



LIVRE BLANC

Impression 3D de boîtiers étanches et résultats des tests de pression

Les besoins en pièces étanches à l'eau et au gaz, qu'il s'agisse de petites séries ou de productions spéciales, sont présents dans de nombreux secteurs industriels, tels que la recherche marine, la robotique sous-marine, le développement de technologies durables, l'industrie pétrolière et gazière et la défense. Bien que certaines technologies d'impression 3D offrent une solution parfaite pour la production de telles pièces, l'idée que les pièces fabriquées par fabrication additive sont poreuses et ne peuvent pas être utilisées sous pression est largement répandue.

Dans le cadre d'une coopération entre Formlabs et l'Undersea Robotics and Imaging Lab (URIL) de l'université de Rhode Island, des assemblages en plusieurs parties ont été imprimés à l'aide des procédés de dépôt de fil fondu (FDM), de stéréolithographie (SLA) et de frittage sélectif par laser (SLS), puis testés dans une chambre de pression sous l'eau.

Les résultats démontrent que l'impression 3D permet de fabriquer de manière fiable des boîtiers étanches pouvant être utilisés dans des conditions de haute pression, et ce grâce à un processus de travail simple et abordable. Dans ce livre blanc, nous présentons les résultats des tests et donnons des conseils clairs sur la manière de fabriquer des boîtiers étanches personnalisés à moindre coût grâce à l'impression 3D.

Sommaire

Fabrication de pièces étanches	3
Résistance à l'eau et étanchéité	3
Applications pour les pièces étanches.....	3
Méthodes de fabrication des pièces étanches.....	3
Impression 3D de pièces étanches	4
Dépôt de fil fondu	4
Stéréolithographie (SLA).....	4
Frittage sélectif par laser (SLS)	4
URI Undersea Robotics and Imaging Laboratory : approche conceptuelle	5
Conception open source	5
Comment choisir un joint torique pour un boîtier étanche imprimé en 3D	6
Couvercles en plexiglas : avantages, découpe au laser et méthode de fixation	7
Essais d'étanchéité et résultats	8
Impression, post-traitement et choix des matériaux.....	8
Résultats des essais sous pression.....	9
Analyse des résultats	10

Fabrication de pièces étanches

RÉSISTANCE À L'EAU ET ÉTANCHÉITÉ

La résistance à l'eau fait référence à la capacité inhérente d'un matériau à repousser l'eau ou à empêcher l'eau d'y adhérer ou d'être absorbée. L'étanchéité désigne quant à elle la capacité d'un objet à empêcher l'eau d'y entrer ou d'en sortir. Elle est donc étroitement liée à la conception du boîtier ou de l'assemblage en question, plutôt que de reposer uniquement sur la nature fondamentale du matériau.

Bien que la résistance à l'eau des différents matériaux joue un rôle fondamental dans cet essai, les résultats finaux sont basés sur l'étanchéité des boîtiers en plusieurs parties. Cela s'explique par l'applicabilité des données : la fabrication de boîtiers étanches peut être difficile, coûteuse et nécessiter beaucoup de travail si l'on utilise des méthodes conventionnelles. L'impression 3D offre une nouvelle méthode de qualité pour mener des recherches en eaux profondes et côtières et aide d'innombrables secteurs à mettre en œuvre des applications sous-marines, comme la défense, l'industrie pétrolière et gazière, l'approvisionnement en énergie, etc.

APPLICATIONS POUR LES PIÈCES ÉTANCHES

Les pièces étanches sont utilisées dans divers scénarios, par exemple dans les moteurs hors-bord, dans l'exploration robotisée des profondeurs ou dans la photographie sous-marine. Lorsqu'une pièce est étanche, elle peut également contenir d'autres liquides, ce qui rend ces composants extrêmement utiles dans les applications où des tuyaux transportent des liquides entre les composants, notamment dans l'industrie automobile, la recherche chimique, l'approvisionnement en énergie et la construction.

Pour les applications de recherche dans les domaines de l'écologie, de la géologie ou de la climatologie, la fabrication d'équipements individuels pour la recherche et l'échantillonnage est souvent extrêmement coûteuse. Étant donné que chaque application est unique et que les environnements dans lesquels ils seront déployés sont en constante évolution et difficiles à gérer depuis la surface, les composants pour la recherche sous-marine ou fluide sont souvent fabriqués sur mesure.

