



LE RAPPORT 2024

RISQUES D'ÉMISSION TOXIQUE LIÉS À L'IMPRESSION 3D AU BUREAU

Il est important d'être conscient des risques pour la santé associés à l'utilisation d'imprimantes 3D.

ALVEO 3D



07 67 74 29 83



www.alveo3d.com

GLOSSAIRE

ATMO	Indice de la qualité de l'air
FDM	Fused Deposition Modeling
SLA	La stéréolithographie
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
PLA	Polylactic Acid
TPU	Thermoplastic Polyurethane
PETG	Polyethylene Terephthalate Glycol
INRS	Institut National de Recherche et de Sécurité
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
PC	Polycarbonate
ALI	Air-Liquid Interface
TSH	Thyroxine
COV	Composés Organiques Volatils
UFP	Particules ultra-fines
PCTPE	PolyCyclohexylenedimethylene Terephthalate
MG	Moyenne Géométrique
GSD	Écart Type Géométrique
PPM	Parties Par Million
VEMP	Valeur d'Exposition Moyenne Pondérée
VLEP	Valeur Limite d'Exposition Professionnelle
CIRC	Centre International de Recherche sur le Cancer
PPB	Parts Per Billion
PM	Particulate Matter
HEPA	High Efficiency Particulate Air
µg:	Microgramme
NIST	National Institute of Standards and Technology

INTRODUCTION

Le marché de l'impression 3D de bureau connaît une croissance fulgurante, avec une projection atteignant les 20,93 milliards de dollars d'ici à 2030 et un taux de croissance annuel composé (TCAC) de 23,4 % entre 2023 et 2030¹.

L'adoption de ces techniques concerne particuliers et professionnels, touchant de plus en plus de secteurs.

L'utilisation de ces procédés génère la production de milliers tonnes de filaments et de résines par an. L'étude de Protolabs révèle que 77 % des participants affirment que le médical est le marché qui a le plus grand potentiel d'impact, avec une prédominance de l'impression 3D SLA qui permet d'obtenir des détails très fins et fidèles.

Cependant, cette évolution rapide soulève des questions importantes concernant la sécurité et les risques environnementaux associés à la fabrication additive de bureau. Alors que l'impression 3D devient de plus en plus répandue, les processus d'impression, notamment ceux impliquant l'utilisation de filaments FDM et de résines, peuvent générer des émissions potentiellement nocives pour les utilisateurs et l'environnement, nécessitant ainsi une attention particulière.

Ce dossier vise donc à clarifier ces enjeux et à proposer des solutions viables pour assurer une impression 3D sécurisée et respectueuse de l'environnement. En explorant les risques associés à la fabrication additive de bureau. À identifier les meilleures pratiques pour minimiser ces risques, nous visons à promouvoir une utilisation responsable et durable de la technologie d'impression 3D de bureau.

¹ <https://www.grandviewresearch.com/press-release/global-desktop-3D-printing-market>

SOMMAIRE

Avant-propos.....

Glossaire.....

Introduction.....

I. Les particules ultrafines.....

1. Définition.....

2. Évaluations des risques.....

II. Les composés organiques volatils.....

1. Définition.....

2. Risques : sujet bien connu.....

III. Les études liées aux émissions.....

1. Impression 3D en milieu professionnel : Risques pour la santé
respiratoire des travailleurs.....

2. Étude sur les effets respiratoires chez les rats

IV. Études liées aux émissions sur les techniques de la Fabrication additive : FDM et résines

.....

1. Étude des Émissions Toxiques des Filaments FDM.....

2. Étude des Risques toxiques liés à l'Impression 3D avec Résine.....

V. Quelles alternatives et solutions face aux risques liés aux imprimantes 3D ?.....

1. Caissons et systèmes de purification d'air

2. Réglementation professionnelle.....

3. Formation et Information du Personnel

4. Instructions de sécurité en impression 3D.....

5. Étude de cas

VI. Conclusion

I. Nanoparticules

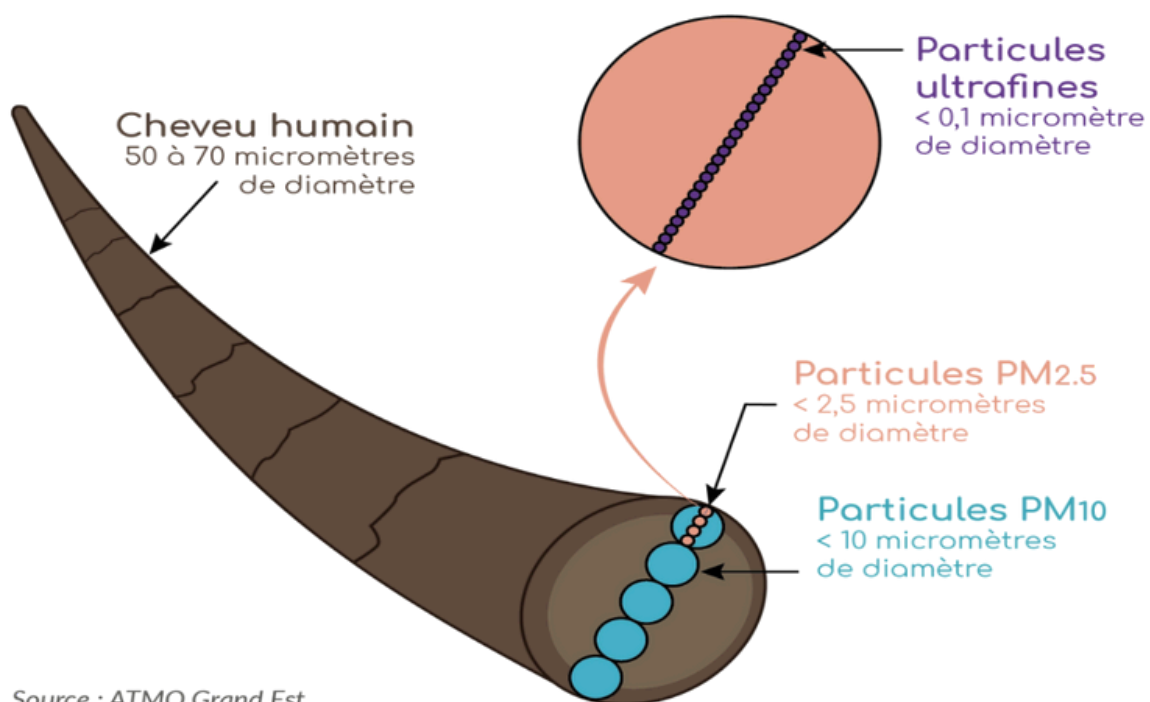
1. Définition

Même si nous utilisons le terme nanoparticules pour désigner les particules émises par la fabrication additive, nous devrions parler uniquement de particules ultrafines. **Le terme nanoparticule** est le plus fréquemment utilisé pour désigner une particule fabriquée volontairement.

Selon la commission européenne et GreenFacts³ : « Les particules fines, ayant un diamètre inférieur à 0.1 micromètre, sont appelées "particules ultrafines" (PM0.1). »

Le terme "**particule ultrafine**" désigne la plupart du temps des particules de taille nanométrique issues involontairement d'un processus². Les critères d'évaluation de la qualité de l'air défini par **ATMO** sont exprimés généralement par l'emploi des termes PM10 et PM2,5.

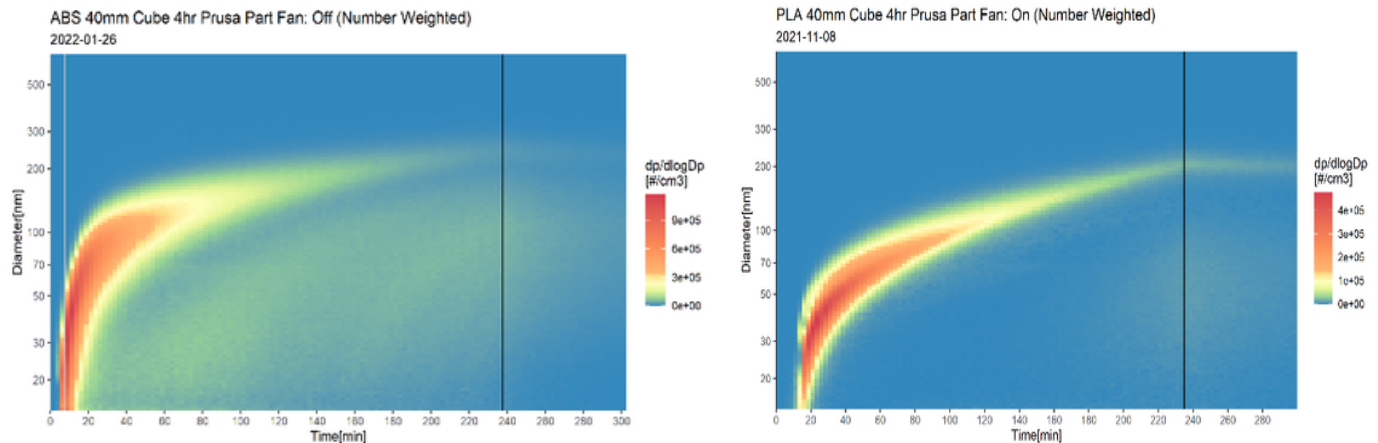
Pour comparaison, une particule ultrafine se situe dans une plage de taille allant de 10 à 100 nanomètres, tandis que les particules PM2,5 se situent autour de 2500 nanomètres et les PM10 atteignent environ 10 000 nanomètres.



