

# L'ABC du prototypage

PROTO LABS\*

**Les maquettes prototypes aident les équipes de conception à prendre des décisions en fournissant des données très précieuses sur les performances et les réactions à ces prototypes. Mais alors comment choisir le procédé le mieux adapté à votre projet ?**

La possibilité d'obtenir rapidement des pièces prototypes permettant de tester l'ajustement des composants et leur fonction peut aider à concevoir un produit avant de l'industrialiser. Il devient en effet possible de modifier la conception, les matériaux, les dimensions, la forme, l'assemblage, la couleur, la manufacturabilité et la robustesse en fonction des résultats des tests et analyses.

De nombreux procédés de prototypage **1** sont aujourd'hui à la disposition des équipes de conception de produits. Certains procédés utilisent des méthodes de fabrication classiques pour produire les prototypes. D'autres technologies sont apparues et ont été améliorées en relativement peu de temps. Il existe ainsi plusieurs dizaines de solutions pour réaliser des prototypes. L'évolution permanente des procédés de prototypage oblige le concepteur de produits à s'interroger constamment sur le meilleur procédé ou la meilleure technologie à utiliser.

Cet article a pour objet d'examiner les avantages et les inconvénients des principaux procédés de prototypage accessibles aux concepteurs d'aujourd'hui. Il fournit une description détaillée des différents procédés et décrit les propriétés mécaniques des pièces produites par chacun d'entre eux. Vous trouverez aussi un arbre de décision qui pourra être très utile aux concepteurs, en mettant en évidence les principales questions à se poser lors du choix d'un procédé. Au final, cet article vous aidera à sélectionner le procédé de prototypage le mieux adapté au processus de développement de votre produit.

## Les différents procédés de prototypage

### SLA – Stéréolithographie

La stéréolithographie est un procédé de fabrication additif qui construit les pièces, dans un bain de résine photopolymère durcissant aux UV, à l'aide d'un laser piloté par ordinateur. Le laser est utilisé pour dessiner et durcir une tranche du modèle de la pièce à la surface de la résine liquide. La couche

### MOTIS-CLÉS

machine,  
procédé,  
prototypage

solidifiée est ensuite abaissée en dessous de la surface de la résine liquide et l'opération recommence. Chaque nouvelle couche durcie adhère à la couche précédente. Ce processus continue jusqu'à ce que la pièce soit achevée. La SLA a été la première technologie de « prototypage rapide ».

**Avantages** : pour les maquettes ou les formes conceptuelles destinées à servir de modèle pour d'autres méthodes de prototypage, la SLA permet de produire des pièces ayant une géométrie complexe et d'excellentes finitions de surface par rapport à d'autres procédés additifs. Son coût est très compétitif et cette technologie est largement disponible sur le marché.

**Inconvénients** : les pièces prototypes sont beaucoup moins solides que les pièces produites à partir de plastiques techniques. Les pièces réalisées par SLA ne conviennent donc généralement pas aux tests fonctionnels. Par ailleurs, du fait que la résine durcit sous l'effet des UV, elle continue à durcir quand on l'expose à la lumière du soleil et les pièces peuvent devenir fragiles et cassantes au bout d'un certain temps. Bien que la SLA permette de réaliser des pièces ayant une géométrie complexe, elle ne donne pas d'indications sur la manufacturabilité finale du modèle. Enfin, les polymères liquides peuvent être très toxiques.

### SLS – Frittage sélectif par laser

Le procédé SLS utilise un laser pour créer des pièces strate par strate à partir de poudres qui sont frittées (fusionnées) de bas en haut. Les pièces SLS peuvent être précises et plus durables que les pièces SLA, mais leur finition est relativement médiocre et présente un aspect granuleux ou sableux. Les liaisons entre les particules fusionnées étant relativement faibles, les pièces ainsi créées sont moins solides que des pièces usinées ou moulées à partir de la même matière. De plus, il n'existe que très peu de plastiques disponibles sous la forme de poudre nécessitée par le SLS.