MÉTHODES DE FABRICATION DES PIÈCES ÉTANCHES

Les méthodes utilisées jusqu'à présent pour fabriquer de tels composants étanches impliquent généralement des matériaux éprouvés et fabriqués de manière traditionnelle, comme le métal, le plastique moulé par injection ou le caoutchouc. Les pièces produites en masse sont peu coûteuses, mais il peut être difficile de les configurer de manière à répondre aux exigences spécifiques d'une application. De plus, cela peut nécessiter des connecteurs, des dispositifs ou des boîtiers fabriqués sur mesure. Dans les assemblages en plusieurs parties, les différentes pièces sont scellées à l'aide d'une combinaison de filetages, de caractéristiques d'emboîtement ou de couplage, de joints toriques ou de joints d'étanchéité.

Le choix des joints toriques peut être extrêmement difficile et la détermination des paramètres appropriés pour le boîtier peut prendre beaucoup de temps. Le manuel des joints toriques de Parker contient des milliers de recommandations basées sur la compression, le diamètre, l'épaisseur, le matériau, l'exposition à la pression, etc. La difficulté de choisir un joint torique personnalisé fait que beaucoup se tournent vers des composants standardisés produits en masse, ce qui limite les possibilités d'innovation et l'ouverture à de nouvelles applications.

Impression 3D de pièces étanches

Depuis que l'impression 3D est devenue de plus en plus populaire dans le domaine de la fabrication sur mesure et de la production en petites séries, des efforts ont été faits pour l'utiliser dans des applications sous-marines. Les appareils sous-marins ou les équipements robotiques destinés à des domaines tels que la recherche, l'extraction de pétrole et de gaz et la construction sont tous uniques : les composants respectifs et les fonctions qu'ils doivent remplir sont entièrement adaptés aux exigences de l'application. C'est pourquoi les applications sous-marines n'étaient jusqu'à présent accessibles qu'aux entreprises et aux projets bien financés, capables de fabriquer des appareils et des équipements personnalisés et coûteux. L'impression 3D peut changer cela : elle permet de fabriquer des pièces sur mesure pour la recherche et le développement à une fraction du coût des méthodes conventionnelles. Pour réussir à utiliser des pièces imprimées en 3D sous l'eau, il faut choisir avec soin la technologie d'impression 3D et le matériau approprié.

DÉPÔT DE FIL FONDU

La technologie d'impression 3D la plus connue, le dépôt de fil fondu (FDM), ne fournit pas de pièces étanches. C'est la raison pour laquelle on pense souvent à tort que les pièces imprimées en 3D ne conviennent pas aux applications nécessitant une étanchéité à l'eau. Le procédé FDM consiste à extruder du plastique fondu à travers une buse et à l'appliquer couche par couche, sans toutefois le lier chimiquement. Les pièces imprimées par FDM sont anisotropes, ce qui signifie qu'elles présentent des propriétés mécaniques différentes en fonction de la direction d'application de la charge mécanique. En outre, elles sont moins denses que des objets similaires fabriqués par d'autres méthodes. Étant donné que les différentes couches ne sont pas liées chimiquement, les liquides peuvent s'infiltrer dans la surface par les interstices microscopiques qui se trouvent entre elles. Par conséquent, les boîtiers fabriqués par impression 3D FDM ne sont pas étanches, à moins que les pièces ne soient retravaillées en profondeur et scellées par des procédés supplémentaires tels que le lissage chimique à la vapeur ou le revêtement. Les pièces imprimées par FDM implosent sous la pression et se déchirent le long des lignes de stratification.

STÉRÉOLITHOGRAPHIE (SLA)

La stéréolithographie (SLA), en revanche, donne des pièces imprimées étanches, car chaque couche est liée chimiquement à la couche suivante. Les pièces imprimées par SLA sont obtenues en faisant durcir une résine synthétique liquide couche par couche à l'aide d'un laser : les chaînes de polymères sont alors liées au sein de cette couche, mais aussi avec la couche précédente et la suivante. On obtient ainsi des pièces aux surfaces lisses, qui ne présentent pratiquement pas de lignes de couches, qui ne sont pas poreuses et qui ne laissent donc pas passer l'eau. Les pièces imprimées ont des tolérances extrêmement étroites, de sorte que les assemblages de plusieurs pièces, tels que les boîtiers utilisés dans les essais décrits ici, peuvent être ajustés sans qu'il n'y ait pratiquement d'espace d'air entre eux. Complétés par des joints, ces boîtiers sont parfaitement étanches et résistent à des pressions énormes.