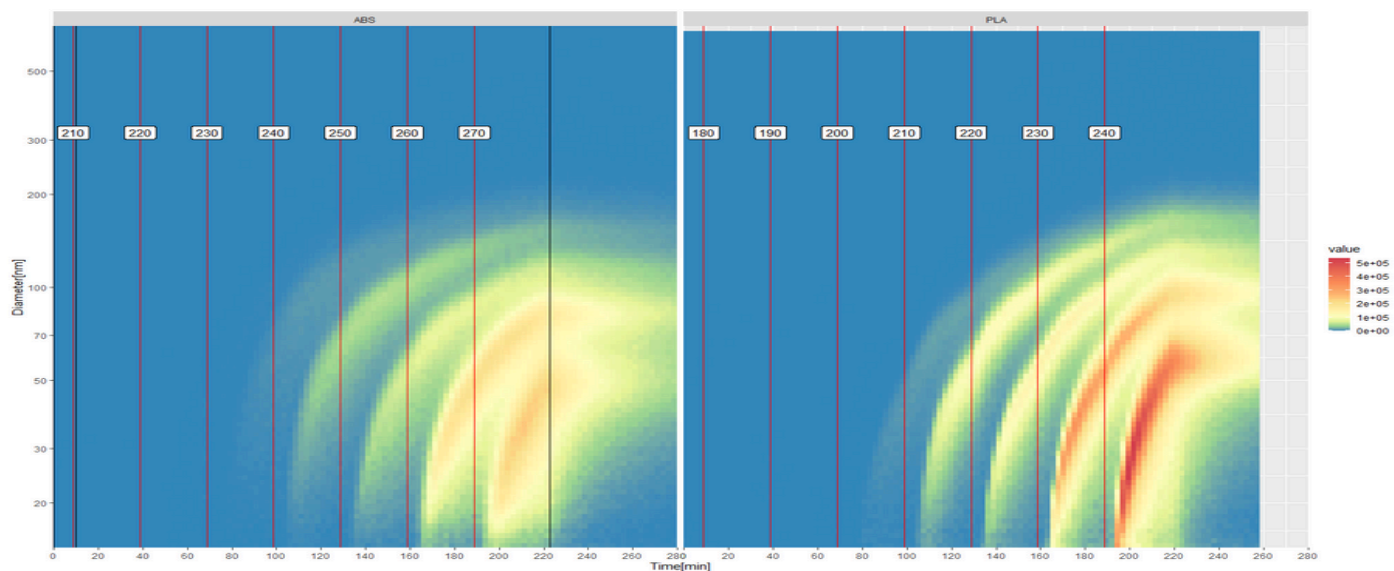
² https://www.oqlf.gouv.qc.ca/ressources/bibliotheque/dictionnaires/VocabulairesPDF/terminologie_nanotechnologie.pdf

³ https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/fr/pollution-air-interieur/glossaire/pqrs/particules-fines.html

Suite à une collaboration avec le **BFR**⁴ en 2022 avec Mme Heiki, l'organisme nous a partagé les illustrations suivantes qui montrent dans leurs tests que la majorité des particules émises par une imprimante FDM se situe entre 10 et 100 nanomètres.



Les recherches approfondies menées ultérieurement ont corroboré les conclusions initiales, mettant en évidence la présence de particules ultrafines dans les émissions provenant des imprimantes 3D.



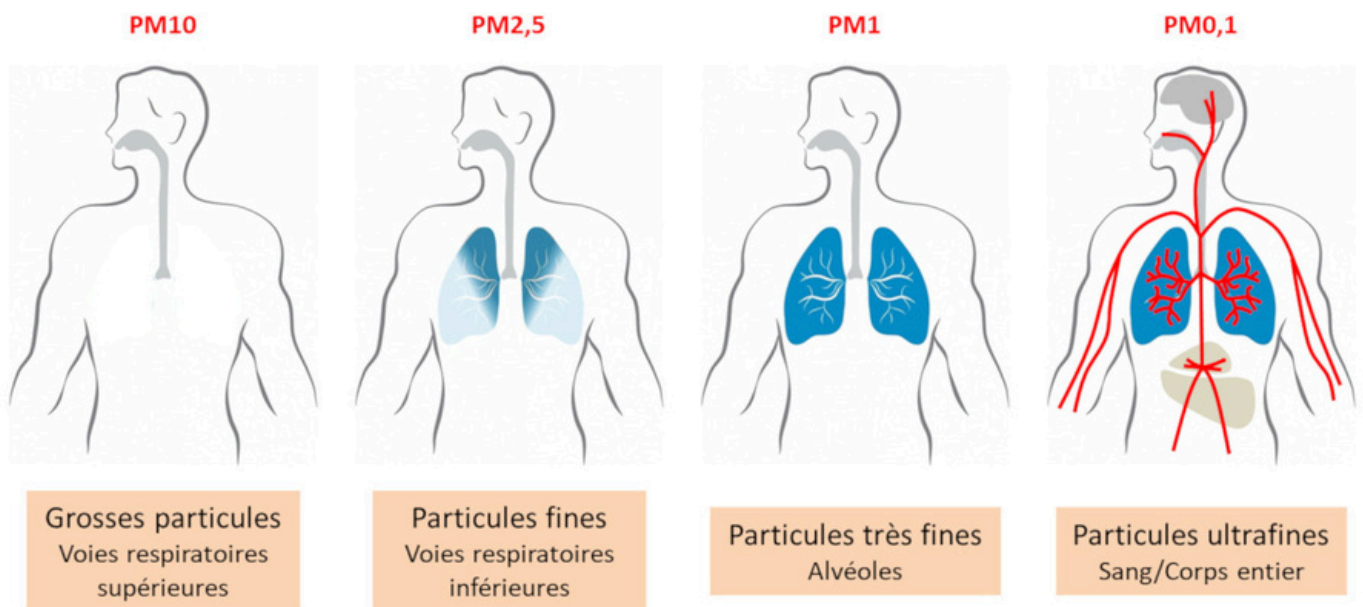
⁴ Le BFR, connu en allemand sous le nom de **Bundesinstitut für Risikobewertung**, est l'organisme fédéral allemand chargé d'évaluer les risques liés à la sécurité alimentaire, la sécurité des produits et des substances chimiques, la contamination de la chaîne alimentaire, la protection des animaux et la santé des consommateurs.

PARTIE ÉTUDE DE MASSE :

Un nombre croissant d'études souligne un lien entre la taille des particules et leurs effets sur la santé. Dans l'étude publiée par **NANEOS**⁵, les chercheurs exposent que les plus petites particules sont le plus susceptible de rester dans l'organisme, l'étude de **PUBMED**⁶ s'attarde sur la plus grande absorption des PUF par les tissus organiques ce qui peut entraîner une toxicité plus élevée.

L'étude de **SCIENCE DIRECT**⁷ tente de comparer les effets toxicologiques entre les PM2.5 et PM10 et les PUF (< pm2.5) mettant en avant leurs effets nocifs supérieurs sur l'organisme de l'être humain. La prise de conscience des enjeux de santé autour des PUF est encore un sujet d'étude.

La dangerosité des PUF semble provenir de leur géométrie. Le ratio surface/masse étant plus élevé ; ces particules pénètrent en profondeur tandis que les particules de taille supérieures semblent avoir une rétention plus limitée par l'organisme.



⁵ <https://www.naneos.ch/pdf/LDSA.pdf>

⁶ <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16002369/>

⁷ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749122010090>

2. Évaluations des risques

Des chercheurs de la **Georgia Institute of Technology** et de l'organisme à but non lucratif UL Chemical Safety ont mené une analyse approfondie sur les émissions potentielles de pollution de l'air liées aux imprimantes 3D. Cette étude corrobore les résultats partagés par BFR dans l'introduction, et montre là aussi le dégagement majoritaire de particules ultrafines durant le processus d'impression 3D.

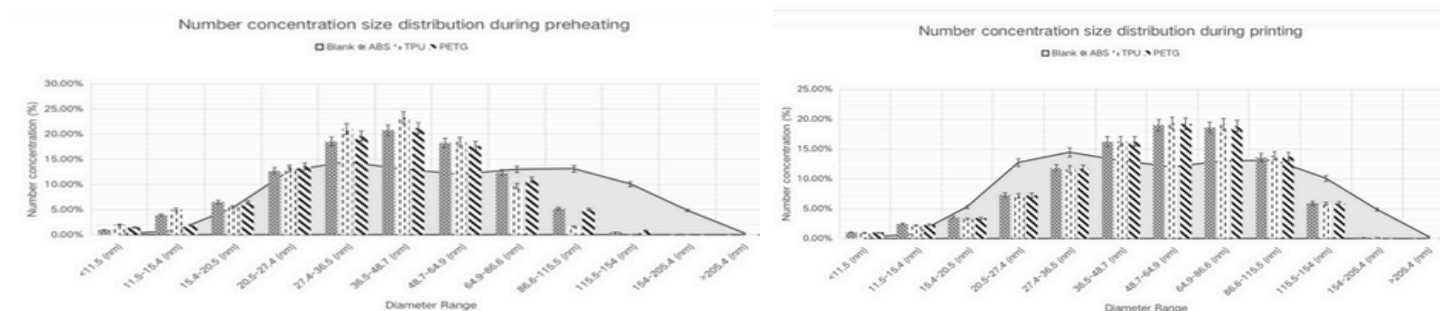
L'étude la plus récente a examiné **la cytotoxicité** et a aussi caractérisé les particules ultrafines (UFP) émises par les imprimantes 3D de bureau utilisant différents filaments, tels que l'ABS, le TPU et le PETG.

