

Les émissions polluantes liées au fonctionnement des imprimantes 3D

YOUSRA SERSAR

PAUL TOSSA

EDF

Service des études
médicales d'EDF
45, rue Kléber
92309 Levallois-Perret
France

<serssaryoussra@
gmail.com>

<paul.tossa@edf.fr>

Tirés à part :

Y. Serssar

Résumé. Depuis son apparition dans les années 1970, l'impression 3D a beaucoup évolué et a révolutionné tous les secteurs : l'industrie aéronautique, la médecine, la recherche, etc. En revanche, quelques articles publiés récemment ont mis en garde les utilisateurs contre des substances polluantes émises par les imprimantes 3D.

L'objectif de cet article est de faire une synthèse de données fiables sur les substances émises pendant l'impression 3D, à la fois en termes de taux d'émission et de leurs concentrations dans l'air. Cette recherche a été étendue aux nanomatériaux manufacturés à cause de leur utilisation croissante dans divers domaines, y compris celui de l'impression. Il a donc été recherché si les particules nanométriques émises pouvaient être liées à l'incorporation des nanostructures dans les matériaux utilisés pour imprimer en 3D.

Cette synthèse a révélé que les imprimantes émettaient, lors du processus d'impression, des particules ultrafines, donc de taille nanométrique, et des composés organiques volatiles dans des proportions dépassant quelquefois les valeurs limites de protection des populations. Le procédé « dépôt de matière en fusion » (procédé très commun en impression 3D), utilisant des thermoplastiques comme matériau d'impression, semble plus émetteur de nanoparticules que le procédé « projection de liant », utilisant les matériaux sous forme de poudre. Une comparaison avec les imprimantes 2D a montré que ces dernières émettaient également des particules ultrafines dans des proportions non négligeables. Aucun des articles n'a mentionné la présence ou non de nano-objets manufacturés initialement incorporés dans le matériau d'impression, et les méthodes de mesures utilisées dans les études ne permettent pas de conclure sur la nature nanométrique à l'origine. Il est enfin important de signaler que les méthodes d'estimation des taux d'émission, de mesure des concentrations dans l'air, variaient d'une étude à l'autre, rendant ainsi difficile toute comparaison. Des protocoles communs de mesures devraient être développés dans des études ultérieures.

Mots clés : impression tridimensionnelle ; polluants ; air ambiant.

Abstract

Emissions related to the operation of 3D printers

The great advances in 3D printing since its appearance in the 1970s has revolutionized many sectors, including the aeronautics industry, medicine, and research. A few recently published articles, nonetheless, have warned users against emissions of substances related to the use of certain types of 3D printers.

The aim of this review is to summarize all the reliable data on substances emitted during printing, in terms of either emission rates or air concentrations. The review has been extended to manufactured nanomaterials because of their increasing use in various fields including printing. We therefore investigated whether the emitted nanometric particles could be linked to the incorporation of the nanostructures in the materials used in 3D printing and intended to confer specific properties on the manufactured objects.

Overall, this synthesis revealed that during printing these devices emit ultrafine particles, nanoscale particles, and volatile organic compounds in proportions that sometimes exceed the limit values for population protection. The "Fused Deposition Modeling"

Pour citer cet article : Serssar Y, Tossa P. Les émissions polluantes liées au fonctionnement des imprimantes 3D. *Environ Risque Sante* 2018 ; 17 : 481-486. doi : 10.1684/ers.2018.1216

process (widely used in 3D printing), which employs thermoplastics as material, appears to emit more nanoparticles than the "Binder Jetting" process, which uses powder. A comparison with 2D printers showed that the latter also emit ultrafine particles in non-trivial proportions. None of the articles mentioned the presence or absence of manufactured nano-objects initially incorporated in the printing material, and the measurement methods used in the studies do not enable any conclusions about the initial nanometric nature of the materials. Finally, it is important to note that comparisons were difficult because the methods for estimating emission rates or measuring concentrations in air varied across studies. Common protocols for measurements should be developed in subsequent studies.

