

FFF 3D Printing with PC Materials:

Challenges and INTAMSYS Industrial-Grade Solutions

Introduction

Le polycarbonate (PC) est un thermoplastique d'ingénierie haute performance largement utilisé dans divers domaines industriels. Connu pour son excellente résistance mécanique, sa résistance à la chaleur, sa résistance aux chocs et sa clarté optique, le PC joue un rôle important dans les secteurs de l'automobile, de l'électronique, de l'électricité, du médical et de la fabrication industrielle. Bien que les processus de fabrication traditionnels tels que le moulage par injection soient idéaux pour la production standardisée à grande échelle, ils ne parviennent pas à répondre aux demandes croissantes de personnalisation, de composants haute performance en petits lots et de géométries complexes.

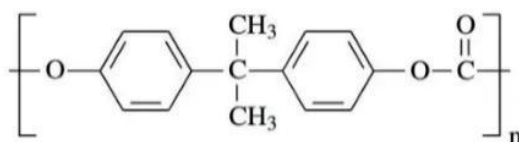
La fabrication de filaments fondus (FFF), une technologie d'impression 3D basée sur l'extrusion couche par couche, a ouvert de nouvelles possibilités pour les PC dans la fabrication personnalisée et le prototypage rapide, grâce à sa rentabilité, sa polyvalence des matériaux et sa simplicité opérationnelle.

Cependant, l'application du PC dans FFF se heurte encore à plusieurs obstacles techniques, tels qu'une mauvaise aptitude au traitement et des défauts d'impression fréquents. Ce livre blanc met en évidence les principaux défis de l'impression sur PC dans FFF, en analysant systématiquement le comportement des matériaux, les limites des processus et les modes de défaillance typiques. Il présente également des pistes d'optimisation et des recommandations d'équipements basées sur les meilleures pratiques actuelles impliquant des matériaux PC modifiés et des plates-formes d'impression haute performance.

Vue d'ensemble du PC

1. Propriétés des matériaux et processus de synthèse

Le polycarbonate (PC) est un polyester thermoplastique amorphe largement utilisé dans les applications d'ingénierie. Dans la production industrielle, le type dominant est le polycarbonate aromatique à base de bisphénol A, connu pour sa stabilité structurelle et ses performances exceptionnelles. Traditionnellement, la PC était synthétisée par polymérisation interfaciale du bisphénol A et du phosgène (COCl_2), une méthode très efficace. Cependant, en raison de la toxicité et des dangers environnementaux associés au phosgène, ces dernières années ont vu une transition progressive vers des voies non phosgène, telles que la transestérification par fusion, favorisant une voie de développement plus verte et plus pure pour les matériaux PC.



Graphique 1. Structure chimique du polycarbonate aromatique à base de bisphénol-A

2. Caractéristiques structurelles et avantages en termes de performances

Les performances supérieures du PC proviennent de son architecture moléculaire unique. Les anneaux de benzène dans la colonne vertébrale offrent rigidité et résistance à la chaleur, tandis que les groupes carbonate contribuent à une résistance aux chocs et une ténacité élevées. La structure de la chaîne moléculaire amorphe assure une excellente transparence et une excellente isolation électrique. De plus, le PC présente une stabilité dimensionnelle et une adaptabilité environnementale élevées, ce qui en fait un matériau polyvalent pour un large éventail d'applications d'ingénierie.

3. Techniques de modification courantes

Pour répondre aux diverses exigences des applications, l'industrie utilise plusieurs stratégies de modification clés pour améliorer les performances globales des PC :

- **Renfort de remplissage** : Renfort en fibre de verre (PC-GF) ou en fibre de carbone (PC-CF) pour améliorer la résistance, la rigidité et la stabilité thermique.
- **Additifs ignifuges** : L'incorporation de retardateurs de flamme peut élever l'indice d'inflammabilité du PC de UL94 V-2 à V-0, répondant ainsi aux normes de sécurité dans les secteurs de l'électronique, de l'automobile et de l'aérospatiale.

- **Mélange de polymères** : Les mélanges de PC tels que le PC-ABS et le PC-PBT améliorent la ténacité, la résistance à la fissuration sous contrainte et la stabilité chimique, élargissant ainsi l'utilisation du PC dans les applications automobiles et électroniques grand public.