La cytotoxicité fait référence à la capacité d'un agent chimique ou biologique à être toxique pour les cellules, pouvant éventuellement les détruire. Dans cette étude, les chercheurs ont utilisé une imprimante 3D de bureau équipée d'une hotte pour mener leurs expériences. Ils ont mesuré la concentration en nombre de particules d'aérosol à l'aide d'un analyseur de particules à mobilité variable.

Les résultats ont montré que la concentration de particules émises variait en fonction du type de filament utilisé, avec l'ABS émettant le plus de particules, suivi du PETG et du TPU. De plus, les particules émises pendant la phase de préchauffage de l'impression étaient plus petites que celles émises durant la phase d'impression.

⁸ Investigating particle emissions and aerosol dynamics from a consumer fused deposition modeling 3D printer with a lognormal moment aerosol model: Qian Zhang, Girish Sharma, Jenny P. S. Wong, Aika Y. Davis, Marilyn S. Black, Pratim Biswas & Rodney J. Weber; Received 19 Jan 2018, Accepted 04 Apr 2018, Published online: 30 Apr 2018

⁹ Cytotoxicity and Characterization of Ultrafine Particles from Desktop Three-Dimensional Printers with Multiple Filaments; by Runcheng Fang, Afzaal Nadeem Mohammed, Jagjit Singh Yadav and Jun Wang 1; Published: 22 August 2023



Distribution de la taille des particules dans les différentes phases d'impression :
préchauffage (en haut) et impression (en bas)

Le tableau ci-dessous donne un aperçu de la taille des particules dans l'air générées par différents filaments d'imprimante 3D (ABS, TPU, PETG) ainsi que par un processus de combustion de référence (blanc). Pour le filament ABS, environ 155 056 particules ont été mesurées en moyenne.

La taille moyenne de ces particules est d'environ 66,01 nanomètres (<100 nanomètres), indiquant une variété de tailles avec un écart-type d'environ 1,75 ; ce qui correspond à la distribution des nanoparticules qui est regroupée autour de la moyenne.

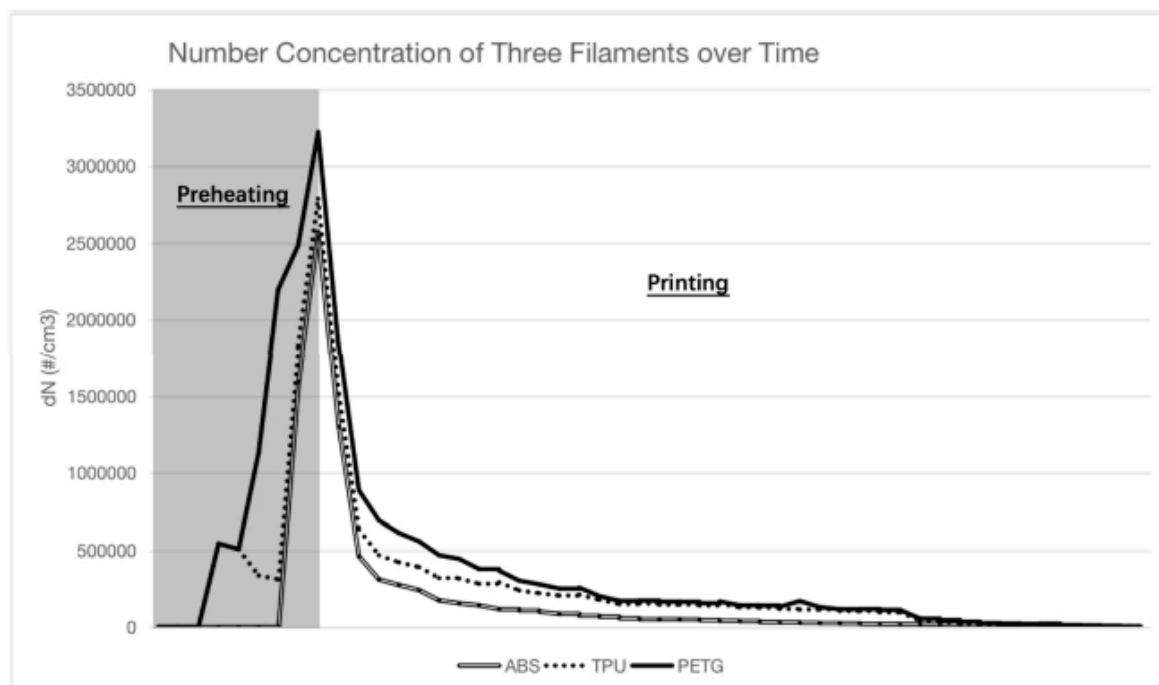


Figure 4. Concentration en nombre de particules de trois filaments différents en fonction du temps.

Tableau 3. Moyenne géométrique (GM), écart-type géométrique (GSD) et diamètres moyens (Mean) (nm) des particules émises.

Filaments	GM	GSD	Moyenne
Blanc	62.94	1.93	77.65
ABS	66.01	1.75	75.99
TPU	60.90	1.77	70.65
PETG	49.89	1.75	57.81

Cela signifie que les filaments d'imprimante 3D produisent des particules de différentes tailles, majoritairement entre 10 et 100 nanomètres. Les scientifiques utilisent des mesures spécifiques, comme la moyenne géométrique (MG) et l'écart type géométrique (GSD), pour mieux comprendre cette diversité de tailles dans les particules. Ces données aident à caractériser de manière réaliste la distribution des particules générées par l'impression 3D. Nous pouvons donc dire que les mesures en qualité de l'air basé sur des indicateurs comme le PM_{2,5} et PM₁₀ ne sont pas représentatifs de l'émissivité de l'impression 3D FDM.

De plus, cette étude a examiné la toxicité des particules émises par une imprimante 3D sur des cellules **A549**¹⁰ cultivées dans un système d'interface air-liquide (ALI) pendant des durées d'exposition de 45 et 90 minutes. Après exposition, les cultures ALI ont été incubées à 37 °C durant 24 heures, puis évaluées pour déterminer le degré de cytotoxicité à l'aide du **test CYQUANT LDH** (Invitrogen, Waltham, MA) (n = 3 pour chaque exposition).

Ce test LDH mesure le pourcentage de LDH libéré dans la chambre basale, ce qui est indicatif de dommages et de lyse cellulaires. Les tests LDH sont des protocoles standardisés utilisés pour évaluer les dommages aux cellules et sont fréquemment employés dans les études de cytotoxicité pour évaluer les effets néfastes des substances sur les cellules.

Les résultats ont montré une augmentation de la cytotoxicité avec une exposition de 45 minutes par rapport à une exposition de 90 minutes. De plus, l'étude a révélé que différents types de filaments d'impression 3D, tels que l'ABS, le PETG et le TPU, ont des effets toxiques variables sur les cellules humaines, l'ABS étant le plus nocif, suivi du PETG et du TPU.

Ces conclusions soulignent l'importance de comprendre les risques potentiels pour la santé liés à l'utilisation de technologies d'impression 3D, et suggèrent la nécessité de recherches supplémentaires pour évaluer les réponses cellulaires à long terme à ces expositions.

¹⁰ Les cellules épithéliales humaines A549 sont une lignée cellulaire dérivée d'un carcinome pulmonaire. Elles sont souvent utilisées en recherche pour étudier les réponses cellulaires pulmonaires, notamment en ce qui concerne l'absorption des médicaments, la réponse inflammatoire et la toxicité.

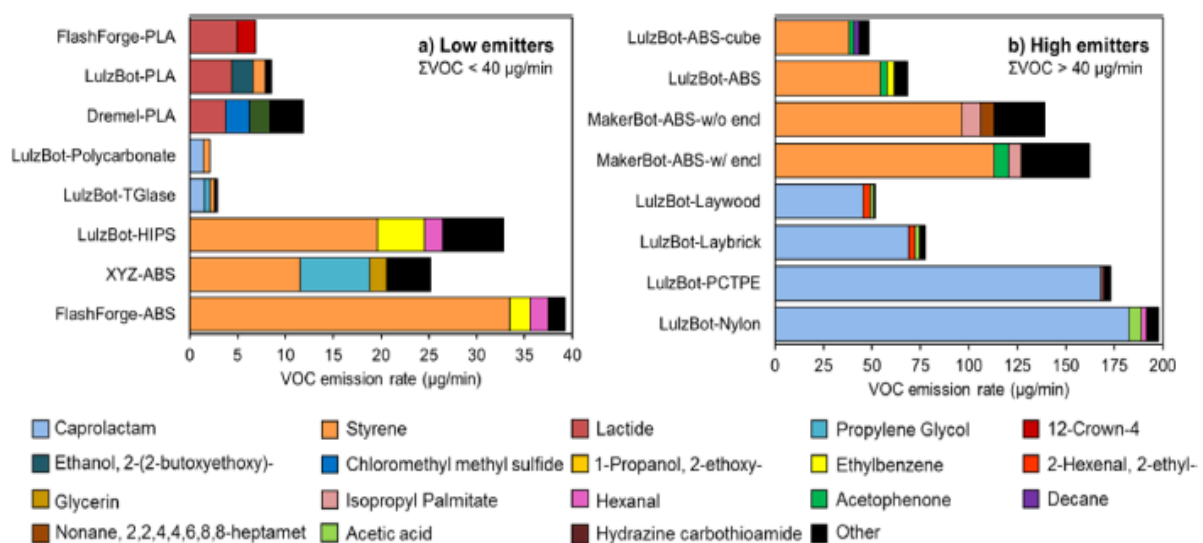
II. LES COMPOSÉS ORGANIQUES VOLATILES

1. Définition

COV est l'acronyme de "composé organique volatile". Les COV ont des points d'ébullition très bas et sont facilement libérés sous forme de vapeur ou de gaz par les produits qui les contiennent. L'origine de cette substance peut être artificielle ou naturelle. Certains sont connus pour être inoffensifs pour la santé, les autres sont toxiques pour l'homme.

