

Décryptage

LA FABRICATION ADDITIVE : QUELLE PRÉVENTION EN ENTREPRISE ?

Ce décryptage présente les enjeux en matière de santé et de sécurité au travail associés aux différents types de techniques de fabrication additive, ainsi que les mesures de prévention à prendre en compte par les employeurs et les préventeurs.

3D MANUFACTURING AND PREVENTION IN COMPANIES – This article presents the occupational health and safety challenges associated with the different types of 3D manufacturing techniques, as well as the prevention measures to be taken into account by employers and OSH professionals.

FRANÇOIS-
XAVIER
KELLER
INRS,
département
Ingénierie
des procédés

Lancée au début des années 1980 par des travaux en laboratoire et le dépôt de quelques brevets en 1984, dont certains sont français, la fabrication additive consiste à ajouter de la matière pour former une pièce, plutôt que d'en enlever, comme c'est le cas dans les procédés de fabrication courants. Le développement des machines de fabrication additive ou impression 3D est en progression constante dans de nombreux secteurs de l'industrie : aéronautique, automobile et médical (prothèses dentaires et auditives). Les principaux avantages de la fabrication additive sont : la réduction du prix de revient des pièces à géométrie complexe et des délais de fabrication, la construction de prototypes fonctionnels, l'augmentation du « rendement matière », la réduction des frais fixes liés à la fabrication des moules et des outillages, ainsi que la limitation de l'utilisation des fluides de coupe et de la génération des copeaux (uniquement aux étapes de finition).

Dans la littérature scientifique s'intéressant aux sujets de prévention, on remarque le manque d'études sur les risques professionnels associés qui peuvent être nombreux (risques chimiques, d'incendie/explosion, mécaniques, troubles musculo-squelettiques...), compte tenu des différentes technologies présentes sur le marché, et qu'il est donc indispensable d'évaluer, afin de mettre en place des mesures de protection des salariés. Une enquête réalisée par l'INRS a révélé qu'environ 25 % des machines présentes dans le secteur de la recherche (laboratoires, universités, centres de

recherche et développement), 50 % dans le secteur des services et 40 % dans le secteur industriel, ne possédaient pas de système d'aspiration.

Les principales technologies présentes sur le marché sont regroupées en sept types de fabrication additive définis dans la norme Iso 17 296¹. D'autres peuvent se développer, car c'est une industrie en plein essor. Parmi eux, on retrouve la photopolymérisation en cuve ; dans ce cas, un photopolymère liquide est durci par l'intermédiaire d'une source lumineuse. Pour la projection de matière, ce sont des gouttelettes de matériau qui sont déposées de manière sélective en couches successives. La technique utilisant la projection de liant consiste à déposer un agent de liaison liquide, de manière sélective, pour lier le matériau de fabrication, qui se présente principalement sous forme de poudre. Cette opération se fait aussi en couches successives. La fusion sur lit de poudre utilise une énergie thermique (rayon laser, faisceau d'électrons) pour faire fondre le matériau. L'extrusion de matière – qui reste la technologie la plus communément répandue – aussi appelée fusion de fil, consiste à distribuer la matière fondue de manière sélective, par l'intermédiaire d'une buse chauffante. Ce procédé s'apparente à l'injection de plastique déjà présent dans l'industrie. Deux autres procédés sont également présents, le dépôt de matière sous énergie thermique concentrée (rayon laser, faisceau d'électrons) qui fait fondre le matériau progressivement, ainsi que la stratification en couches de matériau, liées de manière sélective pour former la pièce finale.



© Patrick Delapierre pour l'INRS/2020

Procédés et matières premières

De très nombreuses matières premières peuvent être utilisées pour la fabrication additive. Le béton, les céramiques, les cellules vivantes sont quelques exemples de matières qui sont utilisées par ce procédé. Cependant, deux familles de matières premières sont le plus souvent rencontrées : les polymères et les métaux, principalement sous forme de poudres.

Parmi les procédés utilisés dans la fabrication additive, la projection de liant, la fusion sur lit de poudre et le dépôt de matière sous énergie concentrée sont ceux qui peuvent employer des poudres métalliques. Aujourd'hui, concernant les poudres métalliques, l'une des technologies les plus répandues est la fusion sur lit de poudre. En ce qui concerne les polymères (sous forme de fil, de poudre ou de résine liquide), on retrouve majoritairement la fusion de fil (extrusion de matière) ou encore la photopolymérisation en cuve, pour laquelle une résine liquide est solidifiée sous l'effet d'une source lumineuse.