**Avantages** : les pièces SLS sont généralement plus précises et plus durables que les pièces SLA. Ce procédé permet de produire des pièces ayant une géométrie complexe.

**Inconvénients** : les pièces ont une texture granuleuse ou sableuse et ne conviennent généralement pas aux tests fonctionnels en raison de leurs faibles propriétés mécaniques. Bien que le SLS permette de réaliser des pièces ayant une géométrie complexe, il ne donne pas d'indications sur la manufacturabilité finale du modèle.

\* Ce dossier a été réalisé par la société Proto Labs que nous remercions pour son autorisation de publication ([www.protolabs.fr](http://www.protolabs.fr)). Proto Labs utilise des technologies propriétaires et des systèmes de production pour fournir des services de production de pièces prototypes et de petites séries.

	Procédé	Description	Robustesse	Finition	Exemples de matériaux
SLA	Stéréolithographie	Photopolymérisation au laser	2 500-10 000 (psi) 17,2-68,9 (MPa)	Couches additives 0,051-0,152 mm en moyenne	Photopolymères ressemblant à des thermoplastiques
SLS	Frittage sélectif par laser	Frittage laser de poudres	5 300-11 300 (psi) 36,5-77,9 (MPa)	Couches additives 0,102 mm en moyenne	Nylon, métaux
FDM	Dépôt de fil fondu	Extrusions fondues	5 200-9 800 (psi) 35,9-67,6 (MPa)	Couches additives 0,127-0,330 mm en moyenne	ABS, PC, PC/ABS, PPSU
3DP	Impression 3D	Liant liquide imprimé par jet sur de la poudre	Faible	Couches additives 0,089-0,203 mm en moyenne	Poudre à base de plâtre/liant liquide
PJET	PolyJet	Jet de résine photopolymère durcie par UV	7 200-8 750 (psi) 49,6-60,3 (MPa)	Couches additives 0,015-0,30 mm en moyenne	Photopolymères à base acrylique, photopolymères élastomères
CNC	Commande numérique par ordinateur (usinage)	Usinage sur machine CNC	3 000-20 000 (psi) 20,7-137,9 (MPa)	Procédé d'usinage soustractif (lisse)	La plupart des thermoplastiques de qualité commerciale et technique, métaux
RIM	Moulage par injection rapide	Moulage par injection, moule aluminium	3 100-20 000 (psi) 21,4-137,9 (MPa)	Moulage lisse (ou avec texture sélectionnée)	La plupart des thermoplastiques de qualité commerciale et technique

#### 1 Référence rapide : comparaison entre les différents procédés de prototypage

### FDM – Dépôt de fil fondu

Le procédé utilisant un dépôt de fil fondu construit les pièces de bas en haut à l'aide d'une tête d'impression pilotée par ordinateur. La matière utilisée dans ce procédé est un filament de résine extrudé que la machine refond sélectivement et dépose sur la couche précédente de chaque section de la pièce désirée. Le procédé FDM produit des pièces en ABS (acrylonitrile butadiène styrène) ou en plastique composite, qui seront donc plus solides que les pièces créées à l'aide d'autres procédés additifs. Toutefois, ces pièces sont parfois poreuses et leur finition externe présente une texture fortement crénelée ou ridée, en particulier au niveau de la jonction des couches. Il peut aussi s'avérer difficile de tenir des tolérances serrées avec ce processus.

**Avantages :** les pièces FDM sont relativement solides et peuvent permettre certains tests fonctionnels. Ce procédé permet de produire des pièces ayant une géométrie complexe.

**Inconvénients :** les pièces ont une finition de surface médiocre et présentent un effet crénelé prononcé. Par ailleurs, le temps nécessaire à la construction est plus long par ce procédé additif que par la stéréolithographie ou le frittage sélectif par laser. Bien que le dépôt de fil fondu permette de réaliser des pièces ayant une géométrie complexe, il ne donne pas d'indications sur la manufacturabilité finale du modèle.

