

Technologie

LA FABRICATION ADDITIVE, UN EMPILEMENT DE RISQUES?

Qui n'a pas encore vu ou lu de reportage sur la fabrication 3D ? Sept procédés sont répertoriés sous le vocable fabrication additive ou fabrication 3D. Ils présentent des risques différents selon le procédé mis en œuvre et les produits utilisés. L'essor spectaculaire de la fabrication additive doit être accompagné par une évaluation rigoureuse des risques et la mise en place le plus en amont possible de moyens de prévention adaptés, en particulier des dispositifs d'aspiration des poussières et des gaz.

ADDITIVE MANUFACTURING: STACKING UP THE RISKS? – Who hasn't seen or read a news story or feature about 3D printing? Seven processes come under the heading of "additive manufacturing" or "3D printing". They have different risks depending on the process implemented and on the products used. The spectacular boom in additive manufacturing needs to be accompanied by rigorous assessment of the risks and by implementation of suitable prevention means as far upstream as possible, in particular devices for extracting or capturing dust and fumes.

MICHÈLE
GUIMON
INRS,
département
Expertise
et conseil
technique

La fabrication additive, également appelée fabrication 3D, impression 3D, prototypage rapide, fabrication rapide ou stéréo-lithographie, consiste à construire couche par couche un objet en trois dimensions.

La fabrication additive se déroule en trois grandes étapes :

- conception numérique de l'objet en trois dimensions;
- transformation du modèle en fichier numérique de fabrication adapté au type de machine;
- construction de l'objet couche par couche dans la machine de fabrication additive.

Les matériaux pouvant être utilisés vont des polymères aux métaux en passant par les céramiques, le bois, le sable, etc.

Lorsqu'il a déposé le premier brevet de fabrication additive il y a 30 ans, Jean-Claude André¹ ne se doutait sans doute pas de la dynamique spectaculaire qu'allait connaître l'évolution de cette technique. L'amélioration de l'accessibilité des logiciels de conception assistée par ordinateur, la standardisation des formats logiciels, le développement de nouveaux procédés, l'amélioration de la qualité des machines, la diversité croissante des matériaux utilisables, ont, conjugués, permis l'essor considérable de la fabrication additive. L'apparition de modèles grand public et le couplage possible avec des scanners 3D ont favorisé

sa médiatisation. Les technologies de fabrication additive soulèvent l'enthousiasme et certains analystes estiment qu'elles contribueront à la troisième révolution industrielle [1] qui verra la transition de la production de masse vers la fabrication individualisée et l'émergence d'un nouveau modèle de chaîne d'approvisionnement.

L'avenir nous dira ce qu'il en est. Aujourd'hui, ces technologies viennent en complément des procédés traditionnels et apportent des solutions sur des marchés spécifiques de pièces complexes produites en petites séries. Leur développement doit également prendre en compte la santé et la sécurité au travail et intégrer le plus en amont possible la prévention des risques professionnels.