Parmi les COV les plus courants figurent le formaldéhyde, le benzène, le styrène, l'acétone... et ils sont produits par de nombreux produits de consommation tels que les cigarettes, la colle, les peintures, les liquides de nettoyage à sec, les produits de préservation du bois et les résines d'imprimante. Les équipements de nettoyage et de désinfection, les désodorisants, les matériaux de construction, les imprimantes, les photocopieuses, les pesticides, etc. Les COV sont présents partout autour de nous, y compris dans les objets ménagers.

En fait, quand nous parlons d'émissions dans l'impression 3D, nous discutons principalement des nanoparticules dans le FDM et des COV libérés dans les résines d'impression 3D. Ces composés sont émis par les matériaux utilisés dans les imprimantes 3D, notamment lors de l'impression avec certains types de filaments (ABS) ou de résines.



Parham Azimi, Dan Zhao, Claire Pouzet, Neil E. Crain et Brent Stephens ont réalisé une étude, qui explore les émissions de nanoparticules et COV générées par 5 modèles d'imprimantes 3D : Le Flashforge Creator, le Dremel 3D Idea Builder, le XYZprinting Da Vinci 1.0, le LulzBot Mini, et le MakerBot Replicator 2X.

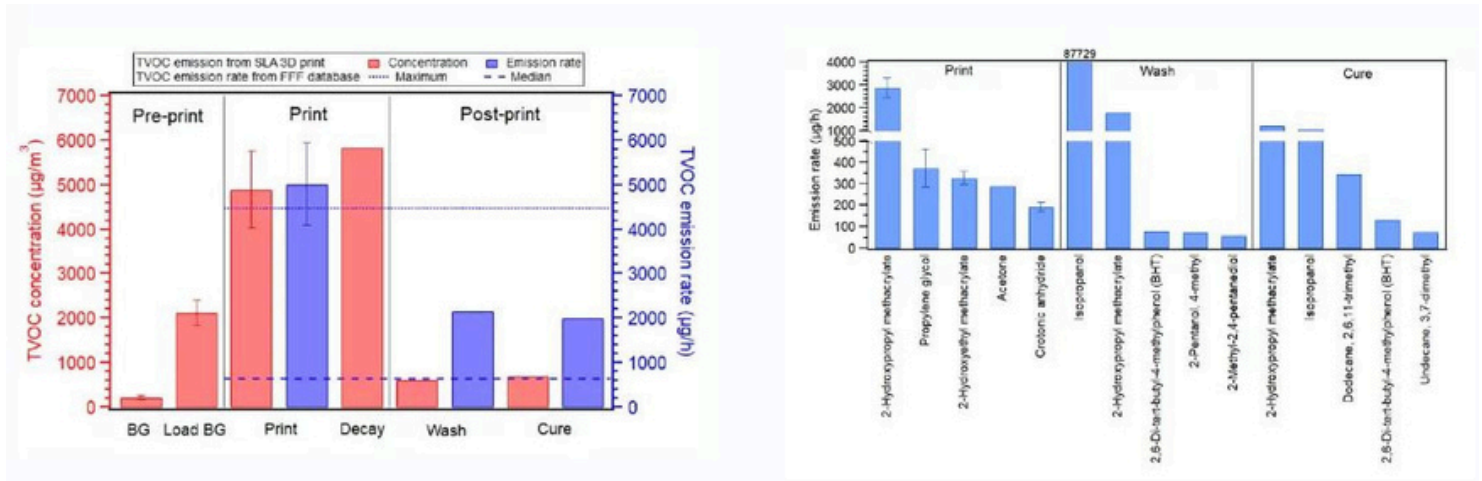
Pour la résine, les COV dans l'impression 3D font référence aux gaz et vapeurs **émis avant l'impression (préparation du matériau), pendant le processus d'impression, et après l'impression (nettoyage)**. Ils peuvent présenter des risques pour la santé des personnes qui y sont exposées, y compris les fabricants et les personnes se trouvant à proximité, qui peuvent tous être affectés par l'émission de COV. Ils se composent d'au moins un atome de carbone et un atome d'hydrogène.

L'impression résine libère significativement plus de COV par rapport à l'impression FDM. Nous pouvons dire que la concentration des émissions est inversement proportionnelle par rapport au FDM.

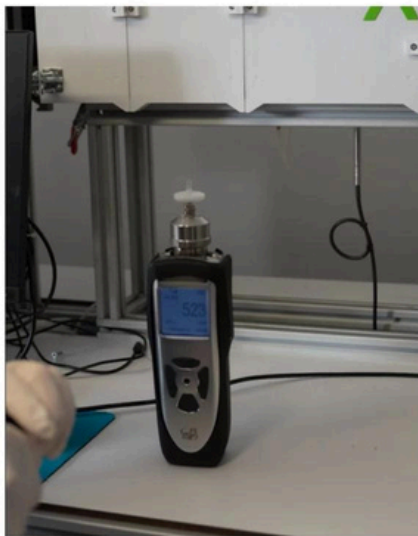
L'étude a été publiée en 2022 par l'American Chemical Society¹¹. Ils ont identifié et quantifié une liste complète de COV émis à l'aide d'un laboratoire d'analyse établi qui comprend une base de données spécifique aux environnements intérieurs. Voici quelques-unes des principales conclusions de l'étude :

1. **Émission importante de COV, faible émission de particules**: L'étude a observé des émissions minimales de particules, mais a identifié 30 à plus de 100 COV individuels émis au cours des différentes phases du processus d'impression 3D SLA, notamment l'impression, le lavage et le durcissement. Les émissions totales de COV étaient nettement plus élevées que celles de l'impression 3D par extrusion de matériaux, les principaux COV étant liés à la résine et aux produits chimiques utilisés dans ces processus.
2. **Variété de produits chimiques émis** : Un mélange complexe de sensibilisants, d'agents cancérigènes, d'irritants et de produits chimiques inflammables, notamment des esters, des alcools, des aldéhydes, des cétones, des aromatiques et des hydrocarbures, a été identifié comme étant des émissions provenant des procédés résines.
3. **Risques sanitaires liés à l'exposition** : Les COV émis, y compris des irritants et des cancérogènes connus comme le formaldéhyde et le naphtalène, pourraient dépasser les niveaux recommandés à l'intérieur des bâtiments, ce qui pourrait provoquer des irritations et d'autres effets sur la santé des utilisateurs.

¹¹ Zhang, Q., Davis, A. Y., & Black, M. S. (2022). Emissions and Chemical Exposure Potentials from Stereo lithography Vat Polymerization 3D Printing and Post-processing Units. ACS Chemical Health & Safety, 29(3), 184–191



En réalité, les fabricants cherchent à fabriquer de la résine et du filament sans odeur, mais cela pourrait inciter les gens à être moins vigilants. La transparence sur les niveaux de toxicité des COV et leurs effets est cruciale pour la sécurité de l'impression 3D. La sécurité de l'impression 3D, notamment en ce qui concerne les émissions et les matériaux, mérite un débat plus ouvert.



0,523 ppm air intérieur



2,376 ppm à l'ouverture de la résine ABS



123,7 ppm à l'ouverture de l'IPA

Note: Les niveaux de COV dans l'air extérieur sont généralement compris entre 0 et 0,05 ppm. Les niveaux dans l'air intérieur peuvent varier de 0,2 à 0,5 ppm.

Notre test montre que les résines d'impression 3D émettent des niveaux plus élevés de COV dès l'ouverture des récipients. Les solvants présents dans les résines se volatilisent au contact de l'air.

2. Les risques des COV sur la santé humaine

D'après le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC), certains COV seraient dangereux. Le centre en classe certains comme des cancérogènes possibles cancérogènes (notamment le styrène) ou probables cancérogènes (c'est le cas, par exemple, de l'éthylbenzène).

D'autres plastiques, tel le toluène, ne sont pas cancérogènes, mais tous ceux relevés dans l'étude sont souvent responsables de maux divers comme des nausées, des irritations ou de la faiblesse musculaire. Les principaux effets aigus des COV sont des maux de tête, des étourdissements, des vertiges qui vont induire une baisse de l'attention et de la concentration et ainsi augmenter possiblement les accidents de travail.