*Le concepteur doit constamment s'interroger sur la meilleure technologie à utiliser*

### 3DP – Impression 3D

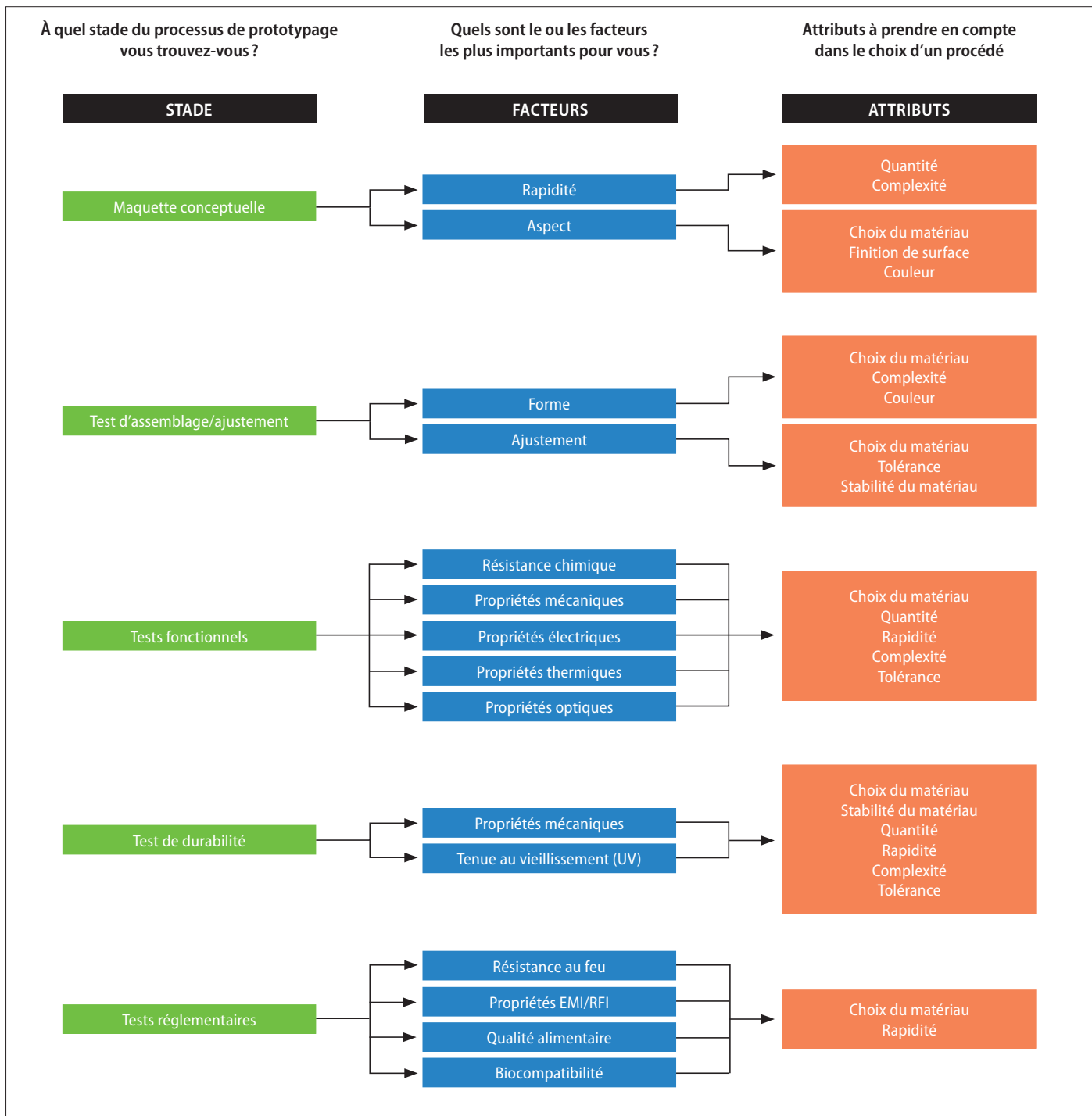
Ce procédé utilise une tête d'impression jet d'encre et un matériau comparable au « plâtre de Paris », qui fond dans l'eau. La machine dépose une fine couche de poudre de plâtre ; la tête passe au-dessus de cette couche et projette de minuscules gouttes d'eau aux endroits que l'on désire solidifier. Bien que ces pièces soient fragiles et grossières, il est facile de colorer les objets finis. Cette méthode est déconseillée pour les tests fonctionnels en raison de la fragilité des pièces.