Identification des risques

De nombreux risques sont présents dans cette activité. Il est possible de distinguer ceux liés à tout procédé industriel, comme la manutention, l'élec-

tricité, les récipients sous pression, le rayonnement laser..., de ceux liés aux produits mis en œuvre ou générés par le procédé. L'ensemble des risques doit faire l'objet d'une évaluation spécifique, formalisée dans le document unique d'évaluation des risques (DU), conduisant à la mise en place de mesures tant techniques qu'organisationnelles, afin de supprimer ou de réduire les risques identifiés. Dans cet article, seuls les risques intrinsèques aux produits ou substances de dégradation, ainsi que les principales mesures de prévention associées, seront détaillés. L'identification des risques liés aux différents produits passe par l'inventaire de tous les produits chimiques présents lors des différentes étapes du procédé. Les caractéristiques de ceux-ci doivent être identifiées à l'aide des sources d'information disponibles, telles que les fiches de données de sécurité (FDS) et les fiches toxicologiques (de l'INRS) par exemple.

Principaux risques liés à ces technologies

Chimiques lors de l'utilisation de matériaux polymères

Les fils plastiques sont composés de polymères mélangés à différents additifs. Les principaux matériaux polymères sont l'ABS, le PLA (acide polylactique), le PET (polyéthylène-téréphtalate),

Laboratoire utilisant des imprimantes 3D : la sécurité au travail a été prise en compte en amont, avec une réflexion sur les zones d'implantations et un choix de matières moins émissives.



le PC (polycarbonate) et le PEEK (polyéther-éther-cétone). Le matériau plastique (brut, non chauffé) ne présente généralement pas d'effet spécifique sur la santé. Si, lors de sa fabrication, la polymérisation a été incomplète, alors des produits de départ (monomères) ou des additifs peuvent remonter en surface ou se dégager, générant principalement des risques d'exposition cutanée. Les résines liquides sont composées principalement de monomères ou de prépolymères (acrylates, polyuréthanes, résines époxy) dissous dans des solvants organiques (polyéthylène-glycol, glycérol). Les effets sur la santé (par inhalation ou contact cutané) sont principalement dus aux monomères ou solvants qui composent les résines. La majorité des poudres plastiques présente des effets sur la santé lors de l'exposition par inhalation ou par contact cutané. D'autre part, tous ces produits sont susceptibles d'être combustibles.

Pour cette catégorie, les dangers relatifs au risque chimique sont liés à une exposition à des composés organiques volatils (COV), issus de la dégradation thermique des polymères comme le CO, le CO₂, les aldéhydes, le styrène. Par ailleurs, une émission de particules ultrafines est observée. Leur taux d'émission par des machines d'impression 3D alimentées avec de l'ABS (acrylonitrile butadiène styrène) est de l'ordre de 1.9.10¹¹ #.min⁻¹ et de l'ordre de 2.10¹⁰ #.min⁻¹ pour des machines alimentées avec du PLA. Cependant, pour ces deux matériaux, les machines peuvent être catégorisées comme étant fortement émettrices en particules ultrafines. Les COV émis par des imprimantes à dépôt de fil fondu sont principalement des vapeurs issues de la dégradation des thermoplastiques. Le styrène étant l'un des composés majeurs de l'ABS, il est aussi trouvé comme composé majeur des émissions. La concentration en styrène près des imprimantes 3D est estimée à 150 µg.m⁻³, ce qui correspond à 20 fois la concentration en styrène mesurée au cours de la campagne US EPA BASE² (base de données provenant de l'agence EPA : *United States Environmental Protection Agency*). Des mesures de débits d'émissions en fonction de différents matériaux (ABS, PLA) ont pu être faites et atteignent 3 500 µg.h⁻¹ en COV totaux. En général, l'ABS émet plus de particules que le PLA, et les additifs pourraient avoir un effet important sur les émissions.

Chimiques lors de l'utilisation de poudres métalliques

En ce qui concerne les matériaux métalliques, les dangers proviennent de l'utilisation de métaux tels que le nickel, le cobalt, le titane et les alliages associés. Ces métaux sont principalement présents sous forme de poudre dont les grains ont une taille pouvant atteindre 20 µm et dont les produits émis

lors de leur fusion ne sont pas précisément étudiés. La génération de ces produits lors des opérations de fusion de poudres métalliques peut aussi présenter des risques pour la santé.