Tableau 1. Principaux COV émis lors d'un processus d'impression 3D ainsi que leurs effets aigus et chroniques sur la santé humaine, leur classification CIRC et leur VEMP en ppm et en mg/m³

COV	Effets sur la santé	Classification CIRC*	VEMP
Styrène	<i>Effets aigus</i> : maux de tête, nausées, vomissements, somnolence, vertiges et faiblesse musculaire <i>Effets chroniques</i> : atteinte du système nerveux central et auditif	Groupe 2A	50 ppm 213 mg/m³
Éthylbenzène	<i>Effets aigus</i> : somnolence, maux de tête, étourdissements et vertiges <i>Effets chroniques</i> : manque de données	Groupe 2B	100 ppm 434 mg/m³
Acrylonitrile	<i>Effets aigus</i> : maux de tête, nausées, vomissements, sentiment d'appréhension, irritabilité <i>Effets chroniques</i> : atteinte du système nerveux central, troubles du sommeil	Groupe 2B	2 ppm 4,3 mg/m³
Formaldéhyde	<i>Effets aigus</i> : irritation locale des muqueuses, y compris les yeux, le nez et les voies respiratoires supérieures <i>Effets chroniques</i> : augmentation de l'incidence de maladies respiratoires chroniques obstructives, troubles neurologiques (diminution de la concentration et de la mémoire, troubles du sommeil, irritabilité), carcinome du nasopharynx	Groupe 1	2 ppm* 3 mg/m³
Cyclohexane	<i>Effet aigu</i> : maux de tête <i>Effets chroniques</i> : symptômes au niveau des fonctions hépatiques	Non évaluée	300 ppm 1033 mg/m³
Toluène	<i>Effets aigus</i> : dépression du système nerveux central, maux de tête, étourdissements, fatigue, somnolence, nausées <i>Effets chroniques</i> : effets neurotoxiques	Groupe 3	50 ppm 188 mg/m³
Méthacrylate de méthyle	<i>Effets aigus</i> : faiblesse, vertiges, nausées, maux de tête, somnolence <i>Effets chroniques</i> : atteinte du système nerveux central, neurotoxicité, effets les systèmes cardiovasculaire, gastro-intestinal, respiratoire	Groupe 3	50 ppm 205 mg/m³

Groupe 1 : agent cancérogène, Groupe 2A : agent probablement cancérogène, Groupe 2B : agent cancérogène possible et Groupe 3 : agent inclassable quant à sa cancérogénicité

La nature cumulative des expositions et la diversité des composés émis soulignent la nécessité d'une vigilance constante, même lorsque les concentrations individuelles semblent être en dessous des seuils critiques. Adopter des pratiques préventives, telles que le choix de filaments résines moins émissifs et une ventilation adéquate, s'avère être raisonnable vu le choix de prévention, ce qui va assurer une utilisation sécuritaire de la technologie d'impression 3D.

III. Étude de cas lié aux émissions de la fabrication additive

1. Impression 3D en milieu professionnel : Risques pour la santé respiratoire des travailleurs

L'impression 3D, bien qu'offrant des possibilités créatives étendues, engendre des préoccupations pour la santé et l'environnement. Une étude à Toronto a évalué les impacts sur la santé respiratoire des utilisateurs d'imprimantes 3D.

Le Centre d'expertise en recherche sur les maladies professionnelles de Toronto a montré qu'une exposition régulière aux émanations des imprimantes 3D engendrait des effets indésirables importants sur la santé respiratoire. 46 travailleurs, utilisant des imprimantes 3D (à 40 heures par semaine) dans 17 lieux de travail, ont été interrogés pour recueillir des données sur leurs habitudes de travail et leur état de santé. Les résultats montrent que 57 % des travailleurs ont indiqué avoir ressenti des symptômes respiratoires plus d'une fois par semaine au cours de la dernière année et que 22 % ont été diagnostiqués asthmatiques. De plus, 20 % ont rapporté des maux de tête (Johnson, 2018).

Deux autres patients travaillant dans la même imprimerie 3D et impliqués dans le nettoyage des outils d'impression ont développé, pour le premier, des pustules et des vésicules, initialement au poignet, aux mains et aux avant-bras, avant de se propager au visage, au cou, aux oreilles, aux jambes et à l'abdomen.

Le second a développé des lésions érythémateuses sur le dos des mains, se propageant aux avant-bras, aux aisselles et à l'abdomen seulement quatre semaines après avoir commencé le travail (Creytens, Gilissen, Huygens et Goossens, 2017).

Un autre cas rapporté, cette fois par l'INRS, présente l'histoire d'un travailleur qui a développé un asthme en utilisant une imprimante 3D, soulignant ainsi que des problèmes respiratoires peuvent être associés aux émissions de ces dispositifs. Il concerne un homme de 28 ans, entrepreneur, avec des antécédents d'asthme disparu dans son enfance.

Utilisant 10 imprimantes 3D avec des filaments d'acrylonitrile-butadiène-styrène (ABS), il a développé des symptômes tels qu'une oppression thoracique, de l'essoufflement et de la toux après 10 jours de travail. L'environnement a été modifié après 3 mois, avec moins d'imprimantes, des filaments d'acide polylactique, et un purificateur d'air.

Bien que ses symptômes aient diminué, il a toujours eu besoin périodiquement de salbutamol. Les tests ont révélé un asthme persistant, mais les symptômes ont finalement disparu. Ce cas souligne les troubles respiratoires possibles liés à l'utilisation d'imprimantes 3D, mettant en lumière la nécessité d'études approfondies sur les émissions spécifiques et les problèmes de santé associés.

Dans le dossier dédié à la **"Journée technique Fabrication additive Comment construire une prévention adaptée ?"** qui a eu lieu le **17 mai 2022**, François Xavier Keller, chercheur à l'INRS depuis 14 ans, signale les risques chimiques liés à la fabrication additive et conclue que pour les atténuer, il faut installer les imprimantes 3D dans des locaux ventilés ou sous une hotte aspirante / enceinte ventilée afin de capter les émissions générées.

2. Étude sur les effets respiratoires chez les rats

L'étude¹² approuvée par le « National Institute for Occupational Safety and Health » (NIOSH), examine les conséquences de l'utilisation d'une imprimante 3D utilisant du plastique ABS pour la création d'objets.

Objectif de l'étude : Les scientifiques ont cherché à déterminer si les émissions de cette imprimante pouvaient avoir des effets négatifs sur la santé des rats, en particulier sur leurs poumons et d'autres organes.

Résultats sur les effets néfastes sur la santé :

- **Perturbation des concentrations hormonales :** L'exposition aux émissions des imprimantes 3D a provoqué des changements significatifs dans les niveaux d'hormones telles que la thyroxine (TSH) et la prolactine. La thyroxine est une hormone thyroïdienne qui régule le métabolisme, tandis que la prolactine est impliquée dans la régulation de la reproduction et de la lactation. Des altérations dans ces hormones peuvent perturber divers processus physiologiques tels que la reproduction, le métabolisme et la croissance.
- **Altérations histologiques et immunohistochimies :** Des altérations ont été observées dans les tissus, en particulier dans l'olfactif (relatif à l'odorat) et l'hypothalamus (régulateur clé des fonctions hormonales), indiquant des effets sur les cellules et la fonction neuronale. Cela peut affecter la transmission des signaux olfactifs et la régulation des fonctions neuroendocriniennes, qui contrôlent de nombreuses activités physiologiques.
- **Expression des gènes et des protéines :** Les résultats ont montré des changements dans l'expression des gènes et des protéines impliquées dans divers processus cellulaires et physiologiques tels que le stress oxydatif (dommages cellulaires causés par les radicaux libres), l'inflammation et la neuroendocrinologie (interaction entre le système nerveux et les hormones).
- **Réduction de la fertilité masculine :** Des altérations ont été observées au niveau des testicules, avec une diminution du nombre de certaines cellules importantes pour la production de sperme. Cela suggère un impact potentiel sur la fertilité masculine, car une altération de la production de sperme peut conduire à des problèmes de fertilité.

Résultats sur les effets néfastes de l'impression 3D sur l'environnement :

Les imprimantes 3D présentent des dangers pour l'environnement principalement en raison des émissions de particules et de composés volatils organiques (VOC) qu'elles génèrent, qui peuvent contribuer à la pollution de l'air intérieur et extérieur, affectant ainsi la qualité de l'air et la santé des êtres vivants à proximité. De plus, les substances émises par ces imprimantes peuvent contaminer les sols, les cours d'eau et les écosystèmes environnants, entraînant des effets néfastes sur la biodiversité et l'équilibre écologique.

Un autre aspect préoccupant est le risque d'accumulation dans l'environnement des matériaux utilisés dans le processus d'impression 3D, tels que les plastiques et les résines. Ces matériaux peuvent persister dans l'environnement pendant de longues périodes, ce qui entraîne une accumulation progressive et une augmentation de la concentration de substances potentiellement toxiques. Cette accumulation peut avoir des répercussions à long terme sur les écosystèmes et la santé des organismes vivants, en raison de l'accumulation de polluants dans la chaîne alimentaire et des effets sur les habitats naturels.

Globalement, les auteurs de l'étude des effets respiratoires sur les rats lors d'une fabrication additive, mettent en garde contre le rejet de ces particules dans l'environnement. Ils appellent donc à « mener des recherches supplémentaires sur le sujet qui vont être nécessaires pour comprendre l'absorption des particules fines par les humains et les animaux, et à évaluer la dissolution des particules dans l'organisme » ; et à examiner les impacts nocifs potentiels de la fabrication additive sur l'écosystème humain.