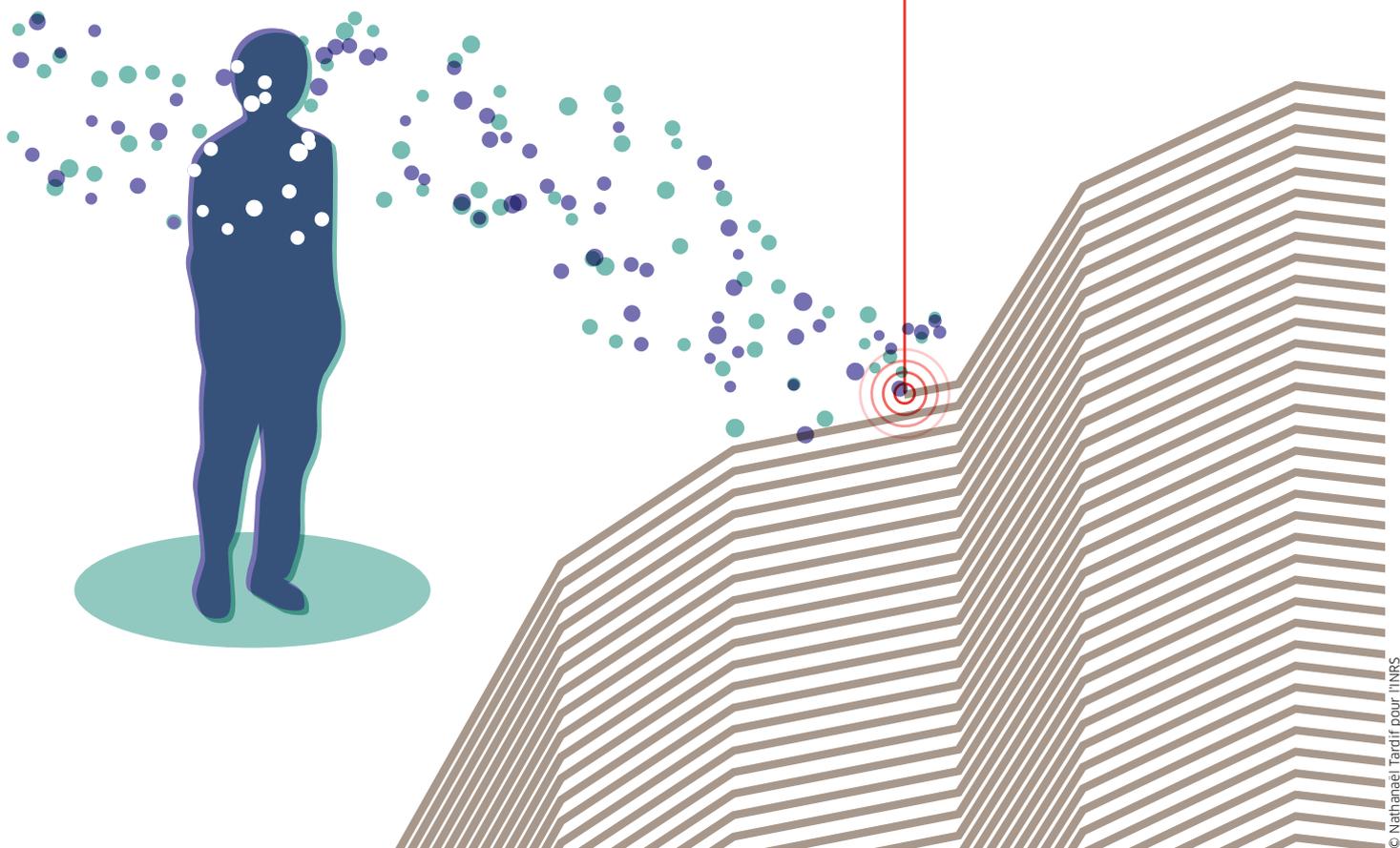
La technologie

Plusieurs procédés de fabrication additive existent [2]. Certains utilisent des buses d'impression type jet d'encre pour projeter un liant sur une poudre, un polymère, d'autres utilisent l'énergie d'un laser ou d'un faisceau d'électrons pour fondre ou fritter une poudre plastique ou métallique.

La normalisation [3] a distingué sept types de procédés (cf. Encadré 1).