Key words: *three-dimensional printing; pollutants; ambient air.*

La fabrication additive, communément appelée impression 3D, regroupe toutes les technologies permettant de fabriquer un objet à partir d'un modèle numérique, en ajoutant de la matière couche par couche.

La première étape de la fabrication additive est la modélisation numérique de l'objet. Le fichier est ensuite analysé et découpé virtuellement en fines couches. Une fois le fichier converti et transformé en format compatible avec l'imprimante 3D, celle-ci procède à la fabrication de la première couche selon le plan (xy) suivie des autres couches en suivant l'axe (z) jusqu'à l'obtention du modèle souhaité. Certaines techniques nécessitent un traitement post-impression.

Initialement développée pour faire évoluer les techniques de prototypage au sein des grands groupes industriels, l'impression 3D est rendue accessible aux petites et moyennes entreprises grâce au développement des parcs d'imprimantes 3D par des sociétés comme Whiteclouds. Ces sociétés se concentrent sur le service aux entreprises via la fabrication des maquettes, de prototypes, mais elles peuvent être un fournisseur de ces machines pour les entreprises ou les particuliers. Il vaut également la peine de mentionner le rôle du projet RepRap (*Replication Rapid Prototyper*) dans la démocratisation des imprimantes 3D. Ce projet a été lancé en 2005 par Adrian Bowyer de l'université de Bath et avait pour objectif la fabrication d'une imprimante 3D auto-répliquative, c'est-à-dire capable d'imprimer des pièces la composant et à faible coût. C'est un projet à code source ouvert et toute personne peut participer à son développement [1].

Face à cette croissance rapide, des inquiétudes sociétales se sont manifestées notamment sur le risque de suppression de certains postes et la perturbation de l'économie mondiale [2]. Par ailleurs, des risques liés à la santé ont émergé à la suite de la publication de quelques articles scientifiques sur l'émission de nanoparticules par les imprimantes 3D en fonctionnement [3].

L'objectif de cet article est de présenter le résultat d'une recherche bibliographique sur la fabrication additive et de synthétiser les données publiées sur les émissions polluantes par ces machines.

Matériels et méthodes

À travers cette bibliographie, nous avons cherché à connaître, dans un premier temps, les différentes techniques utilisées pour imprimer en 3D, l'importance de cette technologie dans les secteurs industriels et le rôle de la nanotechnologie dans l'amélioration de l'impression 3D. Dans un deuxième temps, nous avons analysé les études portant sur les émissions particulières par les imprimantes 3D, et les avons comparées à celles des imprimantes 2D et à celles de gestion de la qualité de l'air intérieur. Cette revue a été également étendue à la présence, éventuelle, de nanomatériaux manufacturés dans les matériaux utilisés pour la fabrication des objets et éventuellement la présence de ces nanostructures dans les émissions lors de l'impression. La revue a été réalisée en utilisant différents ou une combinaison de mots clés en français et en anglais tels que « histoire des imprimantes 3D, *3D printers and nanomaterial, 3D printers emission, etc.* », et en s'appuyant sur les informations disponibles sur des sites internet professionnels d'impression 3D, des articles de presse et également des bases de données d'articles scientifiques comme ScienceDirect, Google Scholar, etc.

Résultats

Les différents procédés d'impression 3D

Les techniques d'impression 3D sont regroupées en sept catégories :

- photopolymérisation en cuve (*vat photopolymerization*) : un photopolymère liquide est durci sélectivement par une lumière ultraviolette ;
- projection de matière (*material jetting*) : le matériau, photopolymère liquide ou cire fondue, est déposé sélectivement sur la plateforme de fabrication par des têtes d'impression. Le matériau est durci par une lumière ultraviolette (cas du photopolymère) ou solidifié par refroidissement (cas de la cire fondue) ;