FRITTAGE SÉLECTIF PAR LASER (SLS)

Le frittage sélectif par laser (SLS) est un procédé d'impression pour lequel une section transversale d'une pièce est frittée dans un lit de poudre, après quoi une autre couche de poudre est appliquée et le processus est répété. Les pièces présentent une certaine isotropie, mais peuvent avoir des propriétés mécaniques différentes selon la direction de la force exercée. Les pièces SLS sont étanches si elles sont conçues avec les tolérances et les techniques de scellement appropriées.



URI Undersea Robotics and Imaging Laboratory : approche conceptuelle

CONCEPTION OPEN SOURCE

L'Undersea Robotics and Imaging Laboratory (URIL) de l'université de Rhode Island a pour mission de démocratiser l'exploration en eaux profondes. Grâce à des imprimantes 3D abordables comme la Form 3+ et la Form 3L grand format, il est aujourd'hui possible de concevoir et de fabriquer des instruments très complexes pour l'exploration en eaux profondes et de partager les conceptions avec la communauté scientifique.

L'URIL a publié plusieurs études sur ses recherches en eaux profondes, notamment un guide sur la conception inédite du [DEEPI](#), un système d'acquisition et de contrôle d'images en eaux profondes, une [étude](#) sur l'utilisation de systèmes de stabilisation passifs pour permettre d'imprimer en SLA sur une embarcation en mouvement, et une [analyse](#) de l'utilisation du biomimétisme dans la conception de boîtiers en se basant sur la forme des nautiloïdes.

Brennan Philips, chef de projet, et Breanna Molsenbocker, doctorante, développent depuis des années de nouvelles itérations de leur caméra sous-marine et de leur boîtier robotique, et ont publié leurs découvertes dans de nombreux articles spécialisés. Le laboratoire a mis sa conception à disposition sous forme de fichier open source afin de permettre à ceux qui n'ont pas les moyens financiers de collecter des données ou de mener des recherches sous-marines de les fabriquer.

Le design présenté ici a été conçu de manière à ce que le volume interne soit suffisamment grand pour accueillir un micro-ordinateur (Raspberry Pi Zero) et une petite batterie. Ce besoin de volume détermine les paramètres du diamètre intérieur et de la longueur du boîtier. L'épaisseur de la paroi a été choisie en fonction des prototypes de boîtiers précédents et de la profondeur

visée (au moins 1500 m). Comme il n'existe pas de méthodes FEA fiables pour simuler la pression d'implosion des boîtiers imprimés en 3D, la conception a été testée dans une chambre de pression hydrostatique afin de s'assurer qu'elle était étanche et suffisamment épaisse pour résister à la pression à 1500 m de profondeur.

L'URIL a mis à disposition les deux designs – le design à parois fines utilisé dans le test et le design non testé avec des parois plus épaisses – sous forme de fichier open source pour permettre à d'autres de les utiliser.

Open Source : parois plus épaisses

Open Source : parois plus fines

Le boîtier en plusieurs parties a été conçu pour être facile à utiliser : chaque composant est doté de filets imprimés en 3D qui permettent de visser facilement l'anneau sur l'embout et le corps principal. Lors des recherches, l'équipe se trouve souvent dans de petites embarcations qui se déplacent au gré des vagues, de sorte qu'il peut être difficile d'utiliser des boulons à vis. Grâce à la haute résolution de la Form 3+ et de la Form 3L, les filets de vis peuvent être intégrés directement dans la conception, tout comme un joint torique qui garantit une étanchéité totale. En cas de modifications, des montages et démontages fonctionnels sont possibles.