4. Analyse comparative des performances pour FFF

Pour évaluer l'adéquation de la PC à la FFF, un système de notation comparative (échelle de 1 à 5) a été développé

Basé sur des indicateurs de performance clés : légèreté, résistance à la chaleur, résistance mécanique, ignifugation, isolation électrique, imprimabilité et coût. Les scores sont normalisés sur la base de données réelles pour les thermoplastiques d'impression 3D grand public.



Graphique 2. Tableau radar des scores de performance des thermoplastiques FFF grand public

Les données illustrent que le PC atteint un profil de performance bien équilibré sur tous les indicateurs clés, ce qui le positionne comme un matériau rentable et fonctionnellement robuste pour l'impression 3D de qualité industrielle. Sa résistance mécanique, sa stabilité thermique, son isolation électrique et son ignifugation répondent toutes aux normes de l'industrie. De plus, le PC présente une compatibilité favorable avec les processus FFF et maintient des coûts de matériaux modérés. Par rapport aux matériaux hautes performances tels que le PEEK, le PC offre des fonctionnalités comparables avec des exigences de traitement nettement inférieures et une compatibilité d'imprimante plus large, ce qui en fait le matériau de choix pour les utilisateurs à la recherche d'un rapport performance/coût optimal.

Applications industrielles du PC dans l'impression 3D

Avec l'avancement des capacités matérielles FFF et la disponibilité croissante de matériaux PC modifiés, le polycarbonate est devenu l'un des Thermoplastiques techniques à forte valeur ajoutée dans l'impression 3D industrielle. Dans les deux domaines d'application représentatifs suivants, les avantages matériels du PC sont pleinement utilisés, ce qui améliore considérablement l'efficacité de la fabrication et transforme les modèles de production.

1. Fabrication industrielle haut de gamme : de la validation du prototype à l'outillage fonctionnel

La haute résistance, la résistance à la chaleur et la stabilité dimensionnelle du PC en font un matériau clé dans la production de composants structurels et fonctionnels pour les secteurs de l'aérospatiale, de l'automobile et de la robotique. En tirant parti de l'impression 3D FFF, les ingénieurs de ces industries peuvent rapidement itérer des conceptions, fabriquer des géométries complexes et accélérer l'évolution des outils de production.

- **Vérification accélérée de la conception :**

L'itération rapide des composants structurels, tels que les connecteurs, les conduits et les boîtiers, améliore la vitesse et la flexibilité des cycles de développement de nouveaux produits.

- **Agilité de production accrue :**

La personnalisation à la demande des gabarits, des montages et des aides à l'assemblage permet aux fabricants de réagir rapidement aux changements de ligne et aux ajustements de production.

- **Une plus grande liberté de conception :**

Prend en charge les géométries optimisées pour la topologie et les assemblages multi-matériaux qui sont difficiles, voire impossibles, à fabriquer à l'aide de méthodes traditionnelles.

- **Répond aux exigences thermiques et mécaniques industrielles :**

Maintient l'intégrité mécanique à long terme dans des conditions de stress et de température élevées, y compris les compartiments moteur, les effecteurs finaux robotisés et les pièces sur des lignes de production automatisées.



Graphique 3. Exemple de composants imprimés sur PC utilisés dans la fabrication industrielle haut de gamme

2. Production finale en petites séries : renforcer les réseaux de fabrication et de services d'impression sur mesure

Dans des secteurs tels que la fabrication de produits électroniques, les pièces détachées d'équipements et les bureaux de services d'impression 3D, où les composants personnalisés, de petit volume et hautes performances sont en demande, l'impression FFF avec PC devient rapidement la pierre angulaire de la chaîne de fabrication numérique de nouvelle génération.

- **Prend en charge les modèles de livraison rapide :**

Élimine le besoin de création de moules et permet une production à la demande, idéale pour les pièces d'utilisation finale avec des géométries complexes et des mises à jour fréquentes de la conception.

- **Nouvelles sources de revenus pour les fermes d'impression :**

Combine des performances de qualité industrielle avec une imprimabilité efficace, répondant aux exigences fonctionnelles de produits allant des boîtiers de petits appareils aux connecteurs électriques, et aidant les fournisseurs de services à se développer sur le marché B2B.

