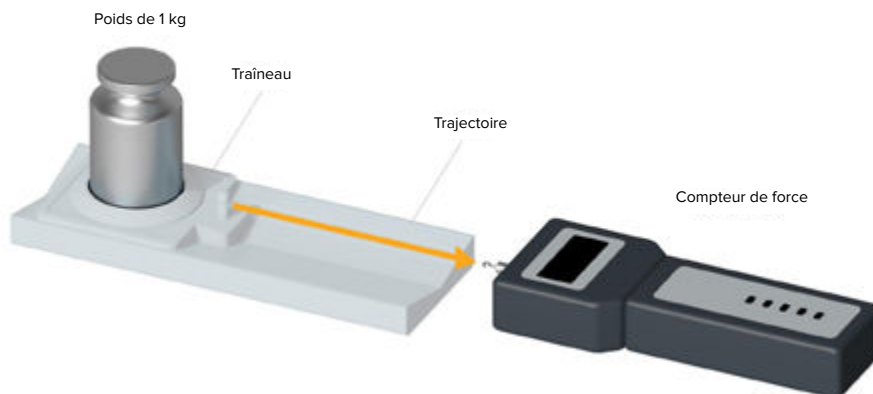
Résultats de Durable Resin : Les bagues imprimées en Durable Resin permettaient un mouvement fluide et à faible frottement autour de la tige en acier poli. À une tolérance de 0,025 mm, la bague présentait un ajustement tournant fluide sans jeu. Au-delà de 0,025 mm, la bague n'adhérait plus du tout à la tige et glissait librement le long de celle-ci. De 0,0 mm à 0,025 mm, la bague demandait un léger effort pour la déplacer le long de la tige. En-deçà de 0,0 mm d'ajustement, il se produit un serrage qui nécessite un effort significatif pour faire coulisser la bague le long de la tige, même si l'assemblage a été possible en raison de la complaisance de la résine. Dans cette zone du graphique, la pièce ne joue plus son rôle de palier.

Si elle est lubrifiée de manière adéquate, Durable Resin se prête bien au prototypage rapide de bagues sur mesure, de systèmes d'engrenage et de produits avec parties mobiles lisses simulant le polypropylène. Pour les assemblages mobiles qui doivent supporter de nombreux cycles de mouvement sans subir d'usure, le mieux est d'utiliser des bagues en Delrin disponibles dans le commerce et de les intégrer à des pièces imprimées avec Tough Resin.

Remarque : Tough 2000 Resin est la mieux adaptée à la création de composants structurels solides qui ne doivent pas être soumis à un frottement à long terme.

Frottement

L'intensité de la force de frottement entre deux composants est le produit de la force appliquée sur la surface de contact (exposée directement à l'ajustement) et d'une constante (le coefficient de frottement) propre à chaque matériau. Le coefficient de frottement est utile pour prédire la résistance que vos pièces devront opposer au mouvement et à l'usure, et le comportement que vous pouvez attendre des résines Formlabs par rapport aux autres matériaux habituels.



Formlabs a testé le coefficient de frottement à l'aide d'une table de mesure, d'un bâti lesté et d'un dynamomètre.

Ce tableau montre les coefficients de frottement non lubrifié entre différentes paires de matériaux imprimés à 100 microns :

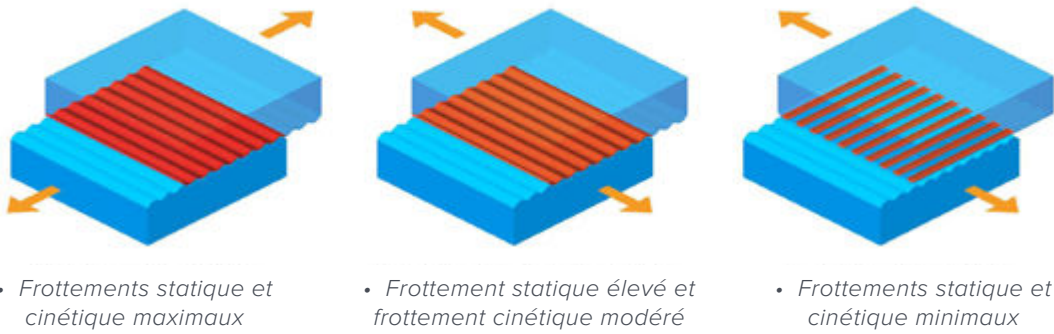
	Coefficient de frottement statique (μ_s)	Coefficient de frottement cinétique (μ_k)
Durable Durable	0,32	0,14
Tough Resin Tough Resin	0,77	0,2
Durable Resin Tough Resin	0,57	0,16

Les pièces ont été testées sans aucun post-traitement de polissage ou de ponçage. Durable Resin dispose du frottement par glissement le plus bas des résines Formlabs en raison de sa forte onctuosité intrinsèque. À l'inverse, Tough Resin montre un frottement par glissement plus élevé et un coefficient de frottement statique significativement plus important, ce qui a causé un comportement de glissement-frottement lors de nos tests. Le faible coefficient de frottement de Durable Resin fait qu'elle est toute indiquée pour les composants mobiles qui interagissent entre eux dans des assemblages cinétiques.