Par comparaison aux procédés traditionnels, la fabrication additive présente de sérieux avantages [5, 6]. Elle permet :

- d'obtenir un niveau de complexité géométrique qui ne peut pas être atteint par les techniques



© Nathanaël Tardif pour l'INRS

- d'usinage conventionnelles;
- d'alléger des pièces en exploitant par exemple les résultats issus de l'optimisation topologique (calculs mathématiques visant à modifier la répartition de matière d'une pièce de forme donnée pour réduire le poids et augmenter la résistance mécanique);
- d'introduire de nouvelles fonctionnalités sur une même pièce en faisant varier les propriétés des matériaux (couleur, dureté, etc., par exemple une coque rigide avec un bouton souple);
- de créer de nouveaux matériaux composites par des associations irréalisables avec des techniques classiques;
- de mettre plus aisément en œuvre des matériaux difficiles comme le titane;
- d'envisager la fabrication de pièces de petite taille: micro-électrochimie, intensification de procédés, dispositifs médicaux, etc.;
- de réaliser une économie de matière par son principe de construction couche par couche et par le recyclage des matériaux non transformés;
- d'éviter l'utilisation d'outillage auxiliaire dédié (montages, châssis, etc.), d'éléments d'assemblage (vis, écrous, etc.);
- de raccourcir les cycles pour une production en petite série (par exemple suppression de l'étape de création d'un moule);
- d'améliorer la réactivité vis-à-vis des demandes des clients;

- de réaliser soi-même des pièces de forme complexe sans passer par la sous-traitance.
- Si elle constitue une méthode de choix pour certaines niches innovantes, elle ne remplacera pas les technologies conventionnelles, en particulier pour la production en grande série, en raison notamment:
- de la limitation de la taille des pièces. Outre une machine de dimension adaptée, les grandes pièces nécessiteraient des temps de fabrication extrêmement longs (même si des projets de taille décimétrique existent);
 - des imperfections de l'état de surface des pièces (rugosité, etc.) et des retraits géométriques non encore maîtrisés pour certaines techniques;
 - de la nécessité de mettre en œuvre des étapes de finition pour certaines techniques;
 - du coût des machines industrielles et des matières premières (le coût unitaire d'une pièce reste élevé).

La fabrication additive est particulièrement adaptée pour les petites pièces complexes et en petites séries, les marchés de niche et les pièces personnalisées.

Les applications

La principale application de la fabrication additive a longtemps été le prototypage rapide, afin de valider des formes et des solutions envisagées. Aujourd'hui, les usages se diversifient et cette



ENCADRÉ 1

LES PROCÉDÉS DE FABRICATION ADDITIVE [4]

Extrusion (fil fondu)

Principe: un polymère est fondu et déposé en couche ultrafine à l'aide d'une buse mobile. Il se solidifie rapidement et adhère aux couches précédemment déposées. Selon la conformation de la pièce, un support peut être nécessaire et une seconde buse dépose en parallèle un autre matériau support.

Matériaux: thermoplastiques (Copolymère acrylonitrile-butadiène-styrène (ABS), poly-(acide lactique) (PLA), etc.) avec pour support par exemple le poly-(alcool vinylique) (PVA) soluble dans l'eau.



© INRS

Projection

Principe: une couche de résine photosensible est déposée par une tête mobile puis elle est polymérisée au fur et à mesure par une lampe UV fixée sur la tête. Selon la conformation de la pièce, un support peut également être construit.

Matériaux: polymères ou résines photosensibles.

Projection de liant

Principe: un liant est projeté sur une couche fine de poudre. Une seconde couche de poudre

est ensuite déposée sur laquelle est projeté le liant et ainsi de suite. Une fois la pièce formée, l'excès de poudre est retiré et la pièce subit des traitements ultérieurs (chauffage, frittage, infiltration par différents produits, etc.).

Matériaux: polymères (époxy, acryliques, etc.), métaux, céramique, sable, verre, plâtre, etc.

Stratoconception (usinage par empilement)

Principe: un outil (laser, fraise) découpe dans une plaque une tranche de la pièce. Sur un deuxième poste les tranches sont positionnées pour former l'objet puis assemblées par différentes techniques.

Matériaux: polymères, métaux, bois, etc.

Photopolymérisation (stéréo-lithographie laser)

Principe: un laser ou un rayonnement UV polymérise certaines parties de la surface d'un bain de résine photosensible à l'état liquide. La première couche formée, la pièce s'enfonce légèrement dans le bain et une seconde couche est polymérisée et ainsi de suite. Une étape ultérieure de polymérisation complémentaire est nécessaire.