- **Assemblage réduit grâce à la conception intégrée :**

Les pièces PC à haute résistance permettent des conceptions intégrées et monolithiques qui intègrent plusieurs fonctions en une seule impression, réduisant ainsi le travail de post-traitement et d'assemblage tout en améliorant l'efficacité du système.

- **Caractéristiques du matériau prêtes à la certification :**

Avec une ignifugation, une isolation électrique et une résistance à l'environnement exceptionnelles, le PC est compatible avec les normes de certification industrielle, ce qui réduit les délais de validation des produits.

- **Prend en charge les modèles de fabrication distribuée :**

À l'aide de jumeaux numériques et de la gestion à distance des appareils, l'impression sur PC permet une production localisée dans toutes les régions pour une livraison plus rapide et une résilience de la chaîne d'approvisionnement. La cohérence d'impression fiable du matériau et sa compatibilité de niveau industriel le rendent bien adapté aux packages de processus standardisés et aux modèles de tranchage, permettant un déploiement rapide et une sortie stable sur plusieurs sites, permettant aux fournisseurs de services d'impression d'établir des



réseaux de production distribués à haut rendement.

Graphique 4. Composants imprimés sur PC pour les applications finales en petits lots.

Les défis de l'impression FFF avec PC

Malgré sa grande adaptabilité des performances, le PC présente un certain nombre d'obstacles techniques lorsqu'il est utilisé dans l'impression FFF. Ces défis découlent principalement de ses propriétés thermiques et rhéologiques inhérentes, ainsi que des risques de défauts associés à un contrôle thermique insuffisant pendant le processus d'impression.

1. Limitations des propriétés des matériaux

- **Exigences thermiques élevées et faible fluidité**

Le PC a généralement une température minimale supérieure à 260°C, nettement supérieure à celle du PLA (~220°C) et

ABS (~250°C). Cela impose des exigences plus élevées en matière de conception de buses, de blocs chauffants et de chaleur

gestion. De plus, le PC a une viscosité à l'état fondu élevée et une faible fluidité, ce qui le rend sujet à la sous-extrusion ou aux défauts limites lors de l'impression à grande vitesse ou à large trajet. Des études indiquent que la viscosité à l'état fondu du PC est 3 à 5 fois supérieure à celle des matériaux FFF conventionnels.

- **Risques élevés de retrait et de déformation**

Avec un taux de rétrécissement linéaire allant de 13,6 % à 16,3 %, bien supérieur à celui de l'ABS (1 % à 3 %), le PC est particulièrement sujet au gauchissement, au soulèvement des bords et à la fissuration pendant la phase de refroidissement, en particulier lors de l'impression de pièces de grand format ou de structures à parois minces. Une contrainte thermique inégale est une cause majeure de déformation dans les impressions PC.

2. Défauts d'impression courants

- **Adhérence insuffisante entre les couches**

Le point de fusion élevé du PC entraîne un refroidissement rapide, conduisant souvent à une fusion intercalaire inadéquate. Cela réduit considérablement la résistance mécanique dans la direction Z. Les forts gradients de température entre les couches sont un facteur majeur de la séparation des couches fragiles, l'une des principales limitations affectant la fonctionnalité du PC dans les pièces imprimées.

- **Porosité et vides**

En raison de ses mauvaises caractéristiques d'écoulement et de sa solidification rapide, les impressions PC sont sensibles aux petits vides ou aux régions non remplies, en particulier dans les zones de contact avec les supports, les zones de transition et les intersections de coques. Ces défauts réduisent la résistance des pièces et augmentent la difficulté de post-traitement

3. Haute sensibilité aux paramètres du processus

- **Fenêtre de traitement étroite**

Le PC est extrêmement sensible au contrôle de la température, au flux d'air et à la planification de la trajectoire. Une coordination précise entre les températures de la buse, de la chambre et de la plaque de construction est nécessaire ; Sinon, des problèmes tels que le cordage, la surchauffe ou la rugosité de surface peuvent survenir.

- **Impact significatif sur la planification du chemin**

Il existe un fort couplage entre l'épaisseur de la couche et la vitesse d'impression : des écarts mineurs peuvent affecter la densité de remplissage et la liaison interfaciale. La conception et l'emplacement des structures de support jouent également un rôle essentiel dans le contrôle du gauchissement et la garantie de la précision dimensionnelle.