Bien que cette conception de boîtier soit destinée à un modèle spécifique de micro-ordinateur, elle peut facilement être complétée par des cavités ou des supports pour des caméras, des capteurs, des passages, etc. En outre, si le corps principal du boîtier reste inchangé, il est possible de concevoir différents designs d'embouts et de bagues à des fins, des tailles et des formes différentes, tant que le filetage de l'ajustement peut toujours être inséré dans le composant principal.

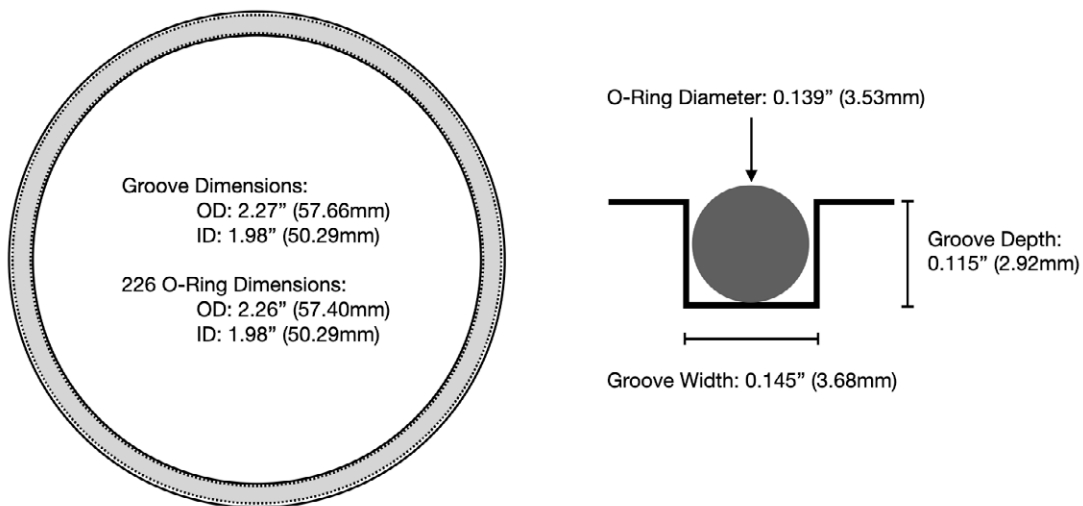
COMMENT CHOISIR UN JOINT TORIQUE POUR UN BOÎTIER ÉTANCHE IMPRIMÉ EN 3D

Lors de ses essais, l'URIL a réussi à utiliser aussi bien des joints toriques que des obturateurs d'alésage, mais elle préfère les joints toriques.

Une fois que les diamètres intérieur et extérieur du boîtier ont été déterminés, il est possible de choisir un joint torique d'étanchéité en fonction du diamètre intérieur. Le joint torique doit bien s'adapter à la surface entre l'embout et le corps de base du boîtier. Les joints toriques de taille 2 selon la norme AS568, c'est-à-dire les joints toriques d'une épaisseur de cordon de 3,53 mm, donnent le scellement le plus fiable pour les pièces imprimées en 3D SLA.

En principe, on observe que les joints toriques de plus grand diamètre sont plus résistants à la compression dans les pièces imprimées en 3D. En ce qui concerne la dimension de la rainure, il faut viser une profondeur inférieure de 15 - 20 % à l'épaisseur du cordon du joint torique (par exemple $100 * (1 - (/3,53 \text{ mm})) = 17,2 \%$). La rainure doit également être plus large que la section du joint torique, de sorte qu'un certain niveau de compression soit possible.

Une ressource utile pour déterminer ces dimensions de manière plus détaillée et pour de nombreuses applications différentes est le [manuel des joints toriques de Parker](#).



COUVERCLES EN PLEXIGLAS : AVANTAGES, DÉCOUPE AU LASER ET MÉTHODE DE FIXATION

De la même manière que les couvercles d'étanchéité sont utilisés dans les applications à basse pression (< 100 m de profondeur), l'URIL a réussi à fabriquer des boîtiers imprimés en 3D avec des joints toriques et des couvercles en plexiglas découpés au laser.