Les composants coulissants tels que des rails, des pistons et des axes présentent un frottement réduit si l'aire active des deux surfaces en contact est réduite. Ceci s'obtient en orientant les objets à imprimer dans PreForm de manière à ce que le motif du « grain » des couches soit perpendiculaire entre les pièces. Si le grain est parallèle entre les pièces, les sillons des couches vont entrer en adhérence, ce qui augmentera la surface de contact et entraînera davantage de frottement statique et cinétique.

Formlabs a testé les coefficients de frottement statique et cinétique entre des composants imprimés en Durable Resin avec des motifs de grain perpendiculaires et parallèles en faisant pivoter le bâti lesté de 90° dans PreForm.

Diagramme à l'échelle microscopique de frottement entre des orientations de surface.



L'orientation perpendiculaire a montré des coefficients de frottement moindres aussi bien lors du test statique que du test cinétique. Cependant, l'orientation du grain a eu un effet plus marqué sur le coefficient de frottement statique : lors de nos tests, le frottement entre des surfaces de grain perpendiculaires était inférieur de 43 % à celui observé entre des surfaces de grain parallèles. Quant au frottement cinétique, il a montré une diminution de 11 % dans le cas de surface de grain perpendiculaires.

Le frottement entre les pièces diminue avec le temps en raison de l'usure des surfaces. C'est bien souvent bénéfique aux assemblages cinétiques. Le ponçage et le polissage sont d'ailleurs deux exemples d'usure délibérée. Mais attention, car une usure excessive a tendance à augmenter le jeu entre les pièces. Le meilleur moyen d'éviter l'usure à long terme est la lubrification.

Remarque : Durable Resin est conçue pour être le matériau le plus résistant à l'usure de Formlabs et elle est la mieux indiquée pour les engrenages, les bagues et les assemblages cinétiques.

Pour certaines applications telles que les rouleaux, les roues et les pinces robotisées, davantage de frottement est souhaitable. Dans ces cas, Flexible Resin offre un coefficient de frottement plus élevé et une onctuosité plus faible.



Modèle réduit fonctionnel d'un moteur à combustion interne de deux cylindres à plat alimenté par air comprimé et lubrifié à l'huile minérale.

Lubrification

Les lubrifiants sont essentiels pour maintenir les composants en bon état de fonctionnement dans les assemblages cinétiques. L'huile minérale est un lubrifiant très répandu et peu onéreux souvent utilisé dans les pièces imprimées par SLA. Les lubrifiants à base d'huile de silicone tels que Super Lube®, eux, sont tout aussi efficaces et le restent plus longtemps sans devenir collants.

Composants collés

Pour faire adhérer entre eux des composants imprimés à l'aide de colle, un ajustement à faible jeu est souhaitable. La colle cyanoacrylate (Super Glu) peut combler les vides peu importants en raison de sa faible viscosité. Une seringue de résine traitée à la main (et en portant les lunettes de sécurité appropriées) à l'aide d'un stylo laser UV ou bleu-violet (405 nm) peut permettre de souder des pièces entre elles par assemblage en angle à plat-joint.

Usinage de pièces imprimées

Les étapes de post-traitement les plus courantes pour les assemblages imprimés sont le ponçage, le polissage et la lubrification. Dans certains cas, il peut être utile d'usiner une pièce en plastique après impression, par exemple si les tolérances de la pièce doivent être en dessous de 0,025 mm, ou pour modifier la pièce après impression. Percer des trous à l'aide d'une perceuse ou ajouter un filetage avec un taraud peut être plus rapide et efficace que de réimprimer la pièce si les outils existent et que le plan de la pièce a changé en cours d'impression.

De toute la gamme de matériaux Formlabs, ce sont Tough 2000 Resin, Tough 1500 Resin et Durable Resin qui résistent le mieux à l'usinage grâce à leur allongement et leur solidité élevés. Les autres résines Formlabs peuvent aussi être usinées, même si elles demandent des techniques moins intrusives et des vitesses d'outil plus élevées.

QUELLES OPÉRATIONS D'USINAGE SE PRÊTENT LE MIEUX AUX RÉSINES SLA ?

High Temp Resin	Ponçage Surfaçage à grande vitesse Forage et alésage de faible diamètre et à haute vitesse
Tough 2000 Resin, Tough 1500 Resin, Durable Resin, Standard Resins	Ponçage Fraisage en bout et en roulant Perçage Forage Alésage Taraudage
Flexible Resin	Ponçage Perçage Découpage



Conclusion

Dans la conception de produits, spécifier l'ajustement en fonction des propriétés des matériaux et de la fonction mécanique est une nécessité. Les types d'ajustement pour des formes géométriques courantes sont largement applicables à de nombreux assemblages de manière à produire des prototypes fonctionnels en moins d'itérations. Pour encore plus d'efficacité et une compréhension intuitive de la manière dont les pièces s'ajusteront entre elles, n'hésitez pas à imprimer les modèles de test dans une grande variété de matériaux pour observer leur comportement.

Au-delà de l'ajustement, le choix du matériau adéquat est essentiel pour la création d'impressions efficaces. Les matériaux Formlabs présentent des résistances à la rupture par traction, des allongements et des résistances à l'usure qui varient significativement de l'un à l'autre. Certaines formes géométriques basiques telles que la tige et la bague donneront des résultats bien meilleurs avec Durable Resin en raison de sa forte résistance à l'usure et de son faible frottement. Mais d'autres applications telles que des composants structurels devant subir une charge seront plus efficaces avec Tough 2000 Resin, qui dispose d'une résistance à la rupture par traction élevée et d'un module de flexion similaire à celui de l'ABS.