Les poudres contenant du nickel ou du cobalt sont classées cancérigènes. Elles présentent des risques pour la santé, lors de l'exposition par inhalation ou par voie cutanée. De plus, même pour des métaux sans effet spécifique sur la santé, la taille de la poudre peut être suffisamment fine pour provoquer des difficultés respiratoires, de l'asthme ainsi que des allergies cutanées. Les poudres métalliques utilisées contiennent seules ou en mélange de l'aluminium, du titane, du manganèse, du zinc, du tungstène, du niobium, du nickel, du cobalt. Tous ces produits sont inflammables voire pyrophoriques (ils s'enflamment spontanément à l'air) pour certaines poudres d'aluminium. Ces poudres fines, de granulométrie très faible, sont donc très réactives. Sous forme de couche à l'air libre, elles peuvent générer un incendie en présence d'une source d'inflammation (surface chaude, flamme, étincelle). Lorsque les poudres sont en suspension, le phénomène généré peut engendrer une explosion. Par ailleurs, la majorité de ces poudres réagit avec l'eau en formant de l'hydrogène, gaz extrêmement inflammable et explosif.

Produits émis (produits de dégradation)

Sous l'effet de la température, les matières plastiques se dégradent superficiellement, formant notamment des COV. L'exposition par inhalation ou par contact cutané aux produits de dégradation thermique émis lors du chauffage peut avoir des effets sur la santé (irritations, allergies, atteintes du système nerveux, voire cancers ou effets sur la reproduction). Lors de la transformation des poudres métalliques sous l'effet de la température, les métaux forment des oxydes. Le nickel, le chrome, le cobalt sous certaines formes oxydées sont cancérigènes.

Produits de finition et d'entretien/nettoyage

Les produits de finition sont utilisés pour éliminer les polymères de support sur certaines pièces. Ils sont pour la plupart liquides et volatils. Le plus employé, l'isopropanol, est irritant (peau, yeux) et inflammable. Les produits utilisés pour l'entretien, le nettoyage ou la maintenance peuvent également être irritants et inflammables (acétone, isopropanol).

Gaz d'inertage

Les gaz (argon, azote...) utilisés pour empêcher l'oxydation de certains métaux présentent un risque d'anoxie, car ils remplacent l'oxygène de l'air lorsque l'enceinte se charge en gaz d'inertage.

Liants

Les polyacryliques, les polyuréthanes, les copolymères styrène-acrylate, le cyanoacrylate de méthyle, sont les liants les plus utilisés dans la fabrication additive. Ces produits peuvent être irritants pour la peau, les yeux et les voies respiratoires.

Prévention des risques

Le risque mécanique, le risque électrique, le risque lié aux rayonnements ionisants sont généralement pris en compte dans la conception de la machine, encadrée par la « directive Machines »³. Les risques chimiques et d'incendie/explosion sont eux aussi partiellement pris en compte. Ces risques existent lors d'autres étapes que celle de la fabrication (les phases de maintenance de la machine, nettoyage, finition, remplissage, récupération de pièce...). Leur évaluation passe par une cartographie des différentes zones d'utilisation des produits dangereux et des tâches réalisées, en tenant compte du mode opératoire ainsi que du matériel utilisé. L'importance de l'exposition est principalement déterminée par l'opération effectuée et les propriétés physicochimiques du produit manipulé. La quantité de matière et la fréquence de la tâche réalisée influent aussi sur l'exposition. L'évaluation des risques est suivie de la mise en place d'actions de prévention concrètes, à hiérarchiser en fonction des priorités (Cf. Encadré).

Principales mesures de prévention

Les principales solutions de prévention adaptées aux tâches identifiées pour la fabrication additive sont les suivantes :

Avant la mise en œuvre

Stocker les produits chimiques ou les déchets dans des locaux frais, ventilés, à l'abri des rayonnements solaires ou de toute autre source de chaleur. Les emballages doivent être étanches, en bon état et fermés soigneusement après chaque utilisation. Le stockage nécessite un système de ventilation afin de limiter l'accumulation de produits dangereux.

Lors de la mise en œuvre

Préparer les charges et alimenter la machine en matière première en circuit fermé ou sur des postes de travail ventilés (cabine ouverte, dossier aspirant). Aspirer les émissions de la machine et les rejeter à l'extérieur.