Dans ces conceptions, des profils de rainures complexes peuvent être utilisés pour les joints d'étanchéité, à condition de conserver un rayon de courbure suffisant pour le joint torique. Les joints toriques d'une épaisseur de cordon de 3,53 mm peuvent être utilisés à partir d'un rayon de courbure de la rainure de 9,53 mm. Pour déterminer la bonne taille de joint torique, il faut calculer le diamètre intérieur équivalent du joint torique qui s'en rapproche le plus, en se basant sur la longueur totale du rayon intérieur de la rainure complète du joint torique. Il convient ensuite de commander deux ou trois tailles dans cette plage de tailles afin de tester l'ajustement dans la pratique. Il n'est pas possible de prédire avec précision la profondeur d'écrasement de formes aussi complexes. Toutefois, jusqu'à une profondeur de 100 m, du plexiglas de 9,53 mm devrait bien fonctionner.



Essais d'étanchéité et résultats

IMPRESSION, POST-TRAITEMENT ET CHOIX DES MATÉRIAUX

Les technologies FDM, SLA et SLS ont été utilisées pour la fabrication des boîtiers. Le boîtier en Nylon 12 GF Powder a été imprimé sur l'imprimante SLS Fuse 1+ 30W, tandis que les autres matériaux (Grey Resin, Clear Resin, BioMed Amber Resin et Rigid 10K Resin) ont été imprimés sur l'imprimante SLA Form 3+. Les pièces imprimées en 3D FDM, fabriquées à partir de filament PLA sur une imprimante Craftbot, ont immédiatement absorbé de l'eau lorsqu'elles ont été immergées et ont donc été exclues du test.

Les technologies SLA et SLS sont toutes deux largement utilisées pour des applications dans le domaine de la construction mécanique et de la recherche, mais leurs points forts se situent dans des domaines différents. Le procédé SLS convient parfaitement à la production de petites séries de pièces destinées à une utilisation finale, dispose d'une gamme de matériaux éprouvés tels que le nylon et le TPU et crée des pièces résistantes de qualité industrielle. En revanche, les imprimantes SLA sortent vraiment du lot lorsqu'une finition de surface lisse et des propriétés de matériau très spécifiques sont requises. Dans ce test, tant la surface lisse que la densité des pièces SLA se prêtaient particulièrement bien à un environnement pressurisé.

Les quatre matériaux SLA choisis ont chacun leurs points forts :

- Grey Resin : un matériau polyvalent extrêmement consistant, idéal pour les prototypes et les pièces avec une finition de surface lisse.
- Clear Resin : un matériau très précis et cohérent qui peut être poli jusqu'à présenter une transparence optique presque totale, ce qui permet de voir les composants internes.
- BioMed Amber Resin : un matériau biocompatible utilisé pour le prototypage et la fabrication de dispositifs médicaux conformes aux réglementations.
- Rigid 10K Resin : une résine à haute charge de verre, idéale pour fabriquer des pièces industrielles qui doivent résister à des charges importantes sans déformation, par exemple de l'outillage rapide pour le moulage par injection.

La poudre SLS choisie, Nylon 12 GF Powder, est capable de résister à des conditions de fabrication exigeantes grâce à sa rigidité et à sa résistance à la chaleur accrues. Elle est idéale pour les applications où la stabilité et la résistance à la température sont essentielles.

Les méthodes de post-traitement telles que le polissage, le sablage, le revêtement, le placage ou la coloration peuvent avoir un effet sur la porosité ainsi que sur la qualité de surface des pièces imprimées en 3D. Certaines de ces méthodes permettent d'obtenir une meilleure étanchéité. Pour cet essai, certains boîtiers en Rigid 10K Resin ont été sablés, ce qui a pour effet de lisser la surface et de réduire la porosité.

Comme il n'existe pas de normes industrielles concernant les tests d'implosion de ces matériaux d'impression 3D, l'URIL a commencé son étude en développant une chambre d'implosion spécialement conçue pour simuler la pression exercée à des milliers de mètres sous le niveau de la mer.