- projection de liant (*binder jetting*) : le matériau en poudre, réparti de façon homogène sur le support de fabrication, est aggloméré sélectivement par un liant adhésif projeté par des têtes d'impression ;
- fusion sur lit de poudre (*powder bed fusion*) : une énergie thermique (laser ou faisceau d'électron) fait fondre et fusionner de manière sélective des régions d'un lit de poudre ;
- extrusion de matière (*material extrusion*) : connu également par son acronyme en anglais FDM signifiant « *Fused Deposition Modeling* ». Cette technique utilise des filaments de thermoplastiques qui, après avoir été chauffés dans la buse, sont extrudés sélectivement sur le lit de fabrication pour former une couche qui est solidifiée par refroidissement ;
- dépôt de matière sous flux d'énergie dirigé (*directed energy deposition*) : le matériau utilisé est sous forme de poudre ou de filament métallique. Il est fondu par une source d'énergie dans la buse avant d'être déposé sélectivement sur la surface de fabrication ;
- stratification de couches (*sheet lamination*) : le matériau sous forme de feuille est coupé par un laser ou par une lame tranchante, les feuilles sont ensuite superposées les unes sur les autres et collées par un adhésif selon le type de matériau.

Les étapes de fabrication, pour chaque technique, sont répétées plusieurs fois jusqu'à l'obtention de l'objet souhaité.

Selon le procédé d'impression, plusieurs matériaux peuvent être utilisés (plastiques, métaux, etc.) et sous différentes formes (filament, plaque, granulé, liquide, etc.) [4].

Domaines d'application

L'impression 3D a connu un grand succès dans le monde industriel. Elle a fait évoluer et continue à révolutionner plusieurs secteurs comme :

- la santé : l'impression 3D est devenue un moyen incontournable dans la création et la réalisation de prothèses, d'implants de façon personnalisée et en respectant l'anatomie de chaque patient. C'est une technologie qui perce significativement dans d'autres secteurs de la santé comme l'odontologie, la fabrication des dispositifs médicaux [5]. De plus, l'impression 3D a été adaptée au domaine de l'ingénierie tissulaire en développant la bio-impression. Elle est basée sur le principe d'impression 3D et a pour objectif de rassembler, couche par couche, des constituants de tissus biologiques selon une organisation prédéfinie par conception numérique. Grâce à la bio-impression, un organe complexe comme la peau peut être constitué et utilisé dans les traitements cutanés [6] ;
- l'aéronautique : la fabrication additive peut répondre aux exigences du secteur en développant des pièces adaptées et permettre une moindre consommation

d'énergie. Lors du Salon international de l'aéronautique et de l'espace de 2015, la société américaine Stratasys a présenté des matériaux et des processus certifiés ayant permis la fabrication de 1 000 pièces pour le nouvel Airbus A350 XWB [7].

Grâce à la commercialisation des imprimantes 3D à moindre coût et l'expiration des brevets d'invention, l'utilisation de ces machines a augmenté chez la population générale, notamment chez les amateurs de bricolage et de « *do it yourself* ».

Les résultats sur les émissions dans l'air

Le premier constat est que, parmi les sept procédés d'impression 3D, la plupart des études ont été réalisées sur le procédé d'extrusion de matière en fusion ou FDM, qui utilise notamment des thermoplastiques comme l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) et l'acide polylactique (PLA). Une seule étude a été retrouvée sur le procédé « projection de liant ».

Études portant sur le procédé de type FDM

Dans l'ensemble, les résultats des études pour ce procédé ont montré qu'il existait des émissions de micro- et de nanoparticules, ainsi que d'autres composés tels que les composés organiques volatiles (COV). Dans une moindre mesure, ces émissions pouvaient concerner les hydrocarbures aromatiques polycycliques. Les taux d'émission ou les concentrations mesurées augmentent fortement durant l'impression et chutent en fin d'opération.

Les émissions particulières

L'une des études, publiée en 2013, a été réalisée sur des imprimantes 3D de type FDM destinées à la population générale [3]. Elle a montré l'augmentation du nombre de nanoparticules, de taille comprise entre 11,5 nm-116 nm, durant le fonctionnement de ces imprimantes. Selon les estimations des auteurs, l'impression avec les filaments ABS génère un taux d'émission total des particules ultrafines (PUF)¹ dix fois plus élevé que l'impression avec des filaments PLA, soit 2.10^{11} et 2.10^{10} particules min^{-1} respectivement. Cette étude a attiré l'attention des autres chercheurs et les a motivés pour en faire d'autres.