Matériaux: polymères ou résines photosensibles, composites céramiques-résines photosensibles.

Fusion d'un lit de poudre

Principe: un laser ou un faisceau d'électrons vient fondre ou fritter certaines parties d'une couche mince d'un matériau poudreux. Une seconde couche de poudre est ensuite déposée par dessus dont certaines parties sont fondues/frittées et ainsi de suite.

Matériaux: polymères (polyamides, polycarbonates, etc.), cire, alliages métalliques (titane, aluminium, nickel, acier inox, etc.).

Cladding - Dépôt de matière dans un flux d'énergie

Principe: Une poudre métallique est projetée dans le flux d'énergie d'un laser et ainsi fondue. Le dépôt s'effectue couche après couche, voire en continu, afin de construire la pièce désirée.

Matériaux: alliages métalliques (titane, etc.)

technologie se positionne sur des domaines très techniques.

La fonderie est un des premiers secteurs à avoir utilisé la fabrication additive pour fabriquer des moules, noyaux, montages, etc. D'autres lui ont emboîté le pas et ont adopté la fabrication 3D comme l'aéronautique (composants, réparation, drones, etc.), l'automobile, l'énergie, la joaillerie, la médecine (prothèses personnalisées, etc.), la dentisterie (couronnes, implants dentaires, etc.), les équipements sportifs (semelles et crampons de

chaussures, etc.), les biens de consommation (trophées, coques de smartphones, vaisselle...). Des recherches sont en cours sur la fabrication additive de tissus biologiques et sur la mise au point de procédés nanométriques.

Le marché s'ouvre aux particuliers et la fabrication 3D personnelle se développe: de petites imprimantes grand public, à monter soi-même ou non, sont disponibles à l'achat; des sociétés de services proposent de fabriquer des objets à partir de fichiers 3D envoyés par des internautes;

des ateliers équipés ouverts à tous (par exemple, les « fablabs » (*fabrication laboratory*) ou « fab-shops » (*fabrication shops*)) se créent.

Les risques

L'essor de cette technologie doit aller de pair avec la prise en compte des risques éventuels pouvant être repérés et leur réduction au niveau le plus faible possible. Les principaux risques rencontrés en fabrication additive sont notamment ceux liés à l'exposition à des produits dangereux, les risques d'incendie et d'explosion, les risques liés à l'utilisation de machines, de lasers, de lampes UV ou de faisceau d'électrons. Cette liste n'est pas exhaustive et d'autres risques tels ceux liés à la manutention d'éléments lourds (plateaux, pièces, cassettes de chargement par exemple) peuvent exister.

Risque chimique

Quel que soit le procédé, il importe de pendre en compte le risque chimique. De nombreux matériaux peuvent être utilisés, organiques ou inorganiques (métalliques, minéraux). Les poudres et les liants sont spécifiquement formulés pour la fabrication 3D; différents additifs leur sont incorporés, sélectionnés parmi une très vaste gamme en fonction du procédé et du matériau (cf. Encadré 2).

Les étapes post-fabrication, de traitement, de finition et de nettoyage nécessitent également l'emploi de produits chimiques.

Sous l'action de la chaleur, lors de la fabrication elle-même ou lors des traitements ultérieurs, de nombreux composés gazeux se dégagent [8], notamment les monomères ou les composés de base, des composés organiques volatils (aldéhydes, alcools, cétones, hydrocarbures aliphatiques ou aromatiques légers, etc.), du monoxyde de carbone, du cyanure d'hydrogène, etc., provenant du début de décomposition des matériaux. Leur nature et leur quantité dépendent du matériau et du procédé mis en œuvre. La présence de particules ultrafines a par ailleurs été relevée [9].