4. Stratégies d'atténuation : Synergie des matériaux et de l'équipement

- **Modification matérielle**

Le mélange de PC avec de la fibre de verre (PC-GF), de la fibre de carbone (PC-CF) ou des copolymères (PC-ABS et PC-PBT) peut améliorer les caractéristiques de fluidité à chaud et réduire le retrait, augmentant ainsi les taux de réussite d'impression et la précision dimensionnelle.

- **Chambres chauffées à haute température**

Les imprimantes FFF équipées de chambres fermées capables de maintenir des températures supérieures à 100°C peuvent réduire considérablement les contraintes thermiques et les déformations. Ceci est essentiel pour l'impression de grands composants structurels ou de lots de pièces d'utilisation finale.

- **Optimisation des paramètres de découpage**

L'ajustement de la densité de remplissage, du chevauchement des chemins, de l'épaisseur de la paroi et du temps de séjour entre les couches dans le logiciel de tranchage peut améliorer le collage à l'état fondu entre les couches et réduire les sources de stress thermique.

- **Séchage et stockage appropriés**

En raison de sa nature hygroscopique, le PC nécessite un stockage scellé dans des conteneurs secs et un séchage avant impression à des températures élevées pour garantir une qualité d'impression constante.

Ces défis soulignent le fait qu'une impression FFF réussie avec un PC nécessite non seulement une compréhension approfondie du comportement des matériaux, mais aussi la capacité de coordonner plusieurs dimensions du système : gestion thermique, contrôle de la trajectoire de mouvement et réglage des paramètres au niveau logiciel. Pour les utilisateurs industriels, la combinaison de filaments PC modifiés et de plates-formes matérielles performantes est la clé pour débloquer une impression 3D PC fiable et performante.

Solution de qualité industrielle :

INTAMSYS FUNMAT PRO 310 NEO

Pour relever les défis de l'impression de matériaux PC avec la technologie FFF, INTAMSYS a développé le FUNMAT PRO 310 NEO, une solution au niveau système conçue spécifiquement pour

Thermoplastiques haute performance. Grâce à sa conception structurelle et de processus avancée, la 310 NEO offre aux utilisateurs industriels une plate-forme d'impression fiable et prête à l'emploi.

1. Environnement stable à haute température : élimination du gauchissement et des fissures à froid

Equippé d'une chambre chauffée entièrement fermée capable de maintenir jusqu'à 100°C, le La FUNMAT PRO 310 NEO garantit un environnement d'impression thermiquement stable tout au long du processus. Cela réduit considérablement l'accumulation de contraintes thermiques lors du refroidissement du PC, ce qui permet d'obtenir les résultats suivants :

- Réduction spectaculaire du gauchissement et de la fissuration des coins dans les grandes pièces
- Fusion intercalaire améliorée, ce qui se traduit par une résistance plus élevée dans la direction Z et une intégrité structurelle plus élevées
- Qualité constante et répétabilité dimensionnelle tout au long de la production par lots

Cet environnement thermique contrôlé joue un rôle essentiel dans l'amélioration de la qualité globale des pièces.



Graphique 5. Comparaison de la déformation d'une pièce PC à différentes températures de chambre

2. Propriétés mécaniques améliorées : augmentation de plus de 50 % de la force d'adhérence entre les couches

En combinant les avantages d'une chambre haute température avec des paramètres d'impression et des stratégies de trajectoire d'outil optimisés, la FUNMAT PRO 310 NEO offre des améliorations significatives en matière de Performances mécaniques dans la direction Z.