Une étude récente de Azimi *et al.* [8] a montré que les émissions particulières par les imprimantes 3D dépendent de plusieurs facteurs :

- type de filament : le taux le plus élevé d'émission total des PUF est observé en utilisant des filaments ABS (9.10^{10} particules min^{-1}) alors que le taux médian estimé en imprimant avec les filaments PLA est de 10^8 particules min^{-1} . Les taux d'émission totaux des PUF sont variables en

¹ Particules ultrafines : les particules de diamètre inférieur à 100 nm, selon les auteurs de cet article.

fonction du filament utilisé ; 4.10^{10} , 2.10^8 , 6.10^7 particules min^{-1} pour le polycarbonate, nylon et laybrick respectivement. Il est à noter que pour cette expérience, un seul modèle imprimante 3D de type FDM a été utilisé par les chercheurs. En revanche, ils ont également montré que le modèle de l'imprimante aurait un impact sur les émissions ;

– température : la température du lit de fabrication des imprimantes FDM influence les émissions. Azimi *et al.* ont utilisé trois niveaux de température pour le lit de fabrication : une température basse (< 45 °C), une température moyenne (60-65 °C) et une température haute (100-110 °C). La température d'extrusion de la buse variait entre 190 et 270 °C. Les résultats ont montré qu'avec les températures basses, le taux d'émission moyen des PUF est égal à 10^8 particules min^{-1} et ne varie pas quelle que soit la température d'extrusion ; alors qu'avec les températures moyennes et hautes du lit, le taux d'émission moyen est compris entre 10^8 - 5.10^9 particules min^{-1} et augmente de façon significative avec la température d'extrusion.

Outre la température ou le type de filament, d'autres facteurs pourraient moduler les taux d'émission des particules comme la couleur du filament, plus précisément les additifs qui donnent la couleur [8], ou la présence d'une enceinte de protection qui pourrait réduire les émissions, alors qu'un dysfonctionnement de la machine contribuerait à une augmentation des émissions particulaires [9].

Composition chimique des particules

Dans une étude récemment publiée (sur des imprimantes de type FDM utilisant des filaments ABS et PLA) [10], les auteurs ont analysé la morphologie des plus petites particules d'aérosols émises, à l'aide d'une microscopie électronique à transmission, et identifié les éléments chimiques les composant. Les résultats ont montré que les aérosols peuvent être de nature liquide et solide et les particules étaient majoritairement composées de carbone et d'oxygène, accompagnés d'éléments métalliques comme le silicium, le cuivre, etc., suggérant ainsi que l'origine des particules était liée au processus de dégradation thermique du thermoplastique. Les aérosols liquides étaient composés de cyclohexane, n-décane, acide isocyanique, 1-décanol, éthylène-propylène-diène-terpolymère et polyéthylène de faible densité ; des substances identifiées également dans les matériaux ABS.

Les émissions non particulaires

Des COV ont été détectés durant l'impression des objets, avec un taux d'émission de COV totaux (TCOV) égal à $3 \mu\text{g min}^{-1}$ pour un filament de type polycarbonate et $200 \mu\text{g min}^{-1}$ pour un filament de type nylon [8]. Le type de COV prédominant diffère en fonction du filament. Par exemple, le styrène est le COV principal émis suite à une utilisation des filaments ABS et HISP (*High Impact Polystyrene*). Les taux d'émission estimés avec ces

filaments varient de 12 à $113 \mu\text{g min}^{-1}$, en fonction de la marque de l'imprimante.

Procédé « projection de liant »

Une seule étude a été retrouvée pour ce procédé [15] qui nécessite un matériau sous forme de poudre et un liant. Dans le cas présent, la poudre est essentiellement composée de plâtre, carbohydate et polymère vinylique. Il a été montré que les concentrations des particules ont augmenté dès la première heure d'impression et ont atteint leur maximum après 120 minutes d'impression.

Selon l'étude, les concentrations à 120 minutes des PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ et $\text{PM}_{1.0}$ sont respectivement 1 100, 900 et $680 \mu\text{g m}^{-3}$ dans les conditions de l'expérience.

Contrairement aux émissions particulaires, les COV ont augmenté dès le début d'impression. Les concentrations maximales atteintes sont entre 600 et 750 ppb.