**Avantages :** l'impression 3D est le procédé additif offrant le temps de fabrication le plus rapide. C'est aussi l'une des solutions les moins onéreuses pour les volumes de prototypes. Les maquettes en couleur peuvent apporter davantage d'informations et sont plus esthétiques. Le plâtre utilisé est un matériau non toxique et facilement disponible. Ce procédé permet de produire des pièces ayant une géométrie complexe.

**Inconvénients :** les pièces sont grossières et fragiles et il n'existe que très peu d'options de matériaux. Bien que la 3DP permette de réaliser des pièces ayant une géométrie complexe, elle ne donne pas d'indications sur la manufacturabilité finale du modèle.

### PJET – PolyJet

Le procédé PolyJet utilise des têtes d'impression jet d'encre pour projeter en couches très minces, à haute résolution, un matériau qui durcit aux UV. Un jet de matériau est déposé en couches ultrafines sur un



2 Arbre de décision

plateau, couche par couche, jusqu'à achèvement de la pièce. Chaque couche de photopolymère est durcie par UV immédiatement après avoir été déposée. Le matériau support, de type gel, spécialement conçu pour les géométries complexes, s'enlève facilement à la main et à l'eau. Cette méthode présente les mêmes inconvénients que la SLA, mais peut produire une finition de surface encore meilleure.

**Avantages :** ce procédé permet d'obtenir une bonne finition de surface ; parmi les procédés additifs, c'est

celui qui offre la meilleure finition. Il représente la meilleure solution additive pour les pièces complexes comportant des contre-dépouilles. Il permet de produire des pièces ayant une géométrie complexe.

**Inconvénients :** les pièces PJET sont peu solides (leur robustesse est comparable à celle des pièces obtenues par SLA). Bien que la technologie PJET permette de réaliser des pièces ayant une géométrie complexe, elle ne donne pas d'indications sur la manufacturabilité finale du modèle.

Attribut	SLA	SLS	FDM	3DP	PJET	CNC	RIM
Quantité	-	-	-	-	-	●	+
Complexité	+	+	+	+	+	●	+
Finition de surface	●	●	-	-	●	+	+
Choix du matériau	●	-	-	-	-	●	+
Stabilité du matériau	-	●	+	-	-	+	+
Couleur	-	-	●	+	-	-	+
Tolérance	-	-	-	-	-	+	+
Rapidité	+	+	+	+	+	+	●
Prix, faible volume	+	+	+	+	+	●	-
Prix, volume élevé	-	-	-	-	-	-	+

- Médiocre   ● Assez bon   + Bon

3 Matrice de comparaison des attributs des procédés de prototypage

### CNC – Commande numérique par calculateur (usinage)

Un bloc de plastique massif, fixé sur une machine-outil à commande numérique, est usiné jusqu'à obtention de la pièce finie. Cette méthode offre une robustesse et une finition de surface bien supérieures à celles que produisent les procédés additifs. La pièce possède toutes les propriétés et l'homogénéité du plastique parce qu'elle est produite à partir de blocs massifs de matière thermoplastique extrudée ou moulée par compression, alors que les procédés additifs utilisent des matériaux « ressemblant au plastique » et les pièces sont formées de couches superposées. Le grand choix de matériaux permet de réaliser des pièces ayant les propriétés désirées telles que : résistance à la traction, résistance aux chocs, températures de distorsion à chaud, résistance chimique et biocompatibilité.