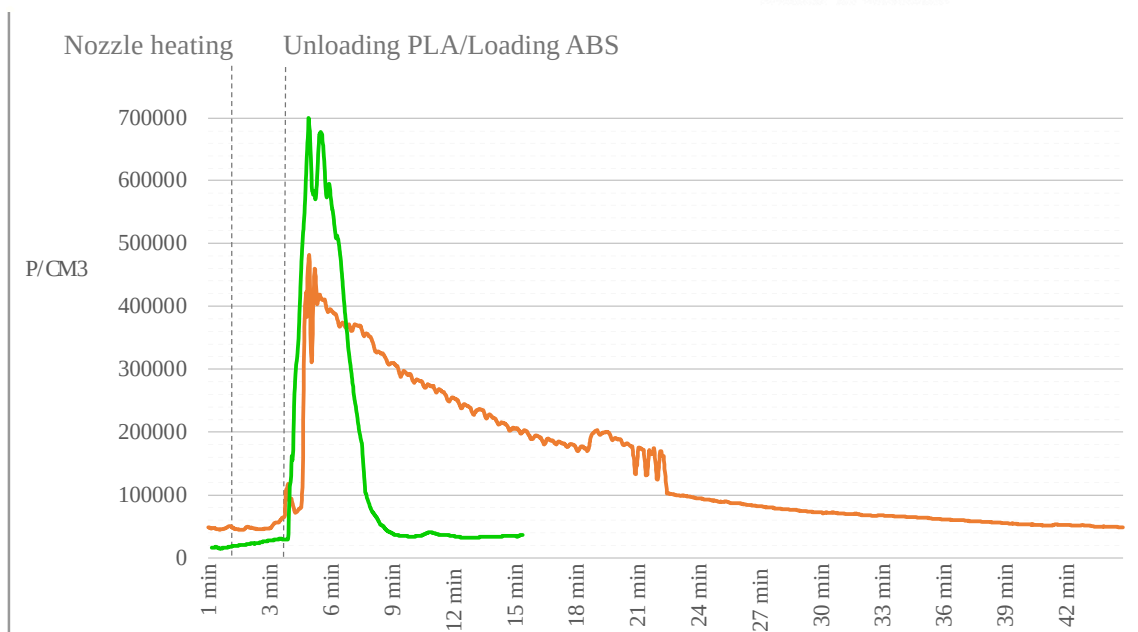
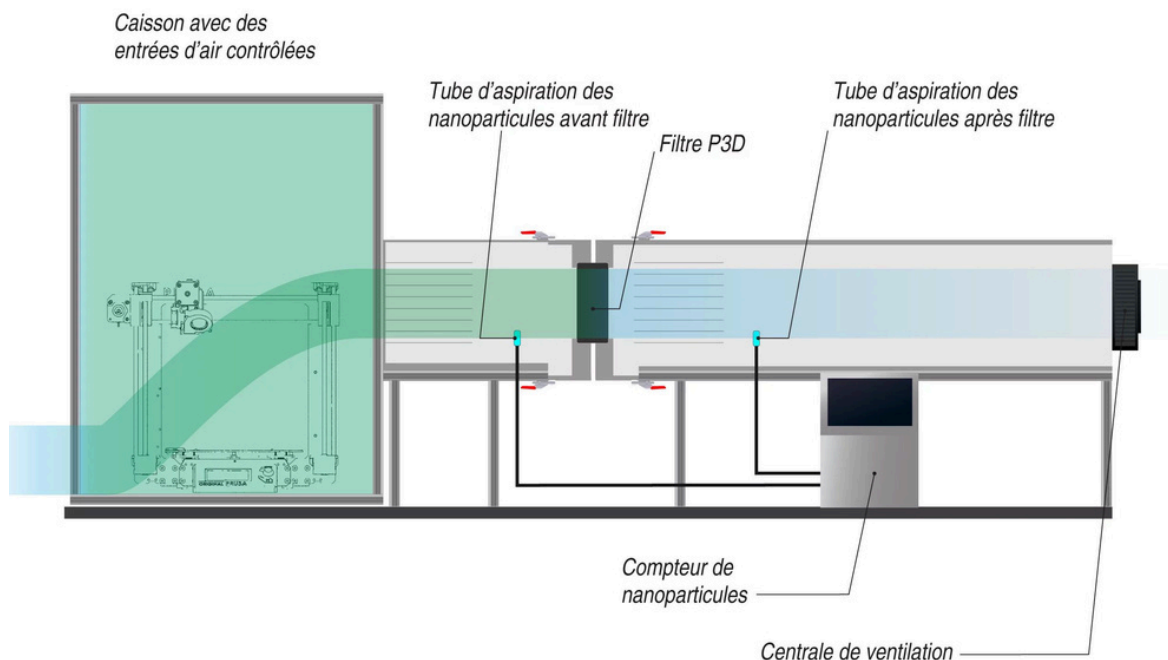
¹²Inhalation of particulate and emissions from 3 dimensional (3D) printers: Effects on the olfactory bulb (OB) and hypothalamic-pituitary-endocrine axes; Kristine Krajnak, Marianna Farcas, Walter McKinney, Stacey Waugh, Kyle Mandler, Mark Jackson, Joanna Matheson, Trey Thomas, Yong Qian. First published: 14 May 2021

IV. Études liées aux émissions impression 3D FDM et SLA

1. Impression FDM

Pour en savoir plus sur les dangers liés à l'impression 3D, nous vous invitons à lire notre étude sur ce sujet, qui a été réalisée par nos soins au sein des laboratoires d'Alveo3D en 2021 sur le site : <https://www.alveo3D.com/etude-emissions-toxiques-impression-3D-filament/>.

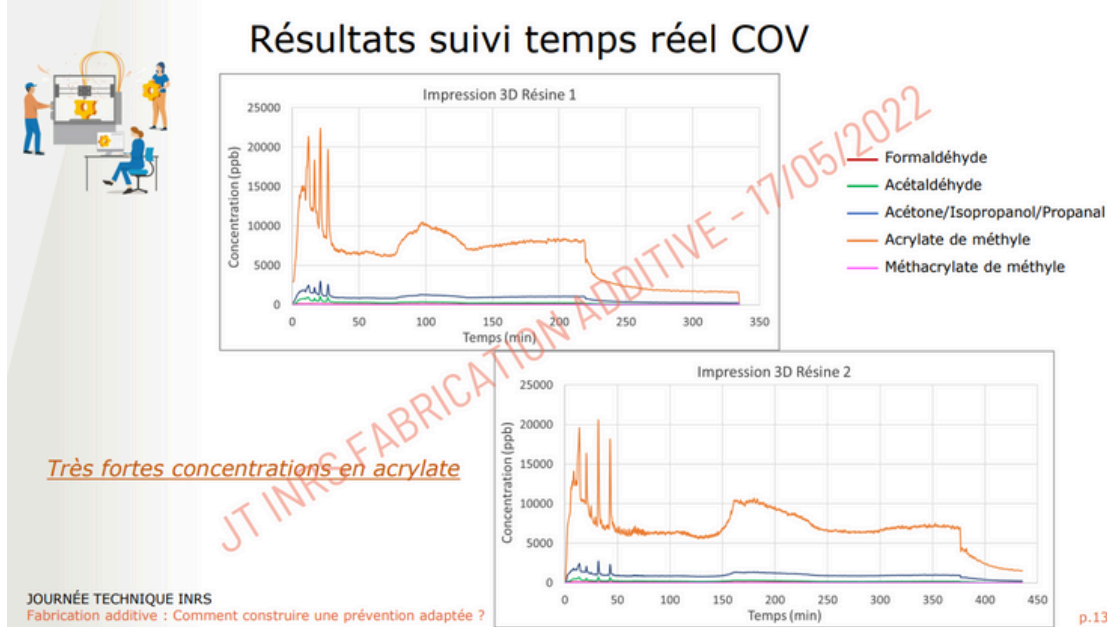
Vous aurez accès aux recherches approfondies sur les émissions toxiques associées à l'utilisation de filaments lors de l'impression 3D, avec une perspective éclairante sur les risques potentiels de cette technique.



- Filament change PLA -> ABS enclosure without filtering (measure before filter)
- Filament change PLA -> ABS enclosure with filtering 40m3/h (measure avant filtre)

2. La résine

Une étude¹³ conduite par l'INRS traite sur les émissions de composés organiques volatils (COV) lors de l'impression 3D utilisant diverses matières plastiques et résine UV dans les processus de photo polymérisation. L'étude a révélé des concentrations élevées d'acrylates provenant des résines et d'aldéhydes provenant des plastiques, soulignant la nécessité d'imprimantes équipées de boîtiers et de systèmes d'extraction pour réduire l'exposition des utilisateurs à ces émissions.



Sur ces graphiques, la courbe orange représente l'acrylate de méthyle avec une valeur moyenne supérieur à 5000 ppb (5ppm)



¹³ Emissions de composés organiques volatils en impression 3D (Marianne Guillemot, INRS)
https://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/Actes-et-comptes-rendus/JT-fabrication-additive/6_GUILLEMOT.pdf/6_GUILLEMOT.pdf

Lors de la « Journée technique Fabrication additive » organisée par l'INRS, les chercheurs de l'institut ont pu détailler les différentes étapes du processus de photopolymérisation, sur deux types d'imprimantes résine. Les résultats d'analyses ont révélé la présence de divers composés oxygénés, notamment les méthacrylates[1], l'acrylate de méthyle[2] et certains dérivés du propanediol[3], provenant de la résine utilisée dans le processus.