Rôle des nanotechnologies

Des études ont montré que les nanotechnologies pourraient contribuer à l'amélioration de la fabrication additive. Par exemple, le renfort des filaments d'ABS avec des nanoplaques de graphène améliore l'élasticité et autres propriétés thermomécaniques [11]. Une autre étude a montré que l'incorporation des nanotubes de carbone dans les filaments ABS pourrait améliorer la constante d'élasticité du filament avec un gain d'élasticité proportionnel à la quantité de nanotubes de carbone ajoutés [12]. D'autres nanoparticules telles que le dioxyde de titane ou la silice ont été également incorporées dans des matériaux afin de leur conférer des nouvelles propriétés et d'optimiser l'impression 3D [13]. Des recherches sont toujours menées pour développer des matériaux contenant des nano-objets et seront utilisées par les imprimantes 3D. Par exemple, la société israélienne NANO-DIMENSION, spécialiste dans l'impression 3D des circuits électroniques, a développé pour sa machine Dragon Fly 2020 des encres conductrices grâce à l'incorporation des nanoparticules d'argent [14]. Malgré toutes les avancées en matière d'amélioration des propriétés des filaments par des nanomatériaux manufacturés, aucune des études analysées, sur les émissions par les imprimantes 3D, n'a donné de précision sur la composition complète du matériau utilisé, ni cherché si les PUF émises par les machines en fonctionnement étaient des nanostructures initialement intentionnellement incorporées au matériau.

Discussion

La plupart des études réalisées ont porté essentiellement sur les imprimantes 3D de type FDM de bureau à usage professionnel et particulier. Une seule étude a été retrouvée sur le procédé de projection de liant à usage strictement professionnel.

Les filaments ABS (par rapport au PLA et autres filaments) sont à l'origine des taux d'émission des particules ultrafines relativement plus élevés. Stephens *et al.* [3] ont expliqué cette différence par le fait que les filaments PLA utilisés sont d'origine naturelle et biodégradable alors que les filaments ABS sont synthétiques, tandis qu'une autre étude a montré que le facteur principal de ces émissions était le processus d'échauffement [16].

Les taux d'émission variaient selon un certain nombre de facteurs tels que la couleur du filament, la température du lit de fabrication, etc.

Il existe, de toute évidence, une difficulté de comparabilité des résultats obtenus dans les études pour un certain nombre de raisons, parmi lesquelles l'absence de méthodes et unités de mesures harmonisées entre les différentes études. En effet, en plus des conditions de ventilation et de volume des pièces qui doivent varier, les appareils de mesure utilisés sont différents d'une étude à l'autre. D'où la nécessité d'élaborer des méthodes standardisées et d'uniformiser le protocole pour faciliter la comparaison.

Par ailleurs, si ce n'est déjà le cas, les données montrent qu'il existe un potentiel assez important d'utilisation des nanomatériaux manufacturés pour améliorer les matériaux classiques en leur conférant des propriétés spécifiques. La revue réalisée n'a pas permis de savoir si les émissions particulières contenaient des nanostructures manufacturées intégrées initialement aux matériaux. Ce point paraît important compte tenu du contexte réglementaire actuel qui accompagne le développement des nanotechnologies, pour ce qui concerne notamment les difficultés de définition et la déclaration des substances à l'état nanoparticulaire.

Cette recherche bibliographique a été étendue aux imprimantes 2D afin de vérifier si les inquiétudes suscitées par les 3D n'existaient pas déjà pour les 2D. Au même titre que les imprimantes 3D, les résultats des études analysées sur les imprimantes 2D varient d'un facteur à l'autre : la marque de l'imprimante, le type (laser, jet d'encre), la vitesse d'impression, etc. Il a été montré que les imprimantes 2D de type laser émettaient des particules de taille inférieure à 100 nm avec des concentrations dans l'air allant de 10^3 - 10^6 particules cm^{-3} [17]. Ces concentrations restent dans le même ordre que celles émises par les imprimantes à projection de liant (10^4 particules cm^{-3}) et les imprimantes FDM à filament ABS (10^6 particules cm^{-3}) [18].