Les tolérances obtenues sont bonnes et les pièces réalisées par ce procédé conviennent aux tests d'ajustement et aux tests fonctionnels. Les prototypes peuvent être livrés en quelques jours, dans les mêmes délais que les procédés additifs. Du fait qu'il s'agit d'un procédé par soustraction de matière au lieu d'un procédé additif, il est parfois difficile d'usiner les contre-dépouilles. L'usinage tend aussi à être relativement plus coûteux que les procédés additifs.

**Avantages** : les pièces usinées ont une bonne finition de surface et sont très robustes, car elles utilisent de véritables matières plastiques.

**Inconvénients** : certaines limitations de géométrie sont associées à l'usinage CNC et ce procédé revient beaucoup plus cher à utiliser en interne que les procédés additifs, en raison du coût des programmeurs

et des opérateurs requis pour créer les trajectoires d'outils et les accessoires de fixation pour les pièces.

### RIM – Moulage par injection rapide

Le moulage par injection rapide est réalisé en injectant des polymères thermoplastiques dans un moule, de la même manière que dans le moulage par injection en production industrielle. La rapidité du processus tient à la technologie employée pour produire le moule, celui-ci est généralement en aluminium au lieu du moule acier traditionnellement utilisé en production. Les pièces moulées sont solides et ont une excellente finition. Par ailleurs, ce procédé étant utilisé en standard pour produire des pièces en plastique, son utilisation pour créer des prototypes lorsque c'est possible présente des avantages inhérents. Pratiquement tous les thermoplastiques techniques peuvent être utilisés ; il n'y a donc pas de contraintes imposées au concepteur par les limitations du matériau de prototypage.

Le RIM comporte un coût initial d'outillage qui n'existe pas dans le cas des procédés additifs ni de l'usinage sur machine CNC. C'est pourquoi, dans la plupart des cas, il est logique de procéder à un ou deux cycles de prototypage rapide (soustractif ou additif) pour vérifier l'ajustement et les fonctions avant de passer au moulage par injection.

**Avantages** : les pièces moulées sont fabriquées à partir d'une très large gamme de thermoplastiques techniques. Elles ont une excellente finition de surface et sont un parfait indicateur quant à la manufacturabilité en phase de production.

**Inconvénients** : son coût initial peut être supérieur en raison des coûts d'outillage.

### Comment choisir un procédé

Afin de déterminer le procédé qui convient le mieux à votre projet, voici quelques outils.

**Étape 1** : utilisez d'abord l'arbre de décision 2 pour déterminer les facteurs présentant le plus d'importance pour vous en fonction du stade du processus de prototypage auquel vous vous trouvez, en vous référant aux définitions (voir encadré Définitions) le cas échéant.

**Étape 2** : sur la base des attributs recommandés pour votre ou vos facteur(s) les plus importants identifiés à l'étape 1, comparez les procédés à l'aide de la matrice 3 afin de déterminer le processus le mieux adapté à votre projet. ■

*Déterminez  
les facteurs  
déterminants pour  
choisir le procédé  
qui vous convient  
le mieux*

### POUR EN SAVOIR PLUS

Alexandre Taillard, « Quand le laser fait parler la poudre », *Technologie*, n° 183, 2013.

## Définitions

Les définitions varient et peuvent différer d'un lieu à un autre, mais on pourra utiliser les définitions ci-après comme point de départ.

### Maquette conceptuelle

Maquette physique rudimentaire réalisée pour illustrer une idée. Les maquettes conceptuelles permettent aux personnes travaillant dans divers domaines fonctionnels de voir concrètement une idée ; elles stimulent la réflexion et la discussion et motivent l'acceptation ou le rejet.

#### Attributs de prototypage importants

- Rapidité : délai nécessaire pour convertir un fichier informatique en prototype physique.
- Aspect : tout attribut visuel – couleur, texture, dimensions, forme, etc.