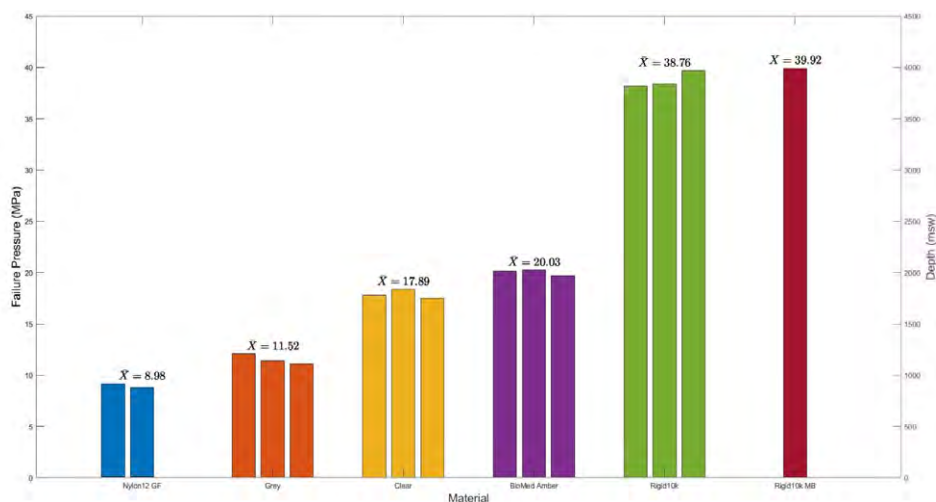
RÉSULTATS DES ESSAIS SOUS PRESSION



Nylon 12 GF Powder (à gauche) a implosé à la pression la plus basse, à 89,9 bars en moyenne, tandis que BioMed Amber Resin (à droite) a résisté à une pression bien plus élevée, implosant à 200,4 bars en moyenne.

PROCESSUS D'IMPRESSION	MATÉRIAU	PRESSIION D'IMPLOSION MOYENNE (BAR)	PLAGE DE VARIATION (BAR)
SLS	Nylon 12 GF Powder	89,9	3,3
SLA	Grey Resin	115,2	9,5
SLA	BioMed Amber Resin	200,4	5,5
SLA	Rigid 10K Resin	387,9	14,8
SLA	Rigid 10K Resin (sablée)	399,4	–

Lors de l'analyse des résultats, il est important de noter que même la pression d'implosion moyenne la plus basse représente une profondeur considérable (89,9 bars pour les boîtiers en Nylon 12 GF Powder des imprimantes SLS de la série Fuse). 89,9 bars correspondent à la pression de l'eau à des profondeurs de près de 1000 m sous l'eau, soit bien plus que les zones explorées par de nombreuses communautés côtières qui peuvent bénéficier d'un accès à des recherches en eaux profondes à un prix abordable.



ANALYSE DES RÉSULTATS

Les résultats démontrent que l'impression 3D SLA et SLS sont des méthodes efficaces pour créer des boîtiers étanches lorsqu'elles sont combinées à l'utilisation de joints toriques, et que l'impression 3D SLA remporte la palme. Les pièces imprimées par FDM se sont révélées inadaptées à cette application, car elles absorbent l'eau directement après l'immersion et ne résistent à aucune pression.

Les matériaux SLA plus rigides ont fait preuve des meilleures performances sous pression. Des méthodes de post-traitement comme le sablage permettent d'améliorer encore les performances en réduisant la porosité de surface.

Rigid 10K Resin, imprimée sur la Form 3+ et sablée, est le meilleur choix pour créer des pièces étanches et peut résister à des pressions de plus de 380 bars. Le choix des joints toriques et du bon design sont également des éléments importants dans la conception d'un boîtier étanche. Des conceptions open source comme celle créée par Motsenbocker à l'URIL peuvent être utilisées pour fabriquer des pièces et des assemblages étanches en un temps record et de manière rentable.

Les résultats montrent que l'impression 3D, en particulier avec des imprimantes accessibles et abordables comme celles de la série Form 3 de Formlabs, peut contribuer à la démocratisation de la recherche marine et ouvrir de nouveaux horizons pour la recherche côtière. Des matériaux avancés combinés à un processus intuitif éprouvé font de cette technologie la solution optimale pour des projets de recherche de qualité à faible coût.

Pour en savoir plus sur l'Undersea Robotics and Imaging Lab et ses activités d'exploration des régions côtières et des grands fonds marins, consultez le site web du laboratoire.



[En savoir plus sur l'URIL](#)



Pour discuter des méthodes d'impression 3D et de la façon dont les solutions de post-traitement peuvent améliorer les qualités d'étanchéité de vos boîtiers, contactez notre équipe.