À date, pour la population générale, il n'existe que des valeurs guides de l'air intérieur (VGAi) pour les $\text{PM}_{2.5}$ (25 et 10 $\mu\text{g cm}^{-3}$ sur 24 heures et le long terme respectivement) et pour les PM_{10} (50 et 20 $\mu\text{g cm}^{-3}$ sur 24 heures et le long terme respectivement) [19].

Dans la revue réalisée, la plupart des imprimantes de type FDM sont des appareils de bureau qui peuvent être utilisés par le grand public, mais toute comparaison serait hasardeuse, la plupart des études portant sur des taux

d'émission et non sur des concentrations dans l'air. En d'autres termes, c'est plus le potentiel émissif qu'une réelle exposition qui est évalué. Mais, si les données le permettent et en fonction de la granulométrie des particules, ces valeurs peuvent servir de repères dans le cadre d'une utilisation de ces imprimantes par le grand public.

En ce qui concerne les travailleurs, les deux procédés d'impression (FDM et projection de liant) peuvent être retrouvés en milieu professionnel, le procédé « projection de liant » ayant un usage professionnel exclusif. Pour les mêmes raisons que pour la population générale, une comparaison à des valeurs-repères serait difficile pour le procédé FDM. En revanche, pour le procédé « projection de liant », les concentrations exprimées sont des concentrations massiques. Selon l'étude de Afshar-Mohajer *et al.* [15] sur les imprimantes à projection de liant, en considérant une impression par jour d'une durée de 4 heures, les concentrations de $\text{PM}_{2.5}$ et PM_{10} étaient respectivement de 58,3 et 80,2 $\mu\text{g m}^{-3}$. Si l'impression s'étend sur toute une journée, les concentrations peuvent atteindre 344 $\mu\text{g m}^{-3}$ pour $\text{PM}_{2.5}$ et 474,3 $\mu\text{g/m}^3$ pour les PM_{10} . Ces concentrations estimées sont largement supérieures à celles recommandées par l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses), ce qui devrait attirer l'attention sur les mesures de protection de travail pour les utilisateurs. Par ailleurs, l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS) a fait une synthèse sur les valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) publiées par le ministère du Travail. Ainsi, les concentrations moyennes en poussières inhalables et alvéolaires de l'atmosphère inhalées par une personne, évaluées sur une période de 8 heures, sont respectivement de 10 et 5 mg m^{-3} d'air. La comparaison reste cependant difficile puisqu'il n'existe pas de VLEP pour les PUF et les conditions de mesure dans les articles ne reflètent pas forcément celles recommandées pour le milieu professionnel [20].

Conclusion

Le développement des imprimantes 3D étant en expansion, une possibilité d'exposition des utilisateurs est de plus en plus croissante.

Toutes les études permettent de conclure qu'il existe un potentiel d'exposition non négligeable à des particules de taille nanométrique et d'autres composés non particuliers tels que les COV. Néanmoins, il existe encore peu d'études pour identifier l'origine de ces émissions et la nature chimique des nanoparticules.

À l'heure actuelle, il y a encore peu de recul et les études menées manquent d'homogénéité pour permettre une comparaison des résultats d'une étude à l'autre. Des efforts lors des études ultérieures doivent aller dans ce sens, notamment sur les nouvelles imprimantes

utilisant des nanoparticules comme matériaux, et chercher à savoir si les particules nanométriques libérées sont initialement intégrées dans le matériau pour améliorer ses propriétés. Il serait fortement conseillé d'instaurer un modèle expérimental standard pour mesurer les concentrations des particules émises et donc estimer l'exposition par l'utilisateur notamment chez les professionnels.

En attendant, des mesures de précaution simples doivent être respectées comme l'impression dans des endroits ventilés, le port d'un masque notamment

lors d'un dysfonctionnement de la machine, et il serait recommandé de limiter l'utilisation par les personnes vulnérables. ■

Remerciements et autres mentions

Les auteurs tiennent à remercier tous les relecteurs de cet article.

Financement : aucun ; **liens d'intérêts** : les auteurs déclarent ne pas avoir de lien d'intérêt.