### Test d'assemblage/ajustement

Consiste à fabriquer tout ou partie des pièces d'un ensemble, les assembler et vérifier qu'elles s'ajustent bien. À un niveau rudimentaire, ce test permet d'identifier les erreurs de conception telles que deux languettes séparées par un intervalle de 2 cm, alors que les fentes correspondantes sont séparées par un intervalle de 1 cm. À un niveau plus fin, il permet de contrôler les différences dimensionnelles mineures et les tolérances. Il est évident que tout test concernant des tolérances doit utiliser le processus de fabrication réel ou un processus ayant des tolérances similaires.

#### Attributs de prototypage importants

- Forme : la forme de la pièce, ses caractéristiques, ses dimensions.
- Ajustement : comment la pièce s'assemble avec d'autres pièces.

### Tests fonctionnels

Servent à voir comment une pièce ou un ensemble fonctionneront en les soumettant à des contraintes préfigurant celles qu'ils rencontreront dans leur utilisation réelle.

#### Attributs de prototypage importants

- Résistance chimique : résistance aux produits chimiques, notamment aux acides, aux bases, aux hydrocarbures, aux carburants, etc.
- Propriétés mécaniques : robustesse de la pièce mesurée en résistance à la traction, résistance à la compression, résistance à la flexion, résistance aux chocs, résistance à la déchirure, etc.
- Propriétés électriques : interaction entre les champs électriques et la pièce. Elles pourront concerner la constante diélectrique, la force diélectrique, le facteur de dissipation, la résistivité superficielle et volumique, la dissipation de l'électricité statique, etc.
- Propriétés thermiques : modification des propriétés mécaniques se produisant sous l'effet de changements de température. Elles pourront concerner le coefficient d'expansion thermique, la

température de distorsion à chaud, le point de ramollissement Vicat, etc.

- Propriétés optiques : aptitude à transmettre la lumière. Peut comprendre l'indice de réfraction, la transmission et la diffusion.

### Tests de durabilité

Tests des propriétés qui pourront changer au bout d'un certain temps et qui présentent une importance pour que le produit reste fonctionnel pendant toute sa durée de vie prévue. Les tests de durabilité consistent souvent à exposer le produit à des conditions extrêmes (température, humidité, tension, UV, etc.), afin d'estimer sur une période brève comment le produit se comportera tout au long de sa vie.

#### Attributs de prototypage importants

- Propriétés mécaniques : résistance à la fatigue, aptitude à supporter un grand nombre de cycles de service à divers niveaux de sollicitation.
- Tenue au vieillissement (UV, fluage) : aptitude à résister à l'exposition aux UV avec un niveau de dégradation acceptable ; aptitude à résister à l'application prolongée de forces sur la pièce avec des niveaux acceptables de distorsion permanente.

### Tests réglementaires

Tests prescrits par une autorité de régulation ou une organisation de normalisation afin de garantir que les pièces seront adaptées à une utilisation particulière telle qu'une utilisation médicale, un service alimentaire ou une utilisation grand public. Ces organismes sont par exemple l'UL (Underwriters Laboratory), la CSA (Canadian Standards Association), la FDA (US Food and Drug Agency), la FCC (US Federal Communications Commission), l'ISO (International Standard Organization) et la CE (Commission européenne).

#### Attributs de prototypage importants

- Résistance au feu : degré d'inflammabilité d'un matériau ou d'une pièce en présence de feu.
- Propriétés EMI/RFI (interférences électromagnétiques/radioélectriques) : aptitude d'un matériau, d'une pièce ou d'un ensemble à filtrer ou à bloquer les interférences électromagnétiques ou radioélectriques.
- Qualité alimentaire : agrément pour l'utilisation d'un matériau ou d'une pièce pour les applications où ils se trouveront en contact avec des aliments en cours de préparation, servis ou consommés.
- Biocompatibilité : aptitude d'un matériau ou d'une pièce à pouvoir être en contact avec le corps humain ou animal, à l'extérieur ou à l'intérieur du corps, sans causer d'effet nocif (irritations, réaction avec le sang, toxicité, etc.). La biocompatibilité est importante pour les instruments chirurgicaux et les prothèses médicales.