Matériel	Pas de chauffage de la chambre	Chambre à 100°C	Facteur d'échelle
PC	24,9 millions de kilomètres	37,7 MPa	1,51x
PC-ABS	11,8 MPa	17,3 millions de kilomètres	1,47 fois

- Une plus grande fiabilité des pièces pour les composants fonctionnels
- Convient aux gabarits, connecteurs et pièces structurales dans les applications industrielles

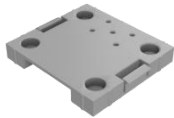
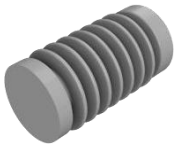
3. Capacité de débit élevé : accélération de la production et du prototypage en petits lots

La FUNMAT PRO 310 NEO, associée au logiciel de tranchage INTAMSUITE NEO, prend en charge l'impression à grande vitesse, la configuration IDEX à deux têtes et le chargement automatisé des profils de processus :

- **IDEX Mirror/Duplicate Mode** : Impression simultanée de deux pièces symétriques ou identiques, doublant la productivité
- **Profils de processus préconfigurés pour PC** : simplifie la configuration des paramètres et améliore le taux de réussite de la première pièce
- **Optimisation totale du temps** : plus de 50 % de gain de temps par rapport aux solutions conventionnelles

Exemple de cas : Conduits d'air automobiles (matériau PC)

- Imprimante FFF A : 15h 5min temps d'impression total
- FUNMAT PRO 310 NEO : 8h 40min, gain sur 6 heures

Model	FFF printer A	FUNMAT PRO 310 NEO	Time Saved
Guide inférieur -PC-FR (Electronics) 	Printing Time 1h 23m 59s	Printing Time 44m 28s	39m 31s
	Non-Printing Time 1h 33m 1s	Non-Printing Time 12m 42s	1h 20m 19s
Insulator -PC (Electronics) 	Printing Time 6h 9m 13s	Printing Time 5h 55m 24s	13m 49s
	Non-Printing Time 1h 16m 21s	Non-Printing Time 8m 9s	1h 8m 12s
HVAC Duct - PC (Automotive) 	Printing Time 10h 25m 35s	Printing Time 8h 24m 7s	2h 1m 28s
	Non-Printing Time 4h 39m 38s	Non-Printing Time 16m 24s	4h 23m 14s
Overhead Handle - PC-FR (Aerospace) 	Printing Time 4h 37m 11s	Printing Time 2h 37m 0s	2h 0m 11s
	Non-Printing Time 3h 12m 16s	Non-Printing Time 19m 10s	2h 53m 6s

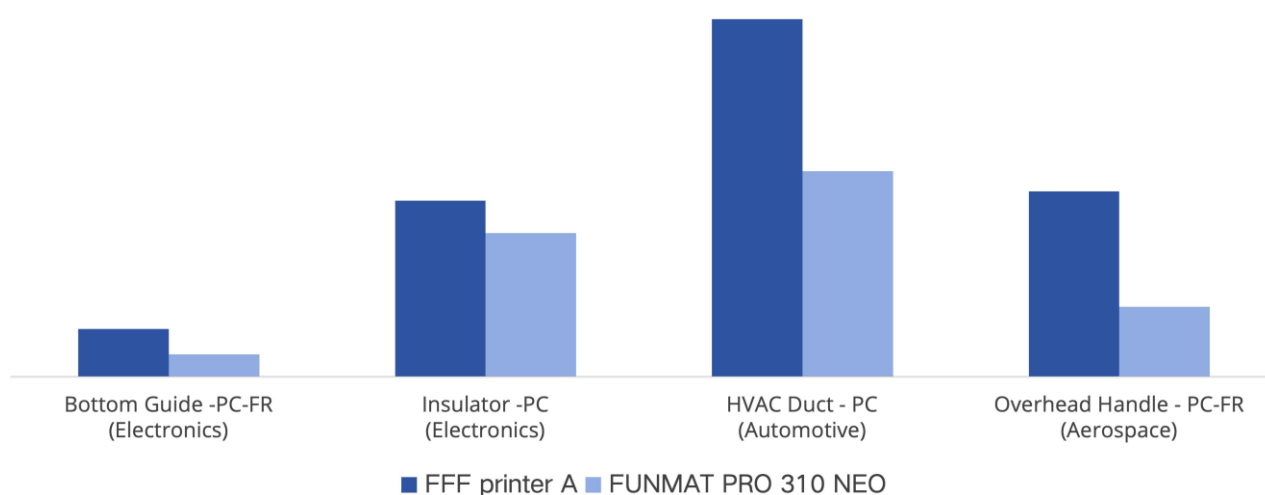


Figure 6 : Analyse comparative du temps d'impression sur les mêmes pièces de PC à l'aide de la FUNMAT PRO 310 NEO par rapport à l'imprimante FFF A

Les résultats montrent que lors de l'impression de pièces PC fonctionnelles complexes ou en grand volume, la solution INTAMSYS peut réduire le temps de production à 40 % à 60 % de la durée d'origine, améliorant considérablement le temps de réponse pour la fabrication en petits lots.