L'exposition, par inhalation ou par contact cutané, aux matières premières utilisées, aux produits de dégradation thermique émis lors du chauffage ainsi qu'aux produits de traitement et de nettoyage peut avoir des effets sur la santé comme des irritations, des allergies, des atteintes du système nerveux, voire des cancers ou des effets sur la reproduction. Même les poussières considérées comme inertes, c'est-à-dire sans toxicité spécifique, peuvent, lorsqu'elles sont en quantité importante, provoquer une surcharge pulmonaire éventuellement associée à une fibrose pulmonaire. Pour connaître les dangers associés aux produits manipulés, il est primordial de consulter leur fiche de données de sécurité (FDS).

Pour réduire les expositions et les maintenir en dessous des valeurs limites d'exposition professionnelle (lorsqu'elles existent), des installations de captage des poussières, des aérosols, des gaz doivent être prévues avec une évacuation à l'extérieur des locaux. Pour une meilleure efficacité, le dispositif de captage devrait être intégré à la machine dès sa conception. Toutes les machines n'en sont pas encore équipées et il importe d'être vigilant sur ce point.

À l'ouverture de la machine, le dégagement de la pièce fabriquée est une opération qui expose particulièrement l'opérateur. Sur certaines machines, de grandes quantités de poussières sont émises. De plus, il est courant de voir l'opérateur dégager la pièce à mains nues ou à l'aide d'une balayette ou d'une soufflette à air comprimé. Ces pratiques doivent être proscrites. L'ouverture de la machine en fin de processus devrait commander la mise en route d'un système d'aspiration des poussières émises. Il est important de veiller au port des gants et à l'utilisation d'un aspirateur. L'usage de la soufflette à air comprimé n'est préconisé que dans une enceinte close et ventilée, isolée de l'atelier et de l'opérateur.

ENCADRÉ 2 DE MULTIPLES PRODUITS EMPLOYÉS EN FABRICATION ADDITIVE [7]

Les matériaux à base de polymères.

Polyamides, époxy, copolymère acrylonitrile styrène butadiène (ABS), poly(alcool vinylique), poly(acide lactique), cyanoacrylates, polycarbonates, acrylates, polyuréthanes, polypropylènes, polyéthylènes, polystyrènes... La cellulose peut également être employée. Ces matériaux peuvent contenir des composés macromoléculaires à grande longueur de chaîne mais également des oligomères (polymères à chaîne courte) et des monomères.

Les poudres métalliques. Alliages métalliques à base par exemple de titane, d'aluminium, nickel, inox, bronze...

D'autres matériaux sont également employés comme par exemple le sable, le verre, le plâtre, les matériaux céramiques, le bois, le papier.

Les additifs sont destinés à apporter certaines propriétés aux poudres ou aux liants. Ils sont très divers: photo-initiateurs, agents de frittage, antioxydants, encres, charges inorganiques dont certaines peuvent être de taille nanométrique, fibres (verre, nanotubes de carbone...), solvants, tensio-actifs, biocides, agents complexants, agents rhéologiques, etc.



D'autres opérations comme le chargement de la machine, les traitements après fabrication, le nettoyage fin après traitement peuvent également être à l'origine d'expositions.

Peu d'études ont encore été menées sur les expositions individuelles et ambiantes et les effets sur la santé des produits utilisés ne sont pas tous connus. Néanmoins, l'observation des installations montre que des situations exposantes sont rencontrées. L'évaluation du risque chimique doit impérativement être réalisée, au cas par cas, en incluant l'intégralité des étapes. Les pratiques et les moyens à mettre en place sont similaires à ceux recommandés pour toute activité exposant à des agents chimiques dangereux [10].

Risque d'explosion

Les poussières de matières plastiques, les poudres métalliques (titane, aluminium, etc.), les poussières de bois forment en mélange avec l'air des atmosphères explosives. Ce risque d'explosion est encore plus élevé dans un appareil fermé et mal ventilé. De plus, les matières plastiques isolantes peuvent provoquer l'accumulation de charges électrostatiques capables de s'évacuer sous forme de décharge électrostatique dont les conséquences peuvent être désastreuses dans une atmosphère explosive.