La photopolymérisation présente des niveaux de concentration variable selon les substances chimiques émises. Par exemple, la concentration mesurée en acétone est de 26 ppm, bien en deçà de la valeur limite de 250 ppm, tandis que les COV totaux varient entre 14 300 et 23 700 $\mu\text{g.h}^{-1}$. Cette technologie émet 4 à 7 fois plus de vapeur que la technologie FDM.

La valeur totale de ces COV n'est pas soumise à réglementation, cependant et dans le cas présent, la concentration en acrylate de méthyle dépasse le seuil d'exposition professionnel fixé à 5 ppm en France et 2 ppm aux US, tout au long du processus d'impression 3D.



Risques pour la santé des résines de stéréolithographie: Source: Prusa Research

Pour évaluer la toxicité de ces résines, le Système général harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques (SGH) est souvent utilisé. Il est donc très important de bien comprendre les indications du SGH afin de garantir une manipulation sécurisée de ces résines.

V. Quelles est solutions face aux risques liés ?

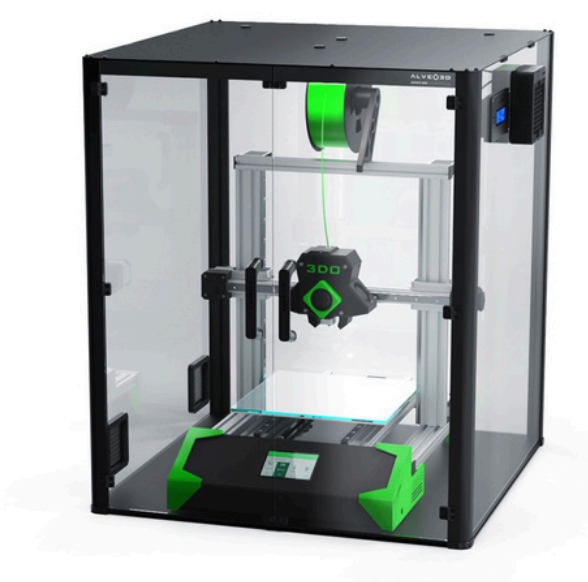
Les dangers liés aux particules ultrafines (PUF) et aux composés organiques volatils (COV) dans le contexte de l'impression 3D requièrent une attention particulière. La mise en place de mesures préventives, s'avère essentielle pour assurer un environnement de travail sécuritaire et préserver la santé des individus.

1. Caissons et systèmes de purification d'air

L'usage de caissons fermés et de **filtres HEPA** dans le cadre de l'impression 3D revêt une importance capitale pour la sécurité et la santé des travailleurs. Ces dispositifs sont spécifiquement conçus pour capturer les particules ultra fines (PUF) émises pendant le processus d'impression, particulièrement prononcé dans les imprimantes utilisant des filaments fondus (FDM).

Les caissons fermés jouent un rôle crucial pour contenir ces émissions, évitant ainsi leur dispersion dans l'environnement de travail. De plus, ils contribuent à maintenir un environnement contrôlé, conforme aux recommandations de sécurité et de santé au travail.

En parallèle, l'intégration de filtres HEPA (de la norme EN1822) combinés avec du charbon actif dans ces caissons permet une filtration efficace des particules, inférieur à 200 nanomètres, améliorant significativement la qualité de l'air.



Printerbox: Caisson pour imprimante 3D FDM



Printerbox: Caisson pour imprimante 3D SLA

Système de filtration avancé

En 2022, Alveo3D testé nos filtres avec filaments Prusament

Phase 1 : Essais initiaux

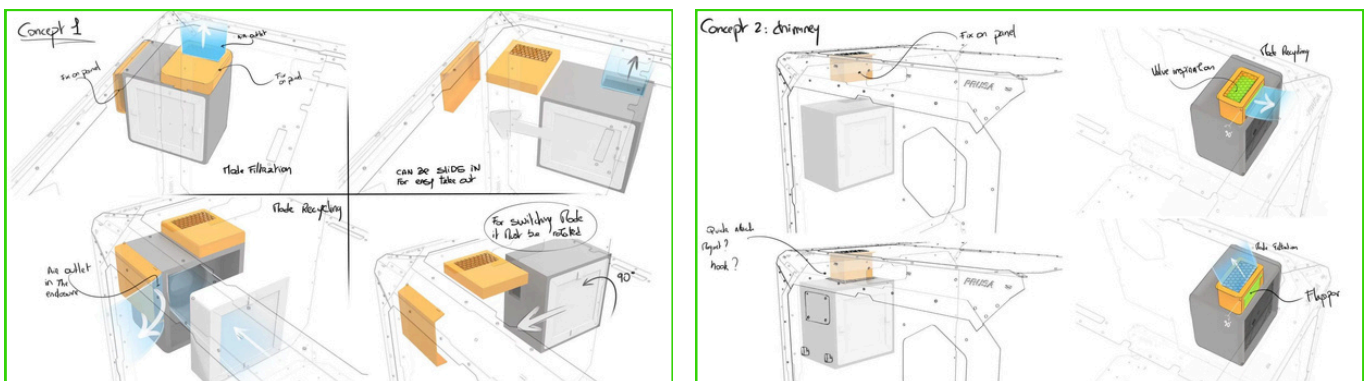
- Commencée en février 2022, elle se concentre sur l'efficacité des filtres Alveo3D avec les filaments Prusament.
- Des tests ont été effectués avec des prototypes afin d'identifier un système de filtration répondant aux spécifications de Prusa.

Phase 2 : Personnalisation et optimisation

- Personnalisation des filtres et des ventilateurs pour optimiser le rapport flux d'air/bruit.
- Prusa a conçu le support du filtre et du ventilateur sur la base des recommandations d'Alveo3D afin d'améliorer les performances et la longévité.

Phase 3 : Tests sur le caisson Prusa Mk3

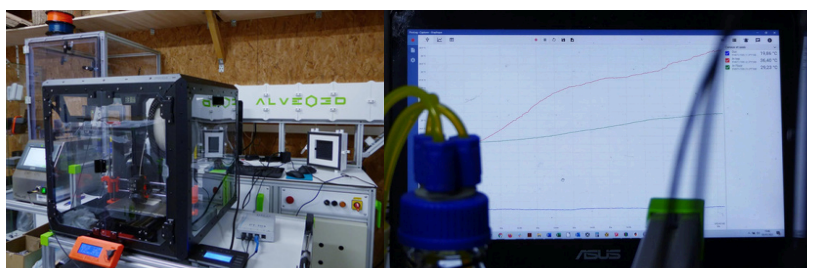
- L'objectif est de déterminer l'efficacité des solutions de Prusa dans la protection de ses clients.



Certificat d'efficacité de filtration

En 2022, Prusa Development A.S. a reçu un certificat d'efficacité de filtrage de Flexee System S.A.S. pour ses filaments Prusament, testés avec le filtre P3D pour imprimantes 3D FDM. Efficacité de filtrage d'une taille de particule de 7nm à 5000nm avec le filtre P3D pour imprimantes FDM 3D:

- Filament ASA : 94,46 %
- Filament PC : 94,96 %
- Filament PETG : 95,20 %
- Filament PLA : 96,98 %



Les caissons en impression 3D sont indispensables pour les raisons suivantes :

- **Réduction des émissions de particules et de COV** : Un caisson aide à confiner ces émissions et à réduire l'exposition de l'utilisateur
- **Contrôle de la Température** : Assure une température stable pour des impressions réussies, surtout avec des filaments sensibles à la température.
- **Réduction des Déformations** : Minimise les déformations potentielles des pièces imprimées en maintenant des conditions thermiques constantes.
- **Prévention des Courants d'Air** : Protège l'impression des perturbations causées par les courants d'air, favorisant une qualité d'impression constante.
- **Réduction du Bruit** : Certains caissons sont conçus pour réduire le bruit généré par l'imprimante 3D, améliorant l'environnement sonore global.
- **Contrôle de la Poussière** : Garantit un environnement propre en protégeant l'imprimante et le filament de la poussière environnante.
- **Sécurité incendie** : Le détecteur de fumée sans fil, envoie un signal radio à la prise électrique pour couper l'alimentation de votre imprimante 3D.

La Médecin du Travail et toxicologue Delphine Bouvet chez INRS, recommande de prioriser la configuration caisson avec extraction d'air et de définir des règles d'utilisation spécifiques pour chaque configuration, ainsi que des consignes de maintenance précises pour les filtres.



2. Réglementation professionnelle

Le Code du Travail, à travers des articles tels que R. 4222-1 et R. 4222-3, établit des normes visant à garantir la qualité de l'air dans les locaux professionnels, en mettant l'accent sur les "locaux à pollution spécifique" où des substances potentiellement dangereuses sont émises. Les dispositions incluent la nécessité d'une ventilation adaptée (R. 4222-11) et la suppression ou la captation des émissions nocives (R. 4222-12).

Si la notion de locaux à pollution spécifique se pose pour les imprimantes 3D de bureau, il est recommandé par l'INRS de mettre en œuvre les mesures de prévention qui impliquent le capotage et l'extraction d'air ou la filtration.

3. Formation et Information du Personnel

La formation du personnel, par un organisme agréé, est une composante essentielle de la gestion des risques liés à l'impression 3D. Elle englobe une compréhension approfondie des dangers associés aux produits utilisés, nécessitant la lecture et la compréhension des étiquettes et des fiches de données de sécurité, en plus d'une sensibilisation aux risques spécifiques des filaments dans le cadre du processus d'impression 3D, sans oublier de mettre un accent sur les moyens de protection à mettre en œuvre.