4.Efficacité logicielle révolutionnaire : INTAMSUITE NEO R2025.1.0

Avec la sortie d'INTAMSUITE NEO R2025.1.0 en avril 2025, l'efficacité globale de l'impression a atteint une nouvelle référence, grâce à des améliorations significatives dans les étapes clés du processus :

- **Optimisation de la planification du chemin :**

Dans le modèle de conduit d'air, des parcours d'outils plus intelligents ont réduit le temps de déplacement et de rétraction de 1 heure et 7 minutes

- **Efficacité de la structure de support :**

Une logique améliorée a permis de réduire l'utilisation de matériaux et le temps de calcul du découpage, ce qui a encore amélioré le débit

- **Réduction du temps sans impression :**

Dans le modèle à guide inférieur, la 310 NEO a effectué des opérations non imprimables en seulement 12 minutes, contre 1 heure 33 minutes sur un concurrent grand public, soit un gain de temps de 87 %

Ces améliorations montrent que la 310 NEO va au-delà de la seule vitesse d'impression, offrant une accélération de la chaîne complète à travers les étapes de préparation, d'impression et de livraison grâce à une intégration matérielle-logicielle poussée.

Conclusion et perspectives

Alors que l'impression 3D FFF continue d'évoluer rapidement, le PC est devenu l'un des matériaux à usage général haute performance les plus prometteurs pour les utilisateurs industriels, en raison de sa résistance mécanique exceptionnelle, de sa stabilité thermique, de son isolation électrique et de ses propriétés ignifuges. Qu'il soit utilisé pour la validation structurelle et l'outillage fonctionnel dans la fabrication industrielle haut de gamme, ou pour la production finale personnalisée en petits lots, le PC fait preuve d'une grande adaptabilité des matériaux et d'une forte viabilité commerciale.

Cependant, l'impression de PC présente également des exigences de performance plus élevées pour les systèmes d'impression 3D. Chaque étape du processus, de la préparation des matériaux, du contrôle thermique et de la planification de la trajectoire au post-traitement, nécessite une coordination et une optimisation systématiques.

L'INTAMSYS FUNMAT PRO 310 NEO se distingue dans ce contexte, en offrant une solution vraiment fiable et prête pour la production pour l'impression industrielle sur PC. Avec son architecture haute température, son système de mouvement de précision, son flux d'impression efficace et sa plate-forme logicielle intelligente, la 310 NEO offre une solution unique de qualité industrielle pour la production de pièces fonctionnelles.

À l'avenir, la convergence des matériaux haute performance et des systèmes d'impression intelligents propulsera la technologie FFF de la simple « fabrication de pièces » à la « fabrication de pièces de manière efficace, fiable et fiable ». INTAMSYS continuera à donner du pouvoir à ses clients mondiaux en faisant progresser l'ouverture des matériaux, l'évolution du matériel et l'intégration des processus, libérant ainsi tout le potentiel de la fabrication additive dans un plus large éventail d'applications industrielles.

Avec l'INTAMSYS FUNMAT PRO 310 NEO, les utilisateurs peuvent vraiment passer de « imprimable » à « prêt pour la production ». Cette plate-forme fournit un support essentiel pour l'application stable du PC et d'autres matériaux avancés dans les pièces fonctionnelles, la fabrication à faible volume et les composants structurels complexes.

Découvrez la puissance industrielle du FUNMAT PRO 310 NEO.

Visitez le site Web d'INTAMSYS www.intamsys.com pour demander un échantillon d'impression gratuit et voir les performances par vous-même.

Contactez notre équipe de vente pour recevoir une solution personnalisée pour votre secteur d'activité.



Informations

Téléphone :

01 39 30 65 06

Email :

info@cadvision.fr

Internet :

www.cadvision.fr

INTAMSYS

www.intamsys.com

info@intamsys.com

Copyright © 2025 INTAMSYS Technology. INTAMSYS se réserve le droit de modifier toute information sans mettre à jour cette publication.