Il convient d'être particulièrement vigilant sur ces points et de prendre en compte ces éléments lors de la conception de la machine et de son implantation.

Risque machines

La prévention des risques s'appuie sur des exigences réglementaires de conception et d'utilisation des machines. Pour respecter ces exigences de conception, le fabricant ou le concepteur de machines peut s'appuyer sur des normes harmonisées. Dans le domaine de la fabrication additive, les normes spécifiques restent à élaborer, les fabricants ne disposent donc pas, à l'heure actuelle, de référentiel donnant présomption de conformité

pour ces machines. Pour garantir la sécurité des utilisateurs, une importance toute particulière doit être donnée à l'analyse des risques afin de supprimer ou réduire les risques dès la conception. La directive européenne Machines exige d'ailleurs que l'évaluation des risques tienne compte des situations normales d'utilisation mais également des situations anormales prévisibles (par exemple, éviter le risque de brûlure provoquée par un plateau chaud en cas d'intervention en cours de fabrication sur une imprimante 3D (procédé fil fondu)). Un travail conjoint entre le fournisseur et l'utilisateur lors de l'achat de la machine permet de mieux appréhender les différents cadres d'utilisation et d'intégrer la sécurité à la conception.

Par ailleurs, l'utilisateur de machines doit veiller au maintien en état de conformité de ses machines et mettre en œuvre des mesures pour assurer la sécurité du personnel et sa formation.

Conclusion

La simplicité apparente de la fabrication additive ne doit pas amener à négliger l'évaluation des risques qu'elle peut faire courir pour la santé et la sécurité des opérateurs ainsi que la mise en place de dispositifs de prévention adaptés. De manière générale, il convient d'être vigilant quant à la manipulation des poudres organiques ou inorganiques et à l'émission des produits de dégradation thermique de ces composés. Ces technologies ont encore été peu investiguées par les organismes en charge de la prévention des risques professionnels et il devient nécessaire d'accompagner leur essor par des études permettant d'évaluer plus précisément les risques encourus et les dispositifs de prévention à mettre en œuvre ainsi que par l'élaboration de normes pour rendre les machines plus sûres. ●

1. Directeur de recherche émérite au CNRS, Directeur scientifique de l'INRS de 1999 à 2007. Brevet français 84.11.241, 1984, Dispositif pour réaliser un modèle de pièce industrielle, J. C. André, A. Le Mehaute, O. De Witte.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] THE ECONOMIST, 21 April 2012
- [2] BERNARD A. ET TAILLANDIER G., *Le prototypage rapide*, Ed. Hermès - Lavoisier, 1998.
- [3] ASTM F2792, *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*, 2012.
- [4] INDUSTRIES & TECHNOLOGIES, n°952, mars 2013.
- [5] HUANG S., LIU P., MOKASDAR A., *Additive manufacturing and its societal impact: a literature review*, J. Adv.Manuf.Technol., 2013, 67, pp. 1191 - 1203.
- [6] KELBASSA I., WOHLERS T., CAFFREY T., *Quo Vadis, laser additive manufacturing?*, J. Laser Applications, 2012, 24, 5.
- [7] UTELA B., STORTI D., ANDERSON R., GANTER M., *A review of process development steps for new material systems in three dimensional printing (3DP)*, Journal of Manufacturing Processes, 2008, 10, pp. 96 - 104.
- [8] MATIÈRES PLASTIQUES ET ADJUVANTS, ED 638, INRS, 2013.
- [9] STEPHENS B., AZIMI P., EL ORCH Z., RAMOS T. - *Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers*, Atmospheric Envir., 2013, 79, pp. 334 - 339.
- [10] DOSSIER RISQUES CHIMIQUES, www.inrs.fr