Les formations doivent également aborder les procédures à suivre en cas de fuite ou de déversement accidentel, soulignant l'importance de l'utilisation correcte des équipements de protection individuelle (EPI).



4. Les recommandations de sécurité en impression 3D

Avant de commencer :

- Renseignez-vous sur les risques : Prenez le temps de comprendre les risques associés à l'impression 3D, tels que l'émission de particules fines, de COV et de vapeurs de solvant.
- Choisissez un emplacement approprié : Installez votre imprimante 3D dans un endroit bien ventilé, à l'écart des sources de chaleur et des courants d'air.
- Utilisez des filaments de haute qualité : Optez pour des filaments de bonne qualité à faible émission de COV et de particules.
- Lisez attentivement les instructions : Assurez-vous de bien lire les instructions de votre imprimante 3D et des filaments que vous utilisez.

Pendant l'impression :

- Portez des équipements de protection : Utilisez des gants, des lunettes de protection et un masque respiratoire, en particulier si vous travaillez avec des filaments ou des résines qui libèrent des émissions nocives.
- Surveillez l'impression : Ne laissez jamais votre imprimante 3D sans surveillance durant son fonctionnement.
- Maintenez un environnement propre : Nettoyez régulièrement votre imprimante 3D et son espace de travail pour éviter l'accumulation de poussière et de débris.

Après l'impression :

- Ventilez la zone : Aérez la zone d'impression après chaque utilisation pour éliminer les éventuelles vapeurs ou particules résiduelles.
- Lavez-vous les mains : Lavez-vous soigneusement les mains après avoir manipulé des filaments ou des pièces imprimées.
- Stockez les filaments en toute sécurité : Conservez les filaments dans des récipients hermétiques dans un endroit frais et sec.
- Éliminez les déchets de manière responsable : Suivez les instructions du fabricant pour éliminer les déchets d'impression 3D, tels que les filaments usagés et les supports d'impression.

5. Étude de cas : Comment Lattice Medical utilise la solution Alveo3D pour respecter les normes strictes de salle propre ISO7 ?



LATTICE MEDICAL

Soft Tissue Reconstruction

**SPÉCIALISÉE EN
INGÉNIERIE TISSULAIRE
ET EN IMPRESSION 3D**

LATTICE MEDICAL ET DE SA MISSION

SES ACTIVITÉS

Lattice Medical a été fondé en 2017, une entreprise spécialisée en ingénierie tissulaire, en biomatériaux et en impression 3D.

Il a développé deux dispositifs : MATTISSE est une prothèse mammaire résorbable imprimée en 3D, et RODIN est une matrice permettant la régénération de l'hypoderme.

PROFIL DE L'ENTREPRISE

Secteur d'activité

- Fabrication d'équipements médicaux.

Taille de l'entreprise

- Un peu plus de 20 personnes.

Le siège social

- 80 rue du Docteur Yersin à Loos, France

CAS D'UTILISATION

- Caisson sur mesure
 - AlveoPro
- Client depuis 2019



LES ENJEUX

ÉMISSIONS ÉLEVÉES DE PARTICULES

L'extrusion des filaments émettait un nombre de particules trop élevé, rendant **impossible le respect des normes requises pour une salle propre ISO7**

CONSTRAINTES D'ESPACE

L'option d'utiliser un autre espace avec une norme ISO moins rigoureuse n'était pas viable, car il n'y avait pas d'espace disponible adapté proposé par l'entreprise Cousin Surgery.

IMPACT DES ÉMISSIONS SUR LES OPÉRATIONS

Le niveau de pollution particulaire de l'extrusion était trop élevé pour permettre l'utilisation des machines dans la salle propre ISO7 sans adaptation.

SOLUTIONS

1. POURQUOI AVEZ-VOUS CHOISI LES CAISSONS, FILTRES D'ALVEO3D ?

Lorsque l'on a commencé à mettre en place notre usine pilote entre 2019 et 2020, il n'y avait pas beaucoup de solutions pour fermer les imprimantes. De plus, les systèmes étaient prévus pour des modèles de machine bien spécifiques.

De plus, nous voulions en cloisonner une extrudeuse (et non une imprimante 3D), ainsi, il fallait trouver quelqu'un capable de faire des caissons sur mesure.

Et passant sur votre stand au salon 3D Print à Lyon 2019, nous nous sommes dits "**bingo**" on a trouvé une solution qui répondait à notre besoin spécifique.



Caisson pour extrudeur plastique



Salle propre ISO7 Lattice Medical

3. COMMENT S'EST DÉROULÉ LE PROCESSUS D'INSTALLATION ?

L'installation et l'intégration ont été très rapides. Le caisson a été livré déjà monté et le système de filtration se fixe très rapidement. Enfin, l'utilisation est très simple, il n'y a pas d'erreur possible, avec le choix de l'intensité de la ventilation et le temps.

Toutefois, Alveo3D a toujours été très réactif à nos sollicitations et très arrangeant. Je pense notamment aux pré-tests du système AlveoPRO. En effet, nous avons pu utiliser les prototypes en avant-première afin de savoir si ce système pouvait convenir à notre besoin.



KEVIN ROUX

Process R&D Engineer, Lattice Medical

“Le système Alveo3D a permis de fournir une solution à une problématique de contamination particulière de production. Cette solution nous permet de respecter le seuil de particules en salle propre (ISO7), tout en extrudant un filament de polymère.”

2. QUELS MODÈLES DE CAISSONS OU FILTRES ALVEO3D AVEZ-VOUS MIS EN ŒUVRE ?

Au tout début, il me semble qu'il n'existait qu'un seul modèle de filtre. Ainsi, nous avons adapté ce filtre à notre caisson sur mesure.

Toutefois, avec le temps, nous nous sommes rendu compte que le 1^{er} modèle de filtre n'était pas suffisant. Et donc en 2022, nous avons repris contact pour savoir comment optimiser la solution que nous possédions.

Nous avons donc repris contact et eu plusieurs échanges techniques pour définir plus finement notre besoin. Ainsi, nous sommes passés au **système AlveoPRO**, nous avons d'ailleurs été l'un des premiers à tester et à acheter ce système.



AlveoPro: Extracteur de fumée

VI. CONCLUSION

Au fil de ce dossier, nous avons compilé et vulgarisé les études réalisées jusqu'à présent par les laboratoires et instituts d'évaluation des risques.

La compilation de ces données démontre que la majorité des émissions de l'impression 3D FDM sont des particules ultrafines de sous les 100 nm. Limiter ces émissions est une recommandation unanime parmi les acteurs concernés des différentes études.

Si le danger potentiel du contact et de l'inhalation de ces particules ultrafines est communément reconnu, les effets sur la santé demeurent en revanche encore trop peu documentés et des études complémentaires sont nécessaires pour déterminer les conséquences exactes sur la santé. L'intérêt croissant de la communauté scientifique pour les particules ultrafines se traduit par l'initiation de nombreuses recherches.

Dans les processus de fabrication additive, l'impression 3D résine génère des émissions polluantes qui se concentrent sur la production de composés organiques volatils (COVs) et peuvent dépasser des seuils de toxicité. Leurs effets, mieux documentés, sont connus de longue date par le secteur de l'industrie.

Si le processus de fabrication additive résine présente des risques en matière d'exposition aux COVs, l'ensemble du processus de la production, stockage jusqu'aux opérations de post-traitement, peuvent amener les opérateurs à être exposés à une pollution de l'air qui dépasse certaines valeurs d'exposition professionnelle.

En termes de prévention et de sécurité, il est donc conseillé de privilégier des filaments et/ou résines faiblement émissifs, d'opérer dans des espaces aérés ou ventilés, ou à défaut, d'utiliser des caissons de confinement pour les émissions et des filtres adaptés.

Dans le cas des productions de particules ultrafines, les filtres HEPA pourront être employés mais une certification et une garantie d'efficacité pour la filtration des particules de moins de 100 nm est souhaitable. En ce qui concerne le traitement des COVs, le charbon actif sera couramment mis en œuvre en choisissant un mélange adapté au risque. D'autres procédés de purification d'air peuvent également apporter des résultats significatifs.

L'évolution rapide des technologies de fabrication additive et l'augmentation des vitesses d'impression qui augmentent le débit d'extrusion des filaments, posent de nouveaux défis. Avec un marché en pleine expansion et des équipements de plus en plus abordables, un public plus large est exposé aux risques liés à l'impression 3D.

De nombreux modèles de machines grand public n'intègrent pas nativement de systèmes de sécurité. La prise de conscience des utilisateurs sur les risques des imprimantes 3D n'est plus un tabou et les marques intègrent de plus en plus de solutions de filtration d'air avec des niveaux variables d'efficacité. En l'absence de réglementation précise sur ce sujet, certains fabricants font le choix de proposer des solutions reconnues comme **Prusa Research avec le système de filtration avancé.**

Nous pouvons souligner que la réalisation des études toxicologiques de tous ces nouveaux matériaux nécessite du temps et implique des coûts afin de documenter cette connaissance générale du risque. Il semble nécessaire d'adopter des mesures de prévention et de former les opérateurs aux pratiques permettant de limiter les expositions aux émissions polluantes.