À la fin de la mise en œuvre

Ne pas ouvrir la machine à la fin de la fabrication. Laisser une temporisation pour que le gaz d'inertage ou la ventilation retire les produits d'oxydation ou de dégradation. Utiliser ensuite un système de boîte à gants pour enlever du plateau la matière non utilisée, pour nettoyer la pièce et la machine (plateau, support de pièces).

ENCADRÉ

PRINCIPES GÉNÉRAUX DE PRÉVENTION APPLIQUÉS À LA FABRICATION ADDITIVE

Substitution

Substituer, si c'est technologiquement possible, les produits les plus dangereux par des alternatives moins dangereuses (exemple : poudres métalliques contenant du nickel, du chrome ou du cobalt par d'autres poudres moins dangereuses).

Circuit fermé

Travailler autant que possible en circuit fermé, que ce soit lors de la manipulation des poudres, lors de la fabrication ou au cours de la finition.

Ventilation - Captage à la source

Dans les situations où le travail en circuit fermé n'est pas envisageable, l'emploi de systèmes de captage et d'aspiration au plus près de la source d'émission est nécessaire. Les vitesses d'air dans les conduits doivent être adaptées aux polluants transportés. Pour les poudres, un minimum de 20 m/s est requis. L'air pollué est rejeté à l'extérieur après filtration.

Ventilation générale

En complément des systèmes de captage localisés, une ventilation générale doit être installée afin de diluer les polluants résiduels et de fournir en air neuf les locaux. Le débit de compensation en air neuf doit prendre en compte le débit de la ventilation générale ainsi que les débits des différents systèmes de captage. L'air neuf ne doit pas provenir d'un local à pollution spécifique.

Mesures organisationnelles

Isoler les tâches polluantes du reste de l'activité. Isoler l'atelier de fabrication additive des autres activités. Limiter l'accès aux personnes habilitées dans les locaux à fabrication additive. Concentrer les tâches polluantes aux postes de travail ventilés.

Équipement de protection individuelle (EPI)

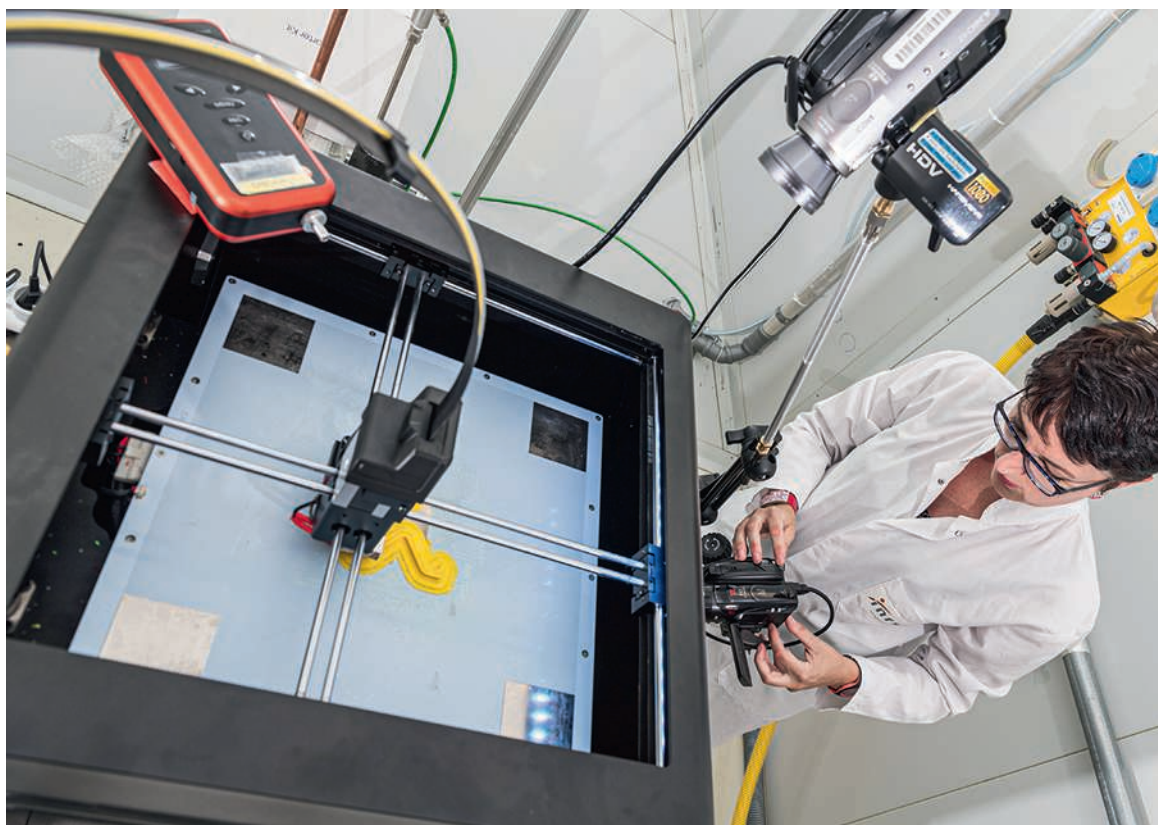
En complément, des équipements de protection individuelle peuvent être utilisés. Ils ne doivent pas se substituer aux mesures de protection collective décrites précédemment. Il s'agit principalement de gants étanches aux poudres et aux solvants utilisés (gants en nitrile par exemple), d'appareils de protection respiratoire filtrants équipés de filtres P2 ou P3, de vêtements de protection étanches aux poudres (type 5) et de chaussures de sécurité.