Références

1. ALL3DP. *The official history of the RepRap project*. ALL3DP, 2016. <https://all3dp.com/history-of-the-reprap-project/>
2. Fischer T. *A real industrial revolution: 3D printing and the impact on jobs*. History, future now, 2012. <http://www.history-futurenow.com/wp/a-real-industrial-revolution-3d-printing-and-the-impact-on-jobs-2/>
3. Stephens B, Azimi P, El Orch Z, Ramos T. Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers. *Atmos Environ* 2013 ; 79 (4) : 334-9.
4. Obaton AN, Bernard A, Taillandier G, Moschetta J.M. Additive manufacturing: state of the art and generated metrological needs. *Rev Fr Metr* 2015 ; 2015 (1) : 21-36.
5. Dodziuk H. Applications of 3D printing in healthcare. *Pol J Thorac Cardiovasc Surg* 2016 ; 13 (3) : 283-93.
6. Velasquillo C, Galue EA, Rodriguez L, Ibarra C, Ibarra-Ibarra LG. Skin 3D bioprinting. Applications in cosmetology. *JCDSA* 2013 ; 3 : 85-9.
7. Stratasy. *Impression 3D pour l'industrie aéronautique*. Stratasy, 2015. <http://www.stratasy.com/fr/secteurs/aerospatiale-defense/airbus>
8. Azimi P, Zhao D, Pouzet C, Crain NE, Stephens B. Emissions of ultrafine particles and volatile organic compounds from commercially available desktop three-dimensional printers with multiple filaments. *Environ Sci Technol* 2016 ; 50 : 1260-8.
9. Yi J, LeBouf RF, Duling MG, et al. Emission of particulate matter from a desktop three-dimensional (3D) printer. *J Toxicol Environ Health* 2016 ; 79 : 453-65.
10. Zontek TL, Ogle BR, Jankovic JT, Hollenbeck SM. An exposure assessment of desktop 3D printing. *J Chem Health Saf* 2017 ; 24 : 15-25.
11. Dul S, Fambri L, Pegoretti A. Fused deposition modelling with ABS-graphene nanocomposites. *J Compositesa* 2016 ; 85 (2016) : 181-91.
12. Tsiakatouras G, Tselou E, Stergiou C. Comparative study on nanotubes reinforced with carbon filaments for the 3D printing of mechanical parts. *World Trans Eng Technol Educ* 2014 ; 12 : 392-6.
13. De Leon AC, Chen Q, Palaganas NB, Palaganas JO, Manapat J, Advincula RC. High performance polymer nanocomposites for additive manufacturing applications. *J React Funct Polym* 2016 ; 103 (2016) : 141-55.
14. Nano Dimension. *High performance materials, dielectric inks and nano particle conductive inks engineered for printed electronics*. Nano-dimension. <http://www.nano-di.com/conductive-inks>
15. Afshar-Mohajer N, Wu CY, Ladun T, Rajon DA. Characterization of particulate matters and total VOC emissions from a binder jetting 3D printer. *J Build Environ* 2015 ; 93 (2015) : 293-301.
16. Deng Y, Cao SJ, Chen A, Guo Y. The impact of manufacturing parameters on submicron particle emission from a desktop 3D printer in the perspective of emission reduction. *J Build Environ* 2016 ; 104 (2016) : 311-9.
17. Pirela SV, Pyrgiotakis G, Bello D, Thomas T, Castranova V, Demokritou P. Development and characterization of an exposure platform suitable for physico-chemical, morphological and toxicological characterization of printer-emitted particles (PEPs). *Inhal Toxicol* 2014 ; 26 (7) : 400-8.
18. Kim Y, Yoon C, Ham S, et al. Emissions of nanoparticles and gaseous material from 3D printer operation. *Environ Sci Technol* 2015 ; 49 : 12044-53.
19. Anses. *Valeurs guides de qualité d'air intérieur (VGAI)*. Anses, 2014.
20. HCSP. *Valeurs repères d'aide à la gestion pour les particules dans l'air intérieur*. HCSP, 2013. <http://www.hcsp.fr/explore.cgi/avisrapportsdomaine?clefr=371>.