Formation et information du personnel

Les moyens de prévention mis en place doivent être accompagnés d'une formation des salariés sur leur fonctionnement et leur utilité. Le bon emploi des EPI et des moyens d'extinctions (extincteurs) et l'information des salariés sur les risques présents dans l'atelier et les dangers des produits utilisés doivent faire partie de cette formation.



Mise en place d'instruments de mesures temps réel en laboratoire (INRS) pour caractériser les émissions des machines d'impression en 3D.



© Serge Morillon/INRS/2019

Post-traitement et maintenance de la machine

Effectuer les opérations de post-traitement (découpe, ponçage, perçage) sur un poste ventilé avec des vitesses d'air de 0.5 – 1 m/s au point d'émission des polluants. Ne jamais utiliser de soufflette ou tout équipement (type pinceau, balai) mettant en suspension la poussière. Toute intervention sur la machine doit se faire par un personnel formé et informé sur les risques existants. Comme l'étanchéité de la machine est assurée lors des étapes de fabrication, vérifier que l'atmosphère est suffisamment riche en oxygène avant d'entrer dans la machine. Enlever le maximum de poudre et de produits de dégradation en circuit fermé, avant d'intervenir dans la machine. Ventiler la machine et l'atelier où elle est implantée. Utiliser des EPI.

En plus de la prévention du risque chimique et du risque incendie/explosion, le risque associé au laser est à maîtriser et l'emploi d'écran de protection est nécessaire.

Incendie/explosion

L'ensemble du matériel et des équipements susceptibles d'entrer en contact avec les matières premières doit être adapté aux caractéristiques physicochimiques de celles-ci, pour éviter notamment que ce matériel ne soit une source d'inflammation et ne génère un incendie ou une explosion. Une évaluation de ce risque doit être effectuée à toutes les étapes décrites précédemment. Des consignes de sécurité doivent être élaborées et les personnes formées à leur contenu (marche à suivre en cas de départ d'incendie ou d'évacuation des locaux). Le plan des locaux avec le détail des produits et des zones de stockage doit être tenu à jour et à disposition des services de secours (pompiers). ●

1. Iso 17296-2 – Fabrication additive. Principes généraux. Partie 2 : vue d'ensemble des catégories de procédés et des matières premières. Genève, Iso, déc. 2016. Accessible sur : <https://www.boutique.afnor.org/> (site payant).

2. Consultable sur : https://search.epa.gov/epasearch/?query=text=additive+manufacturing&areaname=&areacontacts=&easearchurl=&typeofsearch=epa&result_template=2col.ftl#/.

3. Directive n° 2006/42/CE du Parlement et du Conseil du 17 mai 2006 modifiée. Voir notamment : www.inrs.fr/demarche/conception-utilisation-equipements-travail/ce-qu-il-faut-retenir.html.

POUR EN SAVOIR +

- INRS – Fabrication additive ou impression 3D utilisant des matières plastiques. Fiche pratique de sécurité, 2020, ED 148, 6 p. Accessible sur : www.inrs.fr.
- INRS – Fabrication additive ou impression 3D utilisant les poudres métalliques. Fiche pratique de sécurité, 2019, ED 144, 6 p. Accessible sur : www.inrs.fr.
- GUIMON M. – La fabrication additive, un empilement de risques ? *Hygiène et sécurité du travail*, 2013, 233, VP 3, pp. 88-92. Accessible sur : www.inrs.fr/publications/hst/veille-et-prospective.html.